

Faculté d'Electronique et Informatique

THESE

Présentée à l'U.S.T.H.B pour l'obtention du grade de

Magister en Electronique

Spécialité : Contrôle de Processus et Robotique

Par : **Mlle Nabila DERRAGUI**

Sujet :

Commande Coordonnée de Robots Coopérants

Soutenue le 30/09/2003 devant le jury composé de :

Mr R. TOUMI, Professeur à l'USTHB
Mr B. BOUZOUIA, Docteur d'état, Maître de Recherche au CDTA
Mme N. SAADIA, Maître de Conférence à l'USTHB.

Président.
Directeur de Thèse.
Examineur.

Mr M. HAMERLAIN, Docteur d'état, Maître de Recherche au CDTA
Mme N. ACHOUR, Chargée de cours à l'USTHB

Examineur.
Examineur.

Quoi que je fasse, quoi que je dise, je ne pourrais jamais rendre à ma mère et à mon père tous ce qu'ils ont fait pour moi, sans eux, je ne serais pas ce que je suis. Je leur dédie cette thèse dont j'ose espérer qu'ils seront fiers.

Je dédie aussi cette thèse à Fouad qui a toujours été à mes cotés, je le remercie pour son soutien et son encouragement et surtout pour sa patience, je lui dis simplement " Merci d'exister".

*À Fadila et Shahira,
À Manel, Yasmine et Rayane,
Aux miens.*

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier, chaleureusement, Monsieur B. Bouzouia, Docteur d'Etat, Maître de recherche au Centre de Développement des Technologies Avancées, pour la confiance qu'il m'a accordée, en encadrant ce travail. Je m'honore également par ses conseils avisés, qui ont été pour moi, riches en enseignements.

Je remercie, particulièrement, Monsieur M. Kadri, grâce à qui le travail fut grandement facilité, et qui s'est toujours montré généreux, de son temps et de ses compétences, ainsi que pour les précieux documents qu'il a mis à ma disposition.

Je remercie également tous les membres du jury d'avoir accepté de juger mon travail.

Merci à Monsieur R. Toumi, professeur à l'USTHB d'avoir bien voulu présider le jury. Merci à Madame N. Saadia maître de conférence à l'USTHB, Merci à Monsieur M. Hamerlain maître de recherche au CDTA et Merci également à Madame N. Achour chargée de cours à l'USTHB d'avoir bien voulu être examinateurs de ma thèse.

Sommaire

<i>Introduction générale.</i>	<i>1</i>
-------------------------------	----------

Chapitre I :

<i>Position du Problème et Etat de L'art.</i>	<i>6</i>
---	----------

I.1) Introduction.	.6
I.2) Système à deux bras.	6
I.3) Problème de commande des systèmes multi-robots.	11
I.4) Commande coordonnée:	12
I.5) Les différentes solutions proposées dans la littérature.	14
I.5.1) Solution Meneur/Suiveur.	16
I.5.2) La commande Maître/Esclave.	16
I.5.3) La commande Hybride.	19
I.5.4) La commande en Impédance:	22
• <i>Application de la commande en impédance pour la coopération multi-robots.</i>	<i>23.</i>
I.6) Conclusion.	29

<i>Chapitre II: Modélisation</i>	<i>31</i>
----------------------------------	-----------

II.1) Introduction.	31
II.2) La tâche d'assemblage.	31
II.3) Modélisation de deux robots manipulateurs tenant chacun un objet.	33
II.4) Modélisation dynamique de l'effet de collision de deux robots coordonnés.	37
II.5) Modélisation dynamique de deux robots coordonnés reliés par les deux pièces à assembler.	39
• Calcul de force d'interaction.	42
II.6) Conclusion.	43

<i>Chapitre III : Commande de Robots Coopérants.....</i>	<i>44</i>
III.1) Introduction.....	44
III.2) La commande en Impédance.....	45
III.3) La commande coordonnée en impédance	50
• Equations de base.....	50
• L'impédance relative.....	53
• L'impédance Absolue.....	54
III.4) La commande coordonnée en impédance généralisée.....	57
III.4.1) La commande en impédance généralisée.....	57
III.4.2) La commande coordonnée en impédance généralisée.....	58
III.5) Stabilité de la commande en impédance.....	61
III.6) Adaptation des paramètres d'impédance en utilisant la logique floue.....	65
III.6.1) Les entrées/sorties de l'adaptateur flou.....	67
• <i>Les gains de normalisation.....</i>	<i>68</i>
III.6.2) Structure de l'adaptateur flou.....	68
• <i>Les fonctions d'appartenance.....</i>	<i>69</i>
• <i>La base des règles.....</i>	<i>69</i>
• <i>L'inférence.....</i>	<i>71</i>
• <i>La défuzzification.....</i>	<i>72</i>
III.7) Conclusion.....	74
 <i>Chapitre IV : Validation en Simulation</i>	 <i>75</i>
IV.1) Introduction.....	75
IV.2) Modèles dynamiques	75
IV.2.1) Modèles dynamiques des robots manipulateurs simulés.....	75
IV.2.2) Modèles dynamiques des pièces à assembler.....	77
IV.3) Equations de Contrainte.....	78
• Configuration des deux robots manipulateurs.....	80
IV.4) Description de la tâche.....	81
IV.5) Simulation.....	83
IV.5.1) Implémentation de la commande en impédance Généralisée.....	84

IV.5.2) Implémentation de la commande en impédance Généralisée adaptative par logique floue.....	86
IV.6) Résultats de simulation.....	88
IV.6.1) Résultats de simulation de la commande en Impédance généralisée.....	88
IV.6.1.1) Réglage des paramètres.....	88
IV.6.1.2) Poursuite des consignes en positions.....	89
IV.6.1.3) La force d'interaction.....	93
IV.6.1.4) Interprétation des résultats.....	97
IV.6.2) Perturbation du système par une force externe.....	98
IV.6.2.1) Régalage des paramètres.....	98
IV.6.2.2) Poursuite des consignes en position.....	99
IV.6.3) Résultats de simulation de la commande en impédance généralisée adaptative par logique floue.....	103
IV.6.3.1) Adaptation des paramètres dans le cas d'une forte raideur.....	103
1) Poursuite des consignes en positions.....	104
2) La force d'interaction.....	107
3) Interprétation des résultats.....	109
IV.6.3.2) Adaptation des paramètres dans le cas d'une faible raideur.....	109
1) Poursuite des consignes en positions.....	110
2) La force d'interaction.....	113
3) Interprétation des résultats.....	115
IV.7) Conclusion :.....	116
<i>Conclusion générale :.....</i>	<i>117</i>

Annexes.

Bibliographie.

Résumé :

Dans le cadre de la coopération multi-robots, nous présentons dans ce mémoire une nouvelle commande coordonnée en impédance généralisée de deux robots manipulateurs coopérants pour une tâche d'assemblage. Cette commande permet de commander non seulement le mouvement relatif des deux bras manipulateurs et la force interne induite par la mise en contact des deux objets à assembler, mais de commander aussi le mouvement absolu du système total et contrôler éventuellement les forces externes produites par un environnement extérieur.

Dans le but d'accroître la stabilité de la phase critique de transition, du non-contact au contact des deux effecteurs et améliorer les performances de la force de transition, c'est à dire, réduire les dépassement et atteindre la force d'état stable désirée quelque soit la raideur de l'environnement, nous avons fait appel à la logique floue qui offre un caractère simple et efficace pour ajuster automatiquement les paramètres de l'impédance et rendre notre commande coordonnée adaptative à n'importe quel type de pièce (point de vue raideur). Les résultats de simulation sur deux robots manipulateurs rigides à trois degrés de libertés, sont très satisfaisant, ce qui nous a permis de valider notre commande.

Mots clés :

Robots manipulateurs coopérants.

Commande en Impédance.

Commande Coordonnée.

Tâche d'assemblage.

Au cours des dernières années, la recherche dans le domaine de la robotique s'est orientée vers la coopération de plusieurs systèmes mécaniques articulés, les systèmes robotiques multi-bras. L'action coordonnée de ces systèmes permet ainsi la réalisation de tâches qu'un seul robot ne pourrait effectuer ou simplement la diminution du temps d'exécution d'une tâche afin d'en augmenter la productivité.

Il est maintenant reconnu que, dans de nombreux cas les robots manipulateurs deviennent plus efficaces lorsque deux (ou plus), d'entre eux travaillent ensemble dans des tâches d'assemblage ou de transport d'objet.

Dans beaucoup d'opérations d'assemblage il est nécessaire que l'un des robots exécute une partie de la tâche alors que le second est utilisé soit pour tenir l'autre objet à assembler, soit pour maintenir prête une pièce nécessaire à l'accomplissement de la tâche. Ce genre de coopération entre robots est semblable à la coopération des mains ou des bras de l'être humain dans ses tâches coutumières.

Mais il y a d'autres raisons pour employer deux ou plusieurs bras. Par exemple, un bras peut jouer le rôle d'acteur principal de la tâche, alors que l'autre est utilisé comme étau. Cette configuration est particulièrement intéressante quand les bras sont utilisés pour l'assemblage d'une station spatiale. Dans un tel environnement il est plus que probable que les bras seront mobiles et de ce fait aucun établi permanent ne sera disponible pour maintenir les pièces. Un autre exemple important dans le domaine spatial est la capture de satellites pour réparation ou maintenance ; Dans ce cas, les tâches nécessitant deux bras sont par exemple le démontage des panneaux solaires, ou le démontage et remontage des connecteurs des circuits hydrauliques, afin de remplacer le fluide [Haya 88].

Au vu de ces tâches particulièrement intéressantes, on comprend que les problèmes de coordination et de commande de robots travaillant en coopération aient attiré l'attention des chercheurs depuis quelques années. De façon grossière, on peut répartir ces problèmes

en deux grands champs d'investigation. Le premier concerne la génération de trajectoire coordonnée pour deux ou plusieurs bras et l'exécution synchronisée de ces trajectoires. Un environnement de programmation est nécessaire pour exécuter une telle tâche et assurer la cohérence des trajectoires.

Le deuxième champ de recherche, qui est l'objet de notre étude, traite de la commande des robots. Puisque dans des opérations à plusieurs manipulateurs, ceux-ci peuvent être en contact avec un même objet, la commande doit dans ce cas prendre en compte les contraintes que cette situation implique. En fait, le succès d'une tâche dépend essentiellement de la façon dont elle a été décrite et donc de la façon dont le robot est commandé.

Dans le cas des robots multi-bras impliquant la présence de contraintes internes à travers les objets manipulés, il est impératif de choisir une approche qui a pour principe général d'introduire une compliance active dans le système de commande. De nombreuses applications nécessitent la commande d'un vecteur position et d'un vecteur force, cela signifie qu'en général une commande en position seule, n'est pas suffisante pour les tâches complexes que les robots sont sensés accomplir. En effet, tout robot est entaché d'erreurs de position lors de son mouvement, correspondant aux erreurs de géométrie du robot, ou aux erreurs de calcul ou d'échantillonnage du générateur de trajectoire. Ces erreurs créent des contraintes internes dans un système parfaitement rigide. Afin de les réduire, ces contraintes doivent être détectées par une mesure d'efforts, et cette mesure doit être prise en compte dans la description de la tâche.

Dans certains cas, il peut être nécessaire d'exercer des efforts prédéfinis sur l'objet transporté. Par exemple, si un objet est trop volumineux pour être saisi par des préhenseurs, il peut être transporté en étant comprimé entre les deux organes terminaux. Pour une tâche d'assemblage, il faut commander les efforts de contact entre les objets sauf si l'assemblage est très lâche ou si les bras sont munis d'un système de compliance passive. Dans le cas de la déformation d'un objet à l'aide de deux bras, un glissement de l'objet dans les préhenseurs ne peut être détecté que par une mesure d'effort. Une simple commande en position des bras fera croire que la tâche est réussie alors qu'il n'en est rien.

Donc seules les méthodes de commande basées sur une commande Force/Position sont sensées répondre au problème posé. Ces méthodes sont reparties, de manière générale, en trois types de commande : La commande maître/Esclave, la commande Hybride Force/Position et la commande en Impédance.

La commande maître/esclave consiste à contrôler séparément et indépendamment les robots. Dans cette commande, l'esclave reçoit des informations sur la position du maître par l'intermédiaire de l'objet. Cette méthode ne peut donc pas être utilisée pour un objet flexible ou possédant un degré de liberté.

Pour la commande coordonnée multi-robots hybride en force/position plusieurs méthodes ont été proposées, mais elles sont toutes basées sur le principe Hybride classique pour un seul manipulateur introduit pour la première fois en 1981 par *Raibert et Gaig*. [Raib 81]. Dans cette commande l'espace des tâches est divisé en deux sous espaces ; les positions sont commandées le long d'un sous espace et les forces sont commandées le long de l'autre. Une matrice de sélection est utilisée pour déterminer lequel des degrés de liberté sera commandé en position et lequel sera commandé en force. Cette approche de commande permet la commande du déplacement du robot manipulateur suivant une direction et la commande de la force exercée par ce robot manipulateur suivant une autre direction.

Le problème majeur rencontré en appliquant la commande hybride force/position, est celui de la stabilité dynamique. En effet, le caractère discontinu intrinsèque à cette commande risque de rendre le système instable, notamment en cas de contact avec un environnement rigide, pour lequel les chocs sont de grande amplitude [Guih 95].

En opposition avec la commande hybride Force/Position, la commande en Impédance [Hoga 85] permet de lever le problème de discontinuités des lois de commande. La commande en Impédance, qui est à la base de notre étude, a été introduite par *Neville Hogan* en 1985 [Hoga 85]. C'est une approche générale de commande qui crée une relation dynamique entre les variables du robot manipulateur, telle que la position et la vitesse de l'organe terminal, et la force, plutôt que de les commander séparément. Ainsi la force

d'interaction est prise en considération. En d'autres termes, cette commande consiste à réguler l'impédance de sortie du robot.

Cependant la commande en impédance ne permet pas un contrôle explicite de la force. De ce fait, différentes tentatives ont été faites pour combiner la commande en impédance et la commande en force pour tirer profit des avantages de chacune des deux commandes. Ces méthodes ont été élaborées pour la commande d'un seul bras manipulateur. Dans notre travail, nous allons introduire une de ces méthodes, qui est la commande en impédance généralisée, dans la coopération multi-robots.

Nous nous intéressons dans notre travail à la tâche d'assemblage de deux objets réalisée par deux bras manipulateurs (chaque objet étant tenu par un bras). Pour exécuter cette tâche, nous avons élaboré une commande coordonnée en Impédance généralisée. Cette commande permet de commander non seulement le mouvement relatif des deux bras manipulateurs et la force interne induite par la mise en contact des deux objets à assembler, mais aussi, de commander le mouvement absolu de tout le système et contrôler éventuellement les forces externes produites par un environnement extérieur.

Aussi, et par souci de stabilité de contact (stabilité du passage du non-contact au contact) des deux pièces à assembler, nous avons poussé encore l'étude et utilisé la logique floue, pour rendre notre commande, une commande coordonnée adaptative où les paramètres d'impédance peuvent être ajustés automatiquement ; Permettant ainsi de commander le système avec une grande performance en espace libre et en espace contraint, tout en assurant la stabilité de contact quelle que soit la raideur de l'environnement (la raideur des pièces à assembler).

Notre manuscrit est composé de quatre chapitres :

Dans le premier chapitre nous commençons par présenter quelques exemples de coopération multi-robots, en faisant ressortir les avantages d'utilisation de tels robots, comparés à l'utilisation d'un seul robot manipulateur. Ensuite, nous abordons le problème de commande multi-robots en faisant une analyse des avantages et des inconvénients des différentes commandes proposées en littérature, que nous pouvons répartir comme nous

l'avons dit précédemment, en trois types de commande : La commande Maître/Esclave, la commande Hybride Force/Position et la commande en Impédance.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation mathématique du comportement dynamique et cinématique de deux robots coopérants pour la tâche d'assemblage. La tâche d'assemblage qui est constituée de trois phases principales, la phase d'approche des effecteurs, la phase d'accostage et la phase d'insertion des pièces.

Le troisième chapitre est consacré à notre commande coordonnée. Pour la présenter, nous commencerons dans un premier temps, par présenter la commande en impédance pour un seul bras manipulateur. Ensuite, nous introduisons les deux notions de commande en impédance relative et impédance absolue pour la coopération de deux robots, dans une tâche d'assemblage. La commande en impédance généralisée est aussi définie et introduite dans notre commande coordonnée. Dans une deuxième partie, nous utilisons la logique floue comme un outil d'adaptation des paramètres de notre commande en impédance généralisée.

La validation de la loi de commande coordonnée sera faite par simulation sur deux robots rigides, à trois degrés de liberté chacun. La simulation, les résultats ainsi que les discussions seront présentés dans le dernier chapitre.

I.1) Introduction :

Durant ces deux dernières décennies, de grands progrès ont été faits pour la commande des robots à un bras. En effet, le développement de systèmes de commandes rapides et de puissants moyens de calcul intégrés permettent aujourd'hui de résoudre un grand nombre de problèmes théoriques et pratiques liés à la robotique.

Beaucoup de chercheurs notèrent l'importance de l'utilisation des robots multi-bras et firent ressortir les avantages de tels robots, comparés aux robots "handicapés" à un seul bras [Crai 88] [Dauc 90] [Tao 90] [Chia 92] [Hsu 93]. Il est reconnu que deux bras offrent plus de possibilités qu'un seul bras, tant pour exercer des efforts, que pour manipuler des objets. Les applications vont de la manipulation d'objets volumineux, lourds ou flexibles (dans l'industrie automobile par exemple), aux assemblages de deux objets sans équipement spécial (assemblage en l'air en milieu non structuré tel que l'espace), en passant par le déplacement d'un véhicule sous-marin le long d'une structure immergée grâce à l'utilisation coordonnée de deux bras.

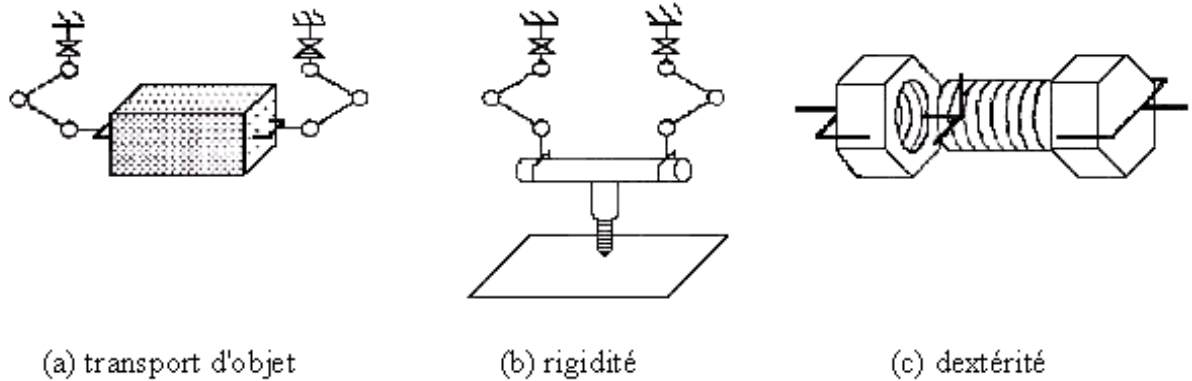
Dans ce chapitre, nous allons présenter quelques exemples de coopération multi-robots et les méthodes de commande proposées à cet effet dans la littérature.

I.2) Système à Deux Bras :

L'utilisation de systèmes à deux bras est justifiée par un nombre de tâches, telles que :

- La saisie d'objets volumineux.
- Le positionnement ou la manipulation d'objets lourds (ou possédant un balourd important).
- Le transport et la déformation "en l'air" d'objets souples ou flexibles (avant montage).
- La réalisation d'assemblage en l'air.

La *Figure(1.1)* donne des exemples typiques de tâches exécutées par plusieurs manipulateurs.



Figure(1.1) : Exemple de tâches exécutées par deux manipulateurs.

La *Figure(1.1.a)* montre la manipulabilité d'un objet lourd ou volumineux par deux manipulateurs, qu'un seul bras ne pourrait manipuler tout seul.

La *Figure(1.1.b)* montre l'exemple d'utilisation d'un outil par deux bras. Cette structure cinématique fermée augmente la rigidité du système.

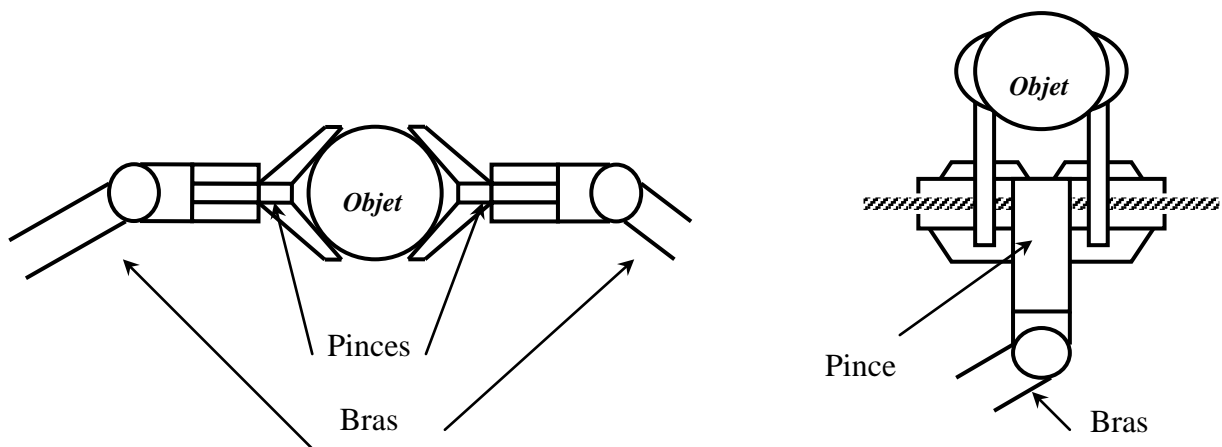
La *Figure(1.1.c)* montre la tâche d'assemblage de deux objets : un boulon et un écrou. L'utilisation de deux ou plusieurs robots en coordination confère à la tâche d'assemblage une grande dextérité.

Contrairement aux utilisations industrielles, l'intervention et le travail en milieu hostile à l'homme définissent des tâches non (ou faiblement) répétitives. D'autre part, le système ne dispose généralement pas de matériels d'assistance péri-robotique (capteur extéroceptif, présentoirs, barillets, ...). Le deuxième bras est alors amené à remplacer ces équipements annexes.

Ces travaux d'intervention sont plus particulièrement localisés dans le milieu sous-marin (offshore), les centrales nucléaires, le milieu spatial ou planétaire. Aux applications correspondantes, il faut ajouter des opérations de sécurité civile, désamorçage, intervention en milieu toxique, etc.. Le système doit disposer d'une faculté importante d'adaptation à la

tâche et à l'environnement. Ceci est généralement résolu par l'introduction d'un opérateur humain pilotant le système à distance.

Deux pinces (à ouverture angulaire) permettent de saisir un objet de volume important par compression (ou par étirement s'il est muni d'orifices dans lesquels les organes terminaux peuvent pénétrer), tout en gardant la possibilité de manipuler des objets de tailles plus réduites. Un bras unique ferait appel à une pince disproportionnée, *Figure(1.2)*. Le système à deux bras permet de s'affranchir d'effecteurs trop spécifiques, et de poids prohibitif.



Saisie par deux pinces angulaires

Saisie par pince unique

Figure(1.2) : Saisie d'objets volumineux.

Dans le cadre de l'intervention sous-marine , le sous-marin Triton dispose de deux bras télécommandés qui permettent soit des manipulations d'élingues, de manilles par exemple, soit la saisie d'objet de section importante (torpille). Des systèmes multi-bras sont également utilisés en milieu industriel pour la saisie par étirement de voiles en fibre de carbone lors de fabrication de paraboles radar [Bouf 92].

Si les points de saisies de chaque bras sont suffisamment écartées, la prise globale est plus stable, et le phénomène de balourd tend à disparaître. Prenons l'exemple d'une barre, il est difficile de la maintenir par une seule extrémité. Le poids crée un moment important au niveau du poignet ; c'est le balourd. Une deuxième prise permet de réduire considérablement ce phénomène, *Figure (1.3)*.



Balourd d'une saisie unique

Disparition du moment avec une saisie double.

Figure (1.3) : Réduction des moments par ajout d'une seconde prise.

Ce phénomène apparaît aussi bien dans les environnements hostiles qu'en milieu industriel, lorsque la taille des objets à manipuler devient importante. C'est le cas des éléments de liaison des stations spatiales que certains projets (japonais en particulier) ont voulu monter par des systèmes robotisés [Bouf 92]. Dans des applications industrielles, ce balourd apparaît également au cours de la mise en place des banquettes d'habitable d'une automobile.

L'intérêt d'un système à deux bras est également de pouvoir exercer des contraintes sur un ou plusieurs objets. Ces contraintes permettent par exemple de comprimer des tôles sur la structure d'une aile d'avion pendant les opérations de perçage, puis de rivetage. La taille des éléments et la précision relative importante entre structure et enveloppe, ne permettent pas l'utilisation d'autres techniques.

Ces efforts exercés de façon relative par les deux bras permettent également d'adapter des objets déformables pour leur montage. Ainsi, un tableau de bord (en plastique) est souvent cintré durant son montage pour l'adapter à l'habitable. Ces efforts relatifs permettent donc la réalisation de tâche de déformation " en l'air ".

Un système à deux bras peut réaliser des enchaînements de tâches plus complexes. Les physiciens atomistes et les chimistes, utilisent fréquemment deux télé-opérateurs pour manipuler des produits dangereux : vissage des enceintes de confinement, transvasements.

Dans le domaine industriel, des manipulateurs réalisent déjà des phases de l'assemblage avec l'aide de matériels péri-robotiques actifs, table de montage, ou poignets compliants actif [Merl 88]. Ces organes extérieurs au robot ont des structures motorisées asservies (parfois en effort). Ces matériels péri-robotiques ont de faibles courses et une dynamique importante qui leur permet de réaliser plus facilement qu'un bras robot classique, une opération particulière de l'assemblage. Lorsqu'ils sont asservis, ils diffèrent peu d'un second robot manipulateur.

Sous certaines conditions, on peut supposer que la maîtrise d'un robot composé de deux bras permettrait de réaliser l'ensemble des opérations d'un assemblage complexe. Cet enchaînement sur un même poste permet de réduire les temps et matériels de transfert, ainsi que les stocks d'encours.

Dans ces exemples d'application, le deuxième bras augmente les capacités de manipulation (saisie, effort, et redondance). Une solution basée sur un seul bras (si elle existe) demanderait un manipulateur plus puissant, et des stratégies de manipulation plus complexes.

Les tâches d'intervention sont généralement réalisées par des télémanipulateurs. Les délais de transmission (des nouvelles applications spatiales et sous-marines), et le problème d'erreur et de fatigue de l'opérateur amènent les concepteurs à rajouter une certaine autonomie aux bras, asservissement dans un plan de travail, ou exécution autonome de certaines phases, saisie, dépose... cette perspective tend à développer des "robots à deux bras" au détriment des télémanipulateurs

La définition d'un système à deux bras est assez vague. Les relations qui existent entre les deux bras sont différentes. Nous distinguons plusieurs systèmes, soit :

- **Deux bras disjoints** : Deux bras sont disjoints s'ils n'ont pas de volume commun et participent à des tâches différentes. C'est le cas des robots d'une chaîne (chaîne de montage de véhicule, par exemple). Ils dépendent d'une même synchronisation, et les informations qu'ils échangent restent très limitées.

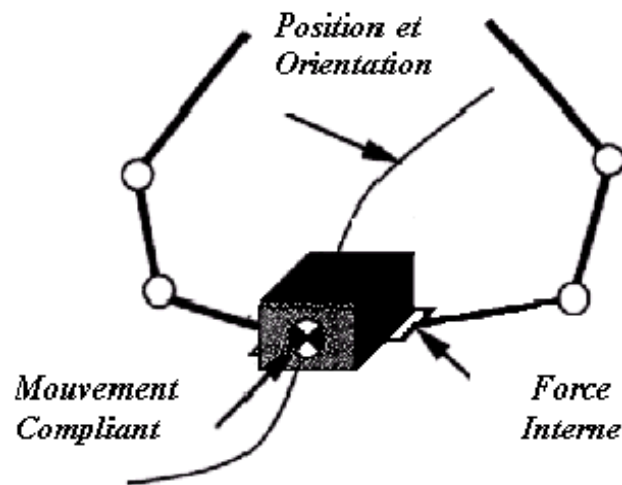
- **Deux bras en interaction** : Deux bras peuvent interagir à travers un volume de travail commun. Les risques de collisions conduisent à un échange d'information de position ou à un apprentissage simultané. Le contact s'il existe entre les deux manipulateurs reste ponctuel. Le volume des données échangées reste réduit.
- **Deux bras coopérants** : Deux bras coopérants à la réalisation d'une même tâche agissent ensemble sur un ou plusieurs objets. Chacun a ses asservissements particuliers: en position, en effort ou en force/position. Grâce à ces asservissements chacun des manipulateurs adopte un certain comportement face aux "perturbations" induites par le second manipulateur. D'un point de vue automatique, les états des deux manipulateurs sont liés par l'interaction des objets situés entre eux. Le couplage doit rester faible sinon l'effet perturbant de l'interaction l'emporte sur l'effet de régulation des asservissements. La quantité d'informations échangées peut devenir importante.
- **Un système composé de deux bras** : Le dernier cas est celui d'un seul robot manipulateur composé de deux bras. Un seul jeu de variables d'états prend en compte les deux structures et l'interaction. Dans ce cas, le débit des informations devient très important.

I.3) Problèmes de commande des systèmes multi-robots :

Divers problèmes inhérents à la manipulation d'un objet par plusieurs robots manipulateurs doivent être pris en considération, *Figure(1.4)* :

- Comment contrôler la position de l'objet.
- Comment réguler la force interne appliquée sur l'objet.
- Comment commander la compliance de l'objet avec les forces externes qui lui sont appliquées.
- Comment distribuer la charge entre les manipulateurs.

Lorsqu'il s'agit d'assemblage d'objets par deux manipulateurs, on doit aussi contrôler le mouvement dynamique relatif entre les deux objets à assembler.

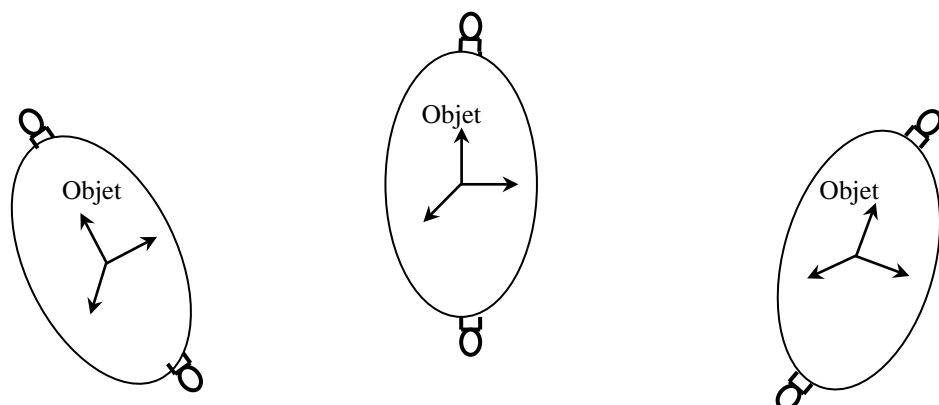


Figure(1.4) : Transport d'objet.

I.4) Commande coordonnée multi-robots :

L'utilisation des systèmes multi-robots fournit une grande habilité d'exécution des tâches. Différentes approches ont été établies pour la commande de robots manipulateurs travaillant en coopération pour l'exécution de tâches contraintes. La plupart des recherches traitent des transports d'objets lourds ou volumineux, en prenant en compte principalement la distribution de la charge, ainsi que la détermination des forces internes induites par les organes terminaux de chacun d'eux.

En général, dans le cas de la manipulation d'un objet rigide la tâche consiste à faire suivre une certaine trajectoire à l'objet, tout en commandant les contraintes internes à celui-ci et éventuellement les contraintes qui lui sont induites par l'environnement.



Figure(1.5) : Déplacement d'un objet.

La trajectoire de l'objet est définie par le déplacement de son centre de gravité et par la rotation simultanée autour de celui-ci, *Figure (1.5)*.

En ce qui concerne les efforts exercés sur l'objet :

- Hors contact avec un environnement extérieur, les efforts exercés ne sont dûs qu'aux effecteurs mais risquent, s'ils ne sont pas contrôlés d'endommager l'objet.
- En contact, les efforts supplémentaires sont créés par l'environnement. Ceux-ci doivent être mesurés et contrôlés, non seulement pour limiter les conséquences de collisions lorsque l'objet est manipulé dans un environnement non structuré, mais aussi lorsque l'objet est un outil dont l'action sur l'environnement fait partie intégrante de la tâche.

Une tâche de coopération peut être subdivisée en plusieurs phases :

- Phase d'approche où les deux robots se déplacent pour atteindre l'objet.
- Phase de mise en contact des robots avec l'objet.
- Phase de déplacement de l'ensemble robots-objet avec action de forces sur l'objet manipulé.

Cette dernière peut, elle-même, être subdivisée en :

- Phase de déplacement dans l'espace.
- Phase de mise en contact de l'ensemble avec l'environnement extérieur.
- Phase de déplacement de l'objet sur la surface de l'environnement en exerçant un effort normal.

Pour l'utilisateur, une tâche de coopération ne peut être définie qu'au niveau global de l'ensemble des robots et de l'objet par des consignes de forces et de positions liées à l'objet.

Un premier vecteur X_{Ad} définit la trajectoire absolue de l'objet à la fois par une consigne de position du centre de gravité et par une consigne d'orientation.

Un deuxième vecteur X_{Rd} définit les positions et orientations relatives des deux points terminaux (deux effecteurs). Dans le cas du transport d'objet cette position relative doit être maintenue constante pendant le déplacement de l'objet, alors que dans le cas de l'assemblage cette position relative doit tendre vers zéro pour assurer l'insertion des deux pièces à assembler.

Les forces et les moments agissant sur l'objet qui provoquent son déplacement dans l'espace sont les efforts externes F_{Ed} . Par définition, ces efforts permettent de réaliser la trajectoire absolue de l'objet. Mais ils servent également à exercer un effort sur l'environnement extérieur.

Enfin l'utilisateur fournit un dernier vecteur de consigne : les efforts internes F_{Id} nécessaires à la déformation de l'objet ou à son maintien dans le cas de liaisons par frottement. Ces efforts sont dûs, par définition, à l'action combinée des deux manipulateurs. La répartition des forces internes n'est donc pas unique.

Ces quatre consignes X_{Ad} , X_{Rd} , F_{Ed} et F_{Id} fournies par l'utilisateur décrivent globalement l'exécution souhaitée d'une tâche de coopération.

Donc pour la commande des robots coopérants, il est impératif de choisir une approche qui a pour principe d'introduire une compliance active dans le système de commande. Seules les méthodes de commande basées sur une commande Force/Position sont sensées répondre au problème posé. On peut les repartir, de façon grossière, en trois types de commande : La commande Maître/Esclave, la commande Hybride Force/Position et la commande en Impédance.

1.5) Les Différentes solutions proposées dans la littérature:

Lorsque deux manipulateurs sont en contact avec un même objet, l'ensemble forme une chaîne cinématique fermée. Il apparaît alors des contraintes sur les positions et les orientations des deux robots ainsi que sur leurs vitesses. Il est nécessaire de prendre en compte les contraintes que cette situation implique. Or cette prise en compte dépend de la façon dont on choisit de décrire la tâche. Par exemple, la tâche consistant à tenir

fermement un même objet sans le déformer peut être décrite uniquement en terme de position. Il faut maintenir constante la position relative des deux bras, ce qui se traduit par un ensemble de contraintes holonomes d'égalité. Il suffit alors de reporter la trajectoire désirée de l'objet sur un seul des deux bras, la trajectoire du second étant déduite de celle du premier bras et des équations de contraintes. Il s'agit de l'approche Meneur/Suiveur [Zhen86].

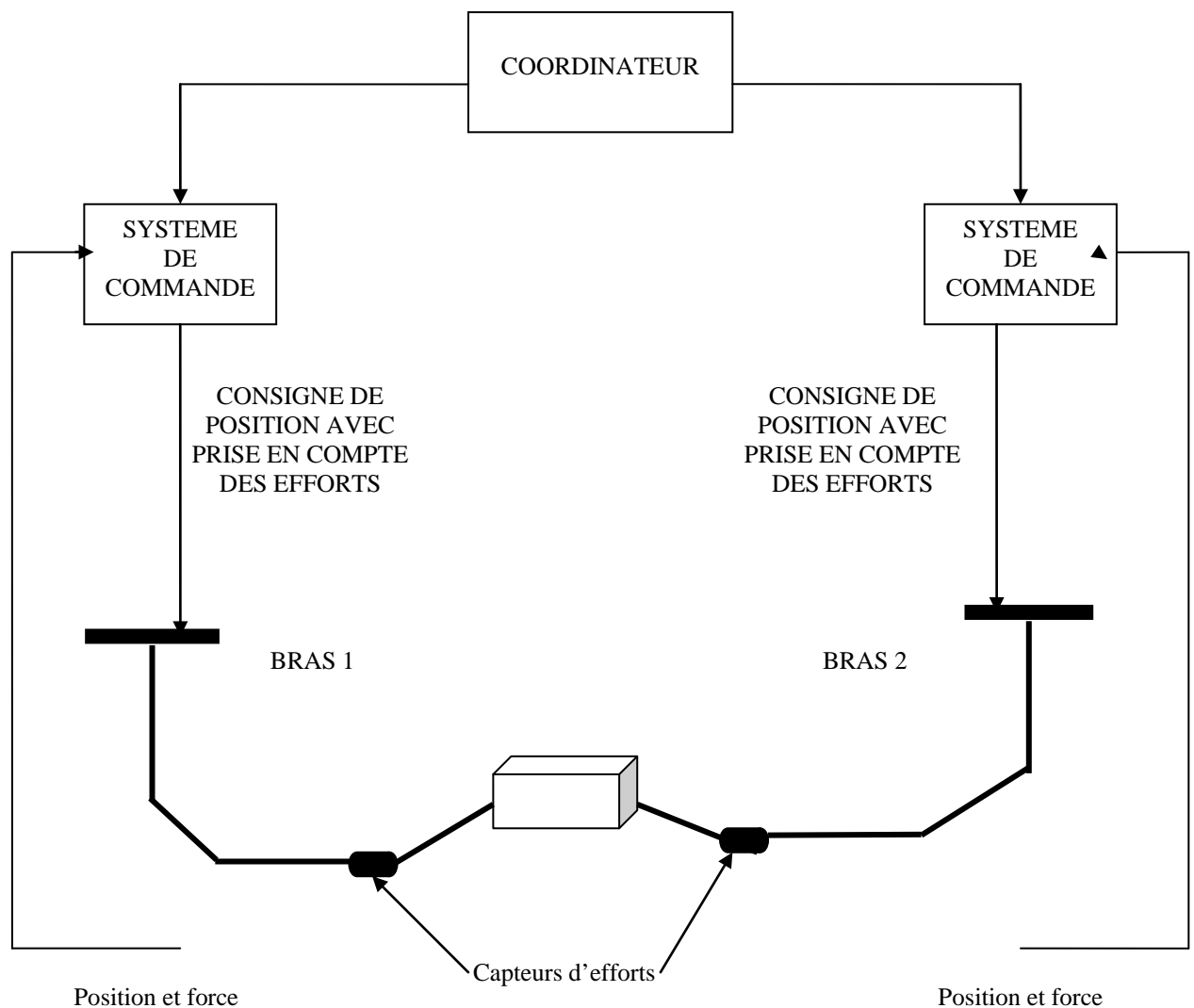


Figure (1.6) Deux systèmes coopérants.

1.5.1) Solution Meneur/Suiveur (Leader/Follower) :

Zheng et *Luh* sont les premiers à avoir apporté la notion de contraintes holonomiques [Zhen 86], relations imposées à partir des contraintes sur les positions et les orientations relatives des points terminaux.

La trajectoire d'un des robots, "Leader", est calculée à partir de la trajectoire désirée de l'objet, comme elle le serait pour un robot unique. Par contre, la trajectoire du deuxième "follower", est calculée à partir de celle du leader, connaissant les relations sur les vitesses angulaires dérivées des contraintes holonomiques. La planification de cette dernière trajectoire est totalement dépendante de la configuration de l'objet.

Cette solution offre des résultats expérimentaux médiocres [Perd 91], car elle suppose que la commande des positions terminales soit parfaite et qu'aucune erreur de modélisation ne soit introduite dans l'étude mécanique des robots et de l'objet. Alors que lorsque les deux bras sont commandés en position, des erreurs de positionnement sont inévitables, erreurs dans l'asservissement d'une part, erreurs de modélisation introduites dans l'étude mécanique des robots et de l'objet manipulé d'autre part. Or si ceux-ci ne sont pas suffisamment compliants, ces erreurs peuvent engendrer des efforts importants qui peuvent entraîner une détérioration du système total. Une autre façon de traduire les mêmes contraintes consiste à imposer la nullité des efforts internes à l'objet. Alors dans ce cas, des consignes en effort doivent apparaître dans l'asservissement correspondant soit directement aux efforts internes à l'objet, soit à certaines composantes des efforts exercés par les bras sur l'objet. Il s'agit dans ce dernier cas de l'approches de type Maître/Esclave.

1.5.2) La commande Maître/Esclave :

La commande Maître/Esclave consiste à contrôler séparément et indépendamment les deux robots. L'idée fondamentale de cette commande est la suivante :

- En fonction de la trajectoire désirée de l'objet, on déduit la trajectoire d'un des bras que l'on nomme maître.

- On impose au second bras, appelé esclave, d'exercer certains efforts sur cet objet par le biais de son organe terminal. Ces efforts servent, en particulier, à supporter une partie du poids de l'objet, mais peuvent aussi inclure des pressions sur l'objet dans certaines directions.

Seules des informations de position sont renvoyées au robot maître, et seules des mesures d'effort sont utilisées pour commander le robot esclave. Celui-ci est donc muni d'un capteur, en général monté en poignet [Dauc 90]. Le principe général est schématisé sur la *Figure (1.7)*.

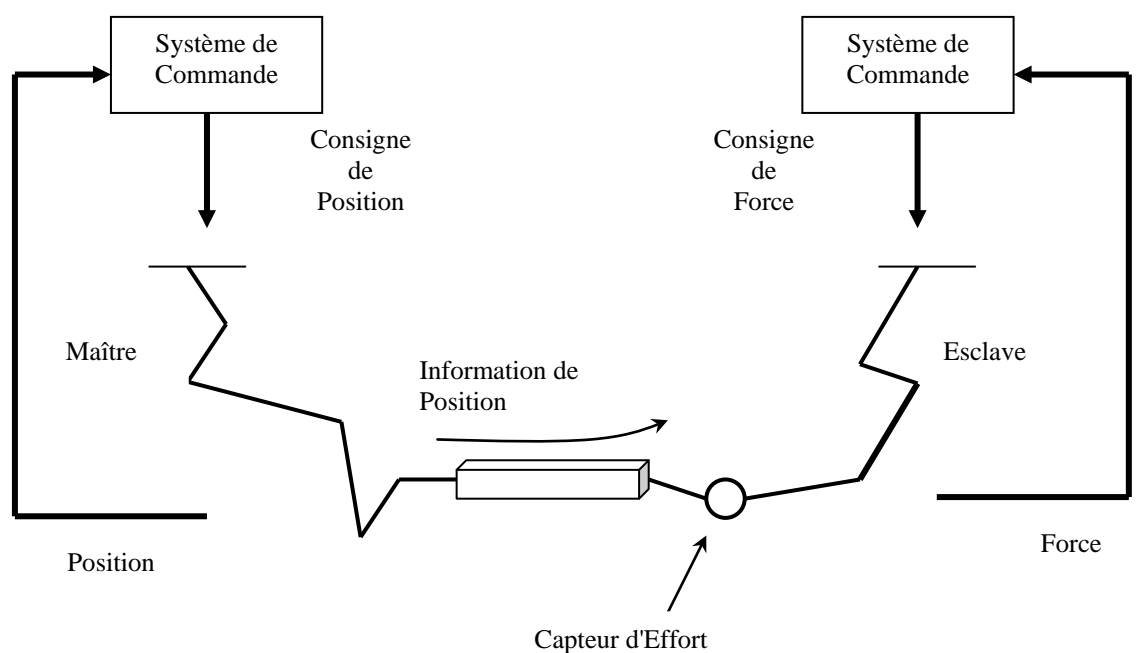


Figure (1.7) : Schéma de principe de la solution Maître/Esclave.

Cette solution peut être rapprochée de celle du Meneur/Suiveur. En effet, l'esclave suit le maître dans tous ses déplacements, comme le suiveur suit le meneur. La différence est que les contraintes cinématiques de la chaîne fermée, n'ont pas à être écrites explicitement pour déduire la trajectoire de l'esclave de celle du maître. La raison est que l'utilisation d'un capteur d'effort pour mesurer les contraintes statiques s'exerçant sur l'esclave, permet de trouver automatiquement la solution des équations des contraintes cinématiques.

Les déplacements du maître induisent une modification des efforts qui s'exercent sur l'esclave à travers l'objet, donnant lieu à une erreur en force par rapport à la consigne d'effort de l'esclave, ce qui engendre le déplacement de celui-ci pour corriger cette erreur. Cela revient donc à dire, que l'esclave reçoit des informations sur la position du maître par l'intermédiaire de l'objet. Cette méthode ne peut donc pas être utilisée pour un objet flexible ou possédant un degré de liberté. Il en résulte que cette méthode est strictement limitée au transport d'objets rigides.

Le problème majeur de la solution Maître/Esclave réside dans la nécessité d'avoir une réponse rapide de l'esclave aux sollicitations du maître, dans le but de suivre les mouvements de celui-ci, en sachant que la position de l'esclave est déterminée à partir de celle du maître, à travers l'objet et le capteur d'effort. En effet, l'esclave ne bouge pas tant qu'il ne détecte pas un changement de la force mesurée, et réagit avec le retard dû à l'algorithme de commande, engendrant des variations importantes de l'effort. Ainsi, si le maître se déplace dans le sens d'un écartement des deux robots, un lâché de l'objet peut se produire. Si au contraire, le maître se déplace dans le sens d'un rapprochement des points terminaux, l'objet risque d'être détérioré.

Pour permettre à l'esclave de réagir correctement, il faut limiter fortement la vitesse de déplacement du maître. Pour pallier à cet inconvénient, une solution consiste à utiliser les informations de vitesse du maître pour l'asservissement de l'esclave. Mais l'algorithme de contrôle devient, dans ce cas, plus complexe et la compensation des variations de position ne peut pas être idéale, en raison du temps d'échange des mesures de position entre les deux contrôleurs [Perd 91].

Ces différentes méthodes sont donc assez limitatives. De plus, elles différencient de façon arbitraire les rôles joués par chacun des deux bras. De ce fait, il a été préférable d'utiliser une description de tâche qui soit symétrique vis-à-vis des deux bras, ayant l'objet comme référence, et qui prenne en compte directement les efforts ressentis par l'objet. En effet, hormis certains cas de manipulation d'objets non fermement tenus (par exemple saisie ferme d'un coté et liaison partielle de l'autre), les deux bras jouent des rôles tout à fait semblable et il n'y a aucune raison de les différencier. Tout se passe donc au niveau de l'objet ; Le plus souvent il s'agit de lui faire suivre une certaine trajectoire, et ce sont les

efforts sur l'objet qu'on doit asservir *Figure(1.8)* : d'une part les efforts internes ressentis qui provoquent sa déformation, et d'autre part les efforts que l'objet exerce sur l'environnement éventuellement. Si cet aspect est pris en compte dans la description de tâche, on peut s'attendre à obtenir de plus grandes performances.

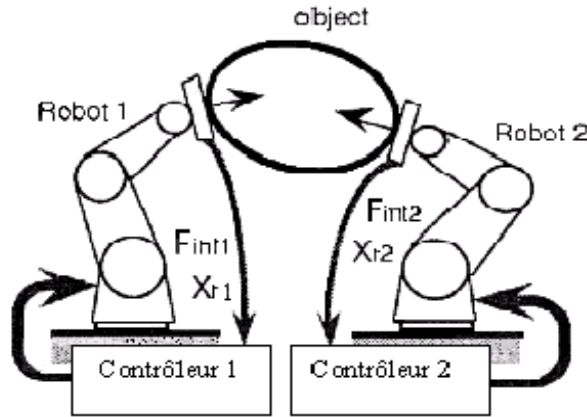


Figure (1.8) : Contrôle de position et des forces internes.

1.5.3) La commande hybride :

Le terme générique de "commande Hybride", est devenu le nom usuel de la méthode de commande en Force et en Position apportée en premier par *Raibert* et *Craig* [Raib 81]. Pour la commande coordonnée multi-robots Hybride en Force/position plusieurs méthodes ont été proposées. Elles sont toutes basées sur le principe Hybride classique pour un seul manipulateur. Le schéma général est donné par la *Figure (1.9)*.

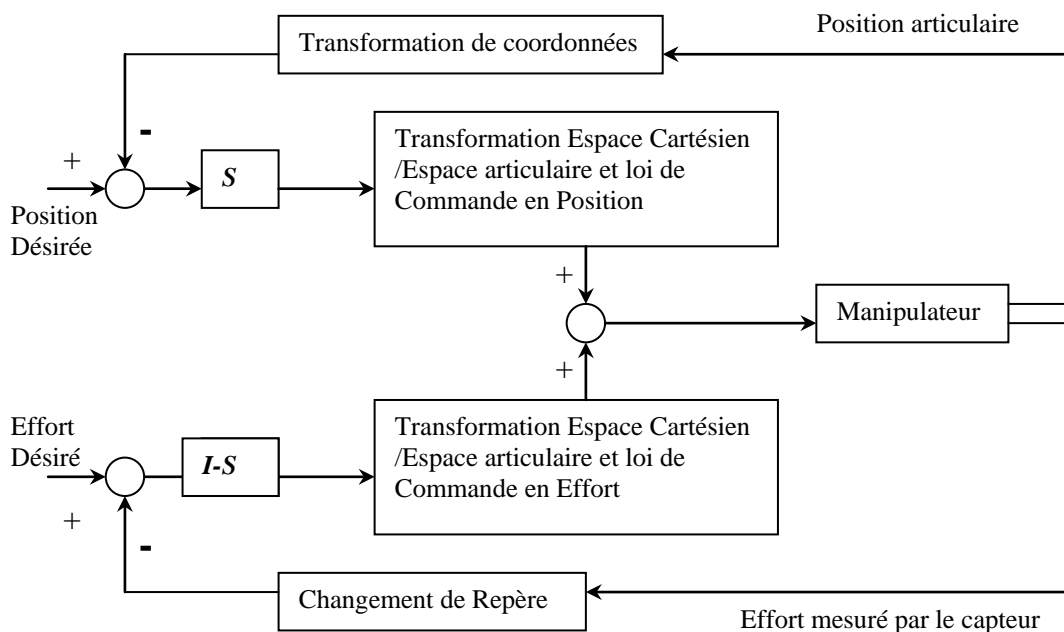


Figure (1.9) : Commande hybride Force/Position d'un manipulateur à un bras.

Cette architecture utilise directement la notion d'orthogonalité de *Mason*, où l'espace de tâche est scindé en deux sous espaces orthogonaux : l'un pour commander en position et l'autre pour commander en force. Le schéma bloc est constitué de deux boucles parallèles et complémentaires, *Figure(1.9)*.

La position désirée correspond à la position et à l'orientation cartésienne de l'organe terminal par rapport à un repère de référence. L'effort désiré correspond à la force et au couple que l'organe terminal exerce sur son environnement. Bien entendu, si le manipulateur est libre de se déplacer dans l'espace, il ne peut exercer aucun effort sur son environnement. Au contraire, s'il est complètement bloqué, il ne peut pas se déplacer. Ces deux situations extrêmes, ainsi que toutes les situations intermédiaires sont prises en compte, par l'introduction de la matrice de sélection S .

La matrice de sélection est une matrice diagonale composée de 0 et de 1. Si un 1 est placé sur une ligne, la composante correspondante de position est sélectionnée, alors que celle d'effort ne l'est pas, en raison de la présence de la matrice $(I-S)$. Si un 0 est placé sur une ligne, c'est la composante d'effort qui est sélectionnée.

Au niveau opérationnel (cartésien), on sélectionne des directions commandées en position et d'autres commandées en effort. Une direction ne pouvant être commandée à la fois en position et en effort, après transformation dans l'espace articulaire, les contributions des deux boucles de commandes peuvent être sommées pour obtenir le vecteur de commande des actionneurs du manipulateur. Bien entendu cela n'a de sens que si les positions et efforts commandés sont des quantités cohérentes, c'est-à-dire qu'à un déplacement selon une direction donnée est associé une force, et à un déplacement autour d'une direction donnée est associé un moment par rapport à cette direction. La difficulté réside en général dans le choix judicieux du repère de référence dans lequel la tâche est décrite. Le choix de ce repère conditionne la facilité de détermination des vecteurs de commande.

Dans cette méthode, les consignes sont données dans le repère de tâche. La structure est organisée sur trois niveaux de repères différents, les erreurs de suivi sont formées dans le repère de tâche pour appliquer directement la matrice de sélection, les

mesures des capteurs de force et de position sont fournies dans le repère de référence et le robot est commandé dans l'espace généralisé. Des transformations géométriques sont introduites à toutes les étapes de l'asservissement, ce qui augmente le temps de calcul.

Khatib a proposé une formulation de la commande hybride en force/position dans l'espace opérationnel [Khat 85], où tous les niveaux de cette structure de commande sont placés dans le repère de référence : que ce soit la somme des effets de chacune des boucles sous forme d'effort cartésien ou la génération des consignes ou l'implantation des correcteurs.

La méthode de *Khatib* évite l'utilisation d'un grand nombre de transformations géométriques. Mais un autre problème reste posé, est celui de la modification de la norme des vecteurs d'erreur par la matrice de sélection. En effet, l'application de la matrice de sélection sur les erreurs de forces et de positions modifie la norme de ces vecteurs, car elle élimine sans compensation les composantes qui ne respectent pas la configuration théorique de la tâche. Dans le cas où la force mesurée ne serait pas orthogonale à la surface de l'environnement, par exemple, la matrice de sélection apporte des erreurs sur le calcul des commandes. Dans ce cas, les commandes envoyées aux actionneurs ne correspondent pas réellement aux commandes nécessaires à la réalisation des consignes.

Beaucoup de chercheurs ont utilisés la commande hybride dans la coopération multi-robots [Khat 85] [Haya 86, 88] [Uchi 88][Dauc 90]. L'*annexe A* présente brièvement quelques méthodes. Les méthodes proposées sont essentiellement des extensions des structures classiques appliquées à l'origine à un seul manipulateur. Toutefois, ces méthodes ont les défauts de leur commande hybride d'origine.

Le problème majeur rencontré en appliquant la commande hybride force/position, est celui de la stabilité dynamique. En effet, le caractère discontinu intrinsèque à cette commande risque de rendre le système instable, notamment en cas de contact avec un environnement rigide, pour lequel les chocs sont de grande amplitude [Guih 95].

1.5.4) La commande en Impédance :

Contrairement à la commande hybride Force/Position, la commande en Impédance [Hoga 85] permet de lever le problème de discontinuités des lois de commande. La commande en Impédance a été introduite par *Neville Hogan* en 1985. Cette approche se distingue des autres approches conventionnelles de contrôle des manipulateurs par le fait que le contrôleur tente d'implémenter une relation dynamique entre les variables du manipulateur, tel que la position de l'organe terminal et la force, plutôt que de contrôler, ces variables séparément. En d'autre terme elle consiste à réguler l'impédance de sortie du robot.

L'issue de cette approche est de commander la relation entre la force agissant sur l'organe terminal et l'erreur entre les positions nominales et actuelles du robot. La commande en impédance est une approche générale de contrôle, dans laquelle, le robot se comporte comme étant un système de masse, de ressort et d'amortisseur, dont ses paramètres (inertie, raideur et amortissement) peuvent être spécifiés arbitrairement (Voir *Paragraphe III.2 pour plus de détails*).

Hogane [Hoga 85] a formalisé la notion d'impédance en la définissant comme une fonction de transfert $Z(p)$:

$$F(p) = Z(p)\delta X(p).$$

où $\delta X(p)$ est un déplacement généralisé ou opérationnel à partir d'une position nominale X_0 , et $F(p)$ la force produite en réponse au mouvement $\delta X(p)$.

p : représente la variable de *Laplace*.

Le manipulateur doit donc se comporter comme une impédance $Z(p)$ variable en fonction des différentes phases de la tâche. Dans la plupart des solutions proposées, le système de contrôle mesure à l'aide d'un capteur, l'effort produit à l'extrémité et en réponse, impose un mouvement.

Généralement $Z(p)$ est une fonction du second ordre :

$$Z(p) = M_t p^2 + B_t p + K_t.$$

Ou bien, dans le domaine temporel :

$$F = M_t \delta \ddot{x} + B_t \delta \dot{x} + K_t \delta x. \quad (1.1)$$

Où M_t , B_t , K_t représentent les paramètres de l'impédance désirée (Target impédance) : inertie, amortissement et raideur, respectivement. Les valeurs de ces paramètres sont choisies en fonction du comportement souhaité.

δx représente l'erreur en position

L'état mécanique de l'organe terminal, dans ce cas, peut être schématisé par le schéma suivant *Figure(1.10)*

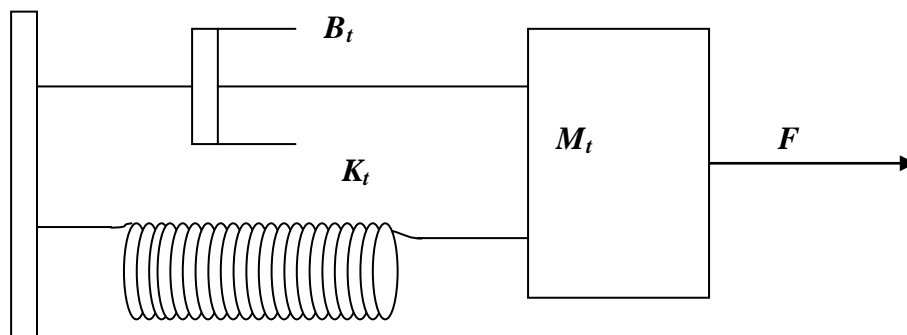


Figure (1.10) : Schématisation de l'impédance désirée au niveau de l'organe terminal.

♦ **Application de la commande en Impédance pour la coopération multi-robots :**

En ce qui concerne la commande multi-robots, beaucoup de travaux, ont été élaborés en utilisant la commande en impédance. On peut distinguer deux types d'approches :

- Des approches qui imposent le comportement de chacun des manipulateurs [Boni96] [Kosu 97] [Moos 98].
- Des approches qui imposent le comportement de l'objet manipulé [Schn 92].

La méthode de *Bonitz* [Boni 92] fait partie du premier type. Dans cette méthode la théorie d'une structure de commande de force interne basée sur la commande en impédance

est proposée. Cette commande relie la vitesse de chaque manipulateur à la force interne de l'objet manipulé. La commande présentée par *Bonitz* enveloppe deux concepts :

- L'utilisation de la force interne dans la relation d'impédance. La force interne est calculée à partir des capteurs d'effort au niveau des deux organes terminaux, en utilisant seulement les relations cinématiques. La dynamique de l'objet manipulé n'est pas nécessaire.
- Chaque robot est directement commandé en impédance par le contrôleur, ce qui élimine le besoin d'avoir deux boucles de commandes, une pour la force et une autre pour la position.

L'impédance de chaque manipulateur i est donnée par [Boni 96] :

$$M_i \delta \ddot{x}_i + B_i \delta \dot{x}_i + K_i \delta x_i = \delta F_{li}. \quad (1.2)$$

$$\delta x_i = x_{id} - x_i$$

δx_i représente l'erreur de la position et de l'orientation cartésienne de chaque organe terminal.

M_i , B_i , et K_i représentent les paramètres de l'impédance désirée de chaque bras : inertie, amortissement et raideur, respectivement, Voir *Figure (1.11)*.

$$\delta F_{li} = F_{li} - F_{ldi}$$

δF_{li} est l'erreur de la force interne du robot i (Voir *Annexe B*).

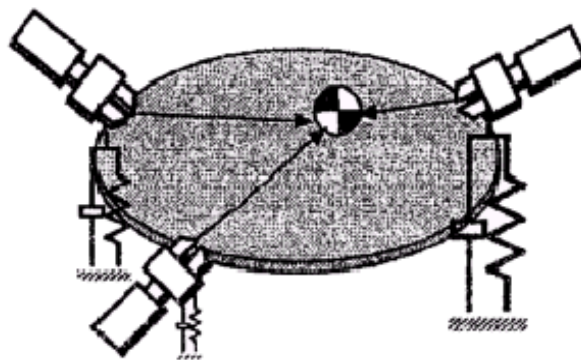
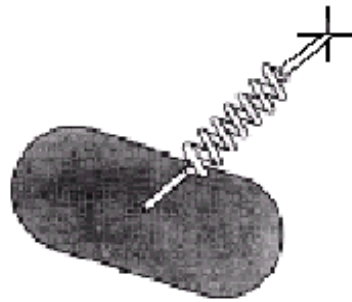


Figure (1.11) : Impédance au niveau de chaque organe terminal.

La commande de *Bonitz* permet de commander simultanément le mouvement de l'objet et la force interne et non pas la force totale d'interaction. Au cas où, l'environnement imposerait une force externe, la commande ne sera plus suffisante et devra prendre la dynamique de l'objet en considération.

D'autre part, *Schneider* et al dans [Schn 92], ont présenté un contrôle dynamique et stratégique des robots coopérants (DASCCOM). La commande utilisée est une commande en impédance. L'impédance commandée est non pas celle des organes terminaux, comme la méthode de *Bonitz*, mais celle de l'objet manipulé lui-même. L'objet est vu par rapport à son environnement comme un système de ressort et d'amortisseur. Un ressort imaginaire est lié au centre de l'objet, l'objet peut alors être manipulé en bougeant simplement la fin du ressort, voir *Figure(1.12)*.



Figure(1.12) : Impédance de l'objet manipulé.

La figure est simplifiée, mais plus exactement, il devrait y avoir des ressorts pour chaque degré de liberté de l'objet, *Figure (1.13)*. La relation d'impédance de l'objet est donnée par l'équation suivante :

$$M_d \delta \ddot{x} + K_v \delta \dot{x} + K_p \delta x = F_E$$

(1.3)

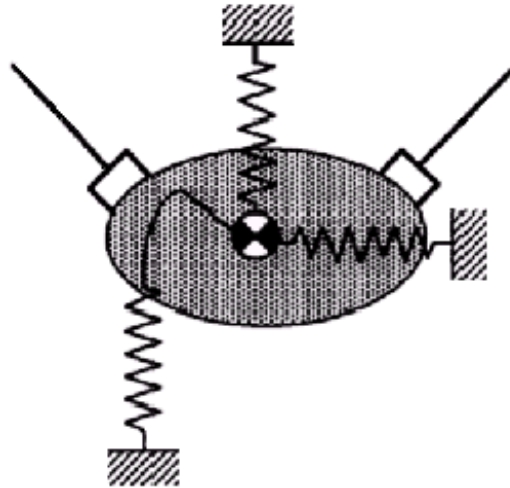
$$\delta x = x - x_d$$

x : coordonnée de chaque degré de liberté de l'objet.

x_d : coordonnée désirée de chaque degré de liberté de l'objet.

M_d , K_v et K_p représentent les paramètres de l'impédance désirée de chaque degré de liberté de l'objet : inertie, amortissement et de raideur, respectivement.

F_E : la force externe appliquée sur l'objet.



Figure(1.13) : Impédance de chaque degré de liberté de l'objet.

L'implémentation de la commande de *Schneider* requiert la connaissance de la dynamique de tout le système à savoir (les deux bras manipulateurs et l'objet manipulé).

Kosuge et al [Kosu 94] ont aussi utilisé la commande en impédance dans le contrôle multi-robots, pour l'exécution des tâches de transport d'objet et la tâche d'assemblage. Dans cette dernière, l'expression de l'équation de l'impédance s'écrit en fonction de la position relative des deux bras comme suit :

$$M_1 \Delta \ddot{x}_1 + B_1 \Delta \dot{x}_1 + K_1 \Delta x_1 = F_1. \quad (1.4)$$

$$M_2 \Delta \ddot{x}_2 + B_2 \Delta \dot{x}_2 + K_2 \Delta x_2 = F_2. \quad (1.5)$$

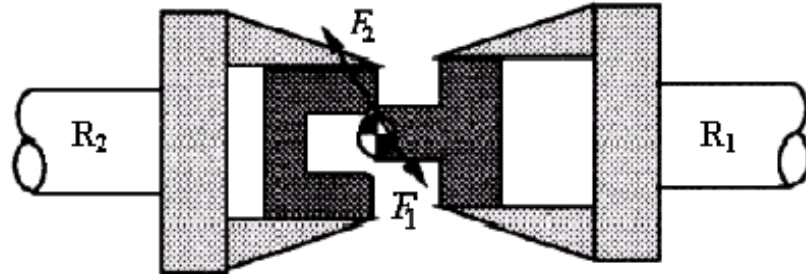
où Δx_1 et Δx_2 sont les erreurs de position de chacun des bras.

$$\Delta x_i = x_i - x_{id}. \quad (i = 1, 2.).$$

d : dénote la position désirée.

M_i , B_i et K_i représentent les matrices d'inertie, d'amortissement et de raideur de l'impédance de chaque bras, respectivement.

F_i est la force appliquée au bras i .



Figure(1.14) : Deux bras coopérants pour une tâche d'assemblage.

Lorsque les deux pièces à assembler sont en contact Figure(1.14), on a :

$$F_1 = -F_2 = F. \quad (1.6)$$

En supposant que chaque manipulateur a la même structure d'impédance, autour du centre compliant attaché à chacun des objets tenus, les paramètres d'impédance de chacun des bras sont donnés par :

$$M_1 = M_2 = 2M.$$

$$B_1 = B_2 = 2B.$$

$$K_1 = K_2 = 2K.$$

Remarque: Le centre compliant est le point, où l'application d'une force provoque uniquement une translation du mécanisme, et l'application d'un moment provoque uniquement une rotation autour de ce point [Perd 91].

Alors l'impédance du mouvement relatif $\Delta x = \Delta x_1 - \Delta x_2$ est donné par l'équation suivante :

$$M \Delta \ddot{x} + B \Delta \dot{x} + K \Delta x = F. \quad (1.7)$$

Inspiré de la méthode de *Kosuge, Nagai et al* dans [Naga 95] ont également utilisé la commande en impédance dans la coopération multi-robots pour la tâche d'assemblage. Mais dans leur méthode, ils ne se sont pas contentés de contrôler l'impédance du

mouvement relatif seulement, mais ils ont introduit une autre formule d'impédance, qu'ils ont nommé l'impédance du mouvement absolu.

L'équation de l'impédance du mouvement relatif et absolu est donnée comme suit :

Le mouvement relatif désiré est exprimé par :

$$M_{Rd} \ddot{x}_R + B_{Rd} \dot{x}_{Rc} + K_{Rd} x_{Rc} = F_I \quad (1.8)$$

$$x_{Rc} = x_R - x_{Rd}$$

x_R : est la position relative des deux organes terminaux.

x_{Rc} : est l'erreur de la position relative, et x_{Rd} est la position relative désirée.

M_{Rd} , B_{Rd} et K_{Rd} sont la matrice d'inertie désirée, d'amortissement désiré et de raideur désirée, respectivement, correspondant au mouvement relatif.

F_I : est la force interne des deux bras.

D'autre part l'impédance désirée du mouvement absolu est donnée par l'équation suivante :

$$M_{Ad} \ddot{x}_A + B_{Ad} \dot{x}_{Ac} + K_{Ad} x_{Ac} = F_E \quad (1.9)$$

$$F_E = F_{E1} + F_{E2}$$

x_{Ac} : est l'erreur de la position absolue.

$$x_{ci} = x_i - x_{di} ;$$

x_{di} est la position désirée du bras i .

M_{Ad} , B_{Ad} et K_{Ad} sont les matrices : d'inertie désirée, d'amortissement désiré et de raideur désirée du mouvement absolu, respectivement.

F_E : est la force externe totale.

$$x_A = \frac{M_1 x_1 + M_2 x_2}{M_1 + M_2} \quad (1.10)$$

x_A est le centre de masse du système total, et x_1 , x_2 sont le centre de gravité de chaque objet.

$M_A = M_1 + M_2$, représente l'inertie totale du système.

Les équations (1.8) et (1.9) peuvent être écrites :

$$M_d \begin{bmatrix} \ddot{x}_R \\ \ddot{x}_R \end{bmatrix} + B_d \begin{bmatrix} \dot{x}_{Rc} \\ \dot{x}_{Rc} \end{bmatrix} + K_d \begin{bmatrix} x_{Rc} \\ x_{Rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_I \\ F_E \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

telles que :

$$M_d = \text{diag} (M_{Rd}, M_{Ad}) ;$$

$$B_d = \text{diag} (B_{Rd}, B_{Ad}) ;$$

$$K_d = \text{diag} (K_{Rd}, K_{Ad}) ;$$

La commande en impédance classique de *Hogan* [Hoga 85], spécifie l'impédance mécanique de l'organe terminal du bras manipulateur. Alors que dans la commande en Impédance proposée par *Nagai* [Naga 95], c'est l'impédance mécanique du mouvement relatif et absolu du système qui est spécifiée.

La différence majeure entre la commande en impédance et les autres approches de contrôle (force, position,...), est que le contrôleur implémente une relation dynamique entre la position et la force d'interaction au lieu de contrôler ces grandeurs séparément [Hoga85]. Ce qui revient à autoriser un déplacement en réponse à une force appliquée ; Cependant la commande en impédance ne permet pas un contrôle explicite de la force.

De ce fait, différentes tentatives ont été faites pour combiner entre la commande en impédance et la commande en force [Surd 96] [Chan 96], dans le but de compenser les inconvénients spécifiques à l'utilisation de l'une des deux commandes seules.

Ces méthodes ont été élaborées pour la commande d'un seul bras manipulateur. Nous allons implémenter, l'une d'elle, pour la commande coordonnée de deux bras manipulateurs coopérants pour une tâche d'assemblage.

I.6) Conclusion :

Dans ce premier chapitre nous avons présenté quelques exemples de coopération multi-robots, en faisant ressortir les avantages d'utilisation de tels robots, comparés à

l'utilisation d'un seul robot manipulateur. Ensuite, nous avons abordé le problème de commande multi-robots en faisant une analyse des avantages et des inconvénients des différentes commandes proposées en littérature, que nous pouvons répartir, en trois types de commande : La commande Maître/Esclave, la commande Hybride Force/Position et la commande en Impédance qui est à la base de notre étude.

Dans notre travail nous nous intéressons particulièrement à la tâche d'assemblage, pour cela nous allons aborder dans le prochain chapitre, la description de cette tâche, et la modélisation du système dans ce cas.

II.1) Introduction :

L'assemblage peut être réalisé par différents moyens : homme, ou homme assisté d'une machine, ou automate, ou robot...etc. Il peut être très complexe et difficilement réalisable. Indirectement, les opérations d'assemblages constituent de nos jours de 40 à 60% des temps de production industrielle, et de 20 à 60% des coûts globaux de production [Bouf 92].

II.2) La Tâche d'Assemblage :

L'assemblage d'un produit est une suite d'actions consistant à créer un ensemble de liaisons entre différents constituants. C'est la jonction, ou bien la réunion de diverses pièces de manière qu'elles ne fassent plus qu'un tout.

Les opérations liées à l'assemblage sont groupées en deux classes d'action [Bouf 92] :

- Les actions positionnelles : Ce sont les opérations consistant à positionner dans l'espace (sans ou avec contact), les différents éléments à assembler.
- Les actions fonctionnelles : C'est l'ensemble des opérations qui consiste à établir une liaison mécanique entre les éléments à assembler.

Les actions positionnelles et fonctionnelles peuvent être décomposées en plusieurs tâches élémentaires réalisées par les robots, à savoir :

- La saisie des pièces à monter par les effecteurs.
- L'approche libre des effecteurs.
- L'accostage et l'accrochage qui est la mise en contact et le recentrage précis au contact des deux composants à assembler.
- L'insertion où est réalisée l'introduction des éléments et l'établissement de la liaison mécanique.
- Le dégagement des deux bras vers la position de repos, après la libération de l'ensemble ainsi formé.

Chacune de ces phases fait appelle à une description et à un contrôle particulier. Notre point d'intérêt portera essentiellement sur les tâches robotique d'approche des effecteurs, d'accostage et d'insertion. Ces trois phases constituent la partie principale de l'opération d'assemblage robotisé, qui est un choix technologique de réalisation.

Dans la première phase, en l'occurrence la phase d'approche, chacun des robots saisit l'une des pièces à assembler et la ramène face à l'autre pièce (sans qu'il y ait contact entre elles). Chacun des robots exécute un mouvement indépendant. La dynamique des objets manipulés (masse et inertie) influe sur la dynamique des robots. Elle doit être intégrée dans le modèle de chaque robot.

Dans la deuxième phase qui est la phase d'accostage, les pièces sont mises en contact. Dans ce cas, le comportement dynamique des deux robots se trouve affecté et il est nécessaire de modéliser le comportement dynamique du système en contact .

Dans la dernière phase, qui est la phase d'insertion, les deux pièces sont jointes ensemble pour ne former qu'une seule entité. Les robots dans cette phase exécutent un mouvement contraint, et une chaîne mécanique fermée est formée par les deux pièces et les deux robots manipulateurs. Le degré de liberté total de la chaîne mécanique fermée est déterminé par la structure des deux robots et le degré de liberté relatif aux deux pièces à assembler.

La réalisation complète implique la mise en œuvre d'un procédé de solidarisation. Celui-ci est réversible comme dans le cas de vissage, ou irréversible (colles, soudage, rivetage). Notre étude considère une opération réversible de montage.

L'exemple typique d'une tâche d'assemblage est l'opération d'insertion d'une cheville dans un trou, *Figure (2.1)* ; Ainsi ce chapitre traite de la modélisation du comportement cinématique et dynamique de deux robots manipulateurs travaillant en coopération pour la réalisation de la tâche d'assemblage sus-citée.

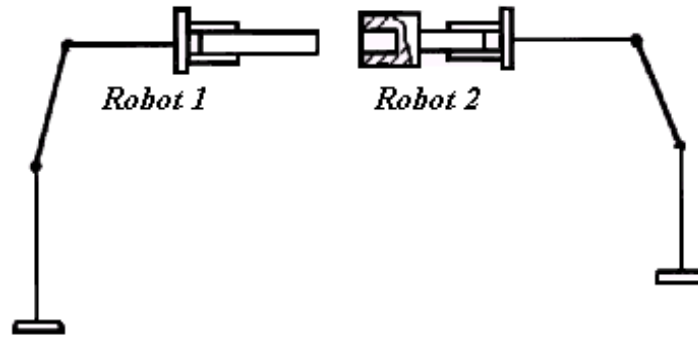


Figure. (2.1) : Opération d'insertion d'une cheville dans un trou.

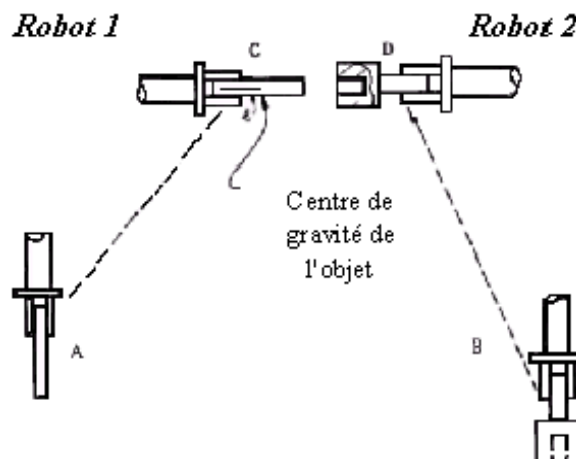
II.3) Modélisation De Deux Robots Manipulateurs Tenant Chacun Un Objet :

Considérons un système composé de deux robots $R1$ et $R2$, qui ont préalablement saisi les pièces à assembler, et qui doivent évoluer vers une configuration où l'insertion est possible.

Remarque:

La tâche de saisie pose le problème des prises (choix de l'effecteur, position et stabilité de prise). Ce problème spécifique ne sera pas abordé, il sort du cadre de notre travail.

La première étape de cette tâche d'assemblage, "l'approche libre des effecteurs" se déroule comme suit : Soit le robot $R1$ au point A et le robot $R2$ au point B . $R1$ doit ramener la première pièce au point C , et $R2$ doit ramener la deuxième pièce au point D , Figure(2.2). C et D seront les points de départ de la deuxième étape.



Figure(2.2) : Phase d'approche libre des effecteurs.

Le modèle dynamique d'un robot peut être écrit comme suit (Voir Annexe C) :

$$A(q)\ddot{q} + H(q, \dot{q}) + G(q) = \tau. \quad (2.1)$$

q : est le vecteur ($n \times 1$) des variables articulaires du robot manipulateur.

n : nombre de degrés de liberté du bras manipulateurs ($n \leq 6$).

$A(q)$: Est la matrice d'inertie ($n \times n$) du manipulateur.

$H(q, \dot{q})$: Est le vecteur ($n \times 1$) qui regroupe les forces de Coriolis et centrifuges.

$G(q)$: Est le vecteur ($n \times 1$) des forces de la pesanteur.

τ : est le vecteur ($n \times 1$) des couples appliqués au système (qui est une entrée de commande).

Nous supposons que les axes du repère attaché à l'objet sont bien alignés avec les axes du repère opérationnel.

Remarque:

Dans la littérature, nous entendons par situation de l'organe terminal d'un robot manipulateur : position de l'origine d'un repère lié à cet organe terminal et, orientation de ce même repère, par rapport au repère fixe lié au bâti du robot manipulateur (repère opérationnel). Ces coordonnées de positions et d'orientations sont appelées coordonnées opérationnelles, Voir (Annexe C).

Le modèle dynamique de l'objet peut être écrit comme suit :

$$\begin{bmatrix} M_o & 0 \\ 0 & I_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{X} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_o G \\ \omega \times I_o \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -F_b \\ -l \times R_b^o(q) F_b - \tau_b \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

M_o : Matrice diagonale (3×3) notant la masse de l'objet.

I_o : Matrice diagonale (3×3) de moment principal et unitaire de l'objet.

X : position du centre de gravité de l'objet dans l'espace opérationnel.

l : la distance entre le centre de gravité de l'objet et l'organe terminal, *Figure(2.2)*.

ω : vitesse angulaire de l'objet, exprimé dans le repère lié à l'objet.

$G = [0 \ 0 \ g]^T$, où g est l'accélération gravitationnelle.

F_b : Est la force d'interaction entre le robot et l'objet, exprimée dans le repère opérationnel.

τ_b : Est le moment d'interaction entre le robot et l'objet, exprimé dans le repère lié à l'objet.

$R_b^0(q)$: Est la matrice (3×3) de passage du repère opérationnel au repère lié à l'objet.

\times : Dénote le produit scalaire.

Lorsque le robot tient l'objet, l'équation dynamique du robot devient :

$$A(q)\ddot{q} + H(q, \dot{q}) + G(q) = \tau + J_p^T(q)F_b + J_a^T(q)R_0^b(q)\tau_b \quad (2.3).$$

où:

$J^T = [J_p^T \ J_a^T]$, J^T est la matrice transposée de la Jacobienne, Voir (Annexe C).

Les équations (2.2) et (2.3) deviennent la dynamique du système "Robot tenant un objet". Il serait judicieux de combiner les deux équations (2.2) et (2.3) pour former un seul ensemble d'équations dynamiques, décrivant le système total.

L'expression de la position du centre de l'objet en fonction des variables articulaires du robot est donnée comme suit :

$$X = P(q) + R_0^b(q) l \quad (2.4)$$

$P(q)$: Position de l'organe terminal dans le repère opérationnel, c'est le modèle géométrique direct (Voir Annexe C).

l : la distance entre le centre de l'objet et l'organe terminal.

$R_0^b(q)$: Est la matrice de passage (3×3) du repère lié à l'objet, au repère opérationnel.

En dérivant deux fois l'équation (2.4) par rapport au temps, on obtient :

$$\ddot{X} = J_p(q)\ddot{q} + \dot{J}_p(q)\dot{q} + L_p(q)\ddot{q} + \dot{L}_p(q)\dot{q} \quad (2.5)$$

\dot{q} : vitesse articulaire du robot manipulateur.

\ddot{q} : accélération articulaire du robot manipulateur.

$$J_p(q) = \frac{\partial P(q)}{\partial q}$$

$$L_p(q) = \frac{\partial [R_0^b(q)l]}{\partial q}$$

$\dot{J}_p(q)$ et $\dot{L}_p(q)$ sont les dérivées par rapport au temps de $J_p(q)$ et $L_p(q)$, respectivement.

∂ :dénote la dérivée partielle.

D'autre part, la vitesse angulaire de l'objet, par rapport au repère lié à celui-ci, est donnée par :

$$\omega = R_b^0(q)J_a(q)\dot{q} \quad (2.6)$$

La dérivée de l'équation (2.6) par rapport au temps, nous donne :

$$\dot{\omega} = R_b^0(q)J_a(q)\ddot{q} + \dot{R}_b^0(q)J_a(q)\dot{q} \quad (2.7)$$

La combinaison de (2.5) et (2.7), nous donne :

$$\begin{bmatrix} \ddot{X} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_p(q) + L_p(q) \\ R_b^0(q)J_a(q) \end{bmatrix} \ddot{q} + \begin{bmatrix} \dot{J}_p(q) + \dot{L}_p(q) \\ \dot{R}_b^0(q)J_a(q) \end{bmatrix} \dot{q} = B(q)\ddot{q} + \dot{B}(q)\dot{q} \quad (2.8)$$

En remplaçant $[\ddot{X} \quad \dot{\omega}]^T$ dans (2.2) par son expression dans (2.8) et ω par son expression dans (2.6), on obtient :

$$\begin{bmatrix} M_o & 0 \\ 0 & I_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B(q)\ddot{q} + \dot{B}(q)\dot{q} \\ R_b^0(q)J_a(q)\dot{q} \times I_o R_b(q)q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_o G \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -F_b \\ -l \times R_b^0(q)F_b - \tau_b \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

La multiplication des deux membres de (2.9) par $B^T(q)$, nous donne :

$$\begin{aligned} B^T(q) \begin{bmatrix} M_o & 0 \\ 0 & I_o \end{bmatrix} B(q)\ddot{q} + B^T(q) \begin{bmatrix} M_o & 0 \\ 0 & I_o \end{bmatrix} \dot{B}(q)\dot{q} + \\ B^T(q) \begin{bmatrix} M_o G \\ R_b^0(q)J_a(q)\dot{q} \times I_o R_b(q)q \end{bmatrix} &= B^T(q) \begin{bmatrix} -F_b \\ -l \times R_b^0(q)F_b - \tau_b \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.10)$$

Il est noté que [Zhen 89] :

$$\begin{aligned} B^T(q) \begin{bmatrix} -F_b \\ -l \times R_b^0(q)F_b - \tau_b \end{bmatrix} &= [J_p^T(q) + L_p^T(q) \quad J_a^T(q)R_b^b(q)] \begin{bmatrix} -F_b \\ -l \times R_b^b(q)F_b - \tau_b \end{bmatrix} \\ &= -J_p^T(q)F_b - J_a^T(q)R_b^b(q)\tau_b \end{aligned} \quad (2.11)$$

tel que :

$$-L_p^T(q)F_b - J_a^T(q)R_0^b(q)l \times R_b^0(q)F_b = [0] \quad : \text{Vecteur nul } (3 \times 1).$$

L'équation (2.10) peut être écrite comme suit :

$$A_b(q)\ddot{q} + H_b(q, \dot{q}) + G_b(q) = -J_p^T(q)F_b - J_a^T(q)R_0^b(q)\tau_b \quad (2.12)$$

$A_b(q)$, $H_b(q)$ et $G_b(q)$ peuvent être identifiées en comparant les équations (2.12) et (2.10).

En additionnant (2.12) et (2.3), on obtient l'équation dynamique du robot manipulateur tenant un objet, sous la forme :

$$[A(q) + A_b(q)]\ddot{q} + H(q, \dot{q}) + H_b(q, \dot{q}) + G(q) + G_b(q) = \tau \quad (2.13)$$

ou encore :

$$A_o(q)\ddot{q} + H_o(q, \dot{q}) + G_o(q) = \tau \quad (2.14)$$

II.4) Modélisation dynamique de l'effet de collision des deux robots coordonnés :

Au cours de la première phase de la tâche d'assemblage présentée, les deux pièces à assembler sont amenées respectivement, au point C et D, *Figure. (2.2)*. Ces deux points sont les points de départ de la deuxième phase. La principale caractéristique de la seconde phase est la mise en contact des deux pièces à assembler.

L'équation dynamique des deux robots R1 et R2 tenant chacun un objet, peut être décrite comme suit :

$$A_o(q_i)\ddot{q}_i + H_o(q_i, \dot{q}_i) + G_o(q_i) = \tau_i \quad (i=1,2) \quad (2.15)$$

Lorsqu'un contact physique se produit entre les deux objets en un point, Voir *Figure(2.3)*, on peut exprimer la position de ce point dans le repère opérationnel, par un vecteur $Y : (3 \times 1)$, il est clair que Y peut s'écrire en fonction de q_1 ou q_2 .

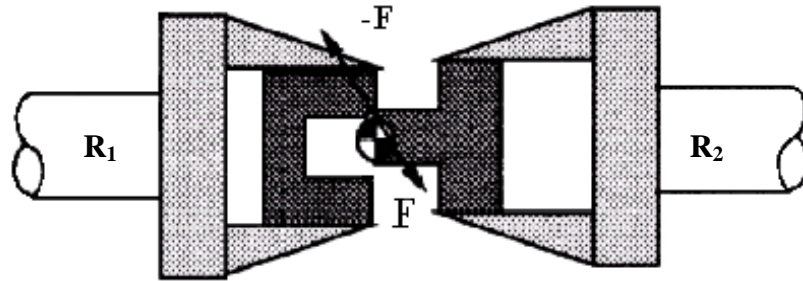
$$Y=f(q_1) =f(q_2) \quad (2.16)$$

Une fois que les deux robots sont en contact, une force F de réaction agit sur les deux parties. Les forces généralisées agissant sur les deux robots peuvent être exprimées comme suit :

$$\Gamma_1 = \left[\frac{\partial \mathcal{F}(q_1)}{\partial q_1} \right]^T F = (J_{p1})^T F. \quad (2.17)$$

et

$$\Gamma_2 = - \left[\frac{\partial \mathcal{F}(q_2)}{\partial q_2} \right]^T F = -(J_{p2})^T F. \quad (2.18)$$



Figure(2.3) : Interaction de deux robots manipulateurs.

Avec les forces d'interactions agissant sur les deux objets, l'équation dynamique des deux robots, s'écrit :

$$A_o(q_i) \ddot{q}_i + H_o(q_i, \dot{q}_i) + G_o(q_i) = \tau_i + \Gamma_i \quad (i=1,2) \quad (2.19)$$

Pour étudier l'effet de collision, on intègre les deux cotés de (2.19) dans un intervalle de temps infinitésimal Δt , on obtient :

$$\int_t^{t+\Delta t} [A_o(q_i) \ddot{q}_i + H_o(q_i, \dot{q}_i) + G_o(q_i)] dt = \int_t^{t+\Delta t} (\tau_i + \Gamma_i) dt. \quad (2.20)$$

Notons que les positions articulaires q_i , les vitesses articulaires \dot{q}_i et les moments appliqués sont des quantités finies. Puisque l'intégrale d'une quantité finie dans Δt est nulle, et que la position articulaire q_i reste constante pendant Δt , on obtient :

$$A_o(q_i) [\dot{q}_i(t + \Delta t) - \dot{q}_i(t)] = (J_{p1})^T F_\delta \quad (2.21)$$

et

$$A_o(q_2)[\dot{q}_2(t + \Delta t) - \dot{q}_2(t)] = -(J_{p2})^T F_\delta \quad (2.22)$$

où:

$$F_\delta = \int_t^{t+\Delta t} F dt$$

F_δ : est appelée la force impulsive.

De (2.21) et (2.22) on a :

$$\Delta \dot{q}_1 = A_o^{-1}(q_1)(J_{p1})^T F_\delta \quad (2.23)$$

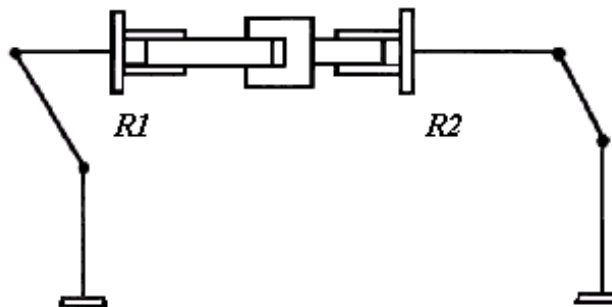
et

$$\Delta \dot{q}_2 = -A_o^{-1}(q_2)(J_{p2})^T F_\delta \quad (2.24)$$

Les équations (2.23) et (2.24) montrent que lorsque deux objets à assembler sont en contact, une force impulsive apparaît sur les deux objets, et la vitesse articulaire des robots coordonnés subit un changement brusque.

II.5) Modélisation Dynamique de Deux Robots Coordonnés Reliés par les Deux Pièces à Assembler :

Au cours de la troisième phase, les deux pièces sont jointes, formant ainsi, avec les deux robots manipulateurs une chaîne mécanique fermée, *Figure(2.4)*.



Figure(2.4) : Deux robots reliés par deux objets assemblés .

Les caractéristiques du mouvement de la chaîne mécanique fermée sont fonction principalement des contraintes cinématiques, qui dépendent des structures géométriques des deux pièces à assembler :

- Dans le cas où la section de la cheville serait circulaire et que le trou serait cylindrique, le mouvement des robots ne pourrait être que suivant ou autour de l'axe Z, *Figure(2.5.a)*. Chaque robot perd quatre degrés de liberté.
- Dans le cas où la section de la cheville et le trou seraient carrées, les robots perdraient cinq degrés de liberté, car le mouvement ne pourrait se faire que suivant l'axe Z, *Figure(2.5.b)*.

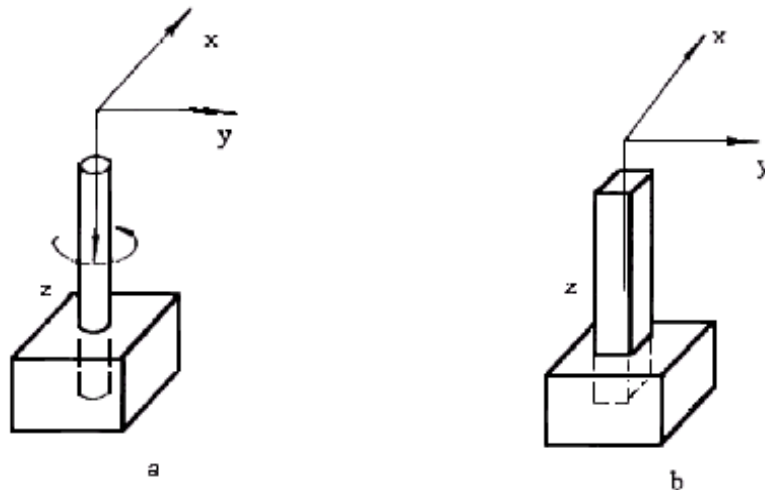


Figure (2.5)

Dans le but de modéliser les contraintes cinématiques, nous étudions séparément, la vitesse linéaire et angulaire des deux bras. Considérons en premier la vitesse linéaire. Les contraintes cinématiques imposées sur le mouvement relatif des deux bras sont données par [Zhen 89] :

$$R_n^o(q_1)[(J_p(q_1)\dot{q}_1 - J_p(q_2)\dot{q}_2)] = QV_n \quad (2.25)$$

où:

V_n : vecteur ($m \times 1$), représentant les composantes de la vitesse linéaire.

Q : est une matrice ($3 \times m$), avec $1 \leq m \leq 3$.

La structure de Q est comme suit [Zhen 89] :

Chaque colonne de Q a un élément égal à 1 et le reste est égal à 0. Le nombre de colonnes de Q , c'est à dire, m est déterminé par le degré de liberté du mouvement, il y a autant de colonnes que de degrés de liberté du mouvement. L'élément 1 correspond à la direction du mouvement, ainsi si le déplacement serait suivant l'axe X le premier élément serait égal à 1. Si le déplacement serait suivant l'axe Y c'est le deuxième élément qui serait égale à 1.

Pour l'exemple d'insertion suivant Z, on a :

$$Q = [0 \ 0 \ 1]^T.$$

V_n est alors un scalaire.

Idem pour la vitesse angulaire, on a :

$$R_n^o(q_1)(J_a(q_1)\dot{q}_1 - J_a(q_2)\dot{q}_2) = N\omega_n \quad (2.26)$$

où :

ω_n : vecteur ($p \times 1$) représentant les vitesses angulaires.

N : est la matrice ($3 \times p$) avec $1 \leq p \leq 3$.

La structure de N et l'expression de (2.26) sont exprimées de la même manière que Q et l'équation (2.25), respectivement.

La force de contrainte F peut être exprimée comme suit :

$$F = UF_n.$$

Où, U est une matrice ($3 \times u$), avec $1 \leq u \leq 3$ et F_n est un vecteur ($u \times 1$) qui représente la force de contrainte suivant chaque axe.

La relation entre U et Q est donnée par [Zhen 89]:

$$U^T Q = [0]. \quad \text{Matrice nulle } (u \times m).$$

De même pour les couples de contraintes, on a :

$$\tau = V \tau_n.$$

Où V est une matrice ($3 \times v$), avec $1 \leq v \leq 3$ et τ_n est un vecteur ($v \times 1$) qui représente le couple de contrainte appliqué suivant chaque axe. la structure de V et τ_n est similaire à U et F_n respectivement, et on a aussi :

$$V^T N = [0].$$

L'équation dynamique des deux robots coordonnés, en présence des forces et moments de contraintes appliqués sur les deux bras, peut être écrite comme suit :

$$\begin{bmatrix} A_o(q_1) & 0 \\ 0 & A_o(q_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} H_o(q_1, \dot{q}_1) \\ H_o(q_2, \dot{q}_2) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_o(q_1) \\ G_o(q_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} J^T(q_1) \begin{bmatrix} R_o^n(q_1)U \\ 0 \end{bmatrix} \\ -J^T(q_2) \begin{bmatrix} R_o^n(q_2)U \\ 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J^T(q_1) \begin{bmatrix} 0 \\ R_o^n(q_1)V \end{bmatrix} \\ J^T(q_2) \begin{bmatrix} 0 \\ R_o^n(q_2)V \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_n \\ \tau_n \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

• Calcul de la Force d'Interaction

Dans le cas de l'insertion, le calcul de la force de contact peut être déduit de la modélisation de la force de contact d'un robot avec son environnement [Hoga 85] [Bert95], Voir (Annexe C). La différence est que l'environnement dans ce cas n'est pas fixe, il est en mouvement, c'est la deuxième pièce à assembler. Ainsi chacun des objets tenu par chaque robot est considéré comme un environnement appliquant une force d'interaction F_e sur l'autre robot. Dans ce cas l'équation exprimant la force F_e est donnée comme suit:

$$\begin{aligned} -F_e &= M_e \Delta \ddot{x} + B_e \Delta \dot{x} + K_e \Delta x \\ \Delta x &= x - x_e \end{aligned} \quad (2.28)$$

$$\Delta \dot{x} = \frac{\partial(\Delta x)}{\partial t}$$

x : Situation de l'organe terminal

x_e : Localisation du point de contact.

M_e, B_e, K_e : sont respectivement, les matrices d'inertie, d'amortissement et de raideur de l'environnement.

Où, plus précisément :

$$\Delta x = x_2 - x_1.$$

avec:

x_1 : Situation de l'organe terminal du Robot₁.

x_2 : Situation de l'organe terminal du Robot₂.

II.6) Conclusion:

La tâche d'assemblage est constituée de trois phases principales, La phase d'approche des effecteurs, La phase d'accostage et la phase d'insertion des pièces. Dans ce chapitre nous avons exprimé le modèle mathématique du comportement dynamique et cinématique de deux robots coordonnés exécutant une tâche d'assemblage. Nous allons passer dans le prochain chapitre, à la commande coordonnée de ces deux robots manipulateurs.

III.1) Introduction :

Considérons la tâche d'assemblage qui consiste à amener les organes terminaux de deux bras manipulateurs dans une certaine configuration relative. Pour pouvoir être réalisée, cette tâche requiert une grande précision de la position relative des deux objets à assembler ainsi qu'une bonne maîtrise de la force interne induite par le contact de ces derniers. La seule issue possible pour réaliser cette tâche, est d'effectuer grâce à un capteur d'effort, des mesures relatives de la force entre les objets manipulés, et exploiter ces mesures pour modifier le mouvement de référence en fonction des efforts de contact. Pour cela, nous avons besoin d'une commande, qui puisse maîtriser les efforts de contact de façon continue et commander la trajectoire en conséquence.

Les solutions basées sur une commande en position seule, la commande maître esclave et la commande hybride vues au chapitre I, sont inadaptées pour notre cas. La commande en Impédance, elle, semble répondre au problème posé. Elle est à la base de notre étude.

Nous n'examinerons pas les problèmes d'évitement de collision entre robots, objets et environnement qui sont de natures différentes. L'objectif ici est, essentiellement, d'élaborer une loi de commande permettant de commander le mouvement absolu et relatif des deux bras manipulateurs et de commander la force interne induite par la mise en contact des deux objets à assembler et contrôler, éventuellement, les forces externes produites par un environnement externe.

Avant de présenter notre commande coordonnée - basée sur la commande en impédance- utilisée pour la coopération de deux robots manipulateurs pour la tâche d'assemblage, nous allons commencer par présenter la commande en Impédance pour un seul bras manipulateur.

III.2) La commande en Impédance :

En s'inspirant de l'examen et de la compréhension du mécanisme de contrôle des mouvements et des forces chez les systèmes biologiques, une nouvelle approche de commande a été introduite par Neville Hogan, appelée commande en impédance [Hoga85].

La commande en impédance ne considère pas l'interaction comme une source de perturbation à rejeter, mais comme étant une partie intégrante de la tâche de commande. La différence majeure entre la commande en impédance et les autres approches de contrôle (force, position,...), est que le contrôleur implémente une relation dynamique entre les variables du manipulateur, telle que, la position, la vitesse de l'organe terminal et la force d'interaction avec l'environnement, au lieu de contrôler ces variables séparément [Hoga85].

Le terme impédance est d'origine issue du domaine physique, en fait, les systèmes physiques sont de deux types:

- Admittance : qui accepte un effort en entrée (exp : force, DDP, pression..), et qui fournit un flux en sortie (exp : déplacement, courant, débit..)
- Impédance : qui accepte un flux en entrée (exp. : déplacement) et qui fournit un effort en sortie (exp. : force).

Une conséquence de l'interaction dynamique entre deux systèmes physiques est que si l'un est une impédance l'autre sera une admittance et vice versa. Vu par le manipulateur (le robot manipulateur), le monde est une admittance. De là, on pourra dire, que dans le cas d'un robot manipulateur effectuant des tâches contraintes, la relation mécanique existante entre ce dernier et l'environnement ne peut être qu'une impédance[Hoga 87].

L'objectif de la commande en impédance est de réguler la force d'interaction, qui peut varier à cause de l'incertitude de localisation du point de contact et des propriétés structurales de l'environnement. L'impédance doit contenir des termes, qui définissent certaines grandeurs physiques, liées aux mouvements. Ces termes auront pour but, de faire

face aux effets de perturbations dues à la structure de l'environnement, en produisant des forces de réactions permettant de compenser les forces extérieures exposées.

Dans un environnement terrestre, ces forces perturbatrices peuvent être en général de trois types différents: force d'inertie, force de frottements et force de raideurs. Un exemple typique de manipulation qui permet d'exposer ces forces, est l'opération d'insertion d'une cheville dans un trou de même diamètre en présence de frottement.

Cet exemple est schématisé par la figure (3.1)

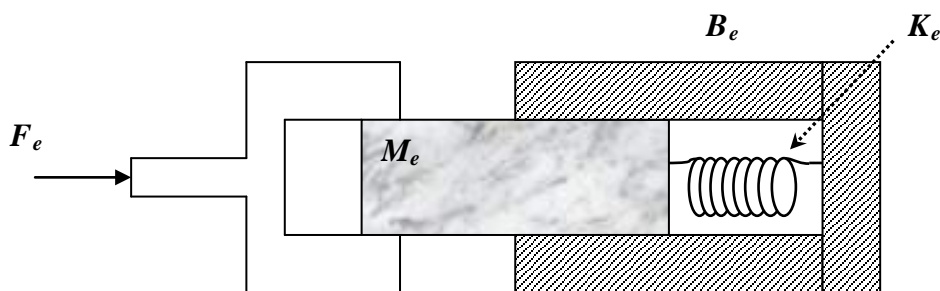


Figure (3.1) : Opération d'insertion d'une cheville dans un trou de même dimension en présence de frottement.

M_e : Inertie de l'environnement.

B_e : Amortissement de l'environnement.

K_e : Raideur de l'environnement.

F_e : Force d'interaction.

Une façon adéquate qui permet d'éliminer ces perturbations, est de présenter au niveau de l'organe terminal une force d'interaction F_e , composée d'un ensemble de termes dont chacun fait face à certains types de ses effets perturbateurs.

Cependant, pour des raisons de simplicité, l'équation de l'impédance est communément adoptée dans la forme d'une équation linéaire différentielle de second ordre, décrivant un système mécanique (masse - ressort - amortisseur) découplé [Hoga 85].

En définissant la position d'équilibre désirée pour l'organe terminal x_0 , la forme générale de la relation entre la force et la position sera :

$$F_e = K[x - x_0].$$

Un autre terme important de l'impédance du manipulateur est la relation entre la force et la vitesse. De même, il est aussi simple de définir une loi de commande pour implementer en coordonnées opérationnelles, une relation désirée entre la force de l'organe terminal et sa vitesse.

$$F_e = B[v - v_0].$$

Le troisième terme important de l'impédance du robot manipulateur est l'inertie, il donne la relation entre la force et l'accélération :

$$M \frac{dv}{dt} = F_e.$$

Pour garantir une certaine dynamique, le choix de l'impédance à imposer doit être fait selon le comportement dynamique dominant du manipulateur [Hoga 85]. Il en résulte que ce choix dépend du manipulateur lui-même, ainsi que de l'environnement sur lequel il opère. Par exemple, un manipulateur prévu pour des applications dans une orbite autour de la terre, affrontera un environnement où l'inertie est prédominante ; Par contre, un manipulateur prévu pour des applications sous-marines, fonctionnera dans un environnement principalement visqueux et il sera raisonnable d'ignorer les effets inertiels.

D'où on peut donner une définition générale de la commande en impédance : La commande en impédance est une approche générale de contrôle, dans laquelle, le robot se comporte comme étant un système de masse, de ressort et d'amortisseur, dont les paramètres (inertie, raideur et amortissement) peuvent être spécifiés (ajusté) arbitrairement (on parlera d'impédance désirée). On peut définir l'impédance comme suit :

$$F_e = Z(x - x_0, v - v_0, dv/dt).$$

Tel que :

x et x_0 sont la position actuelle et la position désirée, respectivement.

v et v_0 sont la vitesse actuelle et la vitesse désirée, respectivement.

F_e : Force d'interaction.

$Z(\cdot)$: L'impédance désirée.

Ou bien d'une manière plus simple :

$$F_e = M_t \, dv/dt + B_t (v - v_0) + K_t (x - x_0).$$

Où M_t , B_t , K_t représentent les paramètres de l'impédance désirée (Target impédance): inertie, amortissement et raideur, respectivement.

L'état mécanique de l'organe terminal dans ce cas peut être schématisé par la figure(3.2).

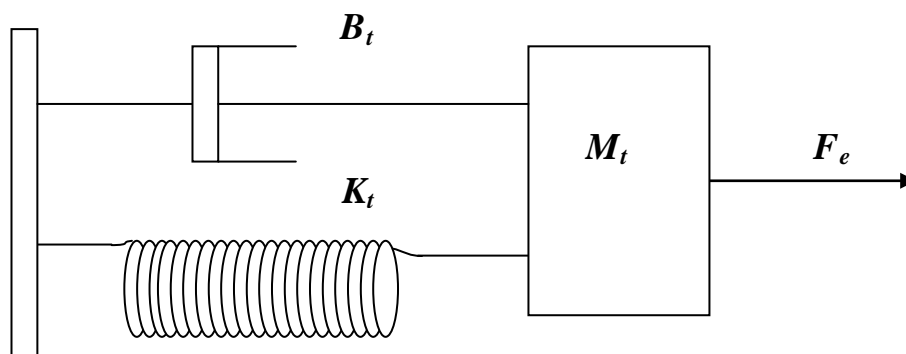


Figure (3.2) : Schématisation de l'impédance désirée au niveau de l'organe terminal.

La matrice d'inertie M_t permet d'assouplir la réponse du système vis à vis des contacts externes. Des valeurs importantes sont données à la matrice de raideur B_t quand il est nécessaire de dissiper de l'énergie cinétique et donc d'amortir la réponse. K_t la raideur, représente la précision avec laquelle on peut espérer satisfaire la commande en position de l'extrémité. Si on s'attend, par exemple, à rencontrer des contraintes physiques dans une certaine direction, la raideur dans cette direction doit être faible pour limiter les forces de contact. Inversement, dans les autres directions, l'utilisateur imposera une raideur importante pour assurer le positionnement correct de l'effecteur.

Différentes techniques ont été élaborées pour mettre en œuvre le principe de la commande en impédance, dont on peut citer :

- *La technique basée sur la position* : elle consiste à mesurer l'effort d'interaction. Cette mesure est utilisée pour modifier la position de consigne, compte tenu de l'impédance souhaitée, *figure(3.3)*.

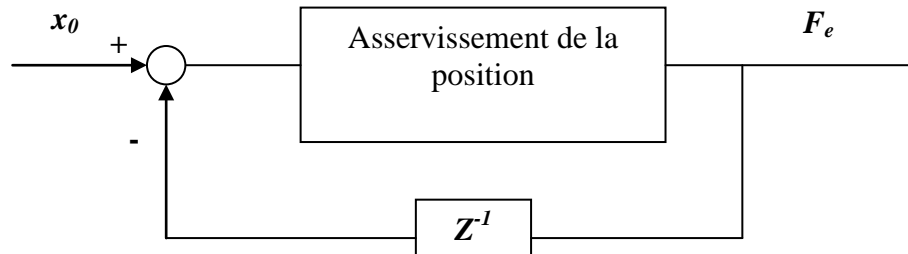


Figure (3.3) : Structure de la commande en impédance basée sur la position.

- *La technique basée sur l'effort* : elle utilise une mesure de la position et en déduit l'effort qu'il faudrait exercer sur l'environnement à partir duquel est calculé l'effort fourni aux actionneurs comme le montre la *figure (3.4)*.

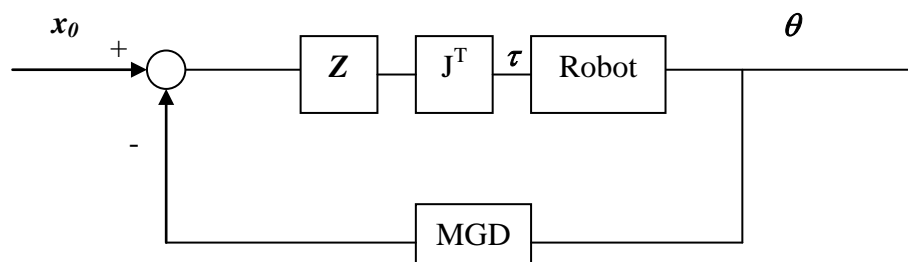


Figure (3.4) : Structure de la commande en impédance basée sur l'effort.

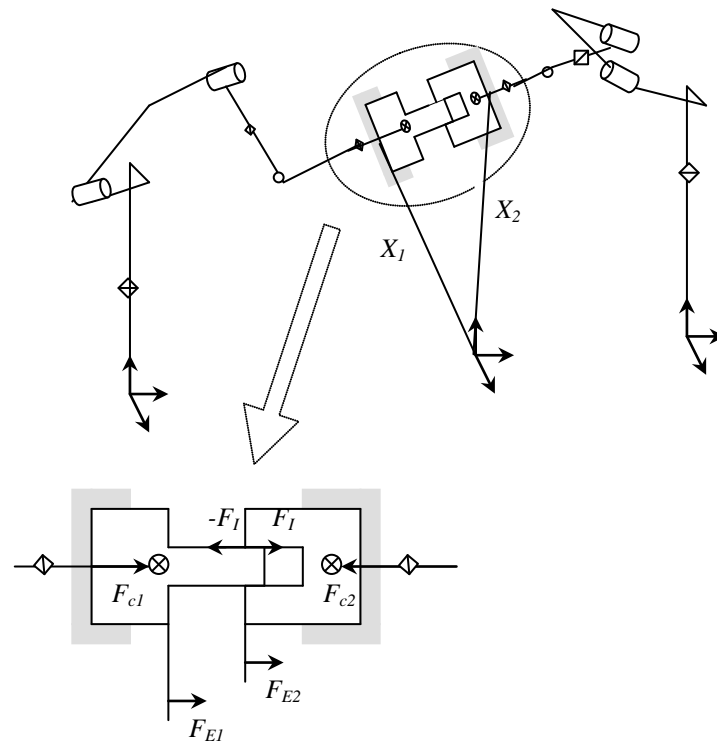
Des versions plus complexes utilisent aussi simultanément des mesures de position et d'effort pour adopter le couple appliqué [Spon 88] [Hsia 91]. Une de ces versions est la technique appelée "computed torque", dont la loi de commande est basée sur l'utilisation du modèle dynamique complet du robot manipulateur [Hoga 85] [Bena 97] [Meng 91]. L'impédance désirée est implémentée dans le modèle dynamique par des transformations mathématiques, ainsi le couple appliqué τ est calculé directement à partir du modèle modifié.

III.3) La Commande Coordonnée en Impédance :

Dans cette partie, nous allons présenter l'application de la commande en impédance, dans le cas de la commande coordonnée de deux robots manipulateurs coopérants exécutant une tâche d'assemblage de deux objets.

- Equations de base :

Pour l'application de la commande en Impédance dans la coopération multi-robots, considérons le système de deux robots manipulateurs à six degrés de libertés, présentés en *Figure. (3.5)*.



Figure(3.5) : Assemblage d'objets par deux robots manipulateurs.

$X_i \in \mathbb{R}^6$ est la position du bras i , ($i = 1, 2$).

$F_{ci} \in \mathbb{R}^6$ est la force appliquée sur l'organe terminal du bras i .

$F_I \in \mathbb{R}^6$ est la force appliquée par le 1^{er} objet sur le second objet, la force d'interaction.

$F_{Ei} \in \mathbb{R}^6$: est la force externe appliquée sur l'objet i .

La position de l'organe terminal du bras i est donnée en fonction des coordonnées articulaires $q_i \in \mathbb{R}^6$.

$$X_i = f_i(q_i). \quad (3.1)$$

Alors la relation de la vitesse et de l'accélération est décrite comme suit :

$$\begin{aligned} \dot{X} &= J_i \dot{q}_i \\ \ddot{X}_i &= J_i \ddot{q}_i + \dot{J}_i \dot{q}_i \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\ddot{q}_i = J_i^{-1} (\ddot{X}_i - \dot{J}_i \dot{q}_i) \quad (3.3).$$

Avec :

$$J_i = \frac{\partial f(q_i)}{\partial q_i}, \text{ la matrice jacobienne du robot } i.$$

On rappelle que l'équation de mouvement du bras i , est décrite en fonction des coordonnées articulaires comme suit (Voir *paragraphe (II.3)*) :

$$A_{qi}(q_i) \ddot{q}_i + h_{qi}(q_i) + D_{qi}(q_i) \dot{q}_i = \tau_i - J_i^T F_{ci} \dots \text{avec } \dots i = 1, 2. \quad (3.4)$$

tel que :

$\tau_i \in \mathbb{R}^6$ est le couple articulaire du bras i .

$A_{qi}(q_i)$ et $D_{qi}(q_i)$ sont la matrice d'inertie et la matrice des frottements visqueux, respectivement.

$h_{qi}(q_i)$: est le vecteur des termes nonlinéaires, exprimant la force centrifuge, de Coriolis et la force de gravité.

L'équation (3.4) peut être représentée en *coordonnées cartésiennes*, en remplaçant l'équation (3.3) dans l'équation (3.4) et en multipliant les deux membres de l'équation par J_i^{-T} :

$$M_{ai} \ddot{X}_i + h_{ai} + D_{ai} \dot{X}_i = J_i^{-T} \tau_i - F_{ci} \quad (3.5)$$

Avec:

$$M_{ai} = J_i^{-T} A_{qi} J_i^{-1}$$

$$h_{ai} = J_i^{-T} h_{qi} - J_i^{-T} A_{qi} J_i^{-1} \dot{J}_i \dot{q}$$

$$D_{ai} = J_i^{-T} D_{qi} J_i^{-1}$$

D'autre part, l'équation de mouvement des objets est donnée par :

$$1^{\text{er}} \text{ objet : } M_{o1} \ddot{X}_1 + h_{o1} = F_{c1} - F_I + F_{E1} \quad (3.6)$$

$$2^{\text{ème}} \text{ objet : } M_{o2} \ddot{X}_2 + h_{o2} = F_{c2} + F_I + F_{E2} \quad (3.7)$$

Où, M_{oi} et h_{oi} sont respectivement, les matrices d'inertie et le vecteur exprimant les termes non linéaires de l'objet i .

L'équation globale du mouvement du système est donnée par l'équation suivante, déduite des équations (3.5) à (3.7) :

$$M \begin{bmatrix} \ddot{X}_1 \\ \ddot{X}_2 \end{bmatrix} + h + D \begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \end{bmatrix} = J^{-T} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -F_I + F_E \\ F_I + F_E \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

où:

$$M = \text{diag}(M_1, M_2), \quad \text{avec } M_i = M_{ai} + M_{oi}.$$

$$h = [h_1^T \ h_2^T]^T, \quad \text{avec } h_i = h_{ai} + h_{oi}.$$

$$D = \text{diag}(D_{a1}, D_{a2}).$$

$$J = \text{diag}(J_1, J_2).$$

Dans la tâche d'assemblage ou de transport d'objet, il est nécessaire de commander non seulement la position relative des effecteurs mais de plus le mouvement absolu de tout le système. Un premier vecteur X_{Rd} définit les positions et orientations relatives des deux points terminaux (deux effecteurs). Dans le cas du transport d'objet cette position relative doit être maintenue constante pendant le déplacement de l'objet, alors que dans le cas de l'assemblage cette position relative doit tendre vers zéro pour assurer l'insertion des deux pièces à assembler. Un deuxième vecteur X_{Ad} définit la trajectoire absolue du système total. La position absolue du système total est définie comme étant la valeur moyenne de la position des deux effecteurs [Dauc 90].

- **L'Impédance Relative :**

Nous pouvons exprimer le mouvement relatif désiré des deux organes terminaux en utilisant une commande en *Impédance relative* qui relie la force interne d'interaction des deux effecteurs à l'erreur de la position relative de ces derniers, selon la relation suivante [Naga 95] [Kosu 94]:

$$M_{Rd} \ddot{X}_R + B_{Rd} \dot{X}_{Rc} + K_{Rd} X_{Rc} = F_I \quad (3.9)$$

$$X_R = X_2 - X_1 \quad (3.10)$$

$$X_{Rc} = X_R - X_{Rd} \quad (3.11)$$

X_R est la position relative entre les deux organes terminaux.

X_{Rc} est l'erreur de la position relative, et X_{Rd} est la position relative désirée.

M_{Rd} , B_{Rd} et K_{Rd} sont la matrice d'inertie désirée, d'amortissement désiré et de raideur désirée, respectivement, correspondant aux paramètres d'impédance du mouvement relatif.

L'application de la commande en impédance relative sur le modèle des robots manipulateurs de l'équation (3.8), nous donne une force articulaire exprimée comme suit :

$$\begin{aligned} \left[-\frac{I}{M_1} \quad \frac{I}{M_2} \right] F = \frac{I}{M_{Rd}} \left(F_I - B_{Rd} \dot{X}_{Rd} - K_{Rd} X_{Rd} \right) - \left(\frac{I}{M_1} + \frac{I}{M_2} \right) F_I + \frac{F_{E1}}{M_1} + \frac{F_{E2}}{M_2} \\ - \frac{D_1}{M_1} \dot{X}_1 + \frac{D_2}{M_2} \dot{X}_2 - \frac{h_1}{M_1} + \frac{h_2}{M_2} \end{aligned} \quad (3.12)$$

$$F = J^T \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix}$$

Cette Force articulaire $F \in \mathbb{R}^{12}$, ne peut être déterminée uniquement par l'équation (3.12), car il existe une redondance dans le mouvement.

Lorsque le nombre de composantes utilisées pour spécifier la tâche est inférieur au nombre de degrés de liberté du robot, il y a redondance de celui-ci vis-à-vis de la tâche et donc une infinité de solution pour la réaliser [Khal 88]. Dans notre cas, nous avons $F \in \mathbb{R}^{12}$, alors que $X_R \in \mathbb{R}^6$.

- **L'Impédance Absolue :**

Pour commander la position absolue de tout le système, nous avons exprimé le mouvement absolu désiré, en utilisant une commande en impédance absolue, qui relie la force externe totale du système à l'erreur de la position absolue, selon la relation suivante :

$$M_{Ad} \ddot{X}_A + B_{Ad} \dot{X}_{Ac} + K_{Ad} X_{Ac} = F_E \quad (3.13)$$

$$X_A = \frac{X_1 + X_2}{2} \quad (3.14)$$

$$X_{Ac} = X_A - X_{Ad} \quad (3.15)$$

$$F_E = F_{E1} + F_{E2} . \quad (3.16)$$

avec :

X_A : est la position absolue.

X_{Ad} : est la position absolue désirée.

X_{Ac} : est l'erreur de la position absolue.

M_{Ad} , B_{Ad} et K_{Ad} sont la matrice d'inertie désirée, d'amortissement désiré et de raideur désirée du mouvement absolu, respectivement.

F_E est la force externe totale.

- **Impédance Relative et Absolue :**

Les impédances désirées du mouvement relatif et absolu données par les équations (3.9) et (3.13) respectivement, peuvent s'écrire sous la forme matricielle suivante :

$$M_d \begin{bmatrix} \ddot{X}_R \\ \ddot{X}_A \end{bmatrix} + B_d \begin{bmatrix} \dot{X}_{Rc} \\ \dot{X}_{Ac} \end{bmatrix} + K_d \begin{bmatrix} X_{Rc} \\ X_{Ac} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_I \\ F_E \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

où :

$$M_d = \text{diag} (M_{Rd}, M_{Ad});$$

$$B_d = \text{diag} (B_{Rd}, B_{Ad});$$

$$K_d = \text{diag} (K_{Rd}, K_{Ad});$$

Pour obtenir la loi de commande qui nous permet de commander la position relative et absolue des deux bras manipulateurs, nous avons besoin de la relation entre les accélérations. Les accélérations du mouvement relatif et du mouvement absolu sont les dérivées secondes des équations (3.10) et (3.14), elles sont exprimées comme suit :

$$\ddot{X}_R = \ddot{X}_1 - \ddot{X}_2 \quad (3.18)$$

$$\ddot{X}_A = \frac{\ddot{X}_1 + \ddot{X}_2}{2} \quad (3.19)$$

La relation entre les accélérations est alors formulée, comme suit :

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_R \\ \ddot{x}_A \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

où:

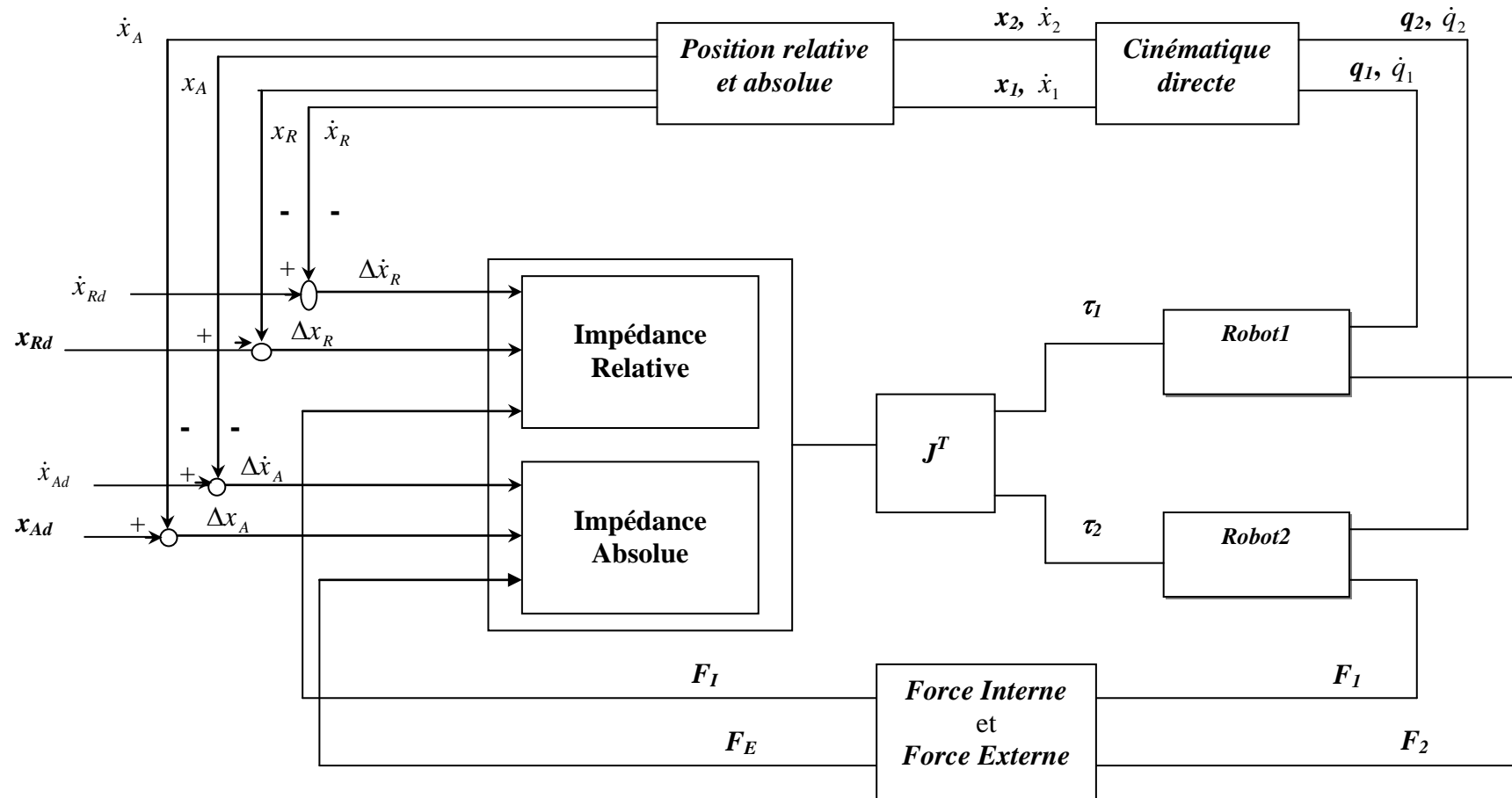
$$C = \begin{bmatrix} -I_6 & I_6 \\ \frac{1}{2}I_6 & \frac{1}{2}I_6 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

I_6 est la matrice Identité 6×6 .

En se basant sur les équations précédentes, la commande coordonnée est dérivée des équations (3.8) et (3.17) et (3.20), comme suit :

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = J^T \left[MC^{-1} M_d^{-1} \left\{ \begin{bmatrix} F_I \\ F_E \end{bmatrix} - B_d \begin{bmatrix} \dot{X}_{Rc} \\ \dot{X}_{Ac} \end{bmatrix} - K_d \begin{bmatrix} X_{Rc} \\ X_{Ac} \end{bmatrix} \right\} + h + D \begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -F_I + F_E \\ F_I + F_E \end{bmatrix} \right] \quad (3.22)$$

Cette loi de commande permet de réaliser le mouvement relatif et absolu des deux robots manipulateurs tenant chacun un objet. Le schéma de commande est représenté en *figure (3.6)*.



Figure(3.6) :Commande en Impédance coordonnée de deux robots manipulateurs

Cependant, cette commande ne permet pas de commander explicitement la force d'interaction. En effet, la commande en Impédance, dans le cas général, telle qu'elle a été proposée par Hogan [Hoga 85], consiste à mesurer l'effort d'interaction et à utiliser cette mesure pour modifier la position de consigne, compte tenu de l'impédance souhaitée. Mais la force d'interaction n'est pas asservie à une force de consigne.

Dans le cas de la commande d'un seul bras manipulateur, plusieurs méthodes ont été proposées pour combiner la commande en impédance et la commande en force pour tirer profit des avantages de chacune des deux commandes [lee 91] [Surd 96] et [Chan 95, 96] [Boun 99]. L'idée maîtresse de cette combinaison, est qu'en modélisant le contact du robot manipulateur avec l'environnement par une impédance, une variation de l'effort se traduit par un déplacement, en corrigeant une consigne initiale de position. La position est en fait asservie à suivre une consigne que rectifie automatiquement l'asservissement de l'effort, pour qu'il y ait contact dans les conditions voulues.

Dans notre cas, nous avons choisi la méthode de Chan [Chan 96], pour l'élaboration de notre commande en impédance coordonnée décrite précédemment. Avant cela, nous présentons d'abord la commande en impédance généralisée appliquée dans le cas d'un seul robot manipulateur.

III.4) La commande coordonnée en Impédance généralisée :

III.4.1) La commande en Impédance Généralisée :

Nous rappelons, que la commande originelle de Hogan, exprime la variation de la position de l'organe terminal en fonction de la force d'interaction et de l'impédance souhaitée, comme suit :

$$M_t \ddot{e}_p + B_t \dot{e}_p + K_t e_p = F \quad (3.23)$$

$$e_p = X - X_d.$$

X : La position de l'organe terminal.

X_d : Position désirée de l'organe terminal.

F : La force d'interaction.

Où, M_t , B_t et K_t sont respectivement, les matrices d'inertie, d'amortissement et de raideur de l'impédance désirée.

Cette impédance originelle a été étendue et généralisée [Chan 96], pour inclure la possibilité d'application d'une consigne de référence pour la force d'interaction. L'impédance généralisée est choisie comme une fonction de second ordre, reliant l'erreur en mouvement à l'erreur en force. Elle est donnée comme suit :

$$M_t \ddot{e}_p + B_t \dot{e}_p + K_t e_p = K_f e_f \quad (3.24)$$

$e_f = F - F_d$, est l'erreur en force.

F_d : La force d'interaction désirée.

K_f est une matrice de gain en force, diagonale définie positive. Lorsque $K_f = I_n$ la matrice *Identité*, et la force désirée est $F_d = 0$, l'impédance généralisée devient l'impédance originelle de Hogan [Hoga 85]. La force de consigne désirée F_d , est introduite de façon à ce que la force d'interaction puisse être directement commandée. Ainsi, la Force est commandée et asservie à une force de consigne.

III.4.2) La commande coordonnée en Impédance Généralisée :

Dans notre travail, nous avons choisi d'appliquer la méthode de l'impédance généralisée sur la commande coordonnée décrite précédemment. Dans ce cas, les équations de l'impédance du mouvement relatif et du mouvement absolu s'écrivent, comme suit :

$$M_{Rd} \ddot{X}_R + B_{Rd} \dot{X}_{Rc} + K_{Rd} X_{Rc} = K_{fI} \Delta F_I \quad (3.25)$$

$$M_{Ad} \ddot{X}_A + B_{Ad} \dot{X}_{Ac} + K_{Ad} X_{Ac} = K_{fE} \Delta F_E \quad (3.26)$$

avec:

$$\Delta F_I = F_I - F_{Id}$$

$$\Delta F_E = F_E - F_{Ed}$$

F_{Id} et F_{Ed} sont respectivement, la force interne désirée et la force externe désirée.

K_{fI} , K_{fE} sont les gains respectifs de la force interne et la force externe.

Remarque:

La commande ou l'asservissement de la force externe n'est pas nécessaire, du moins dans notre cas de tâche d'insertion. Pour cela, nous fixons $K_{fE} = I$ et $F_{Ed} = 0$. L'équation (3.26) devient la commande en impédance absolue définie en (3.13).

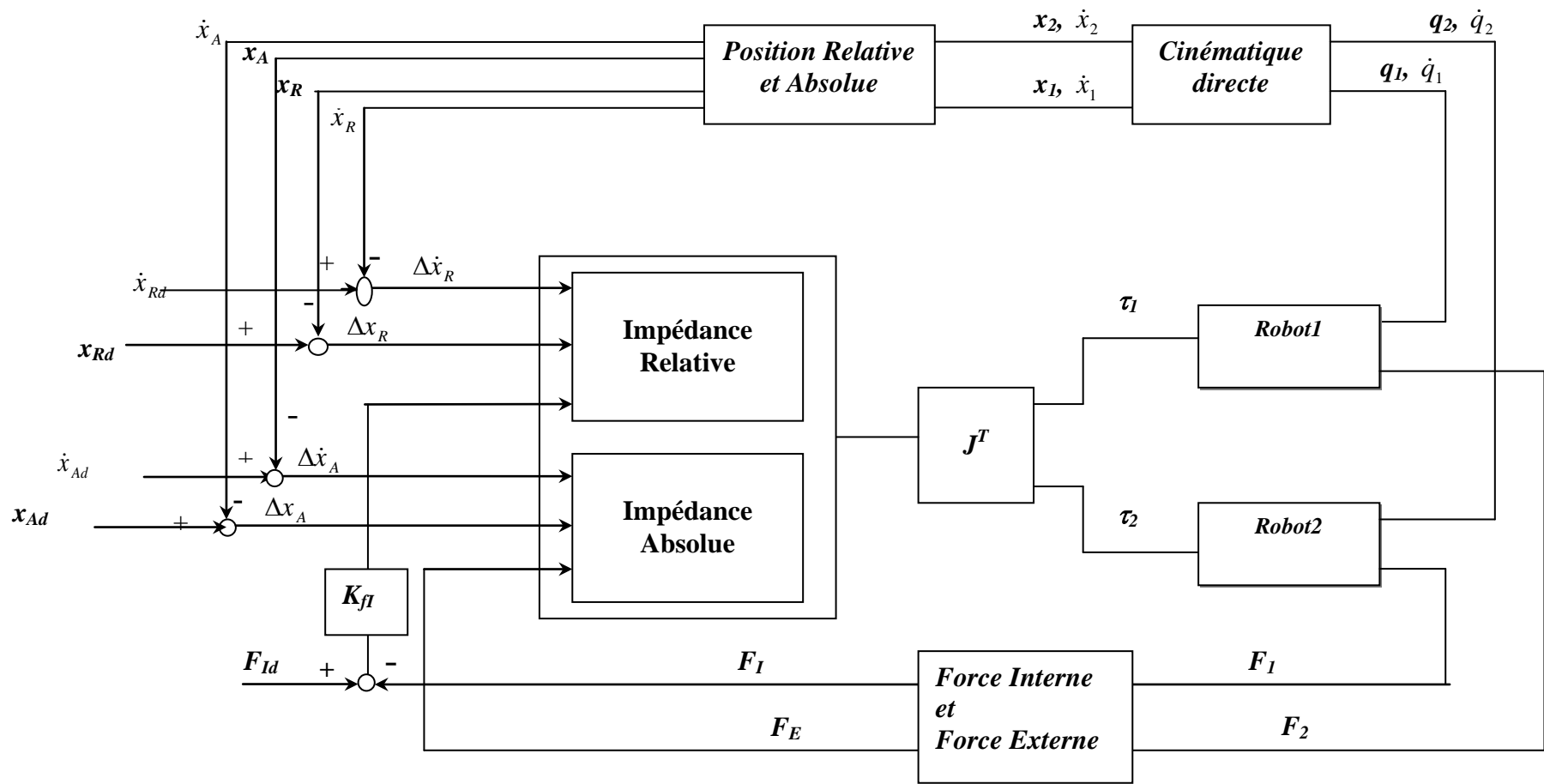
L'impédance totale du mouvement relatif et du mouvement absolu peut alors s'écrire comme suit :

$$M_d \begin{bmatrix} \ddot{X}_R \\ \ddot{X}_A \end{bmatrix} + B_d \begin{bmatrix} \dot{X}_{Rc} \\ \dot{X}_{Ac} \end{bmatrix} + K_d \begin{bmatrix} X_{Rc} \\ X_{Ac} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{fl} \Delta F_I \\ F_E \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

La loi de commande permettant d'assurer l'impédance relative et absolue généralisée des robots manipulateurs tenant deux objets (équation (3.8)), est donnée comme suit :

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = J^T \left[MC^{-1} M_d^{-1} \left\{ \begin{bmatrix} K_{fl} \Delta F_I \\ F_E \end{bmatrix} - B_d \begin{bmatrix} \dot{X}_{Rc} \\ \dot{X}_{Ac} \end{bmatrix} - K_d \begin{bmatrix} X_{Rc} \\ X_{Ac} \end{bmatrix} \right\} + h + D \begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -F_I + F_E \\ F_I + F_E \end{bmatrix} \right] \quad (3.28)$$

Ainsi, nous arrivons à commander non seulement la position relative et absolue des deux bras manipulateurs, mais aussi la force d'interaction des deux bras en contact et contrôler éventuellement la force externe appliquée par un environnement extérieur [Derr 03]. Le schéma bloc de la commande peut être représenté, comme montré en *Figure(3.7)*.



Figure(3.7) : Commande Coordonnée en Impédance Généralisée de deux robots manipulateurs

III.5) Stabilité de la commande en impédance:

La stabilité de la boucle fermée du système total, lorsque les pièces entrent en contact, dépend des paramètres d'impédance et de la dynamique de contact de l'environnement (dynamique des pièces). Il est important de spécifier l'impédance de manière à ce que, lorsqu'elle est combinée avec la dynamique des pièces, la stabilité du système en boucle fermée soit vérifiée et que la réponse en force soit correctement obtenue.

Dans le cas de contact avec un environnement de forte raideur (qui est l'environnement le plus déstabilisant [Hoga 85]), La stabilité est assurée pour chaque ensemble de paramètre d'impédance positif, c'est à dire, M_d , B_d et K_d des matrices symétriques définies positives [Hoga 85] [Boni 93]. Toutefois, les conditions de stabilité de contact imposent certaines limites sur les paramètres d'impédance.

Supposons que dans l'espace de tâche, l'environnement soit modélisé comme suit (Voir Annexe C) [Hoga 85] [Kaze 86] [Bert 92].

$$M_e \ddot{X}_R + B_e \dot{X}_R + K_e X_R = -F_I \quad (3.29)$$

Où, M_e , B_e et K_e sont des matrices symétriques définies positives représentant respectivement, la matrice d'inertie, d'amortissement et de raideur de l'environnement (pièce à assembler).

Remarque:

L'environnement dans ce cas d'assemblage est chaque objet à assembler par rapport à l'autre, c'est à dire que l'environnement du $Robot_1$ est $l'objet_2$ et l'environnement du $Robot_2$ est $l'objet_1$.

Le comportement dynamique de tout le système peut être écrit à partir de l'équation (3.25) et (3.29), comme suit :

$$(M_{Rd} + K_{fl} M_e) \ddot{X}_R + (B_{Rd} + K_{fl} B_e) \dot{X}_R + (K_{Rd} + K_{fl} K_e) X_R = B_{Rd} \dot{X}_{Rd} + K_{Rd} X_{Rd} - K_{fl} F_{Id} \quad \dots(3.30)$$

Cette équation est asymptotiquement stable, si M_{Rd} , B_{Rd} , K_{Rd} et K_{fl} sont choisies comme des matrices diagonales définies positives [Kaze 86] [Hoga 85].

Un certain degré de compromis entre la commande en position et la commande en force peut apparaître, par rapport aux valeurs relatives aux deux ensembles d'impédance $\{M_{Rd}, B_{Rd}, K_{Rd}\}$ et $\{K_{fl}\}$. En effet, en espace libre, la force de contact désirée est nulle $F_{Id}=0$; La partie droite de l'équation de l'impédance relative (3.25) est égale à zéro ça devient une commande en position. Dans le cas d'un contact rigide, la partie gauche de l'équation (3.25) est égale à zéro et ça se réduit à une commande en force. Lorsque la tâche requiert une exécution simultanée de poursuite en position et en force, un compromis entre la commande en position et la commande en force prend place. La sélection des paramètres M_{Rd} , B_{Rd} , K_{Rd} et K_{fl} peut se faire alors en deux étapes, en espace libre et en espace contraint.

Des équations (3.29) et (3.30), la réponse statique du système de commande lorsque $\ddot{X}_{Rd} = 0$ et $\dot{X}_{Rd} = 0$ peut être calculée comme suit :

$$K_e X_R = -F_e \quad (3.31)$$

$$(K_{Rd} + K_{fl} K_e) X_R = K_{Rd} X_{Rd} - K_{fl} F_{Id}. \quad (3.32)$$

Des deux équations (3.31) et (3.32), nous avons :

$$K_{Rd} (X_R - X_{Rd}) = K_{fl} (F_e - F_{Id}). \quad (3.33)$$

Et en multipliant les deux cotés de l'équation (3.32) par K_{fl}^{-1} , nous obtenons:

$$e_{pss} = X_R - X_{Rd} = (K_e + K_{fl}^{-1} K_{Rd})^{-1} (K_e X_{Rd} - F_{Id}). \quad (3.34)$$

$$e_{fss} = K_{fl}^{-1} K_{Rd} (e_{pss}). \quad (3.35)$$

Où e_{pss} et e_{fss} sont les erreurs statiques en position et en force, respectivement.

- Lorsque la raideur de l'environnement est faible, K_e est de petite valeur, la commande en position est favorisée, $K_{Rd} \gg K_{fl}$. Sous cette condition on a :

$$e_{pss} = \frac{K_{fl}}{K_{Rd}} (K_e X_{Rd} - F_{Id})$$

$$e_{fss} = K_e X_{Rd} - F_{Id}.$$

L'erreur statique de la position est faible, c'est à dire que le robot manipulateur suit de très près la trajectoire.

- Lorsque l'environnement est de forte raideur, K_e est de grande valeur, la commande en force doit être favorisée, dans ce cas $K_{Rd} \ll K_{fl}$ est choisie, d'où on a:

$$e_{pss} = X_{Rd} - K_e^{-1} F_{Id}$$

$$e_{pss} = \frac{K_{Rd}}{K_{fl}} (X_{Rd} - K_e^{-1} F_{Id})$$

Dans ce cas l'erreur en force est faible, c'est à dire que la force d'interaction est asservie.

Dans le cas, où la tâche nécessiterait une commutation entre la commande en position et la commande en force, comme dans notre cas, le degré du compromis dépend du besoin de la tâche (son exigence). Le rapport des valeurs K_{fl} et K_{Rd} doit être choisi de manière à ce que des forces d'interaction excessives, qui puissent nuire au système, ne doivent pas être générées, tant que la poursuite en position est de performance acceptable.

Le contact de transition (passage du non-contact au contact) peut être considéré comme stable s'il n'y pas de perte de contact après interaction c.à.d, que le contact soit maintenu sans oscillation (sans rebondissement) [Sur 96].

Les paramètres d'amortissements jouent un rôle extrêmement important pour la stabilité du système. Lorsqu'une grande compliance est requise, les conditions de stabilité nécessitent un comportement sur-amorti de l'impédance, pour assurer un contact stable, surtout lorsque la raideur de l'environnement est incertaine.

Au moment du contact avec un environnement de grande raideur le mouvement de l'organe terminal est ralenti pendant un instant très court. Dans ce cas, la force d'accélération est réduite et peut être négligée. Par conséquent les composantes d'amortissement et de raideur ont une influence dominante sur la force de contact. Les

résultats de l'étude de stabilité de contact faite par *Surdilovic* [sur 96] [Surd 99], ont donné la condition suffisante suivante :

$$\xi_d \geq 0.5\sqrt{1+2K} - 1.$$

avec:

$$\xi_d = B_d / 2\sqrt{K_d M_d}.$$

$$K = K_e / K_d.$$

ξ_d : est le rapport d'amortissement.

K : est le rapport de raideur.

Le moment critique de la transition (pour un environnement de grande raideur) est l'instant qui suit immédiatement l'impact, au moment où la vitesse se réduit brusquement. C'est à cet instant précis que l'amortissement doit être élevé. Or, dans le cas de la commande en impédance, les paramètres d'amortissement et de raideur restent constants durant la commande. Cependant, une valeur relativement grande de l'amortissement, pendant toute la commande, réduit les performances de l'ensemble du système : le système devient lent et dans certains cas où le signal de la force est retardé, la force de contact peut être très élevée après l'impact, avec un dépassement relatif à la raideur de l'environnement, qui risque d'endommager le système.

Une solution à ce problème est de pousser encore l'étude pour élaborer une commande adaptative qui permet d'ajuster automatiquement les paramètres de l'impédance, permettant ainsi de commander le système avec une grande performance en espace libre et en espace contraint, tout en vérifiant la stabilité de contact quelle que soit la raideur de l'environnement.

Pour résoudre ce problème, différents travaux ont été élaborés. La majorité des approches utilise des méthodes de commande adaptative(génération de position de référence) [Sera 93] [Fiel 93] [Hsia 91, 95], les réseaux de neurones [Jung95] et la logique floue [Taro 96]. Bien que ces méthodes offrent une grande possibilité de rendre la commande en impédance indépendante de la structure de l'environnement et des paramètres du robot manipulateur, dans certains cas, ces méthodes sont plus ou moins complexes et font perdre la simplicité de la commande en impédance.

Surdilovic [Surd 99] a proposé une approche fiable et flexible pour l'adaptation des paramètres d'impédance, tout en gardant la simplicité de celle-ci. *Surdilovic* a utilisé la logique floue et cela en se basant sur l'expérience et la compréhension du comportement de la commande en impédance. La commande floue offre un caractère simple et efficace pour contrôler la situation critique pendant la transition de la force (le passage du non-contact au contact).

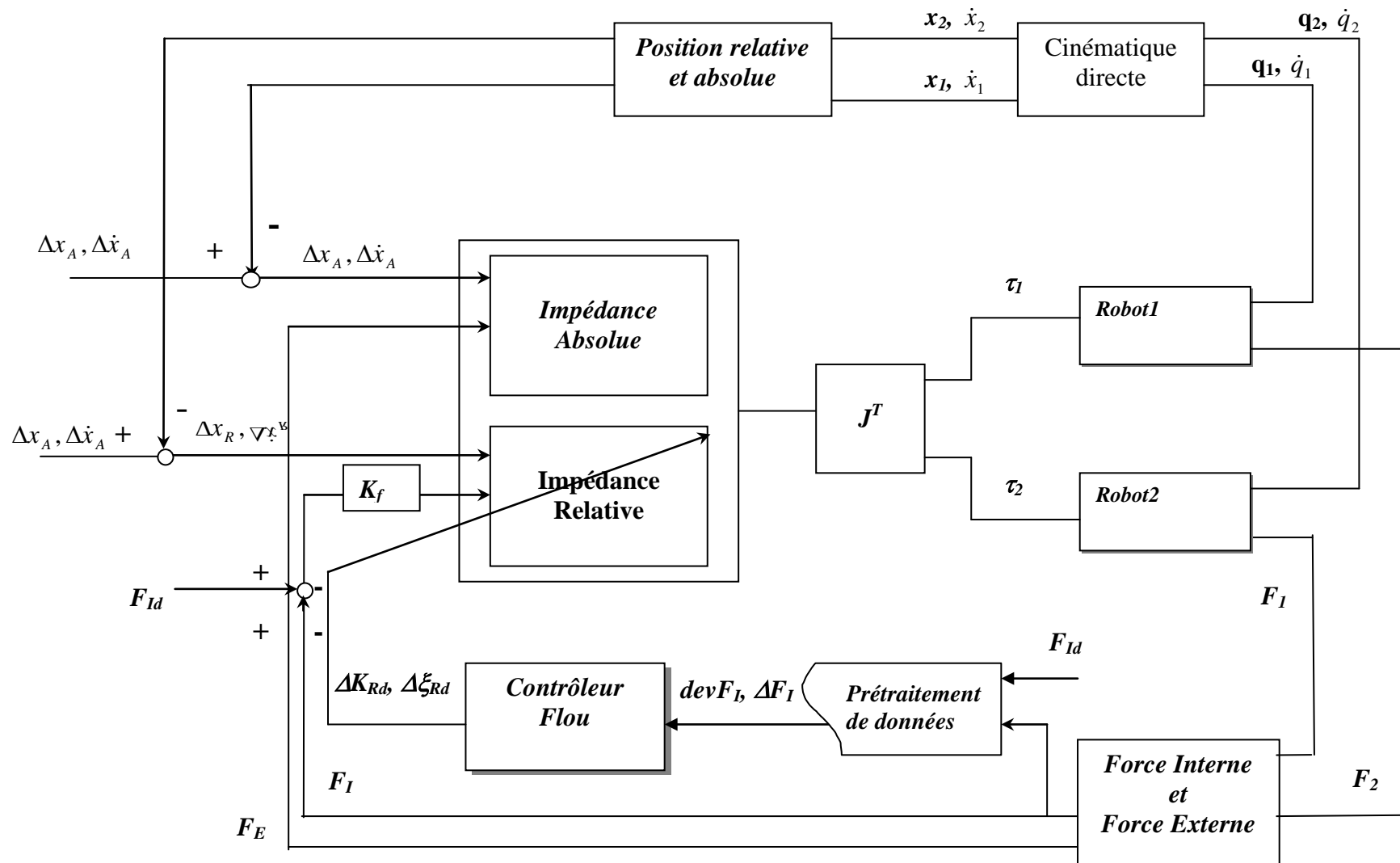
III.6) Adaptation des paramètres d'impédance en utilisant la logique floue :

L'utilisation de la logique floue (Annexe D), pour adapter les paramètres d'impédances B_{Rd} et K_{Rd} se justifie principalement, par les trois raisons suivantes :

- Accroître la stabilité de la phase critique de transition, du non-contact au contact.
- Améliorer les performances de la force de transition, c'est à dire, réduire les dépassements.
- Atteindre la force d'état stable désirée indépendamment de la structure de l'environnement (raideur et localisation).

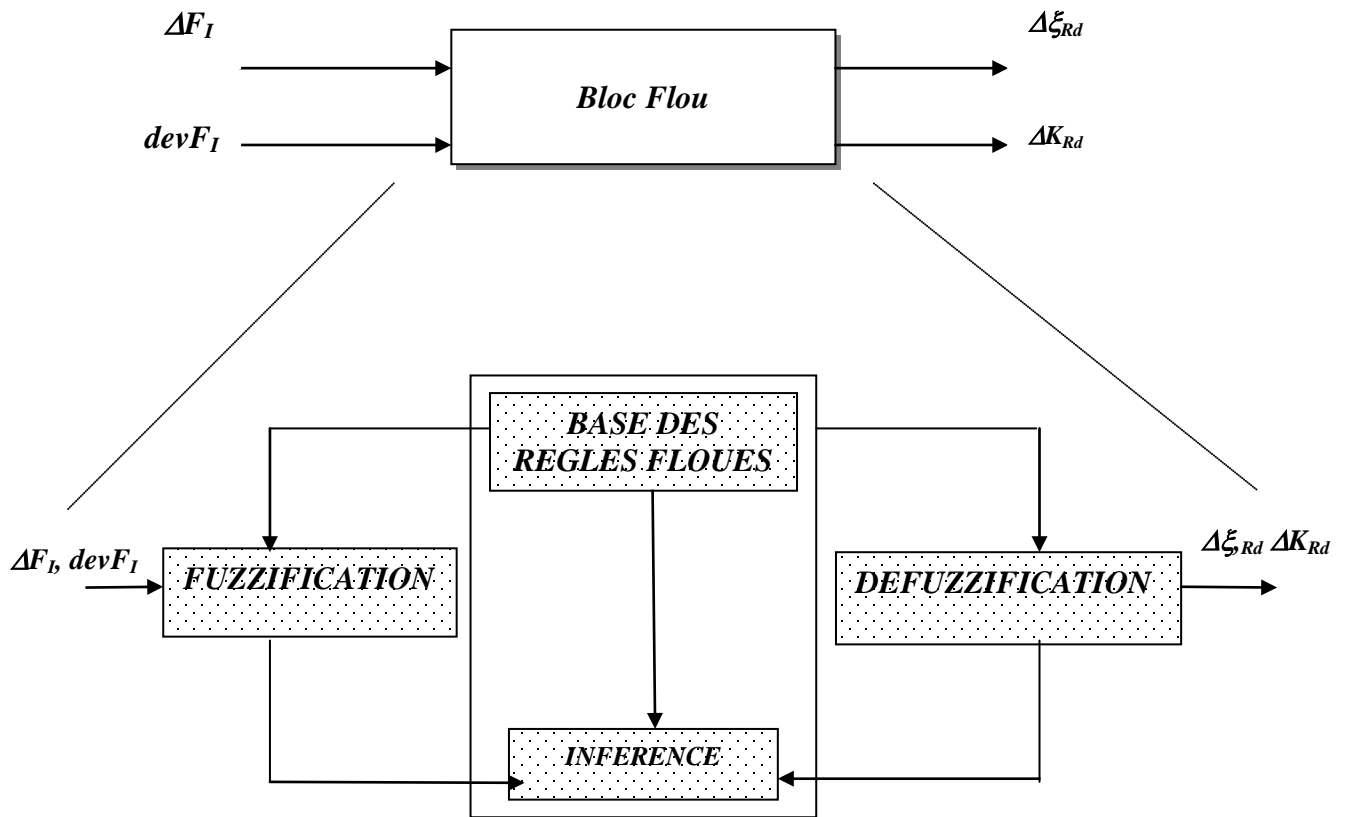
Le schéma de commande proposé est constitué de deux principaux blocs *Figure(3.8)*:

- La boucle d'impédance.
- Le mécanisme d'adaptation flou qui permet de modifier les paramètres d'impédances en fonction de la différence entre la force actuelle (mesurée) et la force désirée.



Figure(3.8) : Commande Coordonnée en Impédance Généralisée à paramètres adaptatifs par logique floue, de deux robots manipulateurs

III.6.1) Les entrées /sorties de l'adaptateur flou :



Figure(3.9):Schéma bloc de l'adaptateur flou.

Le mécanisme de l'adaptateur flou a deux entrées , Figure(3.9):

- La première, est l'erreur de la force de contact $devF = F_{Id} - F_I$, qui est la déviation entre la force de contact actuelle(mesurée) F_I et la force désirée F_{Id} . Cette entrée doit être multipliée par un gain de contact (fonction sign (F_I), par exemple), qui indiquerait lorsque le contact est atteint. Ainsi, en espace libre les paramètres d'impédances ne seront pas adaptés.
- La deuxième entrée du système flou est la variation de la force, c'est à dire le calcul de $\Delta F(k) = F_I(k) - F_I(k-1)$.

Les sorties du contrôleur flou sont : Les incréments des paramètres de raideur et d'amortissement ΔK_{Rd} et $\Delta \xi_{Rd}$, respectivement, qui permettent d'adapter les paramètres d'impédance du mouvement relatif.

• **Les Gains de Normalisation :**

Le domaine des variables d'entrées est normalisé dans un intervalle fermé [-1,1] par des gains de normalisation :

$$dev(F)^*(k) = G_{devF} \quad devF(k) = \frac{devF(k)}{devF_{max}}$$

$$\Delta F^*(k) = G_{\Delta F} \quad \Delta F(k) = \frac{\Delta F(k)}{\Delta F_{max}}$$

Où, $devF^*(k)$ et $\Delta F^*(k)$ sont les valeurs normalisées de l'erreur en force et de sa variation.

$devF_{max}$ et ΔF_{max} sont leurs valeurs maximales respectives.

G_{devF} et $G_{\Delta F}$ sont les gains de normalisation des entrées $devF$ et ΔF , respectivement.

De même pour les sorties du contrôleur flou, elles doivent être transformées du domaine normalisé au domaine original de commande :

$$\Delta K_{Rd}^*(k) = \frac{\Delta K_{Rd}(k)}{G_{\Delta K_{Rd}}} = \frac{\Delta K_{Rd}(k)}{\Delta K_{Rd max}} \quad \text{et} \quad \Delta \xi_{Rd}^*(k) = \frac{\Delta \xi_{Rd}(k)}{G_{\Delta \xi}} = \frac{\Delta \xi_{Rd}(k)}{\Delta \xi_{Rd max}}$$

$$\Rightarrow \Delta K_{Rd}(k) = K_{Rd}^*(k) G_{\Delta K} \quad , \quad \Delta \xi_{Rd}(k) = \Delta \xi_{Rd}^*(k) G_{\Delta \xi}$$

avec:

$G_{\Delta K}$ et $G_{\Delta \xi}$ les gains de normalisation des sorties $K_{Rd}^*(k)$ et $\Delta \xi_{Rd}^*(k)$, respectivement.

III.6.2) Structure de l'adaptateur flou :

Avant de fuzzifier les paramètres choisis, nous devons construire les sous-ensembles d'appartenance, c'est à dire choisir leur nombre, leur forme, les variables linguistiques associées et l'univers de discours correspondants à chaque variable.

Les variations totales de $devF_I^*(k)$ et $\Delta F_I^*(k)$ sont décomposées en 7 sous-ensembles flous correspondant aux variables linguistiques suivantes : négatif-grand (NG), négatif-moyen (NM), négatif-petit (NP), zéro (ZE), positif-petit (PP), positif-moyen (PM), positif-grand (PG).

• **Fonction d'Appartenance :**

La forme de la fonction d'appartenance associée aux entrées $devF_I^*(k)$ et $\Delta F_I^*(k)$ et aux sorties $\Delta K_{Rd}^*(k)$ et $\Delta \xi_{Rd}^*(k)$ est gaussienne, comme le montre la *Figure (3.10)* :

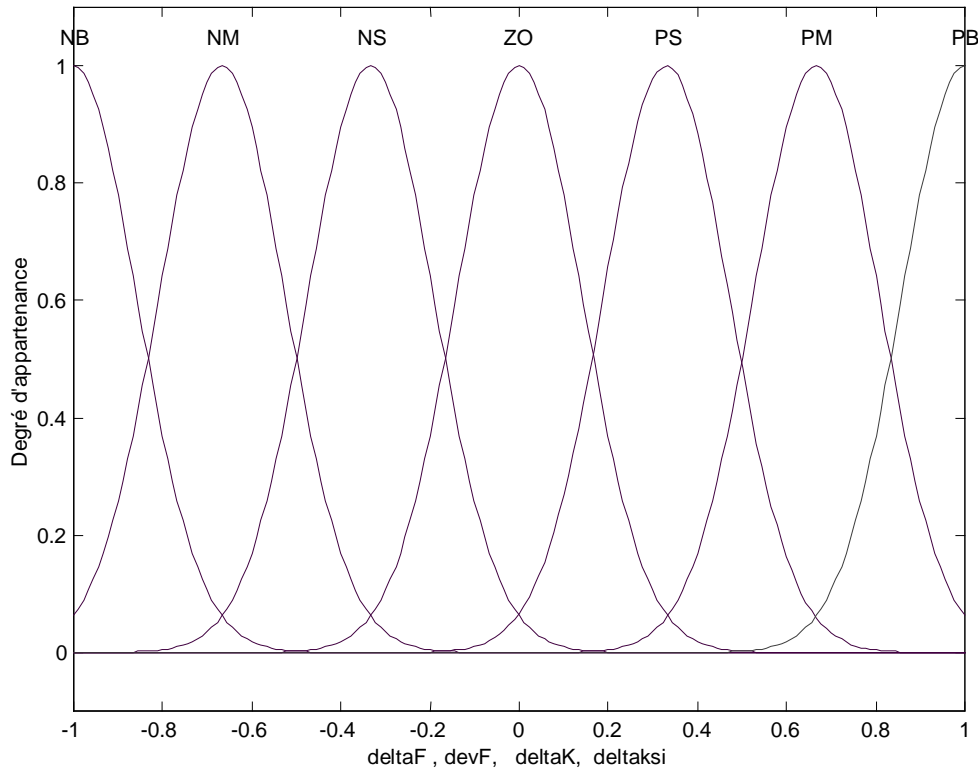


Figure (3.10) : Fonction d'appartenance à 7 classes.

• **La Base des Règles :**

La table d'inférences est établie à partir de l'observation expérimentale du système, dans notre cas nous avons utilisé la base des règles présentée dans [Surd 99] : La base des règles est complète, elle est constituée de 49 règles comme le montre le *Tableau (3.1)*. Pour chaque règle, nous avons deux décisions pour les sorties : ΔK_{Rd}^* et $\Delta \xi_{Rd}^*$.

La règle, de la première case, par exemple, est de la forme suivante :

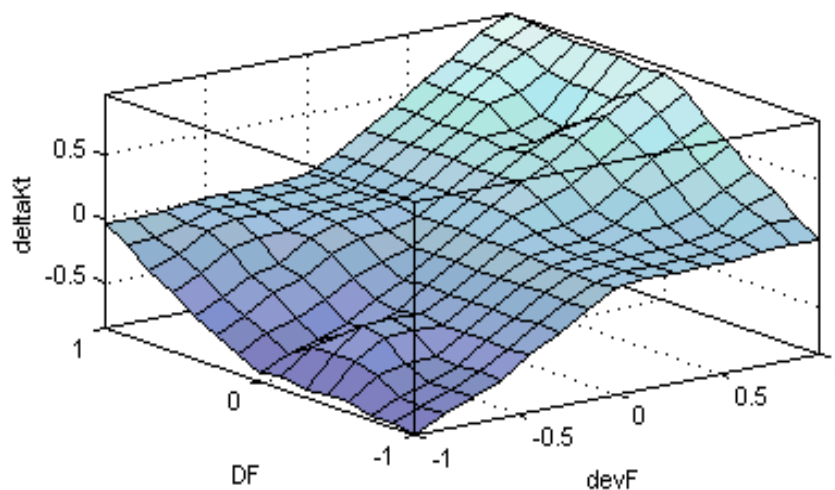
$$\text{Si } (devF_I(k) \text{ est NG } \text{ et } \Delta F_I(k) \text{ est NG }) \text{ alors } (\Delta K_{Rd} \text{ est NG et } \Delta \xi_{Rd} \text{ est NG})$$

$$\mu_{A_{11}} \qquad \qquad \qquad \mu_{A_{12}} \qquad \qquad \qquad \mu_{C_1} \qquad \qquad \qquad \mu_{D_1}$$

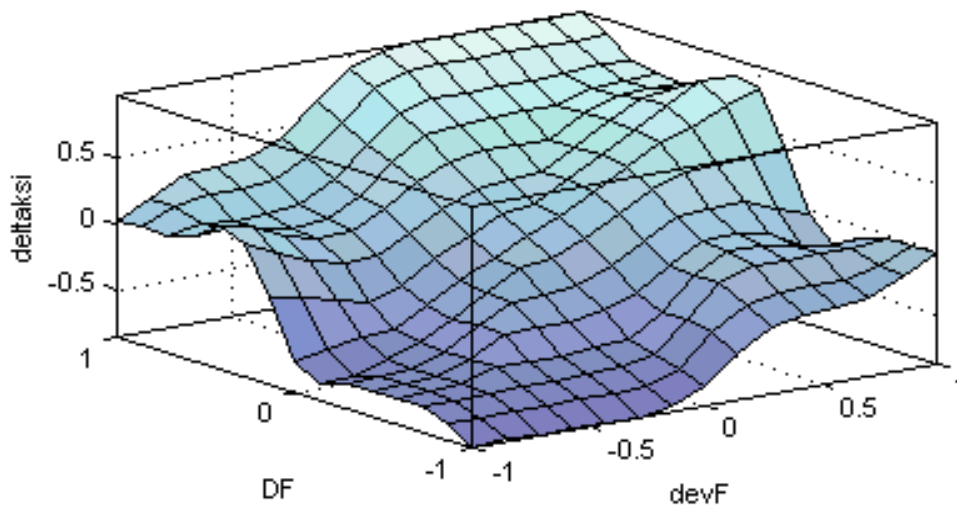
		$devF_I$						
		NG	NM	NP	ZO	PP	PM	PG
ΔF	ΔK_{Rd}	NG	NM	NP	ZO	PP	PM	PG
	$\Delta \xi_{Rd}$	NG	NM	NP	ZO	PP	PM	PG
	NG	NG	NM	NP	ZO	ZO	ZO	ZO
		NG	NG	NG	NG	NP	NP	ZO
	NM	NG	NM	NP	ZO	ZO	ZO	PP
		NM	NM	NM	NM	ZO	ZO	ZO
	NP	NG	NP	NP	ZO	ZO	PP	PM
		NM	NM	NP	NP	ZO	ZO	NP
ZO	NG	NM	NP	ZO	PP	PM	PG	
	NG	NM	NP	ZO	PP	PM	PG	
PP	NM	NP	ZO	ZO	PP	PP	PG	
	PP	ZO	ZO	PP	PP	PM	PM	
PM	NP	ZO	ZO	ZO	PP	PM	PG	
	ZO	ZO	ZO	PM	PM	PM	PM	
PG	ZO	ZO	ZO	ZO	PP	PM	PG	
	ZO	PP	PP	PG	PG	PG	PG	

Tableau (3.1) : Base des règles du contrôleur flou.

Les surfaces de commande du contrôleur flou pour les deux sorties ΔK^*_{Rd} et $\Delta \xi^*_{Rd}$ sont représentées par les graphes (en 3D) des Figures(3.11.a) et (3.11.b), respectivement.



Figure(3.11.a) : Les surfaces de commande du contrôleur flou:
de la sortie ΔK_{Rd}



Figure(3.11.b) :Les surfaces de commande du contrôleur flou:
de la sortie $\Delta\xi_{Rd}$.

• **L'Inférence :**

Pour l'inférence, la méthode de Mamdani (Max, Min) est utilisée [Babu 98] (Annexe D).

La conjonction des prémisses est réalisée par l'opération "Min", comme suit :

$$\begin{aligned} \alpha_i &= \mu_{A_{i1}}(devF^*(k)) \wedge \mu_{A_{i2}}(\Delta F^*(k)) \\ &= \text{Min}\{\mu_{A_{i1}}(devF^*(k)), \mu_{A_{i2}}(\Delta F^*(k))\} \end{aligned}$$

L'implication floue est réalisée par l'opération Min. Chaque règle i implique les deux décisions suivantes :

$$\begin{aligned} \mu_{C_i}(\eta) &= \alpha_i \wedge \mu_{C_i}(\eta), \\ \mu_{D_i}(\eta) &= \alpha_i \wedge \mu_{D_i}(\eta), \end{aligned}$$

C et D sont les décisions du contrôleur flou de fonction d'appartenance résultante respective, μ_C et μ_D . L'agrégation des règles est assurée par l'opération Max, comme suit:

$$\begin{aligned} \mu_C(\eta) &= \mu_{C1}(\eta) \vee \mu_{C2}(\eta) \dots \dots \vee \mu_{C49}(\eta) = [\alpha_1 \wedge \mu_{C1}(\eta)] \vee \dots \dots \vee [\alpha_{49} \wedge \mu_{C49}(\eta)]. \\ \mu_D(\eta) &= \mu_{D1}(\eta) \vee \mu_{D2}(\eta) \dots \dots \vee \mu_{D49}(\eta) = [\alpha_1 \wedge \mu_{D1}(\eta)] \vee \dots \dots \vee [\alpha_{49} \wedge \mu_{D49}(\eta)]. \end{aligned}$$

- **La Défuzzification :**

En utilisant la méthode de centre de gravité comme procédure de défuzzification (Annexe D), les sorties du contrôleur flou sont définies comme suit :

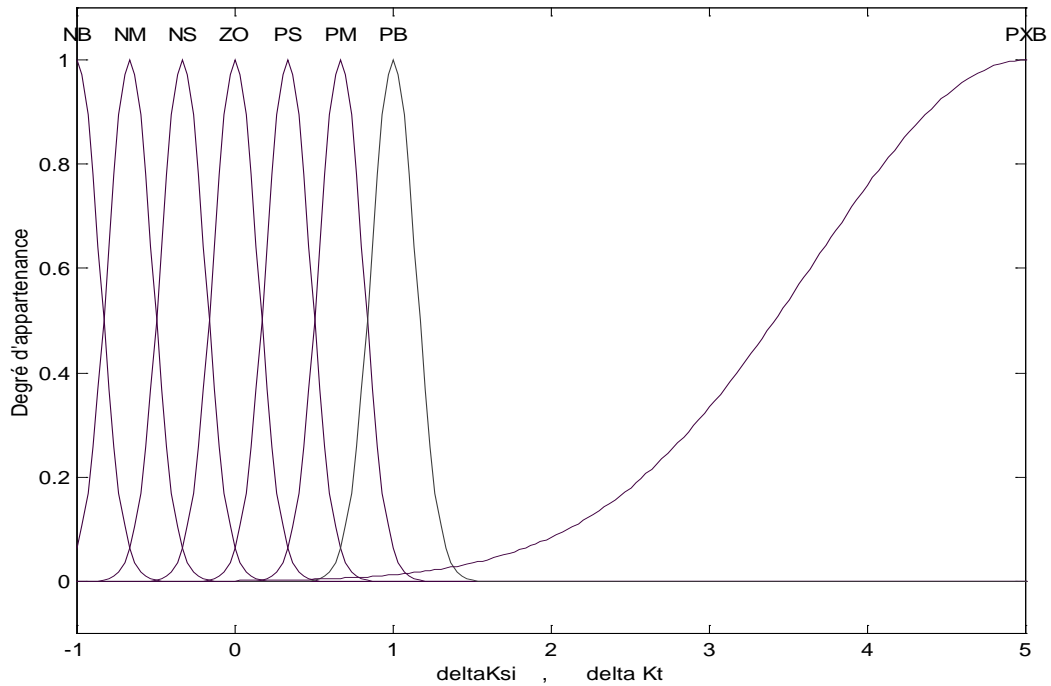
$$\Delta K_{Rd} = \frac{\int \mu_c(\eta) \eta d\eta}{\int \mu_c(\eta) d\eta}$$

$$\Delta \xi_{Rd} = \frac{\int \mu_D(\eta) \eta d\eta}{\int \mu_D(\eta) d\eta}$$

La stratégie d'adaptation floue présentée peut être améliorée. Il est extrêmement important d'empêcher la perte de contact durant l'étape de transition du non-contact au contact. Dans ce sens, l'instant critique est lorsque la vitesse se réduit à zéro impliquant le dégagement d'une poussée énergétique en avant, qui donne lieu à une croissance raide de la force de contact. Pour cela et à cet instant précis, un grand amortissement est nécessaire. Dans le cas de la commande en impédance classique, il aurait fallu utiliser une valeur élevée de l'amortissement depuis le début de la commande, vu que les paramètres d'impédance soient fixes tout au long de la commande, ce qui aurait détérioré les performances du système en Général [Surd 99].

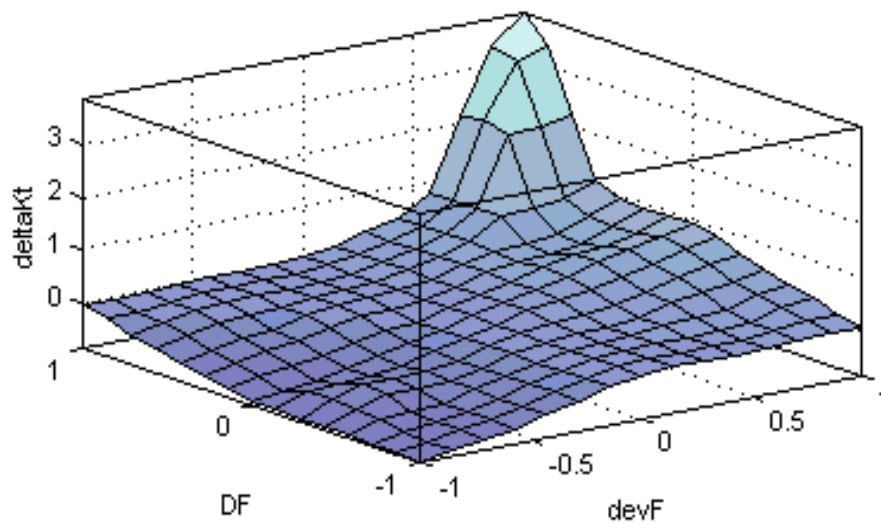
La commande en impédance adaptative nous permet de résoudre ce problème. En effet, l'utilisation de la logique floue pour adapter les paramètres d'impédance nous permet de modifier facilement les régions locales des surfaces de contrôle. Pour cela, il suffit de rajouter une autre variable linguistique PXG (Positif eXtra Grand) pour les deux variables de sorties du contrôleur flou [Surd 99]. Cette variable linguistique peut être définie par une fonction d'appartenance gaussienne de valeur moyenne égale à 5 par exemple, *Figure (3.12)*, permettant ainsi une adaptation des paramètres d'impédance, approximativement 5 fois plus élevées à l'instant de la situation critique. Cela est assuré par la règle suivante:

Si (devF_I(k) est PG et ΔF_I(k) est PG) alors (ΔK_{Rd} est PXG et Δξ_{Rd} est PXG)



Figure(3.12) : Fonction d'appartenance des sorties.

Les surfaces des règles de l'adaptateur flou, dans ce cas, sont représentées comme montré en *Figure(3.13.a)* et *(3.13.b)*. Des graphes présentés, nous pouvons dire que l'adaptation des paramètres est amenée à dépasser le domaine de normalisation lorsque les deux entrées du contrôleur atteignent des valeurs positives élevées, pendant que dans les autres régions des surfaces de contrôle l'adaptation normale des paramètres d'impédance est utilisée et est suffisante pour emmener le système à l'état stable désiré.



**Figure(3.13.a) : Les surfaces de commande du contrôleur flou:
de la sortie ΔK_{Rd}**

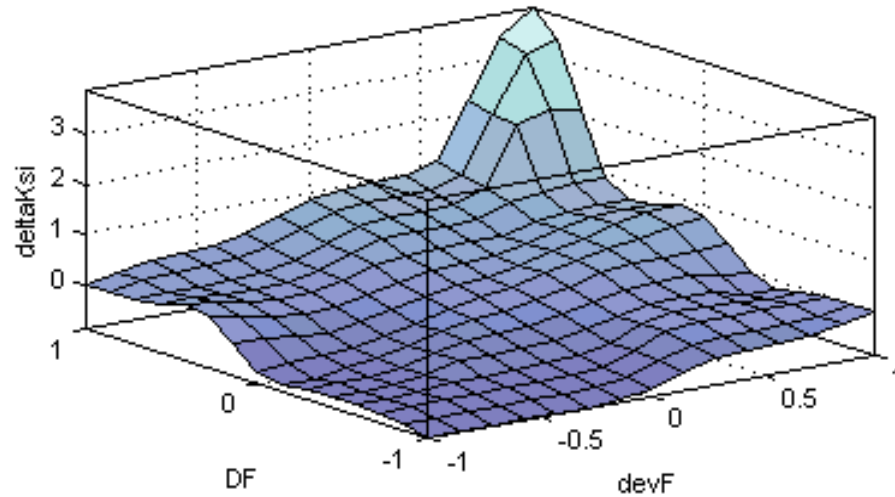


Figure (3.13.b) : La surface de commande du contrôleur flou de la sortie $\Delta\xi_{Rd}$.

La position des ensembles rajoutés (PXG) peuvent être ajustées en fonction de l'impédance désirée et de la raideur de l'environnement [Surd 99].

III.7) Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons présenté notre commande coordonnée de deux robots coopérants pour la tâche d'assemblage, basée sur la commande en impédance généralisée. Notre commande permet de commander non seulement la position relative des effecteurs et la position absolue du système total mais de plus commander la force d'interactions des deux effecteurs et contrôler éventuellement les forces externes produites par un environnement externe.

Pour assurer la stabilité de l'interaction des deux effecteurs (le passage du non-contact au contact), nous avons fait appel à la logique floue, comme outil d'adaptation des paramètres d'impédance et rendre notre commande coordonnée adaptative à n'importe quelle raideur de l'environnement.

Pour valider notre commande coordonnée, nous allons passer à la simulation et la présentation des résultats obtenus.

IV.1) Introduction :

Dans le but de tester la faisabilité de notre commande coordonnée en impédance généralisée et valider le schéma de commande présenté, nous avons procédé à une simulation par PC, en utilisant le logiciel Matlab 5.3.

Ce chapitre se divise en deux parties :

- Dans la première partie, nous avons simulé notre commande coordonnée en Impédance généralisée, présentée au chapitre précédent.
- Dans la deuxième partie, nous avons simulé la commande en Impédance généralisée coordonnée avec l'application d'un adaptateur flou, pour adapter les paramètres d'impédances et cela dans les deux cas, d'environnement de forte raideur et de faible raideur.

IV.2) Modèles dynamiques des robots manipulateurs simulés et des pièces à assembler:

IV.2.1) Modèles dynamiques des robots manipulateurs simulés

Pour l'évaluation des performances de la commande présentée, on considère le cas de deux robots manipulateurs à trois degrés de liberté dans le plan horizontal, représentés par la *figure(4.1)*. Chacun des deux robots manipulateurs comporte trois articulations rotoïdes. Le repère de référence Σ_0 est lié à la base du Robot₁.

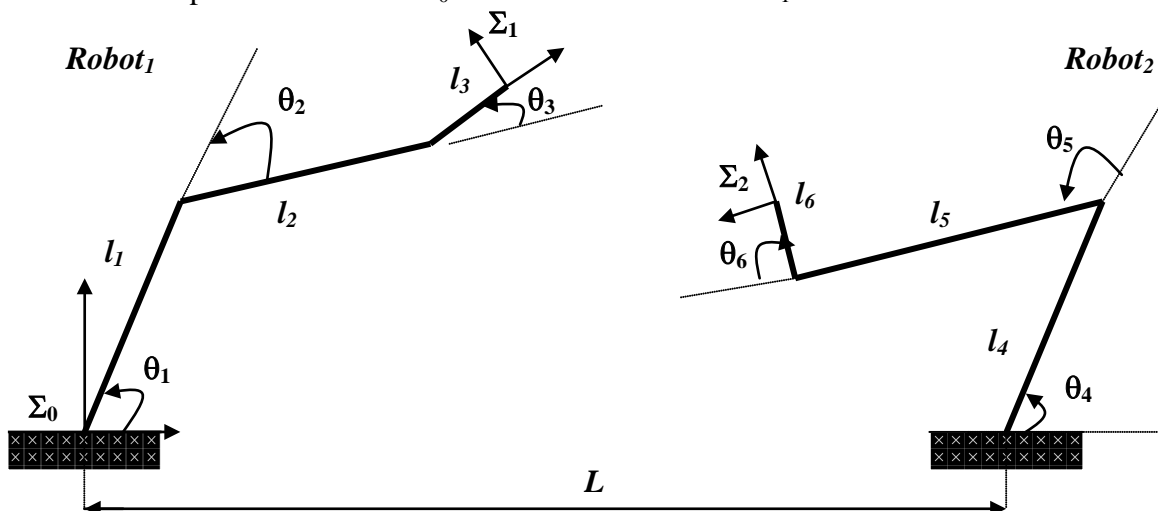


Figure (4.1) : Deux manipulateurs plans à trois articulations

Σ_0 : repère de référence.

Σ_i : repère lié à l'organe terminal i , $i=1,2$.

L : est la distance entre la base des deux robots manipulateurs.

l_1, l_2 et l_3 : Les longueurs des segments du Robot₁.

l_4, l_5 et l_6 : Les longueurs des segments du Robot₂.

Les deux robots manipulateurs sont supposés être identiques. Leur modèle dynamique est tout à fait semblable. Nous ne définissons, ici que le modèle dynamique du premier bras, le deuxième peut être déduit en remplaçant θ_k par θ_{k+3} , $k=1,2,3$.

L'équation dynamique du bras manipulateur (Robot₁), qui relie les couples τ^l appliqués aux actionneurs aux coordonnées articulaires θ^l , est donnée par l'équation suivante [Cari 90] :

$$\tau^l = M^l(\theta^l) \ddot{\theta}^l + D^l(\theta^l, \dot{\theta}^l) \quad (4.1)$$

$M^l(\theta^l)$: Matrice (3×3) d'inertie du manipulateur.

$D^l(\theta^l, \dot{\theta}^l)$: Vecteur (3×1) non linéaire, qui regroupe les forces de coriolis et centrifuges.

$$\tau^l = \begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{pmatrix}, \quad \theta^l = \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{pmatrix},$$

La matrice $M^l(\theta^l)$ et le vecteur $D^l(\theta^l, \dot{\theta}^l)$ sont définis comme suit :

$$M^l(\theta^l) = M^l(\theta^l)^T = \begin{bmatrix} p_1 + 2p_4l_1c_2 + 2p_5(l_2c_3 + l_1c_{23}) & - & - \\ p_2 + p_4l_1c_2 + p_5(2l_2c_3 + l_1c_{23}) & p_2 + 2p_5l_2c_3 & - \\ p_3 + p_5(l_2c_3 + l_1c_{23}) & p_3 + p_5l_2c_3 & p_3 \end{bmatrix}$$

$$D^l(\theta^l, \dot{\theta}^l) = \begin{bmatrix} l_1(p_4s_2 + p_5s_{23}) & l_2p_5s_3 - l_1p_4s_2 & -p_5(l_2s_3 + l_1s_{23}) \\ l_1(p_4s_2 + p_5s_{23}) & l_2p_5s_3 & -l_2p_5s_3 \\ l_1p_5s_{23} & l_2p_5s_3 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1^2 \\ (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 \\ (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)^2 \end{bmatrix}$$

Tel que:

$$P = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 + I_2 + I_3 + l_1^2(m_1 + m_2 + m_3) + 2l_1m_1x_{cm1} + l_2^2(m_2 + m_3) + 2l_2m_2x_{cm2} \\ I_2 + I_3 + l_2^2(m_2 + m_3) + 2l_2m_2x_{cm2} \\ I_3 \\ m_2x_{cm2} + l_2(m_2 + m_3) \\ m_3x_{cm3} \end{bmatrix}$$

avec:

l_i = La longueur du segment i .

m_i = La masse du segment i .

x_{cmi} = Le centre de masse du segment i .

I_i : inertie du segment i .

et:

$C_i = \cos(\theta_i)$; $S_i = \sin(\theta_i)$

$C_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j)$; $S_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j)$

$C_{ijk} = \cos(\theta_i + \theta_j + \theta_k)$; $S_{ijk} = \sin(\theta_i + \theta_j + \theta_k)$.

Les paramètres des bras utilisés en simulation sont donnés par le *Tableau (4.1)*.

Segments #	Longueur l (m)	Masse m (kg)	Centre de masse x_{cm} (m)	Inertie I (kg.m ²)
segments (1 et 4)	0.5	1.0	-0.25	0.05
segment (2 et 5)	0.5	1.0	-0.25	0.05
segments (3 et 6)	0.1	0.2	0.10	0.01

Tableau(4.1) : Paramètres des bras simulés.

IV.2.2) Modèles dynamiques des pièces à assembler :

Les pièces à assembler sont supposées être de même nature (raideur et dynamique).

Le modèle dynamique de chacune des pièces est donné comme suit [Cari 90] :

$$M_{oi} \ddot{X}_o + g_{oi} = F_o$$

$$M_{oi} = \text{diag}(m_{oi}, m_{oi}, I_o), \quad i = 1, 2.$$

m_{oi} = La masse de la pièce i .

I_{oi} = L'inertie de la pièce i .

M_{oi} : Matrice (3×3) d'inertie de la pièce i .

g_{oi} : Vecteur (3×1) de force de pesanteur de la pièce i .

Les paramètres des pièces à assembler simulées, sont donnés comme suit :

$$m_{o1} = m_{o2} = 0.1 \text{ kg}$$

$$I_{o1} = I_{o2} = 0.02 \text{ kgm}^2.$$

$$g_{o1} = g_{o2} = [0;0;0]_N;$$

$$l_{o1} = l_{o2} = 0.1 \text{ m. : longueur des pièces.}$$

IV.3) Equations de contrainte :

Afin d'appliquer notre commande coordonnée sur les deux bras manipulateurs présentés en *figure (4.1)*, nous avons besoin essentiellement des expressions de la position absolue X_A , de la position relative X_R et de la matrice jacobines J . Les efforts de contact sont simulés en utilisant un modèle élastique du système (Voir Annexe C).

Afin de déterminer X_A et X_R , il suffit, comme nous l'avons vu précédemment, d'exprimer les positions et orientations de chaque pièce.

Les situations des deux effecteurs sont exprimées par rapport au repère de référence Σ_0 . La situation de chaque effecteur est représentée par trois coordonnées opérationnelles: position selon l'axe X, position selon l'axe Y et orientation dans le plan. Nous notons X_1 et X_2 les situations des extrémités de chaque bras (la pièce y compris), par rapport au repère Σ_0 , *Figure(4.2)*.

Par souci de simplicité, sans pour autant restreindre la généralité du problème, nous supposons que les extrémités des deux pièces sont ponctuelles.

$$X_1 = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ \alpha_1 \end{pmatrix} \quad X_2 = \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ \alpha_2 \end{pmatrix}$$

Σ_{o1} est repéré par rapport Σ_0 par :

$$\begin{aligned} x_1 &= l_1 \cdot c_1 + l_2 c_{12} + l_3 c_{123} + l_{o1} c_{123} \beta_1 \\ y_1 &= l_1 \cdot s_1 + l_2 s_{12} + l_3 s_{123} + l_{o1} s_{123} \beta_1 \\ \alpha_1 &= \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \beta_1 \end{aligned} \quad (I)$$

De même Σ_{o2} est repéré par rapport Σ_0 par :

$$\begin{aligned} x_2 &= l_4 \cdot c_4 + l_5 c_{45} + l_6 c_{456} + l_{o2} c_{456} \beta_2 + L_x \\ y_2 &= l_4 \cdot s_4 + l_5 s_{45} + l_6 s_{456} + l_{o2} s_{456} \beta_2 + L_y \\ \alpha_2 &= \theta_4 + \theta_5 + \theta_6 + \beta_2 \end{aligned} \quad (II)$$

β_i = constante : C'est l'orientation de la pièce i , par rapport à l'organe terminal i .

$L = [L_x \ L_y]^T = [1.5 \ 0]_m^T$, la distance d'écartement des bases, des deux bras.

La force au niveau des effecteurs, est définie de trois composantes :

$$F_I = \begin{pmatrix} F_X \\ F_Y \\ \tau_\alpha \end{pmatrix}$$

Avec: F_X et F_Y les forces appliquées selon l'axe X et l'axe Y respectivement et τ_α le couple appliqué, dans le plan.

La matrice J se calcule à partir des matrices jacobiennes J_1 et J_2 de chaque bras. Des expressions (I) et (II) précédentes, on tire les composantes de J_1 et J_2 .

$$J_1 = \begin{bmatrix} -l_1 s_1 - l_2 s_{12} - l_3 s_{123} & -l_2 s_{12} - l_3 s_{123} & -l_3 s_{123} \\ l_1 c_1 + l_2 c_{12} + l_3 c_{123} & l_2 c_{12} + l_3 c_{123} & l_3 c_{123} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$J_2 = \begin{bmatrix} -l_4 s_4 - l_5 s_{45} - l_6 s_{456} & -l_5 s_{45} - l_6 s_{456} & -l_6 s_{456} \\ l_4 c_4 + l_5 c_{45} + l_6 c_{456} & l_5 c_{45} + l_6 c_{456} & l_6 c_{456} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

- Configuration des deux robots manipulateurs:

Pour réussir l'insertion, il est impératif que les orientations des deux repères Σ_{o1} et Σ_{o2} soient opposées, C'est à dire que, $\alpha_1 = \alpha_2 \pm \pi$.

Nous choisissons la configuration initiale des deux bras manipulateurs comme le montre la *figure(4.2)*.

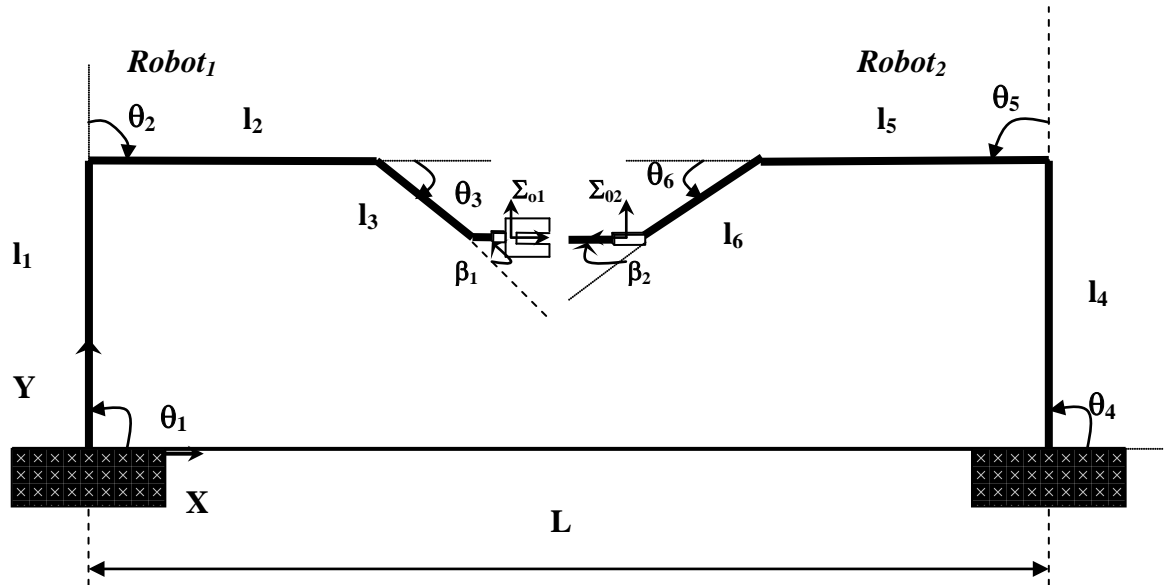


Figure (4.2) : Configuration initiale des deux bras manipulateurs.

$$\theta_1(0) = \pi/2.$$

$$\theta_4(0) = \pi/2.$$

$$\theta_2(0) = -\pi/2.$$

$$\theta_5(0) = \pi/2.$$

$$\theta_3(0) = -\pi/4.$$

$$\theta_6(0) = \pi/4.$$

$$\beta_1 = \pi/4.$$

$$\beta_2 = -\pi/4.$$

Les deux manipulateurs sont écartés de 1.5 mètres. Ils ont chacun une surface de travail de 1.2 mètres de rayon (avec la pince et l'objet). Il existe donc des risques de collisions entre les derniers segments. Ce problème rentre dans le domaine de la planification de trajectoire, qui sort du cadre de notre travail.

IV.4) Description de la tâche :

La tâche simulée est décrite comme suit : les deux effecteurs ayant préalablement saisi les pièces à assembler, doivent évoluer vers une configuration où l'insertion est possible. La consigne en position est donnée en coordonnées opérationnelles.

Les deux effecteurs doivent dans un premier lieu suivre une trajectoire libre sans collision, c'est la phase d'approche ; Puis à partir de $t = 0.55s$, entrer en contact pour l'insertion, jusqu'à $t = 0.75 s$, les deux extrémités butent, C'est la fin de l'insertion.

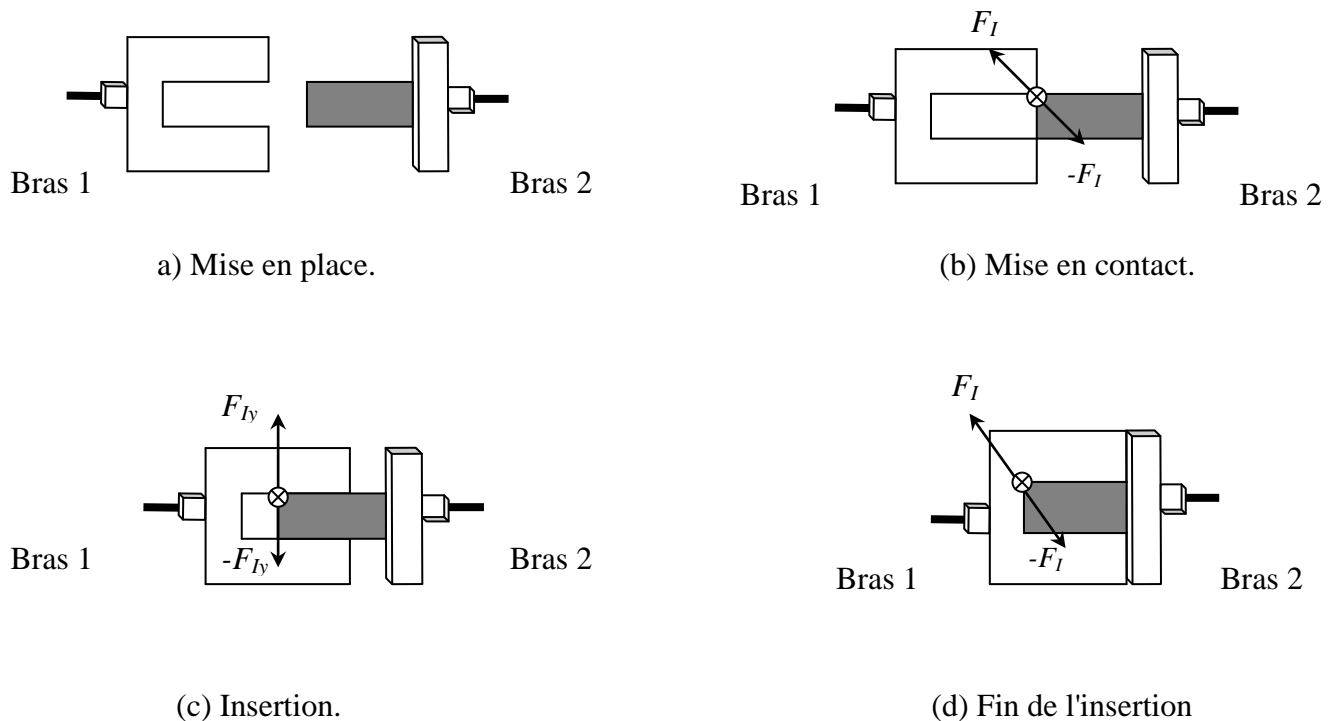
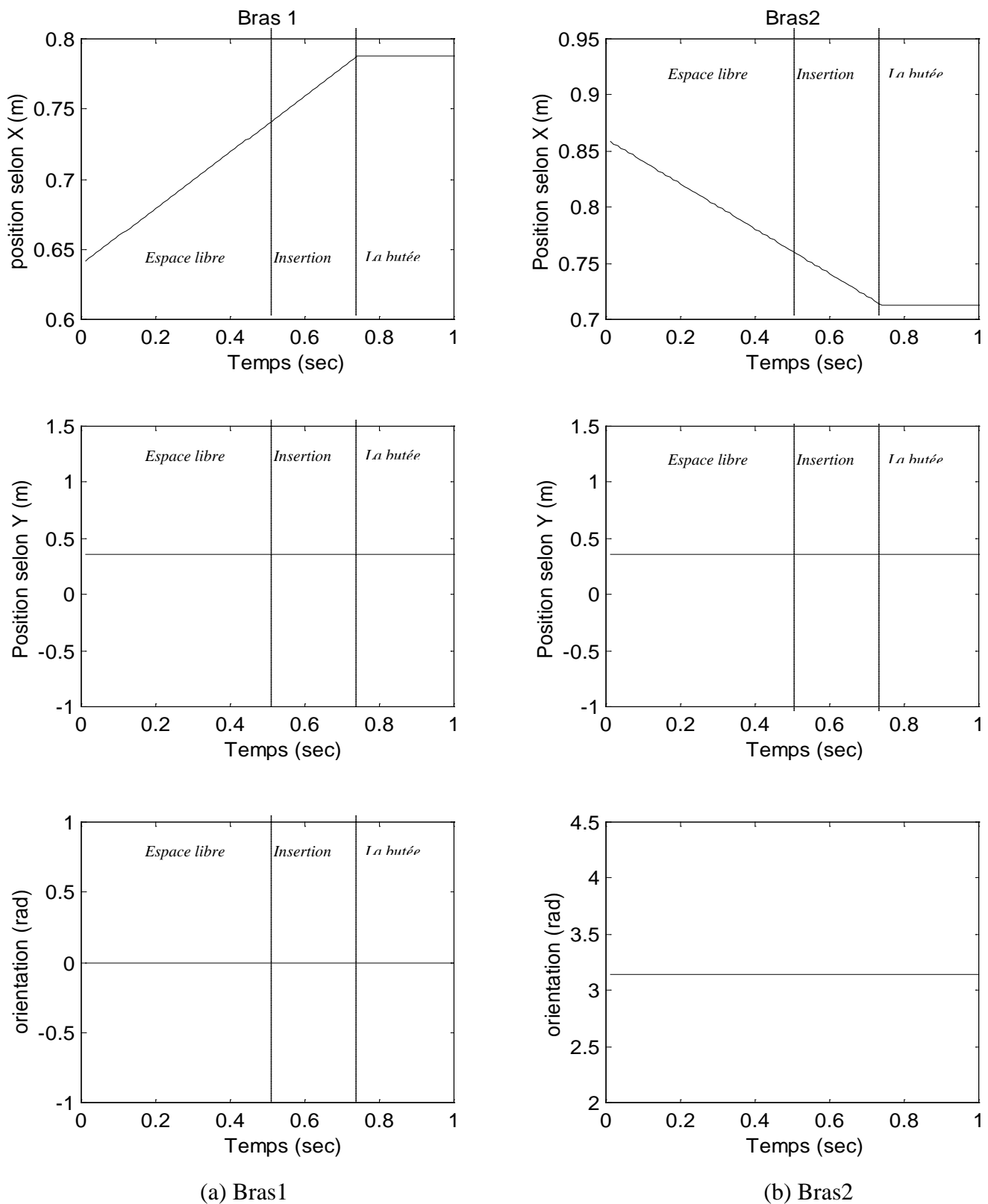


Figure (4.3) : Différentes phases de l'insertion

Pour l'exécution de cette tâche, les variables à asservir sont donc la position absolue et relative des deux effecteurs (selon l'axe X, selon l'axe Y et l'orientation dans le plan), ainsi que la force interne F_I (la force d'interaction des deux pièces).

La trajectoire absolue choisie, pour les deux robots, est une trajectoire rectiligne assurant une position relative finale nulle. La trajectoire de consigne de chacun des

effecteurs est définie en *Figure(4.4)*, avec une période d'échantillonnage de $T=0.01s$. Nous avons donc 101 points qui définissent chaque trajectoire de consigne.



(a) Bras1

(b) Bras2

Figure (4.4) : Position de consigne selon X, selon Y et orientation, pour les deux bras : (a)Bras1, (b) Bras 2.

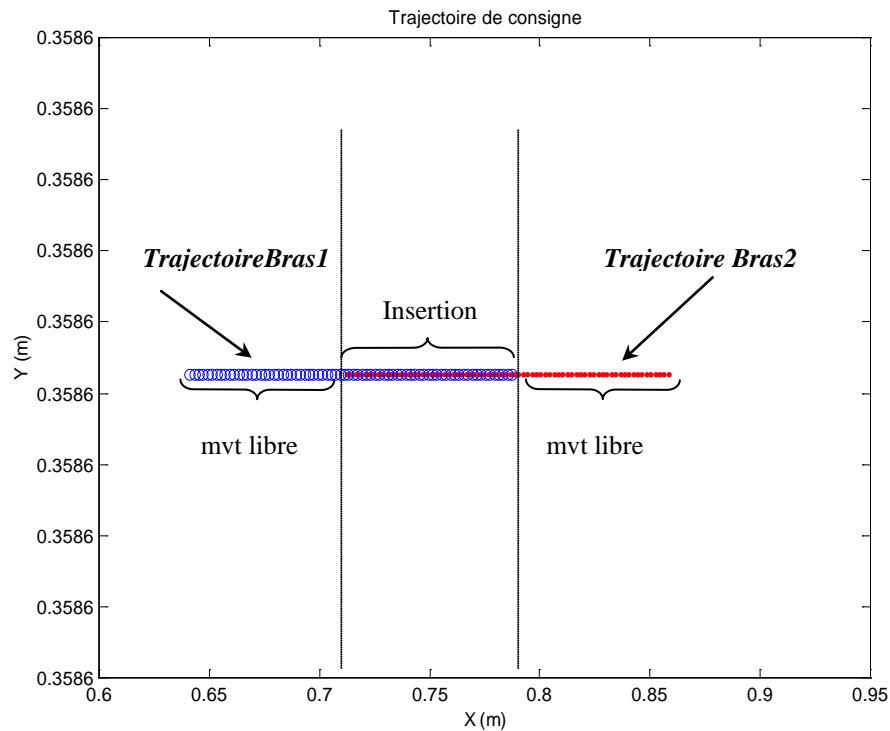


Figure (4.5) : Trajectoire de consigne des deux bras manipulateurs.

IV.5) Simulation :

L'étude en simulation nécessite l'utilisation d'une méthode d'intégration numérique, permettant de résoudre les équations différentielles constituant le modèle dynamique des robots manipulateurs, c'est à dire une méthode d'intégration qui permet de déterminer la solution appropriée (exp. Position, vitesse) suite à l'application de la commande à partir de la connaissance des conditions initiales.

Le choix de la méthode d'intégration est porté sur celle de Runge-Kutta. Pour cela, nous utilisons la fonction ODE 45, disponible dans MATLAB 5.3 ; qui permet de calculer pour chaque articulation n ($1 \leq n \leq 6$), $\theta_n(i+1)$ et $\dot{\theta}_n(i+1)$ à l'instant d'échantillonnage $i+1$, à partir de la connaissance de $\theta_n(i)$, $\dot{\theta}_n(i)$ à l'instant i .

IV.5.1) Implémentation de la commande coordonnée en Impédance généralisée :

Le procédé de l'implémentation de la commande coordonnée en Impédance généralisée, est le suivant :

1/ Fixer : T_{max} , K_e , M_{Rd} , B_{Rd} , K_{Rd} , M_{Ad} , B_{Ad} , K_{Ad} , K_f .

2/ Initialiser : $\theta^1, \dot{\theta}^1, \theta^2, \dot{\theta}^2$.

3/ Si $t \leq T_{max}$ alors :

4/ Générer les consignes de position $X_{1d} = \begin{pmatrix} x_{1d} \\ y_{1d} \\ \alpha_{1d} \end{pmatrix}$ et $X_{2d} = \begin{pmatrix} x_{2d} \\ y_{2d} \\ \alpha_{2d} \end{pmatrix}$

5/ Déduire la position absolue et la position relative désirée :

$$X_{Ad} = \frac{X_{1d} + X_{2d}}{2}, \quad X_{Rd} = X_{1d} - X_{2d}.$$

6/ définir la force de consigne $F_{1d} = \begin{pmatrix} F_{Xd} \\ F_{Yd} \\ \tau_{cd} \end{pmatrix}$.

7/ calculer les erreurs :

$$e_A(t) = X_A - X_{Ad}; \quad \dot{e}_A(t) = \dot{X}_A - \dot{X}_{Ad}; \quad e_R(t) = X_R - X_{Rd},$$

$$\dot{e}_A(t) = \dot{X}_A - \dot{X}_{Ad}, \quad e_{FI}(t) = F_I - F_{1d}$$

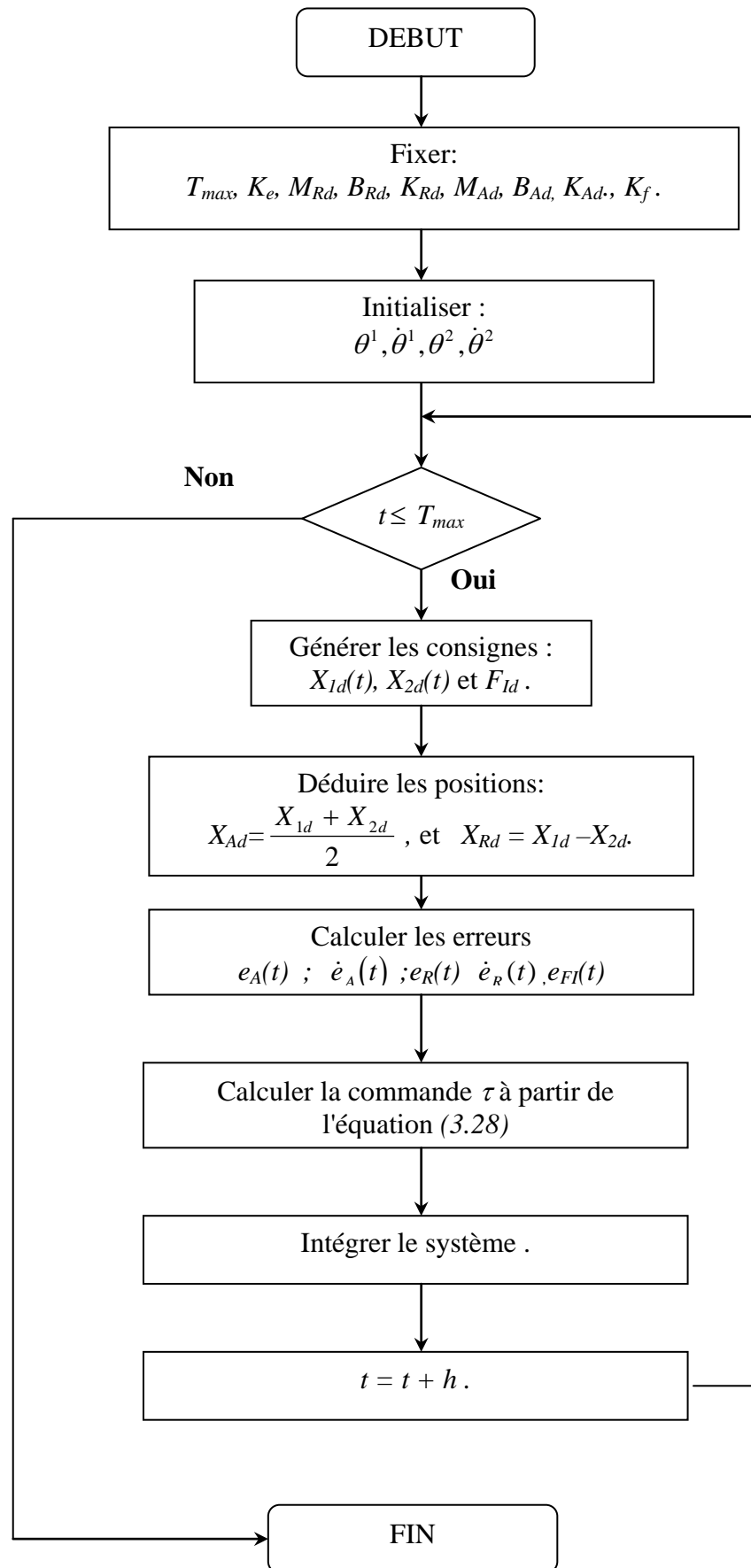
8/ calculer la commande $\tau = \begin{pmatrix} \tau^1 \\ \tau^2 \end{pmatrix}$ à partir de l'équation (3.28):

9/ détermination de $\theta = \begin{pmatrix} \theta^1 \\ \theta^2 \end{pmatrix}$ par l'intégration du système par la méthode de Runge-Kutta :

10/ $t = t+h$ ("h" est le pas d'intégration)

11/ Aller à l'étape (3).

12/ Sinon fin .



Organigramme de la commande coordonnée en Impédance généralisée.

IV.5.2) Implémentation de la commande coordonnée en Impédance généralisée en utilisant l'adaptateur flou :

Le procédé de l'implémentation de la commande coordonnée en impédance généralisée adaptative en utilisant la logique floue, est comme suit :

1/ Fixer : T_{max} , K_e , M_{Rd} , M_{Ad} , B_{Ad} , K_{Ad} , K_f , G_{devF} , $G_{\Delta F}$, $G_{\Delta K}$, $G_{\Delta \xi}$.

2/ Initialiser : $\theta^1, \dot{\theta}^1, \theta^2, \dot{\theta}^2$ ainsi que B_{Rd} et K_{Rd} .

3/ Si $t \leq T_{max}$ alors :

4/ Générer les consignes de position $X_{1d} = \begin{pmatrix} x_{1d} \\ y_{1d} \\ \alpha_{1d} \end{pmatrix}$ et $X_{2d} = \begin{pmatrix} x_{2d} \\ y_{2d} \\ \alpha_{2d} \end{pmatrix}$

5/ Déduire la position absolue et la position relative désirée :

$$X_{Ad} = \frac{X_{1d} + X_{2d}}{2}, \quad X_{Rd} = X_{1d} - X_{2d}.$$

6/ définir la force de consigne $F_{Id} = \begin{pmatrix} F_{IXd} \\ F_{IYd} \\ \tau_{I\alpha d} \end{pmatrix}$.

7/ calculer les erreurs :

$$e_A(t) = X_A - X_{Ad}; \quad \dot{e}_A(t) = \dot{X}_A - \dot{X}_{Ad}; \quad e_R(t) = X_R - X_{Rd},$$

$$\dot{e}_A(t) = \dot{X}_A - \dot{X}_{Ad}, \quad e_{FI}(t) = devF(t) = F_I - F_{Id}, \quad \text{ainsi que } \Delta F(t) = \Delta F(t) - \Delta F(t-1)$$

8/ déduire après fuzzification et defuzzification $\Delta \xi_{Rd}$ et ΔK_{Rd} pour calculer K_{Rd}

et B_{Rd} :

$$K_{Rd} = K_{Rd} + \Delta K_{Rd} \quad ; \quad \xi_{Rd} = \xi_{Rd} + \Delta \xi_{Rd} \quad \Rightarrow B_{Rd} = 2 \xi_{Rd} \sqrt{M_{Rd} K_{Rd}}$$

9/ calculer la commande $\tau = \begin{pmatrix} \tau^1 \\ \tau^2 \end{pmatrix}$ à partir de l'équation (3.28):

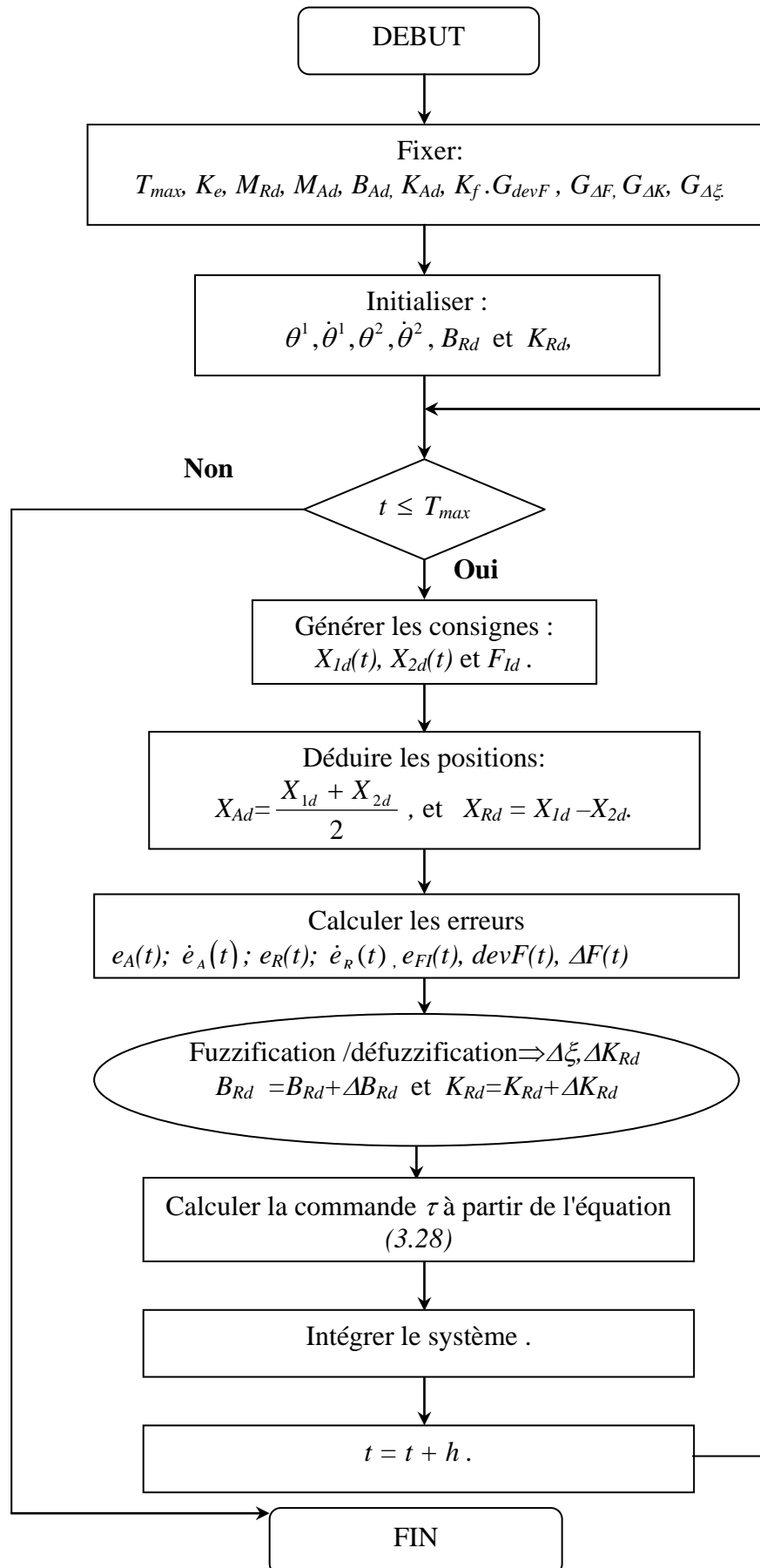
10/ détermination de $\theta = \begin{pmatrix} \theta^1 \\ \theta^2 \end{pmatrix}$ par l'intégration du système par la méthode de

Runge-Kutta :

11/ $t = t + h$.

12/ Aller à l'étape (3).

13/ Sinon fin .



Organigramme de la commande coordonnée en Impédance généralisée avec adaptation des paramètres par la logique floue

IV.6) Résultats de simulation :

Les résultats de simulation des commandes présentées au paragraphe précédent, sont présentés dans cette partie.

- Dans une première partie nous avons simulé les commandes en fixant la raideur des pièces.

En un premier temps, nous considérons la force externe comme nulle. Ensuite, nous considérons le cas d'une perturbation en force externe F_E .

- Dans une deuxième partie nous simulons la commande en utilisant un adaptateur flou, dans les deux cas : d'un environnement de grande raideur et de faible raideur.

Remarque :

L'organigramme ainsi que des résultats de simulation de la commande Coordonnée en Impédance avec la méthode de Nagai sont présentés en Annexe E.

IV.6.1) Résultat de simulation de la commande coordonnée en Impédance généralisée :

IV.6.1.1) Réglage des paramètres :

La raideur des pièces est fixée à :

$$K_e = 157000 \text{ N/m.}$$

Le réglage des paramètres d'impédance relative M_{Rd} , B_{Rd} et K_{Rd} , ainsi que les paramètres d'impédance absolue M_{Ad} , B_{Ad} et K_{Ad} , est fait par essais successifs, afin de déterminer les meilleures valeurs, permettant d'assurer un bon asservissement.

Les meilleurs résultats sont obtenues pour :

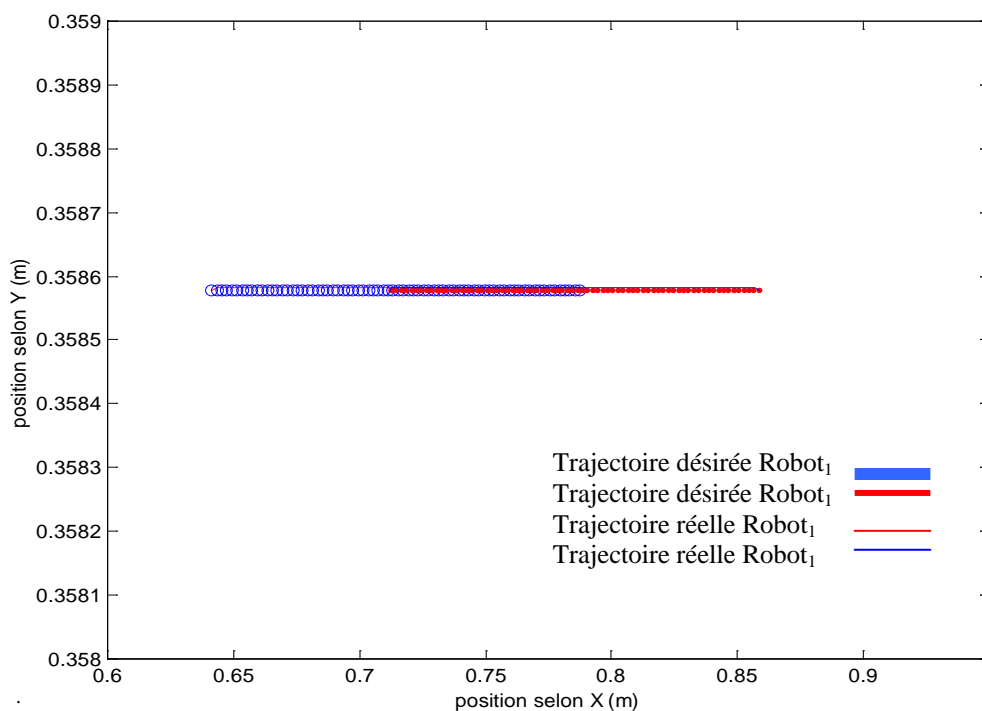
$$M_{Rd} = \text{diag} [0.1, 0.1, 0.1] \text{ kg} , \quad B_{Rd} = \text{diag} [160, 160, 160] \text{ NS/m}, \quad K_{Rd} = \text{diag} [1, 1, 1] \text{ N/m}$$

$$M_{Ad} = \text{diag}[1, 1, 1]_{\text{kg}}, \quad B_{Ad} = \text{diag}[1600, 1600, 1600]_{\text{NS/m}}, \quad K_{Ad} = \text{diag}[1000, 1000, 1000]_{\text{N/m}}$$

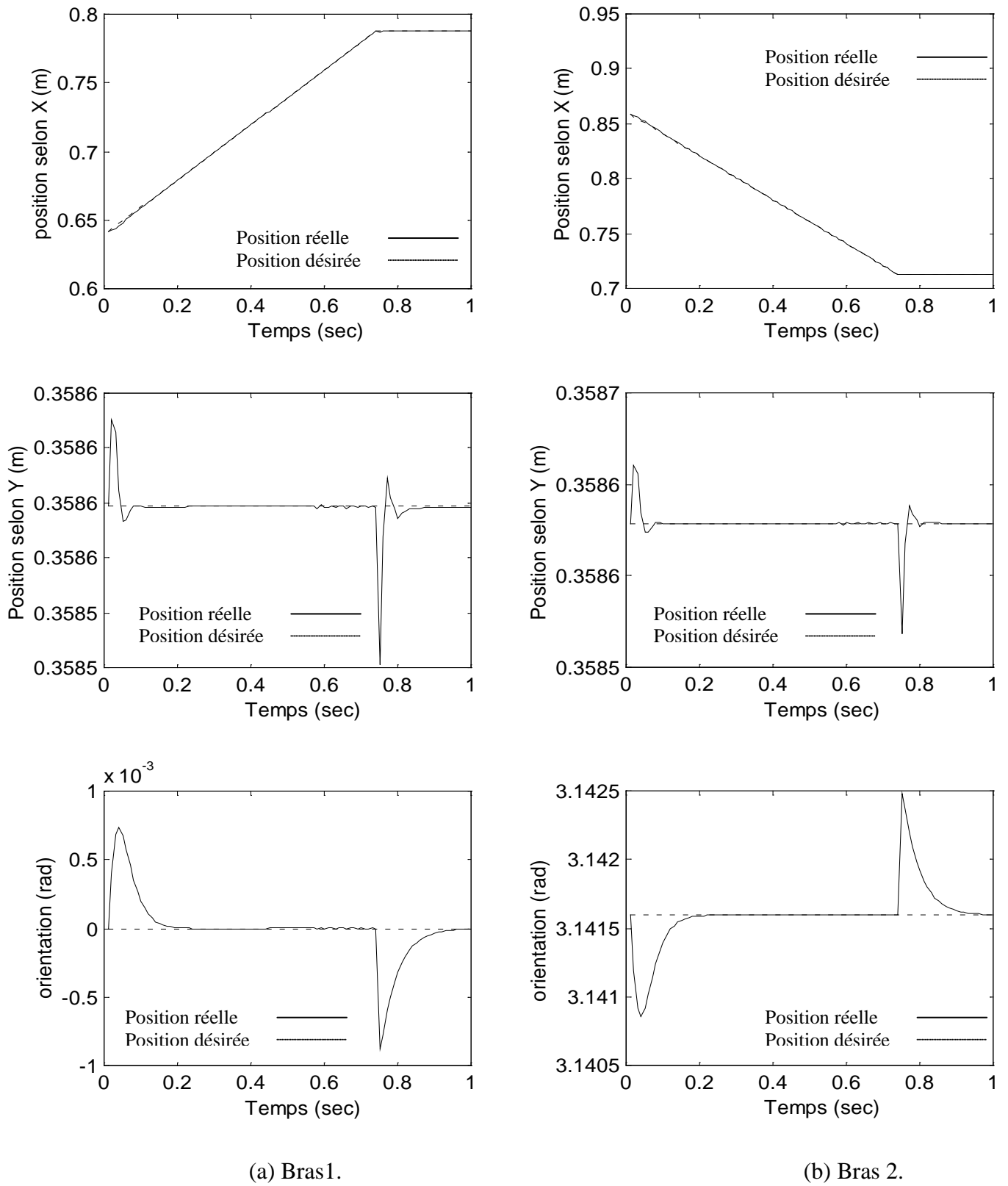
Pour un gain en force $K_f = I$, nous avons les résultats suivants:

IV.6.1.2) Poursuite des consignes en positions:

La *Figure (4.6)*, représente la poursuite de la consigne en position des deux bras selon l'axe X et Y .



Figure(4.6) : Trajectoire des deux bras dans le plan.



Figure(4.7) :Position selon X, selon Y et orientation :(a) Bras1;(b) Bras2.
 "La Commande coordonnée en Impédance généralisée"

La position relative est parfaitement commandée aussi bien suivant l'axe X que suivant l'axe Y qu'au niveau de l'orientation, *Figure(4.8)*. Les erreurs maximales et moyennes de la position relative sont données comme suit:

$$\begin{aligned}
 e_{Rxmax} &= 0.78mm & e_{Rymax} &= 1.11 \cdot 10^{-12} mm & e_{Romax} &= 9.60 \cdot 10^{-5} rad \\
 e_{Rxmoy} &= 3.96 \cdot 10^{-2} mm & e_{Rymoy} &= 4.02 \cdot 10^{-13} mm & e_{Romoy} &= 7.01 \cdot 10^{-5} rad
 \end{aligned}$$

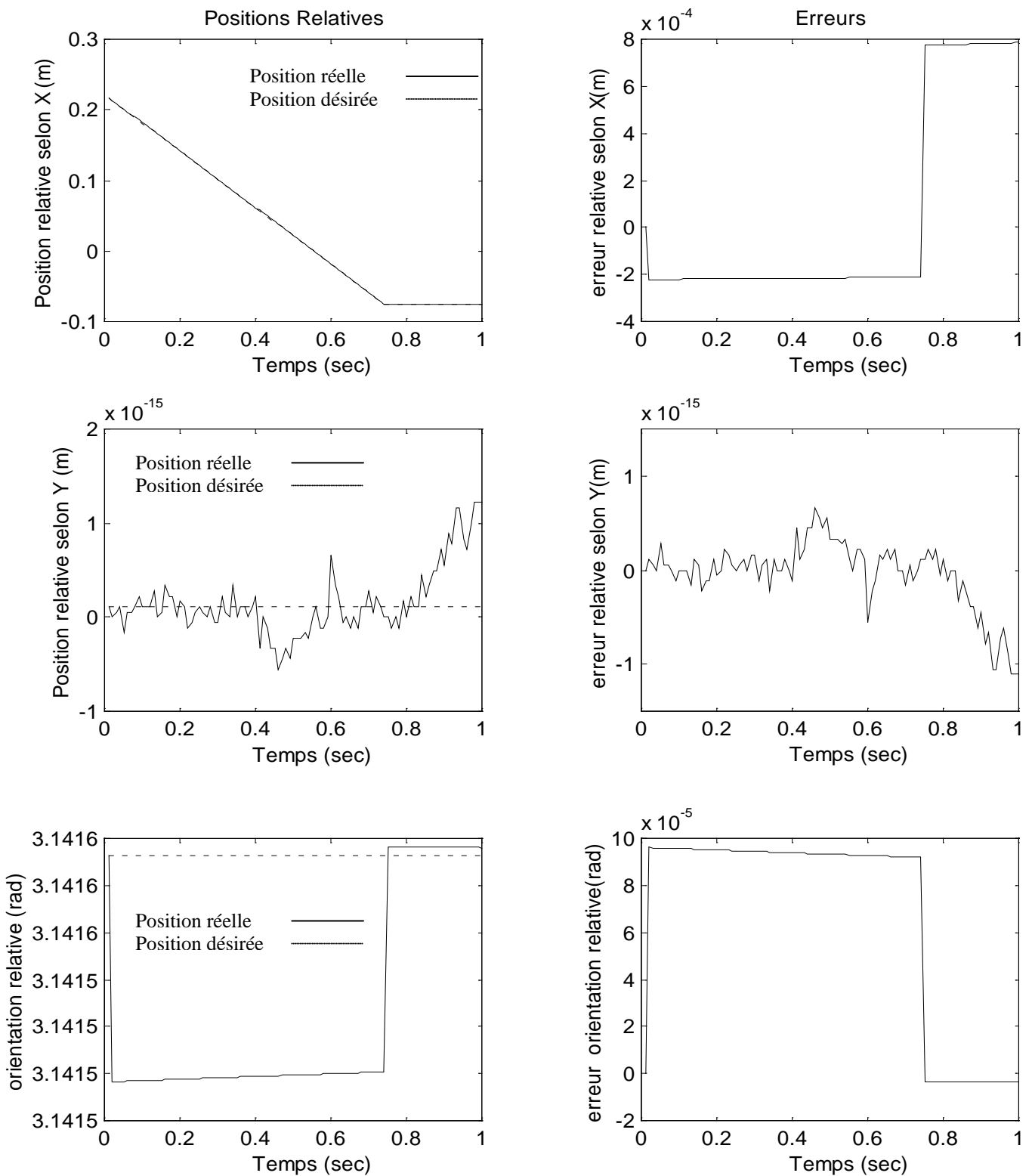


Figure (4.8) :Position relative et son erreur pour "La Commande coordonnée en Force/Impédance "

La position absolue est aussi bien asservie, suivant l'axe X et l'axe Y qu'au niveau de l'orientation, *Figure(4.9)*. Les erreurs maximales et moyennes de la position absolue, suivant l'axe X et l'axe Y et l'orientation sont données avec des valeurs respectives :

$$e_{Axmax} = 2.22 \cdot 10^{-13} \text{ mm}$$

$$e_{Aymax} = 7.21 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

$$e_{A\alpha max} = 8.88 \cdot 10^{-16} \text{ rad}$$

$$e_{Axmoy} = 2.10 \cdot 10^{-14} \text{ mm}$$

$$e_{Aymoy} = 2.20 \cdot 10^{-4} \text{ mm}$$

$$e_{A\alpha moy} = 1.68 \cdot 10^{-16} \text{ rad}$$

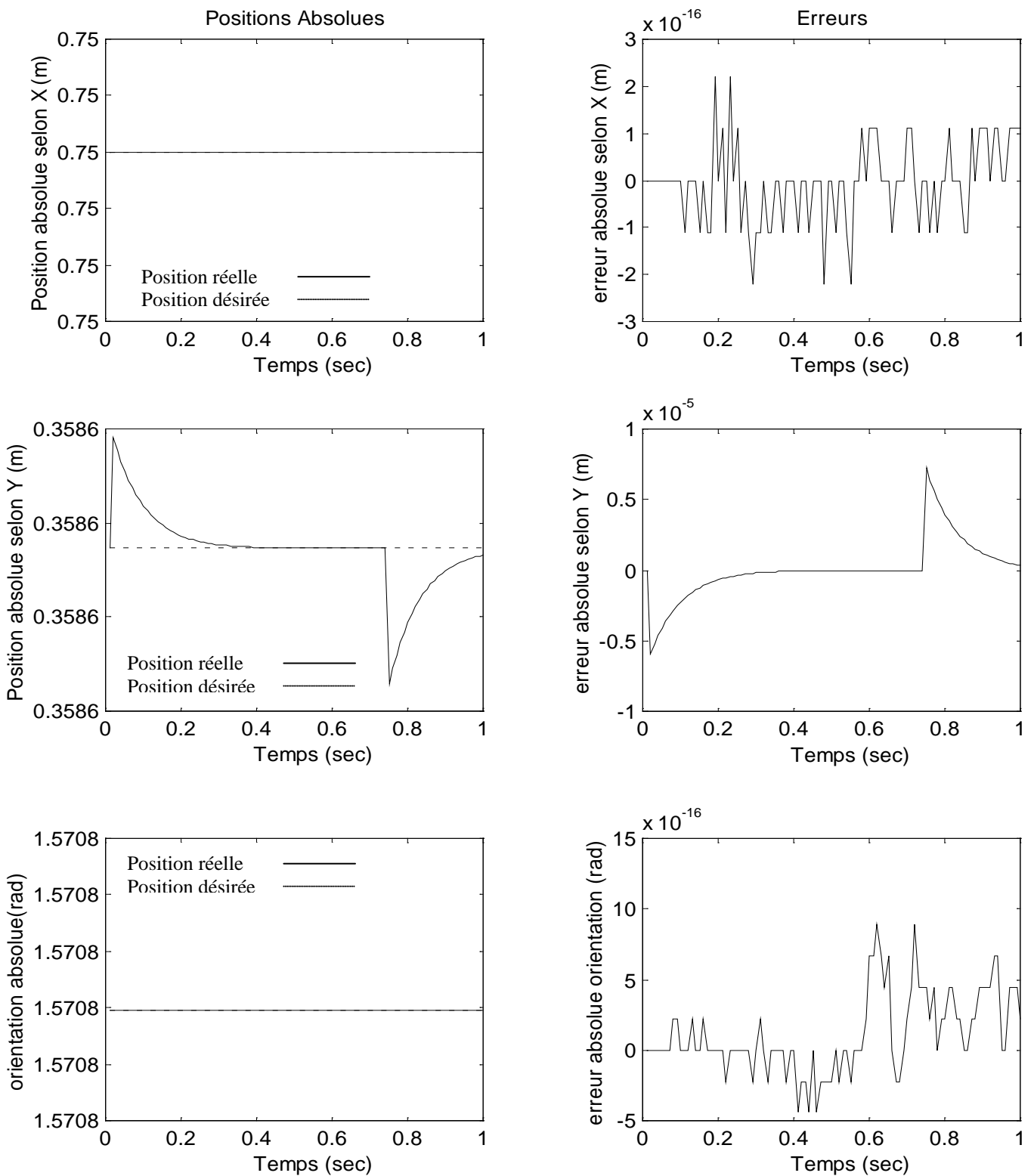


Figure (4.9) :Position absolue et son erreur .

"La Commande coordonnée en Force/Impédance "

En variant le gain en force K_f , on obtient des résultats de poursuite en position de mêmes grandeurs que les résultats obtenus précédemment(de la *Figure(4.6)* à la *Figure(4.9)*).

IV.6.1.3) La Force d'interaction:

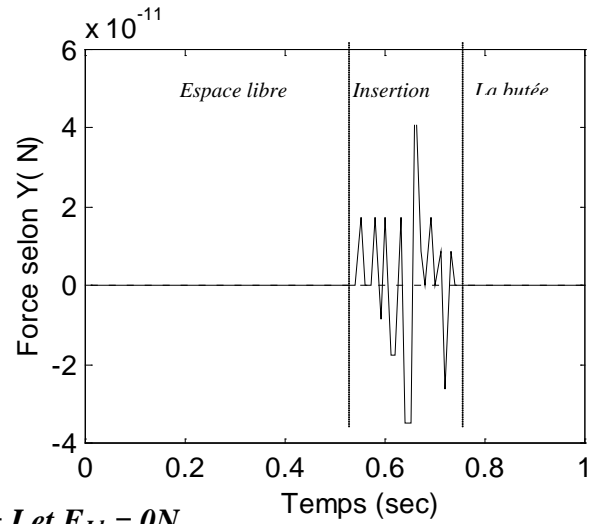
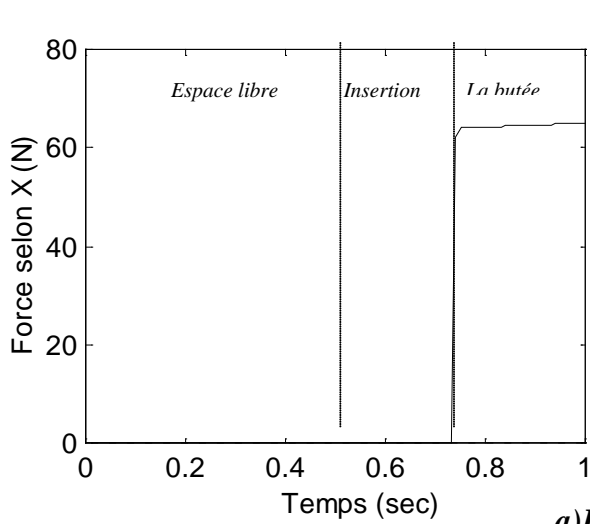
La force d'interaction dépend fortement du gain en force K_f , comme le montre la *Figure(4.15)*. Pour différentes valeurs du gain en force et différentes valeurs de la consigne en force F_{Id} nous avons:

- Pour un Gain en force $K_f = 1$ et une force interne désirée nulle $F_{Id} = 0 N$, la commande devient une commande en impédance seule, c'est à dire que la force n'est pas commandée explicitement. La force interne atteint la valeur de **65.02 N** selon l'axe X, à la fin de l'insertion.
- Pour un Gain en force $K_f = 50$ et une force interne désirée nulle $F_{Id} = 0 N$, on a une très bonne poursuite en force avec une erreur $e_{yxmax} = 5.22 \cdot 10^{-11} N$ selon l'axe Y pendant l'insertion, et $e_{fxmax} = 1.3 N$ selon l'axe X, à la fin de l'insertion.
- En augmentant le gain, l'erreur en force diminue au fur à mesure que le gain augmente. Pour une valeur de $K_f = 1000$, une force interne désirée nulle $F_{Id} = 0 N$, on obtient une erreur en force selon l'axe X à la fin de l'insertion, de $e_{fxmax} = 0.06 N$.

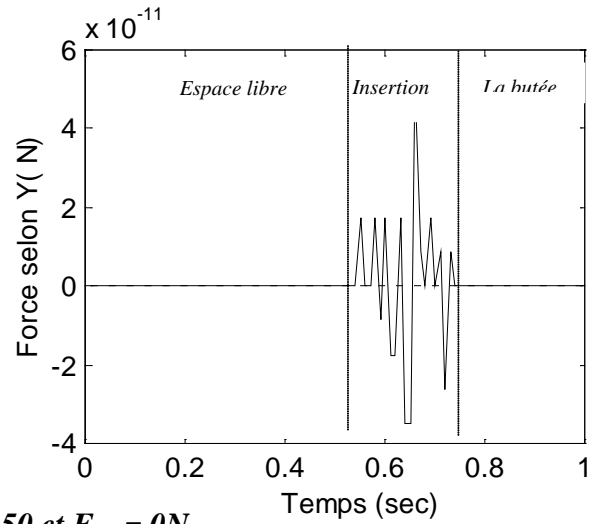
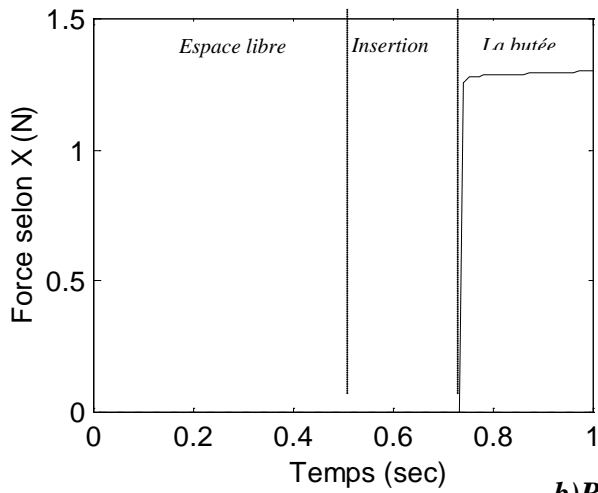
On constate que l'augmentation du gain en force permet d'avoir un bon asservissement de la force interne, l'erreur en force est d'autant plus petite que le gain est grand. Mais le temps de calcul est proportionnel au gain. Un gain de grande valeur induit un temps de calcul élevé

Remarque:

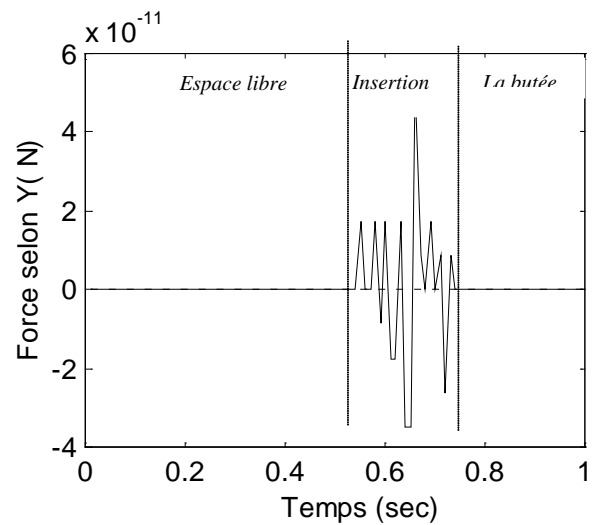
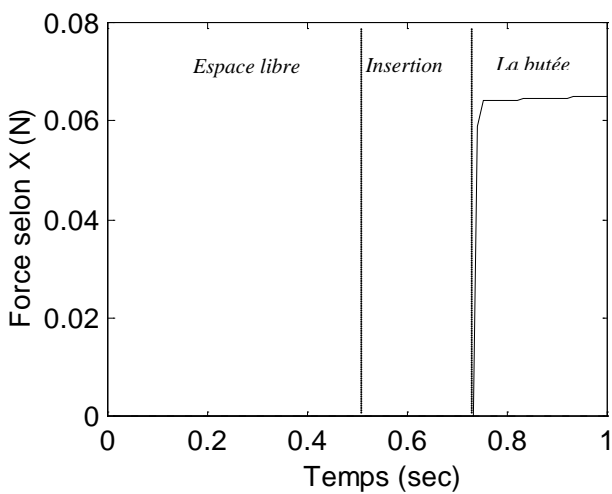
Sur les différentes figures de la force interne, nous ne représentons que la force d'interaction selon l'axe X et Y. Il n'y a pas de moment interne appliqué dans le plan.
 $\tau_\alpha = 0 N.m$.



a) Pour $K_f = 1$ et $F_{Id} = 0N$.



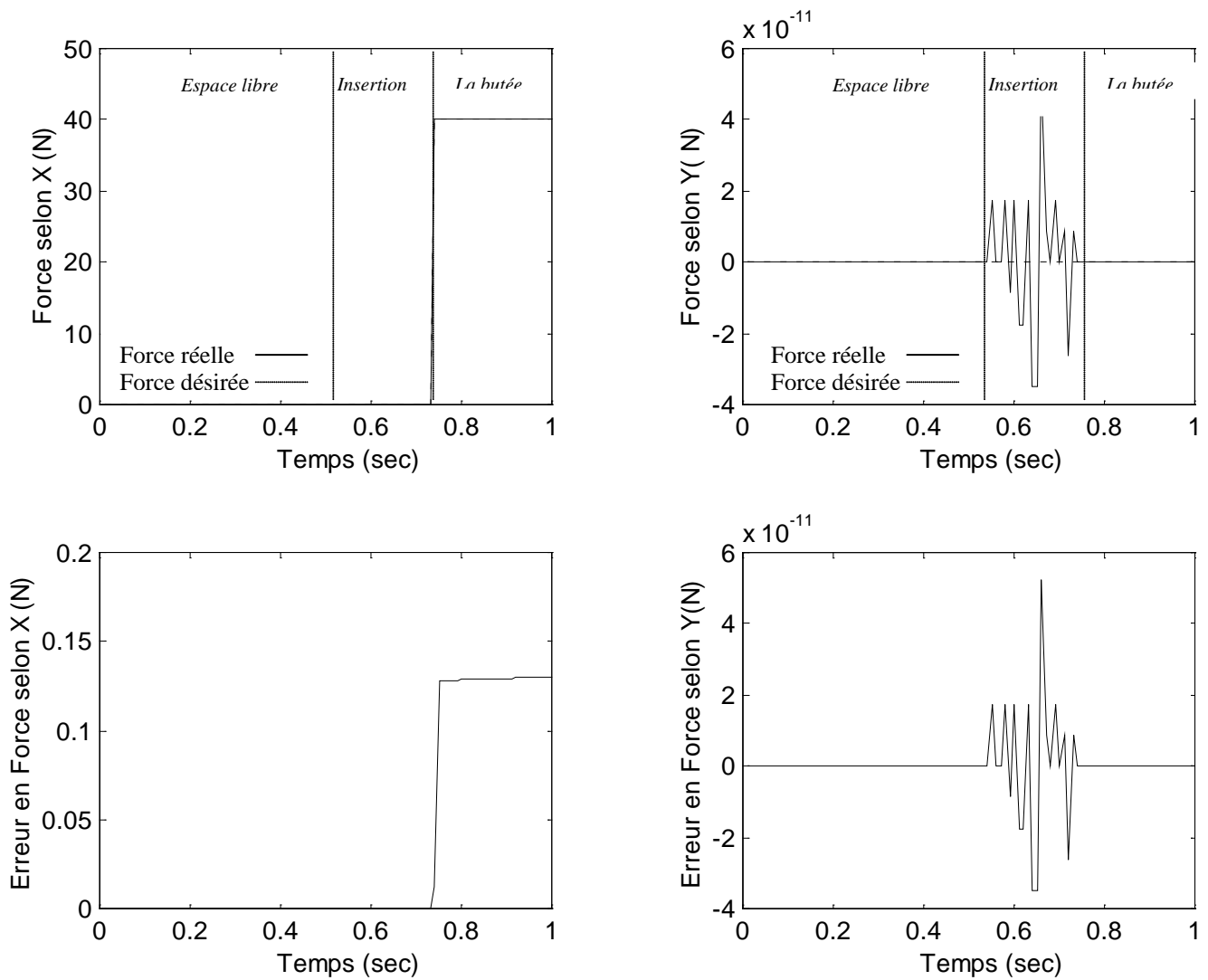
b) Pour $K_f = 50$ et $F_{Id} = 0N$.



c) Pour $K_f = 1000$ et $F_{Id} = 0N$.

Figure(4.10): Force interne selon X et Y pour différentes valeurs du gain K_f

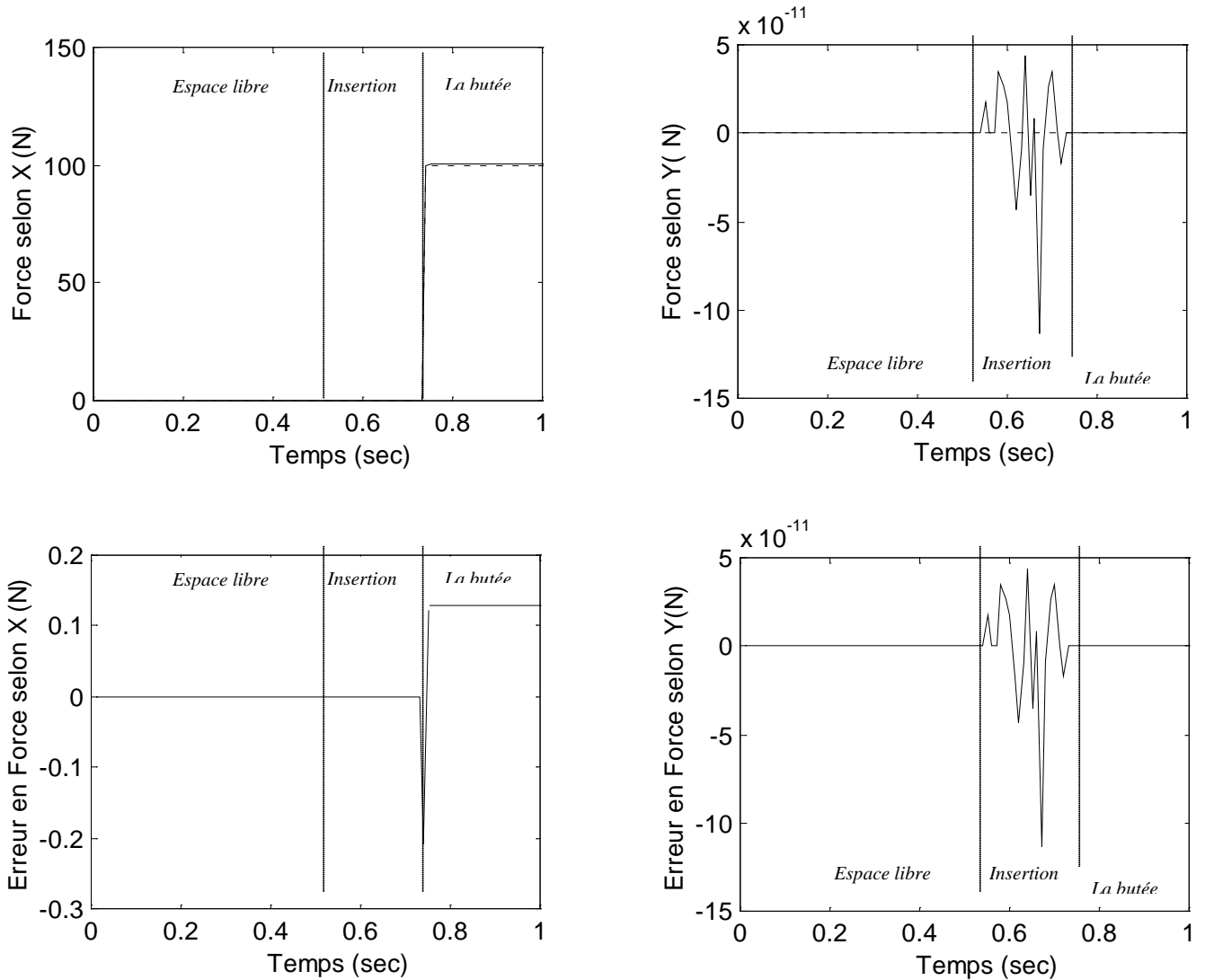
- Pour une force de consigne $F_{Ixd} = 40 \text{ N}$ selon l'axe X, $F_{Iyd} = 0 \text{ N}$ selon l'axe Y, et un gain $K_f = 500$, on obtient un bon résultat, avec une erreur maximale selon l'axe X $e_{fxmax} = 0.13 \text{ N}$, figure(4.11).



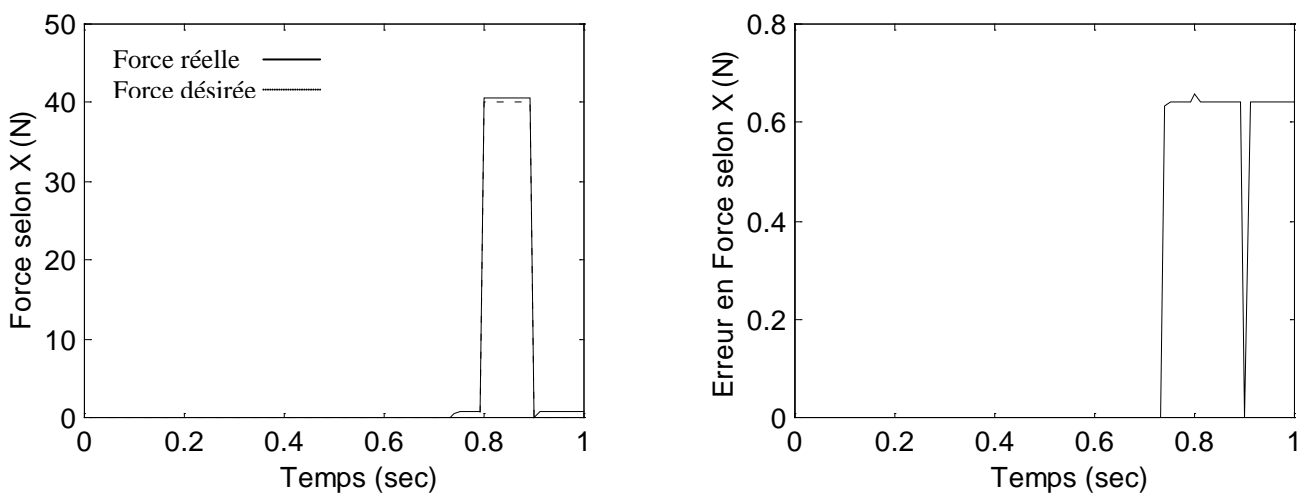
Figure(4.11) : Poursuite et erreur en force interne pour $F_{Ixd}=40 \text{ N}$.

- Pour une force de consigne $F_{Ixd} = 100 \text{ N}$, et un gain $K_f = 500$, on obtient un aussi bon résultat, avec une erreur maximale selon l'axe X de $e_{fxmax} = 0,2 \text{ N}$, Figure (4.12).

- Pour une force de consigne de signal porte de **40N** d'amplitude selon l'axe X, comme le montre la *Figure(4.13)*, et un gain $K_f = 100$, on obtient un bon résultat, avec une erreur maximale selon l'axe X de $e_{fxmax} = 0.6 N$.



Figure(4.12) : Poursuite et erreur en force, Pour $F_a=100N$.



Figure(4.13) : Poursuite et erreur en force Interne selon X

IV.6.1.4) Interprétation des résultats:

A partir des résultats obtenus, nous constatons que la position relative des deux bras et la position absolue de tout le système sont très bien asservies et cela selon les axes X et Y et au niveau de l'orientation relative des deux pièces qui doit être maintenue à π .

La force interne dépend du gain en force. Dans le cas où le gain K_f est égal à 1 et la force désirée nulle, ça devient une régulation et ceci rentre dans le principe de la commande en impédance. Dans le cas où le gain $K_f > 1$, la commande en impédance est généralisée permettant ainsi l'asservissement de la force d'interaction à une force de consigne. L'erreur en force dépend de la valeur du gain ; elle lui est inversement proportionnelle.

Les valeurs des paramètres d'impédance jouent un rôle extrêmement important dans la commande. Après plusieurs essais de simulation et en variant les paramètres, nous déduisons que pour un environnement de forte raideur, la matrice B_d doit être de grande valeur pour amortir la réponse et diminuer les dépassement de la force. Par contre, la raideur K_d , dans ce cas, doit être faible pour limiter la force de contact. En effet, bien qu'une grande valeur de la matrice de raideur K_d permette d'assurer une bonne poursuite en position en espace libre, elle implique une grande force de contact au moment de l'interaction lorsque l'environnement est de grande raideur, ce qui pourrait nuire au système (Voir la *Figure (E.5)* en AnnexeE). Mais pour une faible valeur de K_d nous avons une force d'interaction plus ou moins régulée (dans notre cas 65N). La poursuite en force peut être améliorée et même asservie à une force de consigne(*figure (4.13)*), et cela grâce au gain K_f .

Donc on peut déduire que la commande en Impédance généralisée donne de très bons résultats. Elle assure une bonne poursuite de la position relative et absolue des deux bras manipulateurs coopérants et permet de commander explicitement la force interne à une force de consigne.

Dans les cas étudiés précédemment, la force externe était considérée comme nulle $F_E = 0$. Nous allons voir maintenant, le cas où une force externe vient perturber le système.

IV.6.2) Perturbation du Système par une Force Externe :

Nous supposons que pendant l'insertion et de $t = 0.6s$ à $t = 0.63s$, une force externe $F_{Ey} = 40N$ apparaît selon l'axe Y, *Figure(4.14)*.

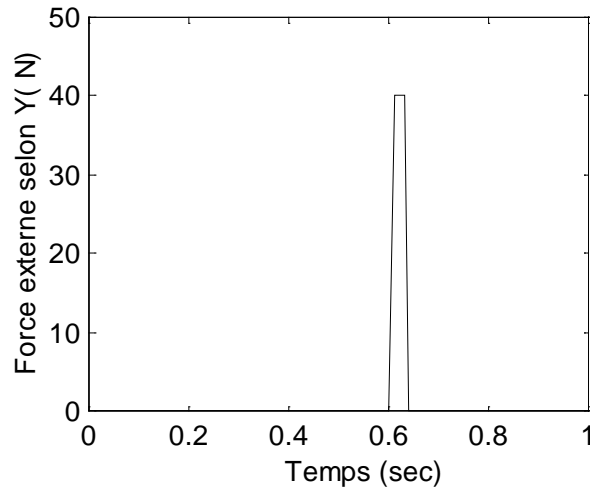


Figure (4.14) : Perturbation en force externe selon Y.

IV.6.2.1) Réglage des paramètres:

Les paramètres d'impédance relative désirée ainsi que les paramètres d'impédance absolue sont choisis comme suit:

$$M_{Rd} = \text{diag} [0.1, 0.1, 0.1] \text{ Kg} , B_{Rd} = \text{diag} [160, 160, 160] \text{ NS/m}, K_{Rd} = \text{diag} [10, 10, 10] \text{ N/m}$$

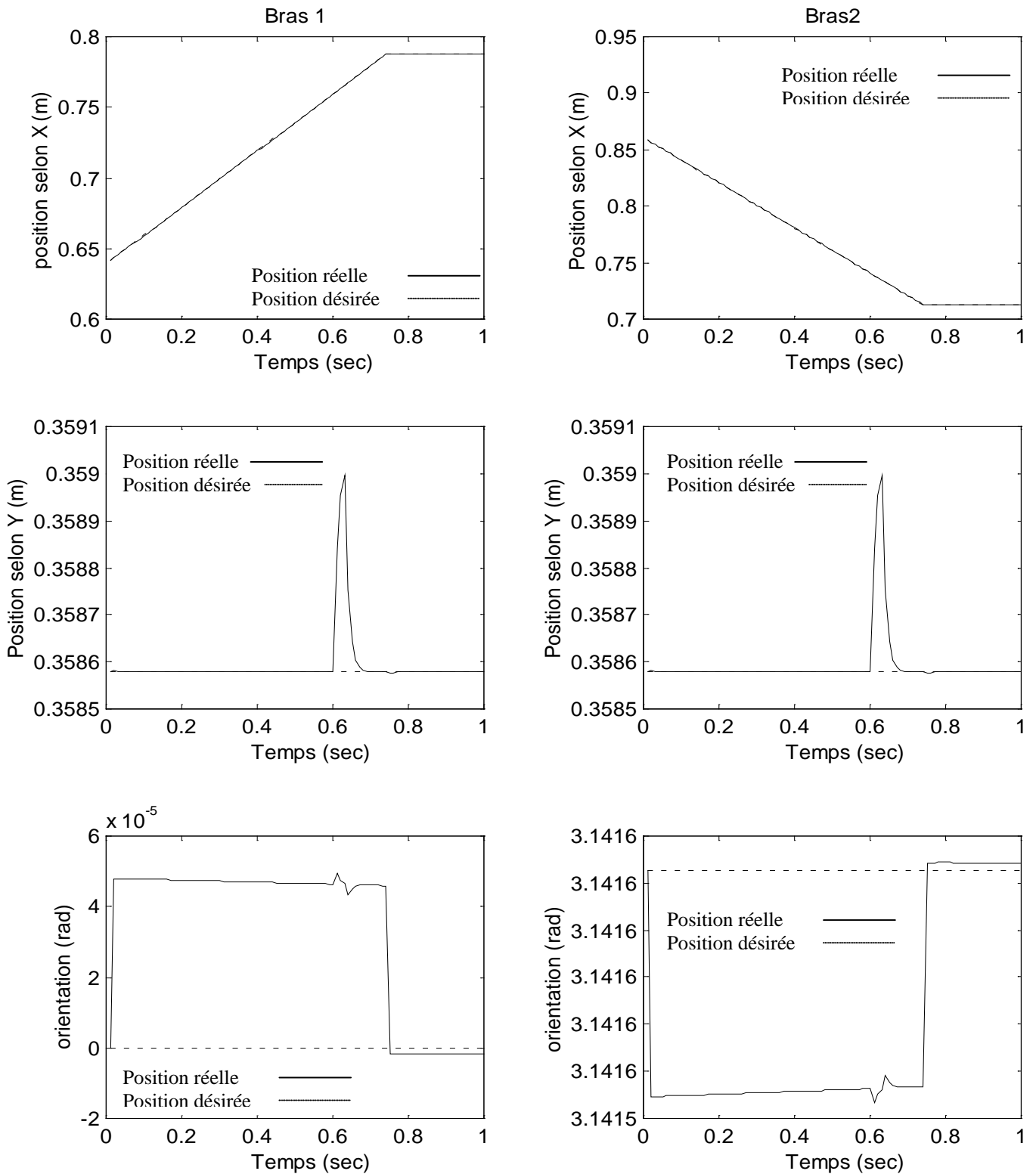
$$M_{Ad} = \text{diag}[1, 1, 1] \text{ Kg}, B_{Ad} = \text{diag}[1000, 1000, 1000] \text{ NS/m}, K_{Ad} = \text{diag} [90000, 90000, 90000]$$

N/m

Pour un $K_f = 1000$ et une force interne désirée nulle, nous obtenons les résultats suivants :

IV.6.2.2) Poursuite des consignes en positions:

La poursuite de la position selon l'axe X et Y ainsi que l'orientation des deux bras sont données comme suit:



Figure(4.15) :Position selon X, selon Y et orientation des deux Bras.

La position relative est parfaitement commandée aussi bien suivant l'axe X et Y qu'au niveau de l'orientation. Les erreurs maximales et moyennes de la position relative sont données comme suit:

$$e_{Rxmax} = 0.22 \text{ mm}$$

$$e_{Rymax} = 2.22 \cdot 10^{-12} \text{ mm}$$

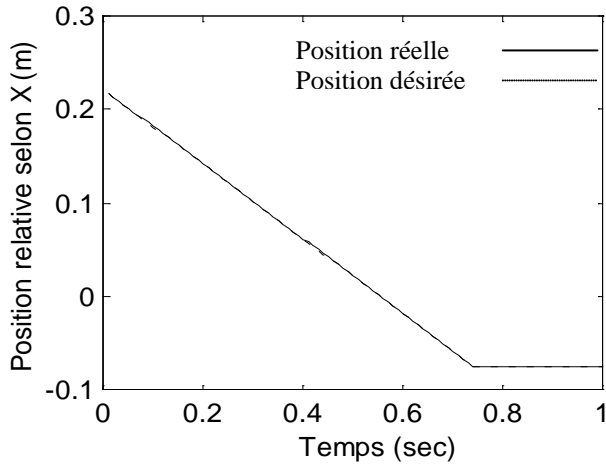
$$e_{R\alpha max} = 9.84 \cdot 10^{-5} \text{ rad}$$

$$e_{Rxmoy} = -0.16 \text{ mm}$$

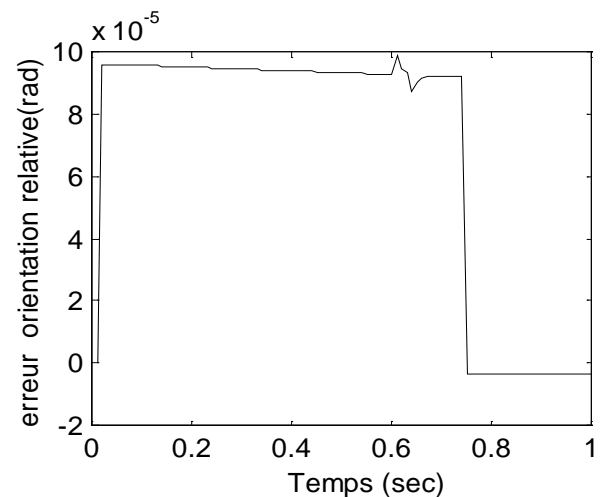
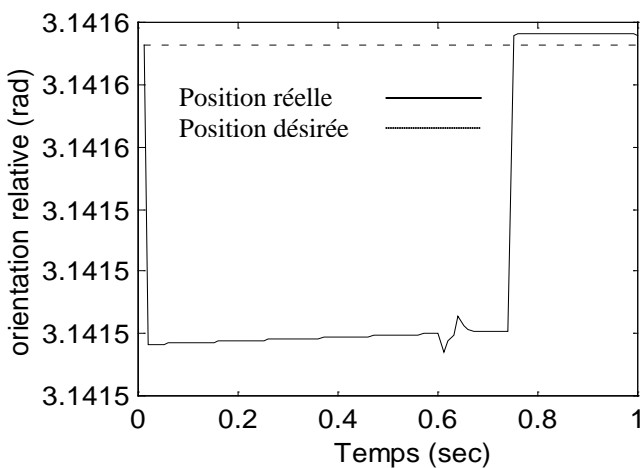
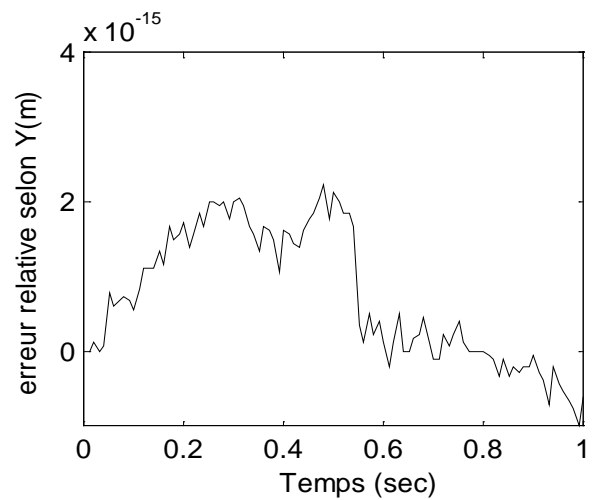
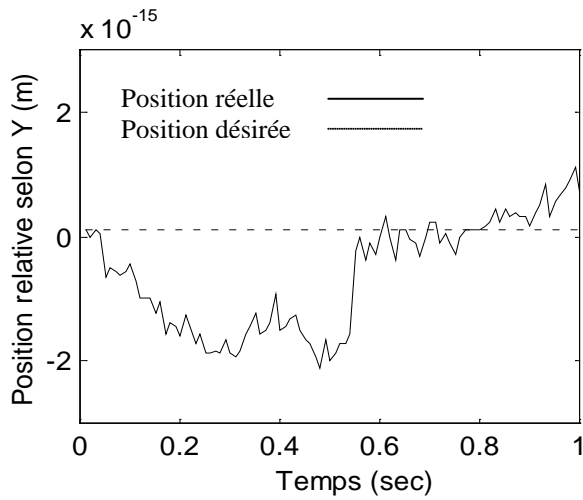
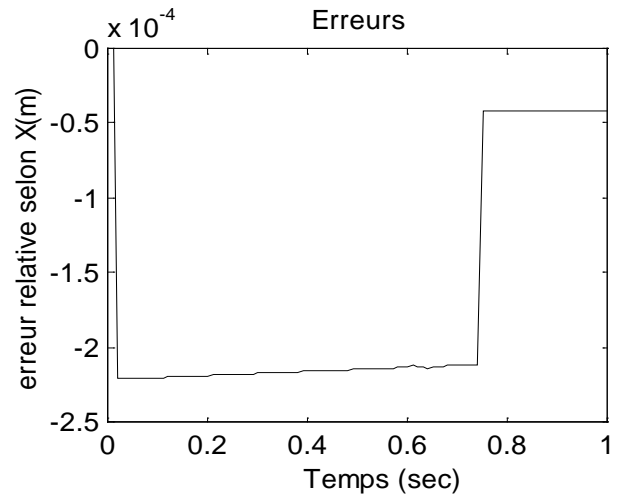
$$e_{Rymoy} = 7.26 \cdot 10^{-13} \text{ mm}$$

$$e_{R\alpha moy} = 6.77 \cdot 10^{-5} \text{ rad}$$

Positions Relatives



Erreurs



Figure(4.16):position relative et son erreur

L'application de la force externe influe sur la poursuite de la position absolue selon l'axe Y, *figure(4.17)*. les erreurs maximales et moyennes de la position absolue sont données comme suit :

$$e_{Axmax} = 2.22 \cdot 10^{-13} \text{ mm}$$

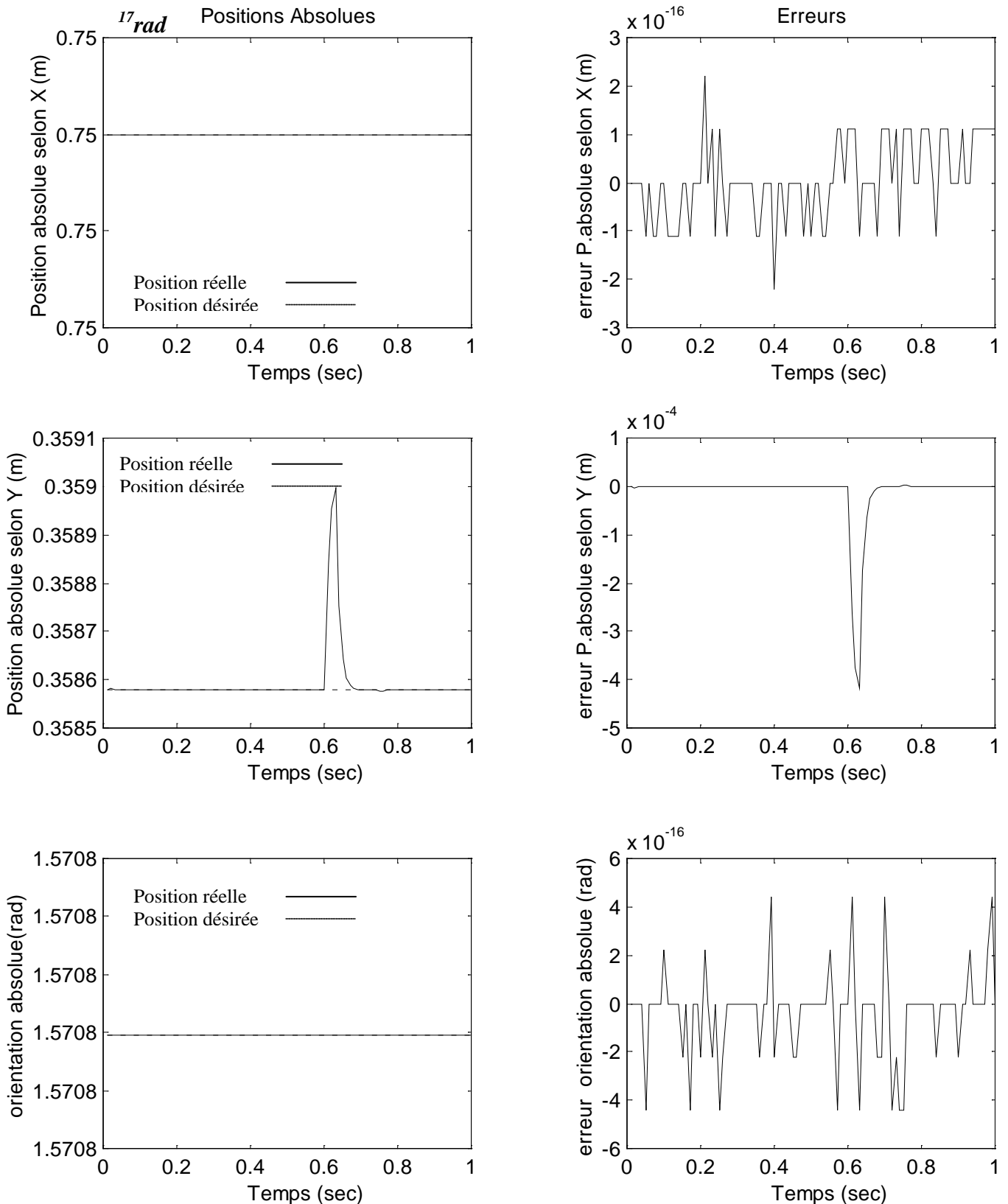
$$e_{Aymax} = 0.41 \text{ mm}$$

$$e_{A\alpha max} = 4.44 \cdot 10^{-16} \text{ rad}$$

$$e_{Axmoy} = 7.77 \cdot 10^{-15} \text{ mm}$$

$$e_{Aymoy} = -1.33 \cdot 10^{-2} \text{ mm}$$

$$e_{A\alpha moy} = -3.55 \cdot 10^{-16} \text{ rad}$$



Figure(4.17):position absolue et son erreur

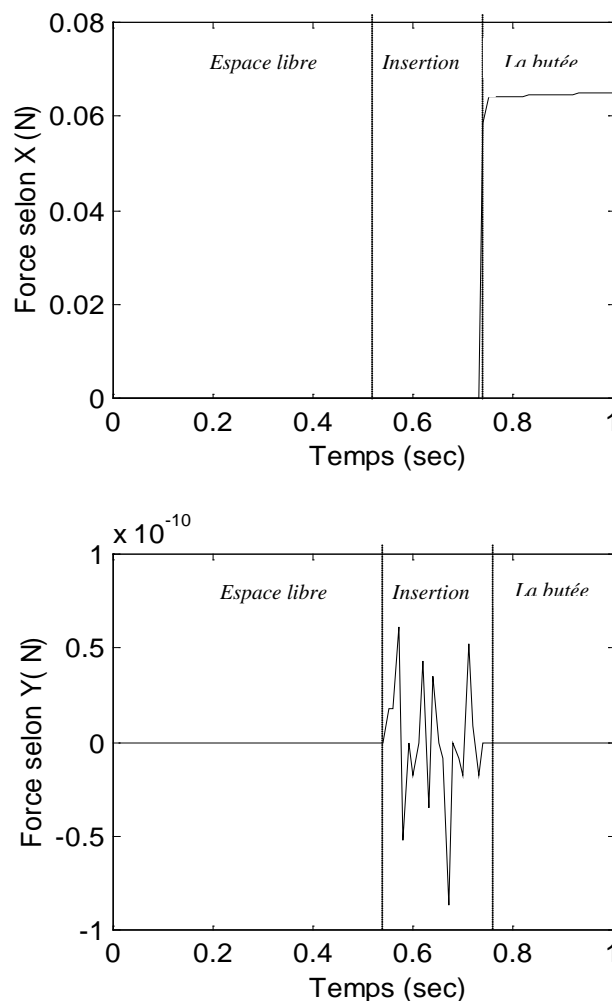
Avant l'application de la force externe le système évolue normalement avec un très bon asservissement de la position relative et absolue. Au moment où une force externe s'applique suivant l'axe Y sur le système, on remarque un pic sur la position absolue suivant cette direction. Mais dès que la perturbation s'annule, la position revient et converge vers sa trajectoire de consigne, *Figure (4.17)*.

La position relative par contre est très bien asservie, *Figure(4.16)*. La force externe ne perturbe pas la position relative, donc la force interne n'est pas affectée, l'insertion est assurée.

En effet, pour une force $F_d = 0 \text{ N}$, comme le montre la *Figure (4.18)*, la force interne est asservie. L'erreur maximale en force selon l'axe X et l'axe Y sont données, respectivement, comme suit :

$$e_{fxmax} = 0.06 \text{ N}$$

$$e_{fymax} = 8.71 \cdot 10^{-11} \text{ N.}$$



Figure(4.18) : Force d'interaction.

Nous pouvons déduire que la commande en Impédance généralisée résiste à la perturbation de la force externe.

IV.6.3) Résultat de simulation de la commande en Impédance généralisée adaptative par logique floue :

Jusque là, nous avons utilisé la commande en impédance en considérant l'environnement d'une raideur de valeur égale à 157000 N/m . Dans le cas où nous voudrions changer la raideur des pièces ou manipuler des pièces de raideur incertaine, ce qui est généralement le cas, les paramètres d'impédance doivent être recalculés pour assurer une interaction stable. Pour cela, nous allons passer à l'adaptation des paramètres d'impédance en utilisant la logique floue, et cela dans les deux cas d'un environnement de forte raideur et de faible raideur.

Remarque :

La structure de l'adaptateur flou utilisée en simulation, est celle présentée au chapitre III (*Paragraphe III.7.2*).

IV.6.3.1) Adaptation des paramètres dans le cas d'une Forte Raideur :

Comme nous l'avons vu au *paragraphe (IV.5.2)*, pour utiliser l'adaptateur flou, nous devons fixer les paramètres de l'impédance absolue ainsi que les paramètres d'inertie de l'impédance relative, nous devons également initialiser les paramètres de raideur et d'amortissement à adapter et fixer les gains des entrées et des sorties floues.

Pour une raideur de $K_e = 157000 \text{ N/m}$, et $K_f = 100$, nous avons choisi les paramètres d'impédance absolue et les paramètres d'inertie de l'impédance relative, comme suit :

$$M_{Ad} = \text{diag}[1, 1, 1]_{Kg}$$

$$B_{Ad} = \text{diag} [160, 160, 160]_{NS/m}$$

$$K_{Ad} = \text{diag}[9000, 9000, 9000]_{N/m}$$

$$M_{Rd} = \text{diag} [0.1, 0.1, 0.1]_{Kg}$$

Les paramètres initiaux de la raideur et de l'amortissement de l'impédance relative, sont choisis comme suit :

$$\mathbf{B}_{Rd} = \text{diag} [16, 16, 16]_{NS/m},$$

$$\mathbf{K}_{Rd} = \text{diag} [900, 900, 900]_{N/m}.$$

Concernant le choix des gains des entrées de l'adaptateur, une règle pratique consiste à prendre le gain correspondant à l'erreur, proche de la valeur de l'erreur désirée et le gain correspondant à la variation de l'erreur égal au dixième du gain correspondant à l'erreur.

Pour le gain de l'erreur en force et de sa variation, nous avons choisi :

$$\mathbf{G}_{devF} = 0.1;$$

$$\mathbf{G}_{\Delta F} = 0.01;$$

Pour les gains de sorties, nous avons pris:

$$\mathbf{G}_{\Delta K} = 5;$$

$$\mathbf{G}_{\Delta \xi} = 1;$$

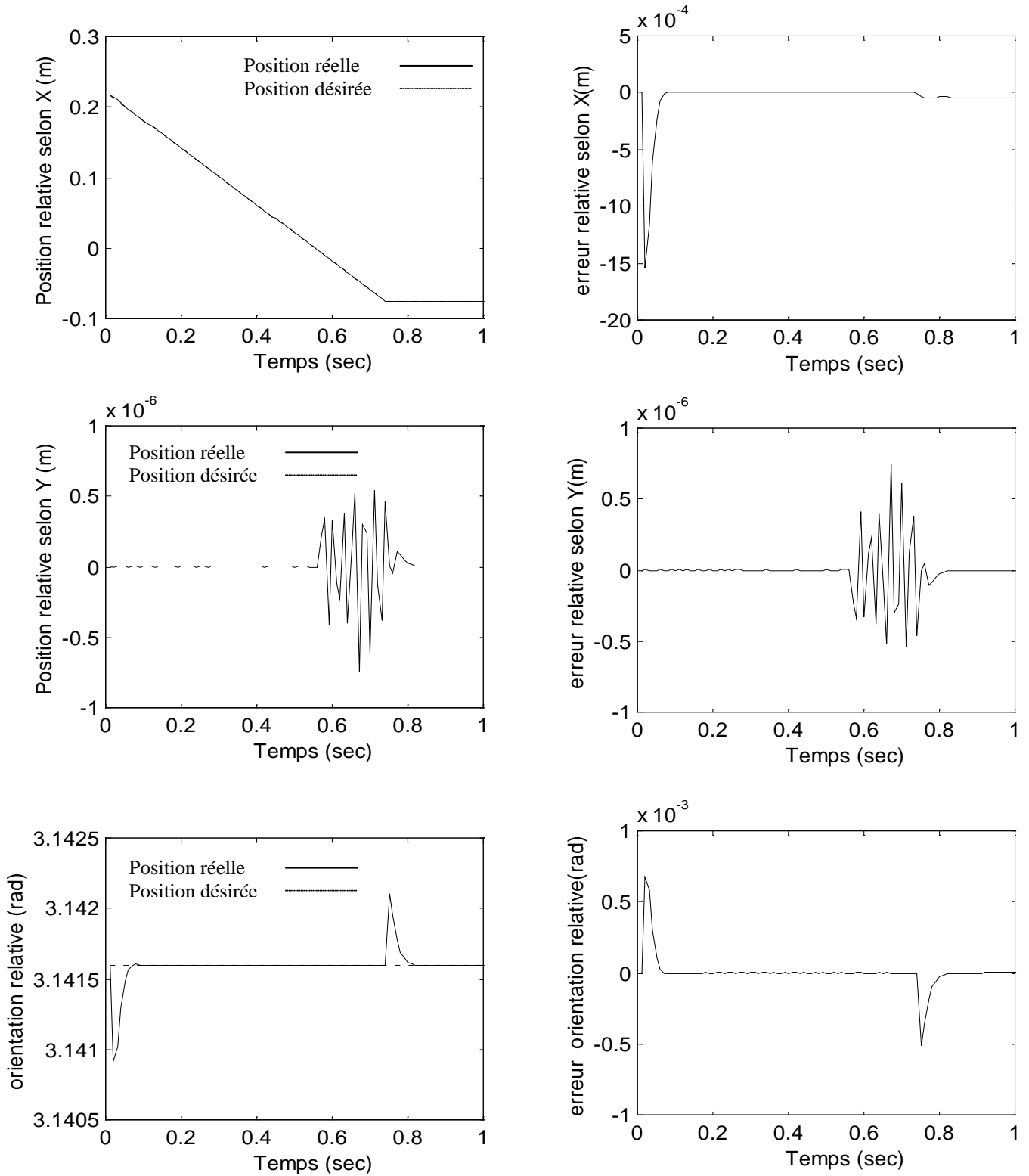
La simulation de la commande en impédance généralisée adaptative – dans le cas d'une forte raideur -, donne les résultats de poursuite en position et poursuite en force suivants :

1) Poursuite des consignes en positions:

La position relative est aussi bien asservie, suivant l'axe X et l'axe Y qu'au niveau de l'orientation, *Figure(4.19)*. Les erreurs moyennes et maximales de la position relative sont données comme suit :

$$e_{Rxmoy} = -0.04 \text{ mm} \quad e_{Rymoy} = -7.22 \cdot 10^{-6} \text{ mm} \quad e_{R\alpha moy} = 3.87 \cdot 10^{-4} \text{ rad}$$

$$e_{Rxmax} = 1.5 \text{ mm} \quad e_{Rymax} = 7.44 \cdot 10^{-4} \text{ mm} \quad e_{R\alpha max} = 6.79 \cdot 10^{-4} \text{ rad}$$



Figure(4.19): position relative et son erreur
(Cas d'une forte raideur)

La position absolue est très bien asservie, *Figure(4.20)*. Les erreurs moyennes et maximales de la position absolue, suivant l'axe X et L'axe Y et l'orientation sont de valeurs respectives:

$$e_{Axmoy} = 1.07 \cdot 10^{-4} \text{ mm}$$

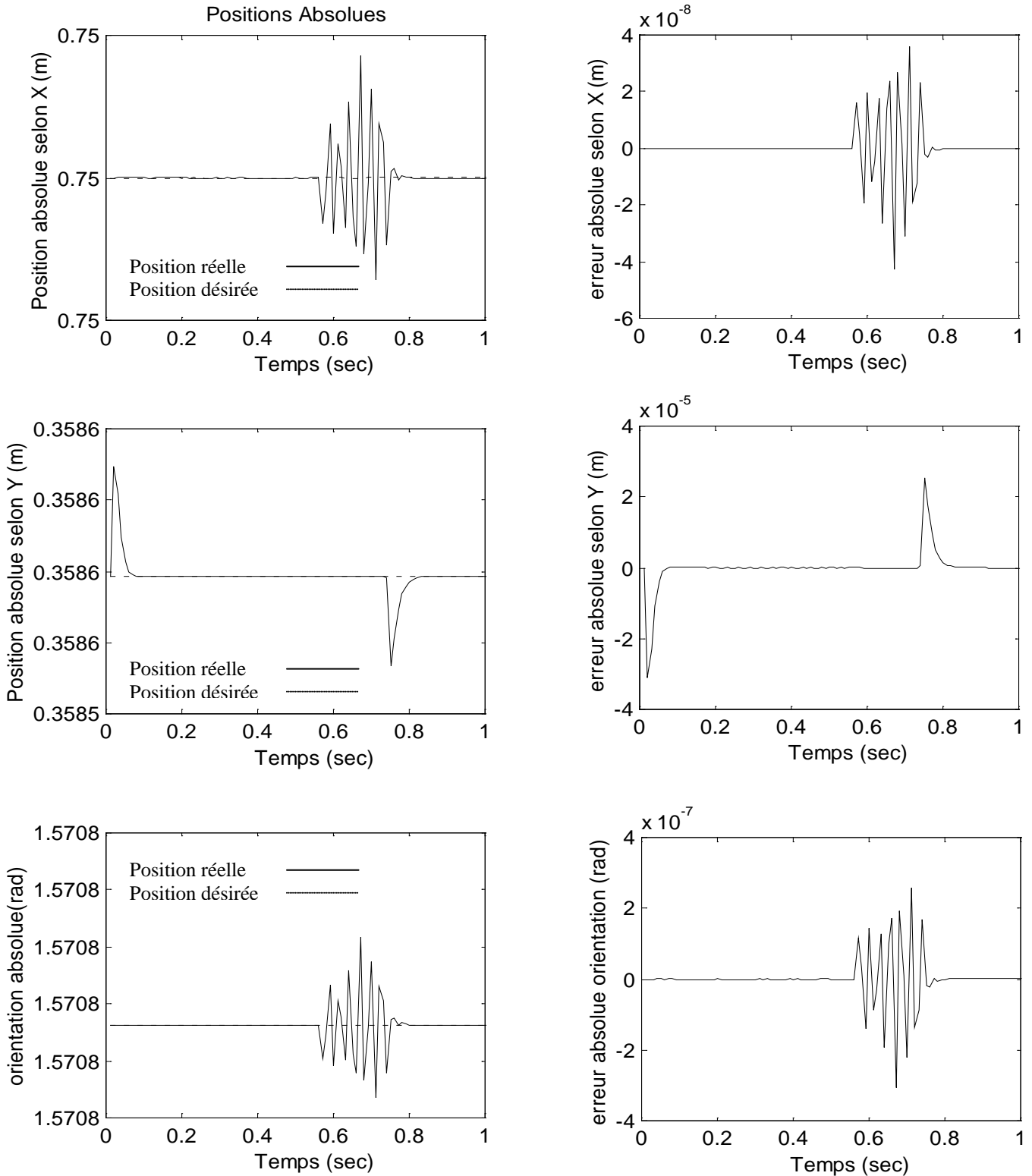
$$e_{Aymoy} = -5.81 \cdot 10^{-5} \text{ mm}$$

$$e_{A\alpha moy} = 7.4 \cdot 10^{-10} \text{ rad.}$$

$$e_{Axmax} = 4.29 \cdot 10^{-5} \text{ mm}$$

$$e_{Aymax} = 3.09 \cdot 10^{-2} \text{ mm}$$

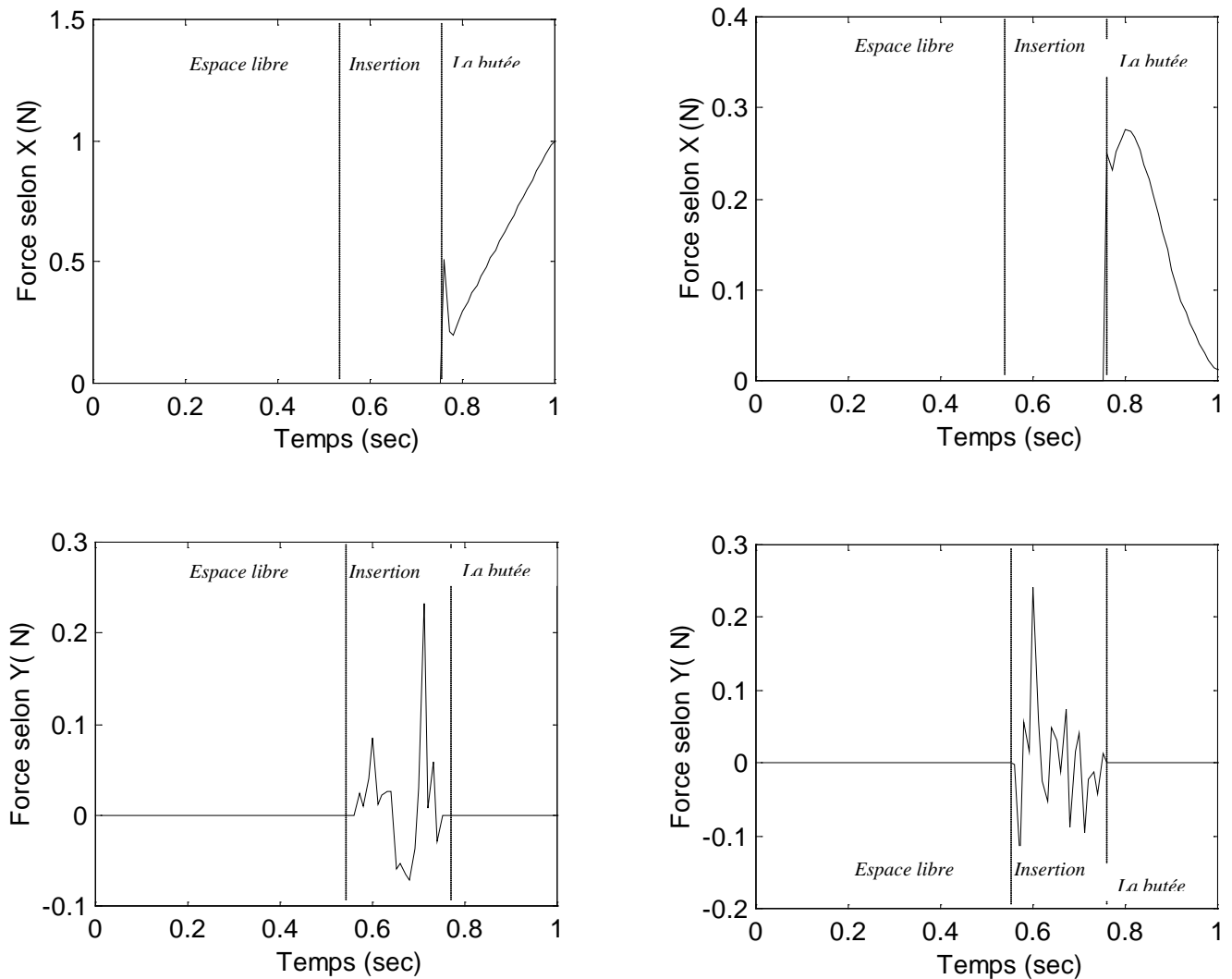
$$e_{A\alpha max} = 3.08 \cdot 10^{-7} \text{ rad.}$$



**Figure(4.20):position absolue et son erreur
(Cas d'une forte raideur)**

2) La Force d'interaction:

Pour montrer l'effet de l'adaptateur flou sur la force de contact dans notre commande, nous avons simulé la commande en impédance généralisée sans et avec l'utilisation de l'adaptateur flou, et cela pour les mêmes paramètres d'impédance. La *figure(4. 21)* donne les résultats de la poursuite en force obtenus dans les deux cas.



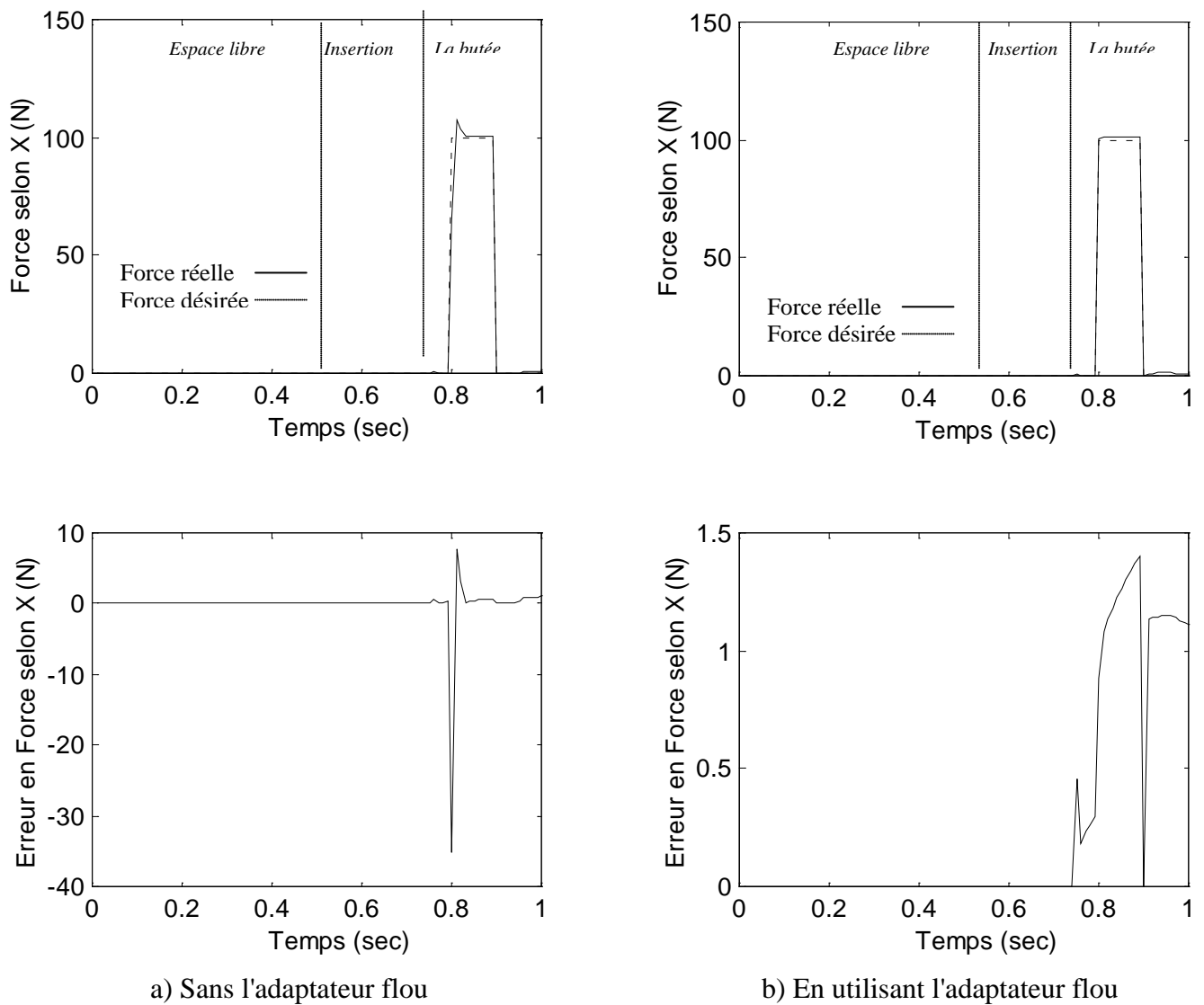
a) Sans l'adaptateur flou

b) En utilisant l'adaptateur flou

Figure(4.21) : La force d'interaction.

Pour une consigne en force $F_{Id} = 0 \text{ N}$, l'utilisation de la commande en impédance généralisée avec des paramètres fixes et un faible amortissement, induit une divergence de la force de contact suivant l'axe X (la force d'interaction évolue d'une manière croissante) , *Figure (4.21)*. Alors qu'en utilisant l'adaptateur flou, la force d'interaction est bien régulée avec une erreur maximale qui ne dépasse pas 0.3 N selon les deux axes X et Y.

De même, dans le cas d'une force désirée $F_{Id} = 100 \text{ N}$, l'adaptateur flou permet d'atténuer le dépassement de la force de contact, comme le montre la *figure(4.22)* :



Figure(4.22) : La force d'interaction.

Sans l'adaptateur flou l'erreur en force dépasse $30N$, ce qui pourrait détériorer les pièces manipulées, tandis qu'en utilisant l'adaptateur flou l'erreur en force ne dépasse pas $1.4N$, *figure(4.22)*.

3) Interprétation des résultats :

Les résultats obtenus montrent que l'adaptateur flou permet d'ajuster les paramètres d'impédance en assurant une bonne poursuite en position et une bonne poursuite en force sans dépassement de cette dernière. En effet, dans le cas de la commande en impédance généralisée à paramètres fixes, un grand amortissement est nécessaire pour assurer une force de contact stable (sans dépassement, sans oscillation), mais cela pourrait provoquer un comportement lent du système et détériorer ces performances (point de vue rapidité). L'adaptateur flou par contre, permet d'augmenter l'amortissement au moment même de l'interaction. Ainsi pendant que les deux bras se déplacent en espace libre le système n'est pas retardé par un grand amortissement et au moment du contact la force d'interaction est bien régulée, même en présence d'un environnement de forte raideur.

Les paramètres d'impédance initiaux ainsi que les gains de normalisation jouent un rôle extrêmement important dans la commande adaptative.

- Les paramètres d'impédance initiaux doivent être choisis de façon à assurer un bon asservissement de la position, car en espace libre l'adaptateur flou n'est pas activé. Dans ce cas, c'est une commande en impédance à paramètres fixe qui assure la commande en position des effecteurs.
- les gains de normalisation des entrées/sorties dépendent des paramètres initiaux choisis, de la raideur de l'environnement et de la consigne en force désirée.

IV.6.3.2) Adaptation des paramètres dans le cas d'une Faible Raideur :

Pour une raideur faible $K_e = 157 N/m$, et $K_f = 100$, nous avons choisi les mêmes paramètres d'inertie et la même initialisation que dans le cas d'une forte raideur :

$$M_{Ad} = \text{diag}[1, 1, 1]_{Kg}.$$

$$B_{Ad} = \text{diag} [160, 160, 160]_{NS/m},$$

$$K_{Ad} = \text{diag} [9000, 9000, 9000]_{N/m}$$

$$M_{Rd} = \text{diag} [0.1, 0.1, 0.1]_{Kg} ,$$

Les paramètres initiaux de la raideur et de l'amortissement de l'impédance relative, sont choisis comme suit :

$$B_{Rd} = \text{diag} [16, 16, 16]_{NS/m},$$

$$K_{Rd} = \text{diag} [900, 900, 900]_{N/m} .$$

Pour le gain de l'erreur en force et de sa variation, nous avons choisi :

$$G_{devF} = 0.1;$$

$$G_{\Delta F} = 0.01;$$

Pour les gains de sorties nous avons pris:

$$G_{\Delta K} = 40.$$

$$G_{\Delta \xi} = 1.$$

La simulation de la commande en impédance généralisée adaptative –dans le cas d'une faible raideur- donne les résultats de poursuite en position et en force suivants :

1) Poursuite des consignes en positions:

La position relative est aussi bien asservie, suivant l'axe X et l'axe Y qu'au niveau de l'orientation, *Figure(4.23)*. Les erreurs moyennes et maximales de la position relative suivant l'axe X et L'axe Y et l'orientation sont respectivement :

$$e_{R_{xmoy}} = 0.31 \text{ mm}$$

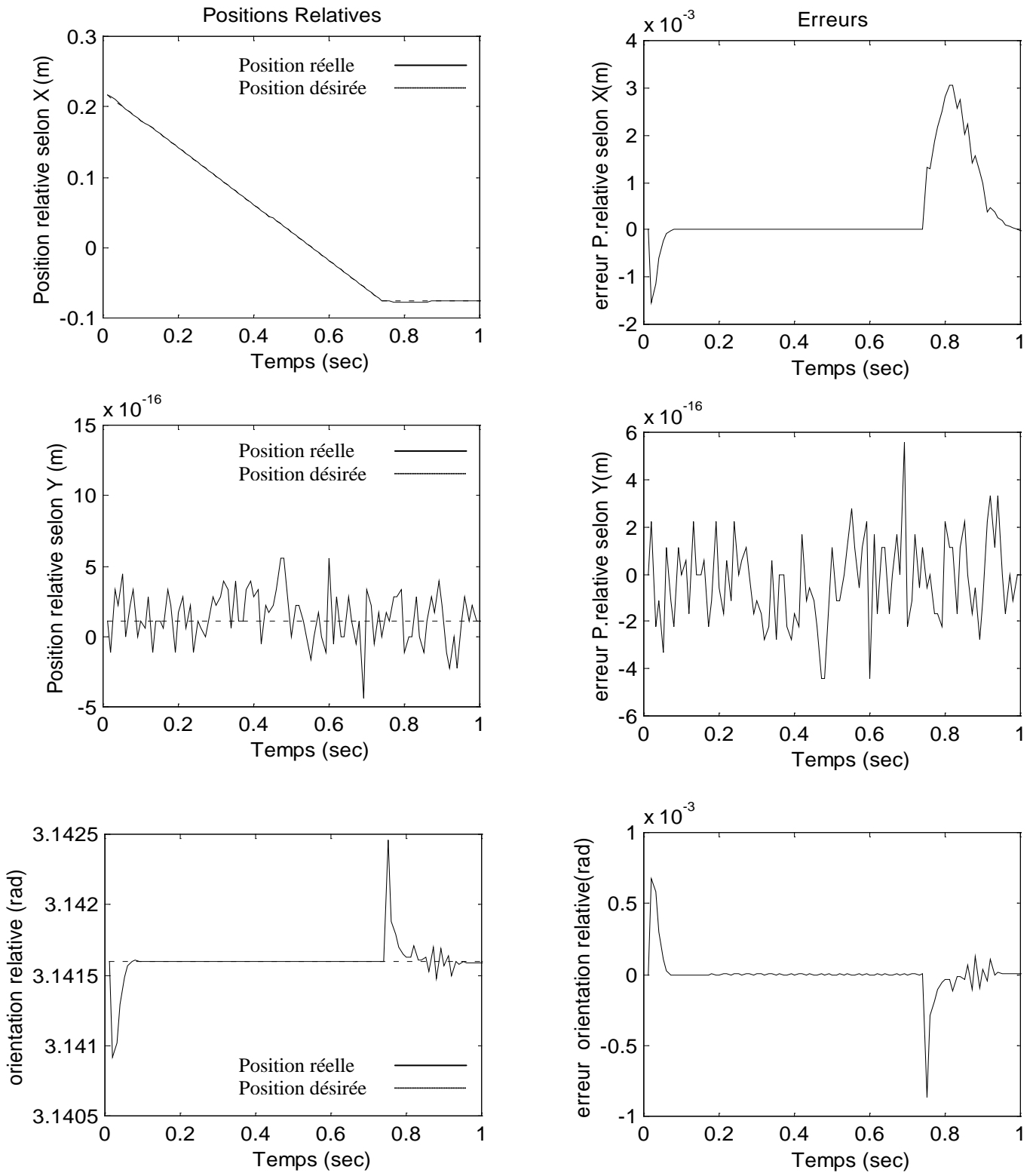
$$e_{R_{ymoy}} = -2.77 \cdot 10^{-14} \text{ mm}$$

$$e_{R_{\alpha moy}} = 1.04 \cdot 10^{-7} \text{ rad}$$

$$e_{R_{xmax}} = 3.00 \text{ mm}$$

$$e_{R_{ymax}} = 5.55 \cdot 10^{-13} \text{ mm}$$

$$e_{R_{\alpha max}} = 8.70 \cdot 10^{-4} \text{ rad}$$

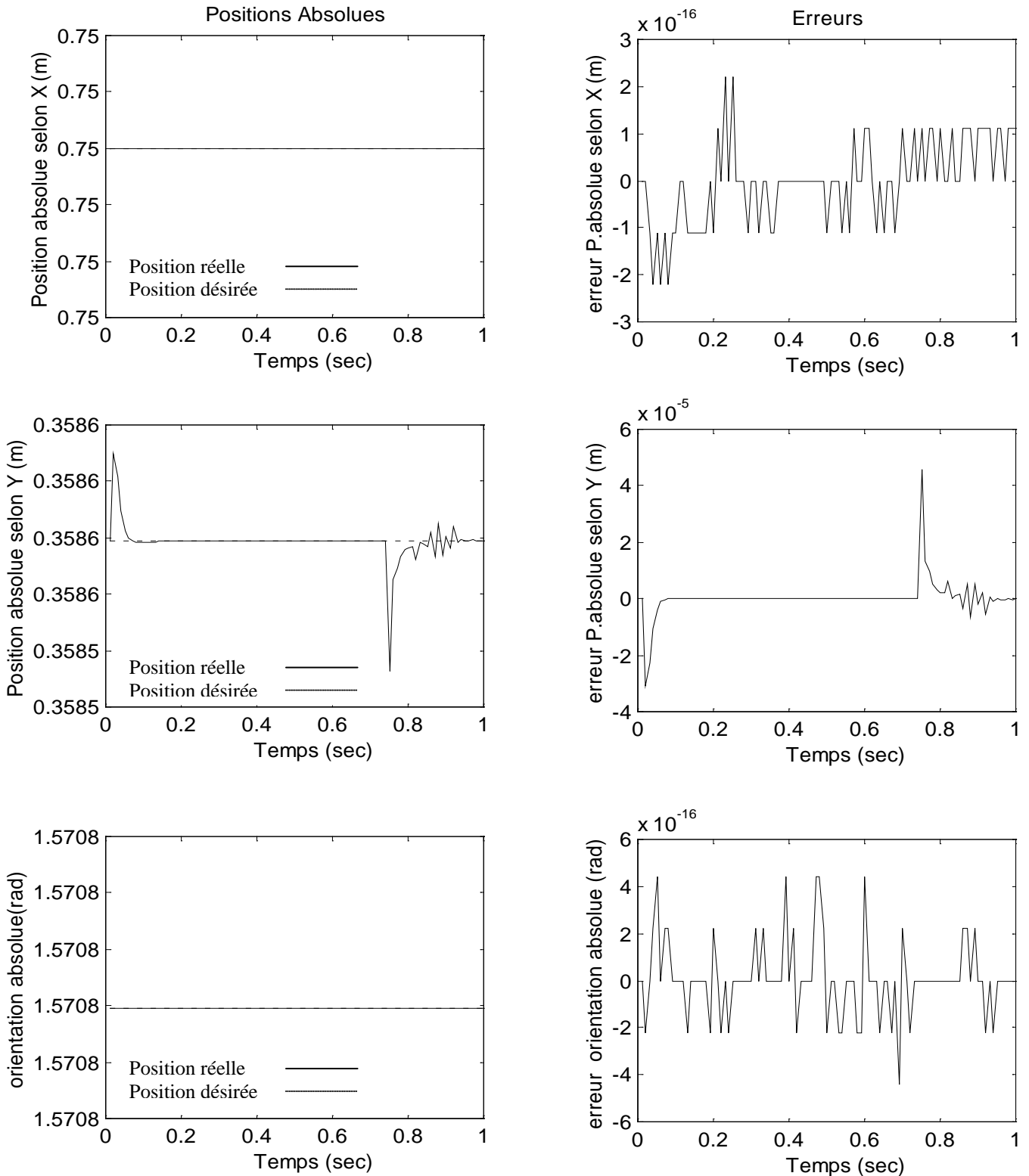


Figure(4.23):position relative et son erreur.
(Cas d'une faible raideur)

La position absolue est aussi bien asservie, suivant l'axe X et l'axe Y qu'au niveau de l'orientation, *Figure(4.24)*. Les erreurs moyennes et maximales de la position absolue, sont respectivement:

$$e_{Axmoy} = -1.11 \cdot 10^{-15} \text{ mm} \quad e_{Aymoy} = 1.45 \cdot 10^{-4} \text{ mm} \quad e_{A\alpha moy} = 8.88 \cdot 10^{-18} \text{ rad.}$$

$$e_{Axmax} = 2.22 \cdot 10^{-13} \text{ mm} \quad e_{Aymax} = 4.60 \cdot 10^{-2} \text{ mm} \quad e_{A\alpha max} = 4.44 \cdot 10^{-16} \text{ rad.}$$



**Figure(4.24):position absolue et son erreur.
(Cas d'une faible raideur)**

2) La Force d'interaction:

De la même manière que dans le cas d'une forte raideur et pour montrer l'effet de l'adaptateur flou sur la force de contact, nous avons simulé la commande en impédance généralisée sans et avec l'utilisation de l'adaptateur flou pour les mêmes paramètres d'impédance. La *figure(4.25)* présente les résultats de la poursuite en force obtenus dans les deux cas.

Pour une consigne en force $F_{Id} = 0 \text{ N}$, et en utilisant l'adaptateur flou, la force d'interaction est bien régulée, avec une erreur maximale qui ne dépasse pas 0.25 N selon l'axe X. Alors que pour les mêmes paramètres d'impédance et sans l'utilisation de l'adaptateur flou l'erreur de la position relative augmente pour dépasser 1.5 cm , *figure(4.26)*, Dans ce cas précis, au lieu que les deux pièces à assembler s'arrêtent à la fin de l'insertion, elles continuent à pénétrer à l'intérieur l'une de l'autre en exerçant une force de contact croissante dans le temps (*figure (4.25)*), ce qui pourrait les endommager.

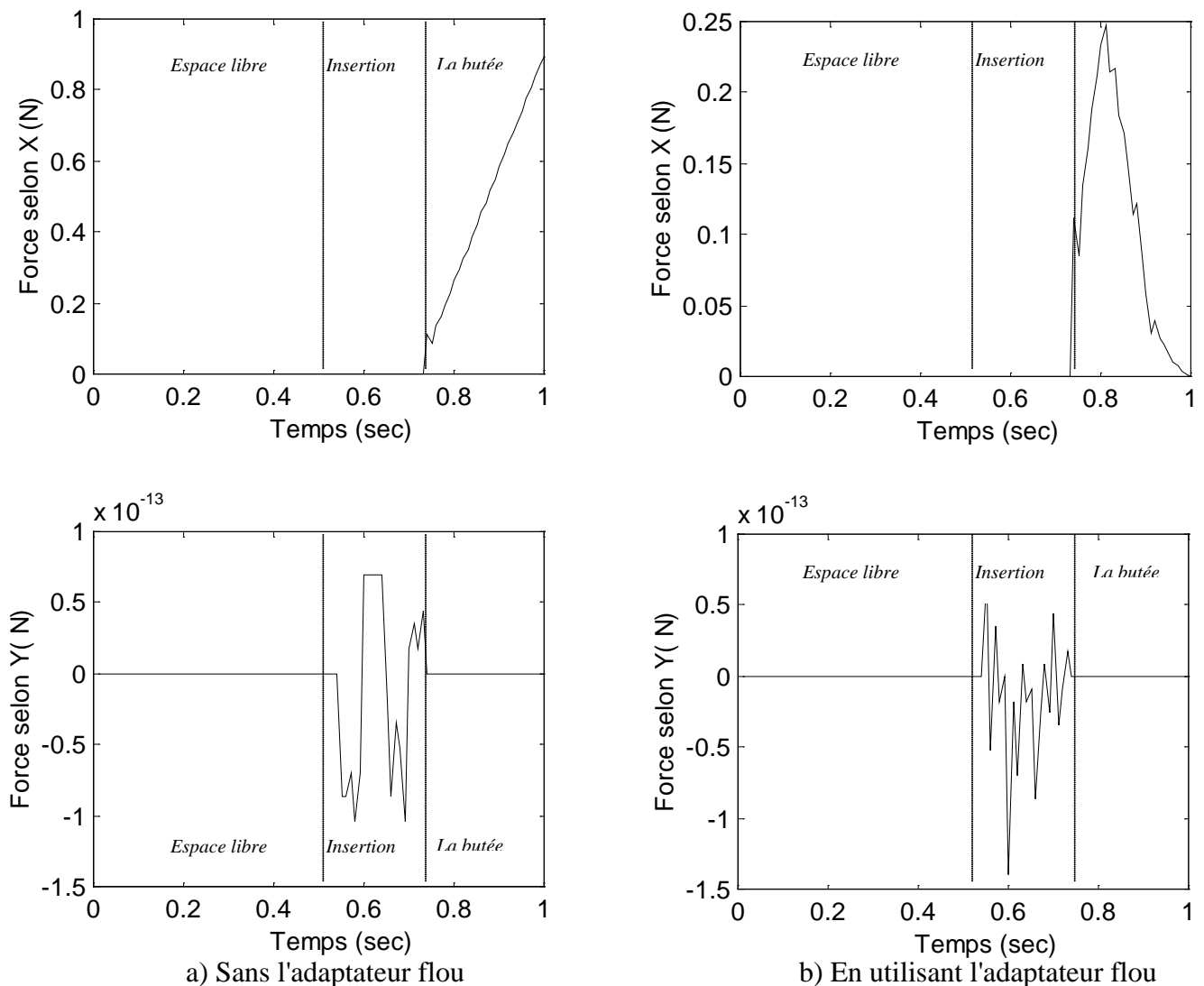
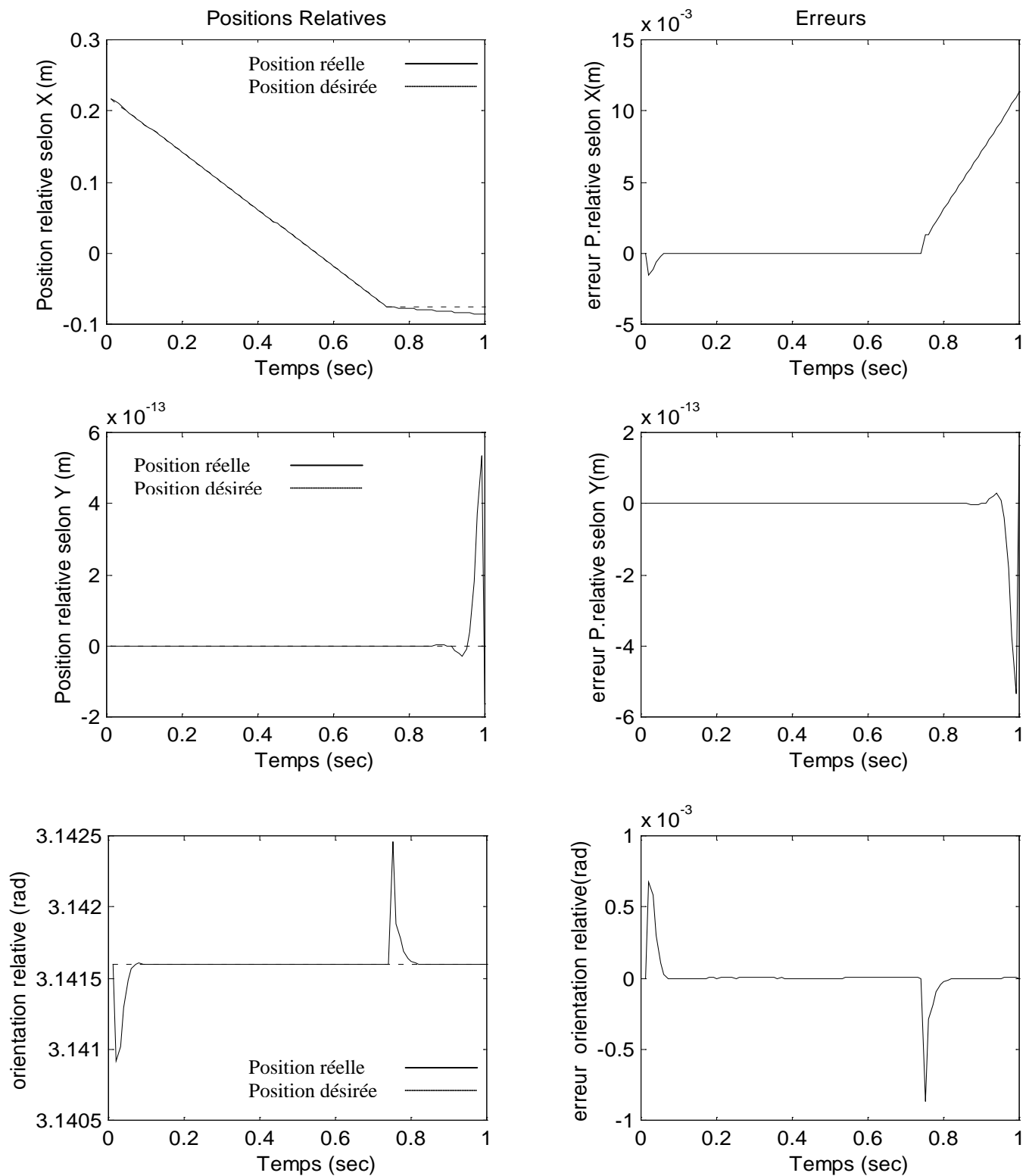


Figure (4.25) : Force d'interaction.

(Cas d'une faible raideur).



Figure(4.26):position relative et son erreur.
 (Commande en impédance généralisée non adaptative,
 Cas d'une faible raideur)

3) Interprétation des résultats :

Des résultats obtenus, nous pouvons déduire que la commande en impédance généralisée sans adaptation des paramètres donne des résultats différents selon la raideur de l'environnement. En effet, dans le cas où nous avons choisi des paramètres d'amortissement faible, le comportement du système dépend de la raideur de l'environnement.

- Pour un environnement de forte raideur, le passage du non-contact au contact induit une force de contact instable qui augmente dans le temps avec apparition de pic en force, qui pourrait endommager les pièces à assembler.
- Pour un environnement de faible raideur, le passage du non-contact au contact induit une force d'interaction croissante mais d'amplitude plus faible que le premier cas (cela est dû à la raideur faible de l'environnement), mais il induit aussi un risque de déformation des pièces, produit par la pénétration continue de ces dernières, et cela même à la fin de l'insertion où les pièces sont censée s'arrêter.

Pour pallier à ce problème, dans le premier cas nous devons augmenter le paramètre d'amortissement, ce qui pourrait rendre le système très lent. Alors que dans le deuxième cas on doit diminuer la raideur de l'impédance désirée pour éviter l'endommagement des pièces, mais cela affecterait l'asservissement de la position des effecteurs en espace libre. Autrement dit, pour chaque raideur nous avons une solution particulière et celle-ci n'est pas toujours optimale.

Pour la commande en Impédance généralisée adaptative ce problème ne se pose plus, car les paramètres d'impédance sont modifiés au moment même du contact et en fonction de la raideur de l'environnement. Ainsi, dans les deux cas où l'environnement est de forte ou de faible raideur les positions relative et absolue des effecteurs sont bien asservies. De plus, le passage du non-contact au contact est stable et est sans dépassement de force. La force d'interaction est régulée et asservie à une force de consigne. Les seuls paramètres à changer sont les gains de normalisation des entrées qui dépendent de la force désirée ainsi que les gains en sortie qui dépendent du comportement désiré du système et de la raideur de l'environnement.

IV.7) Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons simulé la commande coordonnée en Impédance généralisée pour une tâche d'assemblage. La simulation a été faite sur deux robots manipulateurs à segments rigides, à trois degrés de liberté chacun.

Les résultats obtenus par simulation prouvent l'efficacité de la commande coordonnée en Impédance généralisée, ce qui permet ainsi de la valider. En effet, notre commande permet de commander le mouvement relatif et le mouvement absolu des effecteurs en espace libre (phase d'approche) et en espace contraint (phase d'insertion). La commande coordonnée en Impédance généralisée permet aussi de commander et asservir la force de contact à une force de consigne et de contrôler les forces externes qui pourrait s'appliquer, éventuellement, sur le système.

L'introduction d'un adaptateur flou à la commande coordonnée en Impédance généralisée, offre une souplesse et une flexibilité à la commande lui permettant ainsi d'adapter ses paramètres pour assurer une force de transition stable du passage du non-contact au contact des effecteurs, selon la raideur de l'environnement.

Au terme de ce manuscrit, nous nous proposons de faire un récapitulatif de notre travail, d'analyser globalement les résultats obtenus et enfin de dresser des perspectives qui permettront de finaliser les objectifs que nous nous étions fixés au début de cette thèse.

L'évolution des besoins du milieu industriel a fait apparaître de nouvelles classes de tâches robotisées, dont la réalisation dépasse largement la capacité d'un seul bras manipulateur. Ces tâches vont du déplacement d'objet lourds ou à plusieurs degrés de liberté à la déformation d'objet, à l'assemblage de différentes pièces, etc. La réalisation de toutes ces tâches a conduit à l'utilisation de plusieurs bras coopérants. Cette coopération apporte des avantages certains dans la réalisation de ces tâches et leur octroie une certaine flexibilité.

Dans notre travail nous nous sommes intéressés à la tâche d'assemblage. Outre les avantages apportés par la coopération multi-robots dans la réalisation d'opérations d'assemblage, ce type de configuration engendre des problèmes supplémentaires tels que le problème de commande et la prise en charge des forces d'interactions.

L'objet de notre travail a été d'élaborer une commande coordonnée de robots coopérants, pour la réalisation d'opération d'assemblage de deux objets tenus chacun par un bras manipulateur et cela en intégrant les forces d'interaction.

Dans notre travail, nous avons commencé par une analyse des différentes commandes proposées en littérature, que nous pouvons répartir de façon grossière, en trois types de commande: La commande Maître/Esclave, la commande Hybride Force/Position et la commande en Impédance.

Après une modélisation du comportement cinématique et dynamique de deux robots manipulateurs coopérants dans une tâche d'assemblage, nous avons élaboré une commande coordonnée basée sur la commande en Impédance généralisée.

La commande en impédance généralisée ne considère pas les interactions dynamiques comme étant une source de perturbation qu'il faut éliminer, mais comme une partie intégrante de la tâche. C'est l'idée mère de la commande en impédance, elle suppose que la tâche du robot manipulateur doit fondamentalement être décrite, pas en termes de mouvements, ni en termes de forces, mais en termes de relation entre eux, et cela par la notion d'impédance. Cette commande permet donc et dans le cas d'un seul robot manipulateur, de contrôler la relation qui existe, entre la position et la force au niveau de l'organe terminal, plutôt que de le commander soit en force ou en position comme est le cas de la plus part des autres commandes. La commande en impédance généralisée est une généralisation de la commande en impédance. Dans cette commande généralisée l'impédance est choisie comme une fonction de second ordre, reliant non plus la force à l'erreur en mouvement mais plutôt l'erreur en force à l'erreur en mouvement, permettant ainsi l'asservissement de la force d'interaction à une force de consigne.

Dans le cas de coopération de deux robots en vue de la réalisation de tâche d'assemblage, nous avons combiné entre la commande en impédance généralisée et la notion d'impédance relative et impédance absolue, proposée par *Nagai* [Naga 95]. Nous avons modifié la définition de la position absolue, en la définissant comme étant la valeur moyenne de la position des deux effecteurs. Ainsi, nous avons obtenu une commande en impédance généralisée coordonnée qui permet de commander non seulement le mouvement relatif des deux bras manipulateurs et la force interne induite par la mise en contact des deux objets à assembler, mais de commander aussi le mouvement absolu du système total et contrôler éventuellement les forces externes produites par un environnement extérieur.

Les résultats de simulation sur deux robots manipulateurs rigides à trois degrés de libertés, sont très satisfaisants. En effet, la commande en impédance généralisée coordonnée offre une très bonne poursuite de la position relative des organes terminaux ainsi que la position absolue du système total, et cela dans les deux cas où les manipulateurs sont en mouvement libre ou en mouvement contraint. Par ailleurs, elle assure un bon asservissement de la force d'interaction à une force de consigne, lors de la mise en contact des deux objets.

Dans le but d'accroître la stabilité de la phase critique de transition, du non-contact au contact des deux effecteurs et améliorer les performances de la force de transition, c'est à dire, réduire les dépassements et atteindre la force d'état stable désirée, indépendamment de la structure de l'environnement (raideur des pièces), nous avons utilisé la logique floue qui offre un caractère simple et efficace pour ajuster automatiquement les paramètres de l'impédance et rendre notre commande coordonnée adaptative à n'importe quel type de pièce (point de vue raideur). Les résultats de simulation là aussi, était très satisfaisants et ont montré clairement les bonnes performances de notre commande, ce qui a permis ainsi de la valider.

Il est nécessaire de vérifier les performances attendues sur une opération réelle d'assemblage. Des contraintes de temps et de matérielles ne nous ont pas permis de le faire et de le présenter ici. Nous souhaitons le réaliser en perspectives. Notre commande coordonnée en impédance généralisée a été appliquée pour une tâche d'assemblage, nous pouvons envisager également de l'élargir et l'appliquer pour les tâches de transport d'objet ou bien la réalisation de tâche de déformation " en l'air ".

Bibliographie

- [Babu 98] R. Babuska, "Fuzzy modelling : Principles, methods and applications. 1998.
- [Bena 97] M. Benachour, "Commande en impédance", Thèse d'ingénieur, USTB, 1997.
- [Bert 95] A. Berthe, "Etude de la robustesse de Schémas de commande Position/Force pour robots à deux bras", Thèse d'état USTL, Montpellier, Juin 1995.
- [Boni 96] R.G. Bonitz et T.C. Hsia, "Internal force-based impedance control for cooperating manipulators", IEEE Transaction on Robotics and Automation, Vol.2.n°1, Février 1996, pp78-88.
- [Bouc] B. Bouchon-Meunier, "La logique floue et ses applications ", Edition Addison-wesley, France, SA.
- [Bouf 92] Y. E. Bouffard-Vercelli, " Commande hybride et coordination de deux bras manipulateurs en environnement non structuré : manipulabilité et assemblage", Thèse d'état, USTL Montpellier, 17 décembre 1992.
- [Boun 99] A. Bounar, N. Derragui, "La commande en Force/Impédance", Thèse d'ingénieur, USTHB, 1999.
- [Cari 90] C. R. Carignan, "Adaptive tracking for complex systems using reduced-order models", IEEE, International conference on Robotics and Automation 1990, pp 2078-2083.
- [Chan 95] S. P. Chan et H. C. Liaw, " Impedance control Strategy for robotic for assembly tasks ", Proceedings of the 1995 IEEE IECON 21st International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation, vol.2, pp.1372 -1377
- [Chan 96] S. P. Chan et H. C. Liaw, " Generalized impedance control of robot for assembly tasks requiring compliant manipulation", IEEE Transaction on Industrial electronics, Vol.43.n°4, Août 1996, pp 453-461.
- [Chia 92] P.Chiacchio, S.Chiaverini et B.Siciliano, "Cooperative control schemes for multiple robot manipulator systems", IEEE, International conference on Robotics and Automation, Nice, mai 1992, pp 2218-2223.
- [Coif 81] P. Coiffet, Les Robots, Tome1 : "Modélisation et commande", Hermès, Paris, 1981.
- .

- [Crai 88] R. Craig Carignan et D.L. Aking, " Cooperative control of two arms in the Transport of an Inertial load in Zero Gravity", IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol.4, No 4, Août 1988.
- [Dauc 90] P.Dauchez, " Description de tâches en vue de la commande hybrides symétriques d'un robot manipulateur à deux bras", Thèse d'Etat, USTL Montpellier, 8 février 1990.
- [Derr 03] N. Derragui, M. Kadri et B.Bouzouia, " Generalized Cooperative Impedance Control of Dual-arm for Assembly Task", IEEE 11th International Conference on Advanced Robotics ICAR, 30 juin-3 juillet 2003, Coimbra, Portugal, pp.1196-1201.
- [Fiel 93] G. Field et Y. Stepanenko, "Model reference impedance control of robotic manipulators" Processing of the 1993 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal , Vol.2, pp. 614 –617.
- [Guih 95] M. Guihard, "Etude de lois de commandes adaptatives d'actionneurs pneumatiques pour le contrôle dynamique d'un robot marcheur", Université de pierre et marie curie, Juin 1995.
- [Haya 86] S. A. Hayati, "Position and force control of multi-arm cooperating robots", acts IEEE International Conference on robotic and automation, san Francisco, USA, 7-10 avril 1986, pp 82-89.
- [Haya 88] S. A. Hayati, "Position and force control of coordinated multiple arms", IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, Vol.24.n°. 5, Septembre 1988, pp584-590.
- [Hoga 85] N. Hogan, "Impedance control: An approach to manipulation": Part I-Theory, Part II-Implementation, Part III-Application, ASME Journal of dynamic systems measurement and control 1985, Vol.3, pp1-24.
- [Hoga 87] N. Hogan, "Stable execution of contact tasks using impedance control", IEEE International conference on Robotics and Automation, Raleigh, Etats-Unis, Avril 1987, pp.1047-1054.
- [Hsia 91] T. C. Hsia, T. A. Lasky, "Force tracking-impedance control of robot manipulators", Technical report N°UCD-EECS-SCR-91/3, University of California, fevrier 1991.

- [Hsia 95] T. C. Hsia, S. Jung, R. G. Bonitz, "On Force tracking impedance control with unknown environment stiffness", Proc. of IASTED International conference on Robotics and manufacturing, Monterey, Août 1995. pp. 11-116.
- [Hsu 93] P. Hsu, "Control of Multi-manipulator Systems – Trajectory Tracking, Load Distribution, Internal Force Control, and Decentralized Architecture", Proceedings of the 1989 IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol.2, pp.1234–1239.
- [Hsu 93] P. Hsu, " Coordinated Control of Multiple Manipulator Systems ", IEEE Transaction on Robotics and Automation, Vol. 9, No 4, Août 1993, pp 400-410.
- [Jung 95] S. Jung, T. C. Hsia, "On neural network application to robust impedance control of robot manipulators", Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation 1995, vol.1, pp. 869 –874.
- [Kaze 86] : H. Kazerooni, T. B. Sheridan, et P. K. Houpt, "Robust compliant motion for manipulators, part I : The fundamental concepts of compliant motion motion; part II : Design method", IEEE J. Robot Automat., vol RA-2, juin 1986, pp 83-105.
- [Khal 88] W. Khalil, "Modélisation et commande des robots", Hermès, Paris, 1988.
- [Khat 85] : O. Khatib, " The operational space formulation in robot manipulator control", Actes 15th International Symposium on industrial Robot, Tokyo, Japan, 11-13 Septembre 1985, pp.165-172.
- [Kosu 94] K. Kosuge, H. Yoshida et T. Fakuda, "Unified control for dynamic Cooperative manipulation", Proceeding. of the 1994 IEEE/RSJ Conference on Intelligent Robots and Systems, 1994, pp.1042-1047.
- [Kosu 97] K. Kosuge, T. Oosumi et H. Seki, "Decentralized Control of Manipulators Handling an Object in coordination Based Control of Each Arm", Proc. IEEE , IROS ,1997 .pp.17-22.
- [Lee 91] S. Lee et H. S. Lee, "Intelligent Control of manipulators interacting with an uncertain environment based on généralized impedance", Proceeding. of IEEE International Symp. Intelligent Control, Arlington, VA, Août 1991, pp. 61-66.
- [Meng 91] Q.-H.Meng, W.-S.Lu, "Impedance control white adaptation of robotic manipulations", IEEE Transaction on Robotics and Automation, Vol.7 n°3, Juin 1991.

- [Merl 88] : J.P. Merlet, commande par retour d'efforts", Technique de la robotique, tome 2, Col. Hermès 1988.
- [Moos 98] S. Ali. A. Moosaviant et E. Papadopoulos, "Multiple Impedance Control for Object Manipulation", Proceeding of the 1998 IEEE/ RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Victoria, B. C, Canada, Octobre 1998, pp 461-466
- [Naga 95] K. Nagai, S. Iwasa, K. Watanaba and H. Hanafusa : "Cooperative Control of dual-arm robots for reasonable motion distribution", Proceedings of the 1995 IEEE/RSJ Int. Conf. on Int. Rob and Syst, IROS' 95, pp.54 -61 vol.1.
- [Perd 91] V. Perdereau, "Contribution à la commande Hybride Force Position : Application à la coopération de deux robots", Thèse de Doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie, 18 février 1991.
- [Raib 81] M. H. Raibert, J. J. Craig, "Hybrid Position/Force control of manipulators", Trans. of the ASME, Journal of dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol.103, Juin 1981, pp126-133.
- [Schn 92] S. A. Schneider et R.H. Cannon , "Objet impedance control for Cooperative manipulation : theory and experimental results", IEEE Transaction on Robotics and Automation, Vol.8.n°.3, juin 1992, pp 383-393.
- [Sera 93] H. Seraji et R. Colbaugh, " Adaptive Force-Based Impedance Control", Proceeding of the 1993 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Yokohama, Japan, 26-30 Juillet 1993, pp 1537-1544.
- [Spon 88] M. W. Spong, R. J. Anderson, "Hybrid impedance control of robotic manipulators", IEEE journal of robotics and automation, Vol 4 n°5, Oct 1988. pp.549-556.
- [Sur 96] D. Surdilovic, "Contact stability issues in position based impedance control : Theory and experiments", IEEE International conference on Robotics and Automation, Minneapolis, Minnesota, April 1996, pp.1675-1680.
- [Surd 96] D. Surdilovic, J. Kirchhof, "A New position Based Force/Impedance Control for Industrial Robots", IEEE International conference on Robotics and Automation, Minneapolis, Minnesota, April 1996, pp 629-634.
- [Surd 99] D. Surdilovic, Z. Cojbasich , "Robust robot compliant motion control using intelligent adaptive impedance approach", IEEE International conference on Robotics and Automation, Detroit, Michigan, Mai 1999, pp 2128-2133.

- [Tao 90] J. M. Tao, J. Y. S. Luh et Y. F. Zheng, "Compliant coordination Control of Two Moving Industrial Robots", IEEE Transaction on Robotics and Automation, Vol.6, No 3, Juin 1990, pp 322-330.
- [Taro 96] M. Tarokh et S. Bailey , " Force Tracking with Unknown Environment Parameters using Adaptive Fuzzy Controllers", Proceeding of the 1993 IEEE/RSJ International Conference on Robotics and Automation, Minneapolis, Minnesota, vol.1, Avril 1996.pp. 270-275
- [Uchi 88] M. Uchiama et P. Dauchez : "A symmetric hybrid position/force control scheme for the coordination of two robots", Proceeding. of IEEE International conference on Robotics and Automation, Vol.1. 1988, pp 350-356.
- [Zhen 86] Y. F. Zheng et J. Y.Luh, 'Joint torque for control of two coordinated robots ', IEEE International Conference on Robotic and Automation, San Francisco, USA, 7-10 Avril 1986, pp1375-1380.
- [Zhen 89] Y. F. Zheng, "Kinematics and Dynamics of two Industrial Robots in Assembly", Proceedings of the 1989 IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol.3. pp. 1360 -1365 .

Annexe A

Application de la commande hybride dans la coopération multi-robots :

Nous allons présenter brièvement les différentes méthodes de commande hybrides de robots manipulateurs travaillant en coopération. Les méthodes proposées sont essentiellement des extensions des structures classiques appliquées à l'origine à un seul manipulateur.

En général, les deux robots ont le même rôle : ils contribuent simultanément à la réalisation de la consigne de position et de la consigne de force.

Pour répartir les commandes sur les actionneurs, il existe deux types d'approche :

- Première approche : Elle consiste à calculer le modèle dynamique de l'ensemble [Haya 86].
- Deuxième approche : Elle consiste à écrire les relations statiques et cinématiques du système global [Uchi 87] [Dauc 90].

a) Première approche :

La structure de la *Figure (A.1)* a été proposée par *Hayati* [Haya 86], qui le premier, a eu l'idée d'étendre la notion de commande hybride au contrôle coopératif de robots.

Hayati démontre qu'à partir du modèle dynamique de l'ensemble (Robots + Objet) et tenant compte des contraintes internes et des efforts extérieurs, le contrôleur peut être synthétisé en une somme de contrôleurs locaux de type "operational space formulation" avec découplage dans le repère opérationnel de compliance lié à l'objet.

La consigne de position X_{Ad} décrivant la trajectoire de l'objet est commune aux deux robots. La mesure de la position absolue est la moyenne des mesures respectives de position des deux points terminaux.

La redondance dans le sous-espace des efforts est résolue en minimisant l'amplitude du vecteur des forces externes désirées, pour déterminer ainsi les consignes d'efforts externes F_{Ed1} et F_{Ed2} propres à chaque manipulateur.

La matrice de sélection S permet d'assurer l'orthogonalité des commandes issues de chacun des contrôleurs, avant que celles-ci ne soit sommées sous forme de forces opérationnelles. A ces commandes, s'ajoutent les consignes de d'effort internes F_{Id1} et F_{Id2} . Celles-ci ne sont pas explicitement contrôlées. Globalement, leur effet est nul de telle sorte qu'un effort soit exercé sur l'objet sans que celui-ci ne soit déplacé.

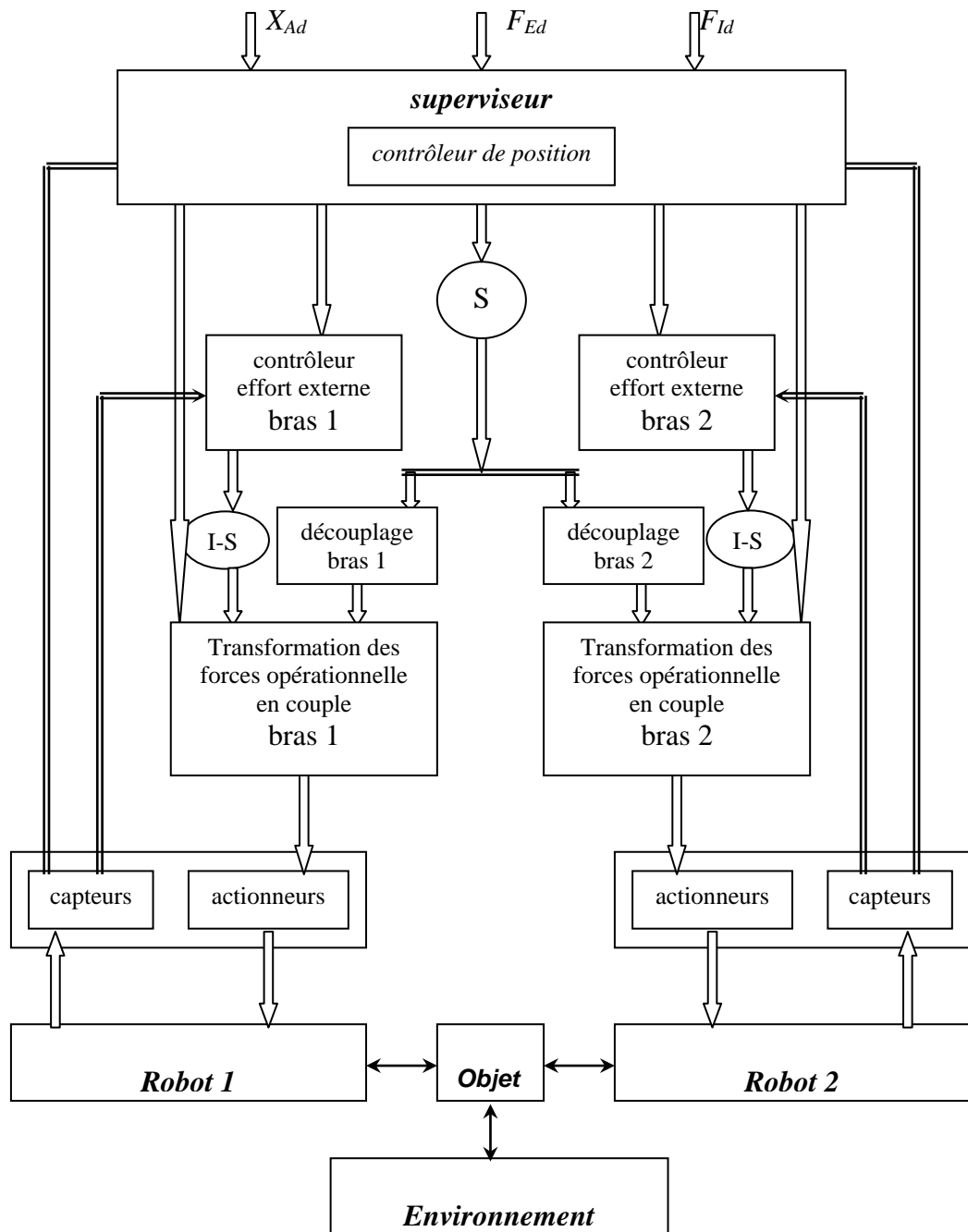


Figure (A.1) : Commande Hybride de robots coopérants
(Méthode de Hayati 1986).

Les modèles cinématiques et géométriques sont propres à chaque robot. Par contre, le modèle dynamique de chacun est recalculé dans le repère objet en incluant une partie des propriétés inertielles de l'objet par le biais d'une extension artificielle de chacun des bras jusqu'à l'origine du repère de compliance.

Cette méthode nécessite de connaître les dimensions de l'objet et les propriétés inertielles de la chaîne cinématique fermée pour le découplage de la dynamique. Ces propriétés varient brutalement lors de la phase de mise en contact des robots avec l'objet.

b) Deuxième approche :

Uchiyama, Iwasawa et Hakomori [Uchi 87] utilisent une approche différente *Figure(A.2)*, ils définissent un nouveau système de coordonnées commun aux deux manipulateurs.

Soit θ_1 et θ_2 , les vecteurs des positions généralisées respectives des deux manipulateurs. Le vecteur global θ des coordonnées généralisées, est une combinaison de ces vecteurs :

$$\theta = [\theta_1^T \theta_2^T]^T.$$

De même, le vecteur X des coordonnées opérationnelles est lié à l'objet, il s'écrit à partir du vecteur X_A de position et orientation de l'objet manipulé, et du vecteur X_R des positions et orientations relatives des deux points terminaux, sous la forme suivante:

$$X = [X_A^T X_R^T]^T.$$

Il est possible alors, d'obtenir à partir de ce nouveau système de coordonnées, de nouvelles relations statiques et cinématiques pour l'ensemble de la chaîne fermée, de la même façon que pour un seul manipulateur:

$$X = G(\theta)$$

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

L'architecture de l'asservissement repose sur le modèle cinématique inverse global J^1 . Les deux manipulateurs sont considérés comme un système unique auquel sont envoyés deux effets issus des contrôleurs sous forme de vitesse.

Les contrôleurs de force et de position sont implantés au niveau global du superviseur. Celui-ci, utilise les mesures des positions articulaires θ_1 et θ_2 de chacun des effecteurs, pour les transformer sous forme de vecteurs X et F communs aux deux manipulateurs.

L'originalité de la méthode réside dans l'utilisation d'une cinématique commune. Toutefois les calculs dépendent totalement de la configuration de la tâche et cette approche ne propose ici aucune élaboration théorique des relations statiques et cinématiques du système couplé.

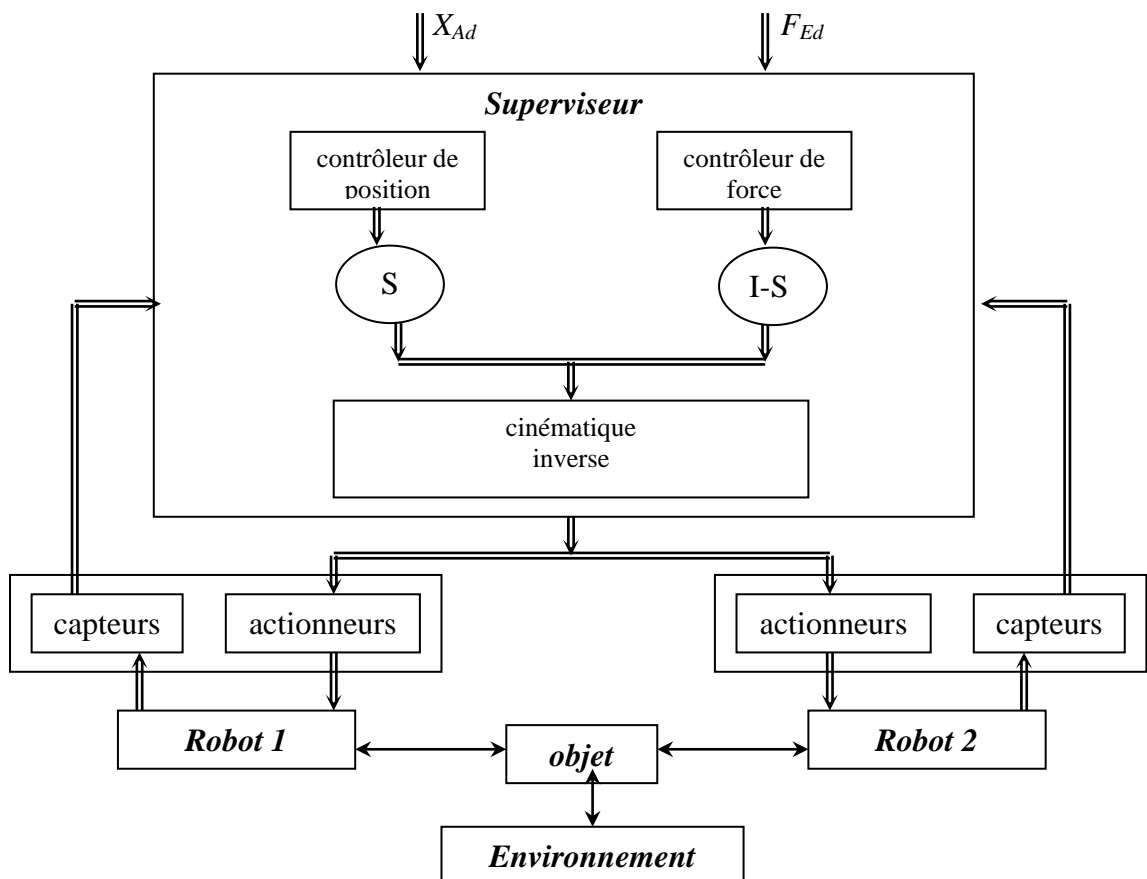
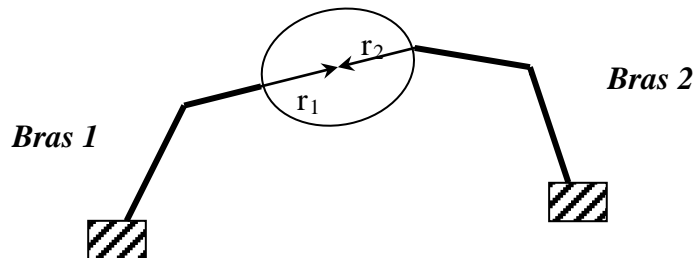


Figure (A.2) : Commande Hybride de robots coopérants (Méthode de Uchiyama, Iwasawa et Hakomori 1987).

Une autre méthode est celle de *Uchiyama et Dauchez*, *Figure(A.4)*, [Uchi 88]. Cette structure de commande, bien que différente de la précédente, repose sur le même principe de modèle géométrique et de jacobienne calculés pour l'ensemble formé par les deux robots.

Les auteurs fournissent une justification théorique des relations introduites par *Uchiyama*, grâce au nouveau concept des segments virtuels *Figure(A.3)*. Ces segments rigides imaginaires r_1 et r_2 , fixés aux points terminaux des robots et pointants sur le centre de l'objet, permettent de calculer facilement les relations statiques de la chaîne cinématique fermée.



Figure(A.3) : Segments virtuels.

De nouvelles coordonnées de l'espace de travail sont déterminées, composées d'un vecteur de force F et d'un vecteur de position X définis globalement pour la configuration de la tâche. Les vecteurs de configuration de tâche X et F sont des fonctions symétriques des mesures des positions articulaires et des forces de chacun des robots, c'est pourquoi la méthode de *Uchiyama et Dauchez*, *Figure (A.4)*, a été appelée "commande hybride symétrique".

Les asservissements de position sont réalisés au niveau global du superviseur qui envoie les commandes à chaque actionneur sous forme de couples.

Les quantités à contrôler dépendent de la configuration de la tâche, mais il n'est pas possible de contrôler simultanément la position absolue X_A et les efforts externes F_E , ni la position relative X_R et les efforts internes F_I , car les vecteurs F_E , V_A et F_I , V_R sont orthogonaux deux à deux. Une matrice de sélection est donc nécessaire pour assurer l'orthogonalité des commandes issues des contrôleurs.

Uchiyama et Dauchez montrent eux-mêmes les limites de leur méthode. Tous les calculs sont basés sur l'hypothèse que la déformation de l'objet est très faible. Lorsque l'objet est flexible ou simplement lorsque la prise de celui-ci se modifie par glissement, les extrémités des segments virtuels ne coïncident plus constamment pendant l'exécution de la tâche. Ils doivent donc être redéfinis à chaque période d'échantillonnage. L'intérêt du principe qui est de simplifier les relations, disparaît.

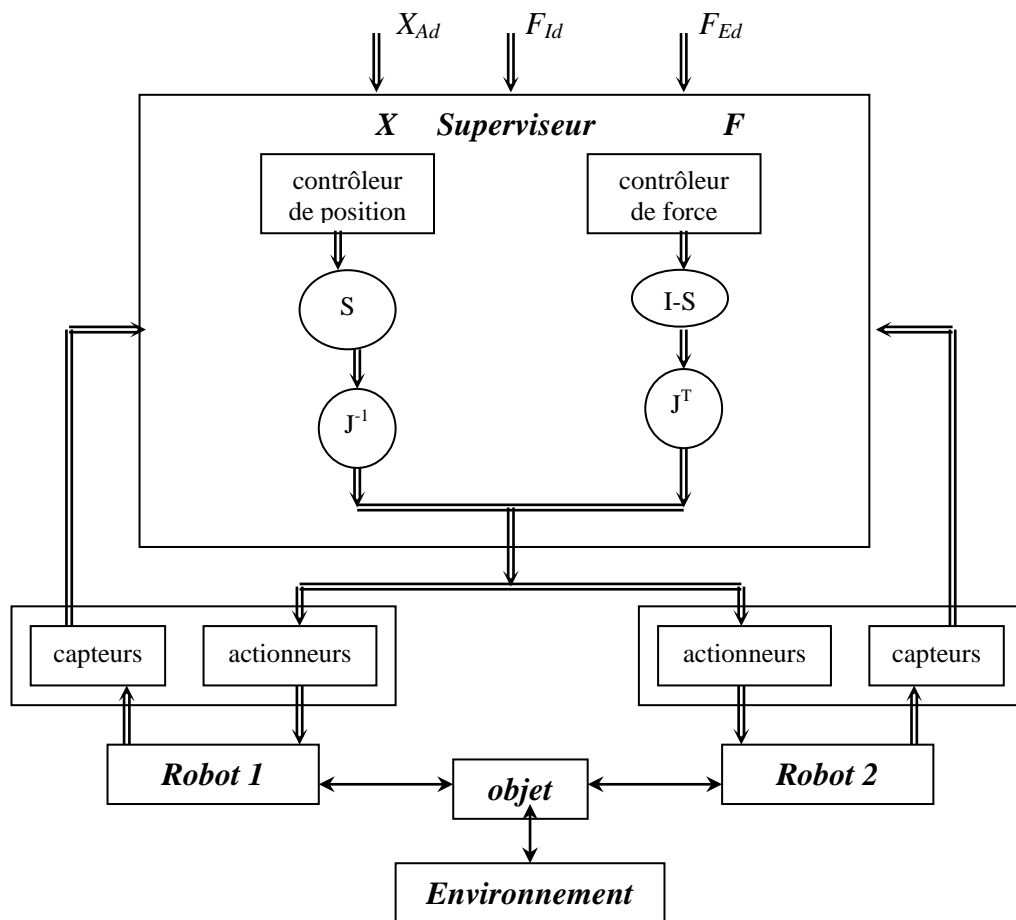


Figure (A.4) : "Commande symétrique".

En conclusion, les structures Hybrides décrites précédemment, autorisent un contrôle simultané de la position de l'objet et des forces internes et externes exercées sur celui-ci. Toutefois, ces méthodes ont les défauts de leur commande hybride d'origine. La configuration de l'asservissement requiert une analyse détaillée de la tâche en respectant la notion d'orthogonalité entre force et vitesses dans un repère lié à l'objet. Les différents repères utilisés engendrent de très nombreuses transformations géométriques. De plus

l'asservissement est réalisé au niveau global du superviseur, ce qui implique des échanges très nombreux entre les contrôleurs des robots et les superviseurs, et augmente d'autant les temps de cycle de chacune des boucles au détriment des performances dynamiques. Toute rupture des communications entre les manipulateurs et le superviseur provoquerait des comportements imprévisibles de l'un ou de l'autre des deux bras.

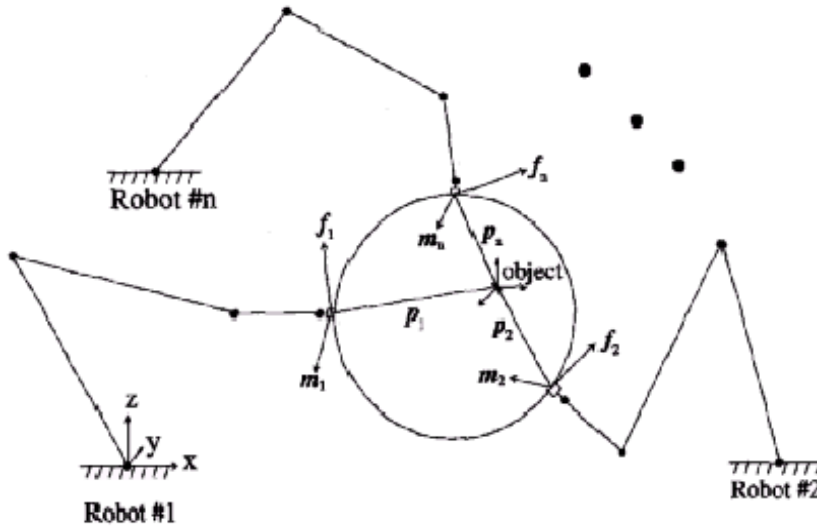
Annexe B

La Force Interne et la Force de mouvement :

Lorsque plusieurs robots manipulateurs tiennent un seul objet *Figure (B.1)*, la force F appliquée par les manipulateurs peut être décomposé e en une force F_m induisant le mouvement et une force interne F_I [Boni 96]. La force interne est une force de compression ou d'extension.

$$F = F_m + F_I.$$

(B.1)



Figure(B.1) Système de n manipulateurs

Lorsque l'objet est rigidement tenu par les manipulateurs, la force au niveau de l'objet est reliée à la force appliquée par chaque manipulateur par la relation suivante :

$$F_0 = [J_{01}^T \quad J_{0n}^T] F = J_0^T F \tag{B.2}.$$

$$J_{0i} = \begin{bmatrix} I_3 & 0_3 \\ -P_i & I_3 \end{bmatrix};$$

$$P_i = \begin{bmatrix} 0 & -p_{iz} & p_{iy} \\ -p_{iz} & 0 & -p_{ix} \\ -p_{iy} & p_{ix} & 0 \end{bmatrix}$$

avec:

p_{jk} : coordonnée de la position de l'organe terminal i par rapport au centre de l'objet selon l'axe k , *Figure (B.1)*.

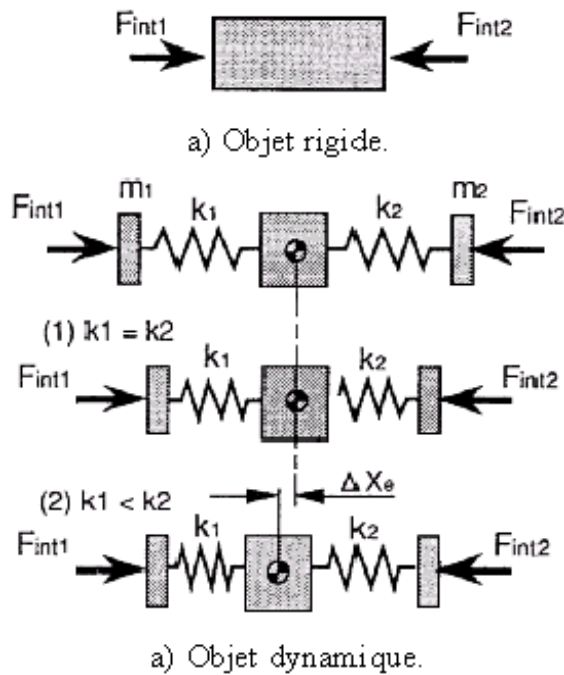
I_3 : Matrice identité (3×3).

La force interne par définition ne contribue pas au mouvement *Figure (B.2)*, elle appartient à l'espace nul de J_0^T [Boni 96], d'où à partir de l'équation (B.1) et (B.2) on a :

$$F_m = J_0^{T\#} J_0^T F \quad \text{et} \quad F_I = (I - J_0^{T\#} J_0^T) F. \quad (B.3)$$

avec:

$J_0^{T\#}$ est la matrice inverse généralisée de la matrice J_0^T .



Figure(B.2) : Définition de la force interne.

Annexe C

- **Les degrés de liberté d'un robot manipulateur :**

Considérons un solide indéformable situé dans l'espace réel à trois dimensions, la mécanique nous rappelle que ce solide possède six degrés de liberté, trois qui lui permettront de se déplacer (T1, T2, T3) et trois qui lui permettront de s'orienter (R1, R2, R3).

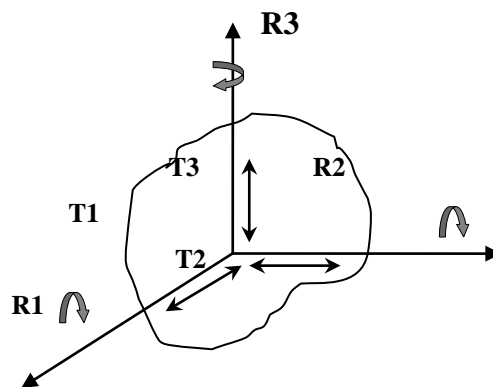


Figure (C.1) : les six degrés de liberté possibles d'un solide indéformable.

Un robot manipulateur a pour objectif la modification de son environnement par l'intermédiaire d'outils, qu'il doit situer pour ce fait ; D'où il est nécessaire de lui assurer un nombre suffisant de degrés de liberté pour lui permettre d'atteindre cet environnement, en contournant des obstacles par exemple.

- **Modélisation des robots manipulateurs :**

- a) Modélisation géométrique des robots manipulateurs :**

Un robot manipulateur est un système mécanique articulé, animé par n actionneurs, qui lui confèrent une configuration dans l'espace caractérisé par un vecteur $\theta(t) = [\theta_1(t) \ \theta_2(t) \dots \dots \theta_n(t)]^T$; C'est le vecteur des variables articulaires, qu'on appelle aussi variables généralisées. Il correspond aux valeurs des angles des n articulations, prises

en fonction du temps. Dans le cas où un degré de liberté est une translation, la variable articulaire n'est plus un angle mais une longueur.

Dans la littérature nous entendons par situation de l'organe terminal d'un robot manipulateur : position de l'origine d'un repère lié à cet organe terminal et, orientation de ce même repère, par rapport au repère fixe lié au bâti du robot manipulateur. Ces coordonnées de positions et d'orientations sont appelées coordonnées opérationnelles. D'un point de vue théorique et, dans le cas général, six coordonnées opérationnelles suffisent pour définir la situation de l'organe terminal : trois pour la position et trois pour l'orientation ; tel que $X(t) = [x_1(t) x_2(t) \dots \dots x_m(t)]$, avec $m \leq 6$.

• **Modèle géométrique direct d'un robot manipulateur :**

Le modèle géométrique direct MGD, permet de déterminer la position, et l'orientation de l'organe terminal dans le repère de la tâche, en fonction des valeurs des variables articulaires, autrement dit le MGD permet de déterminer le vecteur des variables opérationnelles $X(t)$ en fonction du vecteur des variables généralisées $\theta(t)$, il s'écrit :

$$X = f(\theta). \tag{C.1}$$

f : exprime les relations fonctionnelles entre $X(t)$ et $\theta(t)$

• **Modèle géométrique inverse d'un robot manipulateur :**

Lorsqu'on veut commander un robot manipulateur, c'est la situation de l'organe terminal qui est connue et il faudra remonter à la connaissance des coordonnées généralisées θ , c'est le modèle géométrique inverse, c.à.d déterminer $\theta = f^{-1}(X)$, ce qui s'avère être difficile. La difficulté du calcul du modèle géométrique inverse réside dans le fait que la fonction f est non linéaire ; Les théorèmes d'existence et d'unicité font alors défaut.

b)Modèle différentiel direct :

Le modèle différentiel direct d'un robot manipulateur décrit les variations élémentaires des coordonnées opérationnelles, en fonction des variations élémentaires des coordonnées articulaire, il est noté :

$$dX = J(\theta) d\theta.$$

$J(\theta)$: Désigne la matrice Jacobiënne de dimension $(m \times n)$.

$$X = f(\theta) \Rightarrow J_{ij} = df_i(\theta)/d\theta_{ij}, \quad \begin{matrix} i=1, \dots, m. \\ j=1, \dots, n. \end{matrix}$$

$$X = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ \dots \ x_m]^T \quad ; \quad \theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ \dots \ \theta_n]^T.$$

c)Modèle dynamique du robot manipulateur à chaîne ouverte simple :

• **Modèle dynamique du robot manipulateur en espace libre :**

La modélisation dynamique des robots manipulateurs est la détermination des relations entre les couples ou forces articulaires, les variables articulaires et leurs dérivées par rapport au temps, de la forme :

$$\tau = f(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}).$$

τ : vecteur couples articulaires .

Dans la littérature, plusieurs méthodes sont utilisées pour obtenir le modèle dynamique d'un robot manipulateur : équation de Newton -Eulaire, bond-graph et les plus courantes sont les équations de Lagrange [Khal 86] que nous allons introduire :

• **Equation de Lagrange :**

Considérons une chaîne formée de N corps rigides articulés, le corps $N^0=0$ étant fixe, la forme générale représentant le mouvement de cette chaîne s'écrit [Coif 85] :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}_i} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta_i} = Q_i + \tau_i \\ i = 1, \dots, N. \end{cases} \tag{C.2}$$

L: Le Lagrangien qui représente l'énergie totale du système.

L=T-U.

T: Energie cinétique du système.

U : Energie potentielle interne au système.

θ_i : Angle (ou translation) entre deux solides consécutifs ($i^{\text{ème}}$ variable articulaire).

$\dot{\theta}_i$: Vitesse de rotation (ou translation) entre deux solides consécutifs.

Q_i : Le couple exercé par la pesanteur sur θ_i .

τ_i : Couple exercé par les actionneurs sur θ_i .

Avec l'hypothèse de rigidité des segments de la chaîne, le robot n'emmagasine pas d'énergie interne (contrairement à un ressort qu'on comprime par exemple), d'où on a $U=0$, et l'énergie totale se réduit à l'énergie cinétique, elle-même somme des énergies individuelles des N solides interconnectés de la chaîne [Coif 86] :

$L=T$.

le système (1.2) s'écrit [Coif 81] :

$$\begin{cases} \sum_{\lambda=1}^N \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T_{\lambda}}{\partial \dot{\theta}_i} \right) - \frac{\partial T_{\lambda}}{\partial \theta_i} = Q_i + \tau_i \\ i = 1, \dots, N. \end{cases}$$

T_{λ} : Energie cinétique du solide S_{λ} .

Nous aboutissons à un système d'équations différentielles, sous la forme matricielle :

$$A(\theta) \ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta}) \dot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + Q(\theta) = \tau \quad (C.3).$$

$A(\theta)$: Matrice ($n \times n$) d'inertie du robot manipulateur.

$C(\theta, \dot{\theta})$: Vecteur ($N \times 1$) qui regroupe les forces de Coriolis et centrifuges.

$V(\theta, \dot{\theta})$: Vecteur ($N \times 1$) qui regroupe la somme des frottements secs et visqueux.

$Q(\theta)$: Vecteur ($N \times 1$) des forces de la pesanteur.

τ : Vecteur ($N \times 1$) des couples appliqués au système, qui est considéré comme une entrée de commande.

Le système obtenu est formé de N équations différentielles couplées du second ordre, et non linéaire.

• **Modèle dynamique du robot manipulateur en espace contraint :**

Nous considérons le cas simple d'un actionneur en contact avec un mur, nous modélisons ce système selon le schéma présenté par la *figure (C.2)*. Le contact est modélisé par un ressort de raideur K_e . L'amortissement de coefficient B_e représente les frottements visqueux. L'actionneur défini par sa masse M et sa position x , fournit la force F tandis que F_e est celle exercée par le mur sur l'actionneur (force d'interaction).

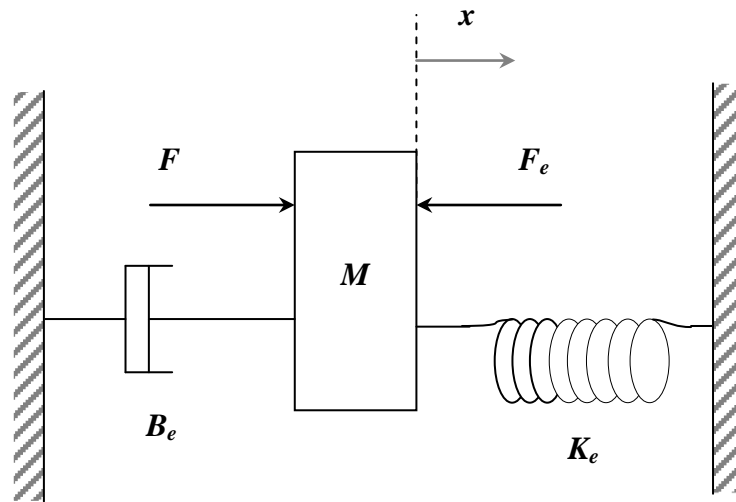


Figure (C.2) : Modèle de l'actionneur en contact avec le mur .

En prenant comme origine la position de repos du ressort, l'équation du système est:

$$F_e = M \ddot{x} + B_e \dot{x} + K_e x.$$

Par le principe du travail virtuel on a :

$$\tau e = J^T F_e .$$

τe : Couple exercé par l'environnement .

J^T : est la matrice Jacobiënne du robot manipulateur.

Le modèle dynamique en présence d'environnement s'écrit alors [Bert 95] :

$$A(\theta) \ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta}) \dot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + Q(\theta) = \tau + \tau e \tag{C.4}.$$

Annexe D

- **LOGIQUE FLOUE :**

Elle n'est autre qu'une extension de la logique classique. Elle permet de traduire l'incertitude et l'imprécision du langage humain et attribue un degré de vérité à une proposition donnée.

Soient X une variable floue et A une caractéristique :

- **La proposition :**

Une proposition floue est une description de la variable floue donnée sous la forme suivante " X est A ".

- **La jonction:**

La jonction de deux propositions est réalisée par l'opérateur **ET**. Par exemple :
" X_1 est A_1 **et** X_2 est A_2 ".

- **La disjonction :**

La disjonction de deux propositions est réalisée par l'opérateur **OU**. Par exemple :
" X_1 est A_1 **ou** X_2 est A_2 ".

- **L'implication :**

L'implication est définie comme suit :

" **Si** X_1 est A_1 **alors** X_2 est A_2 ".

- **LES ENSEMBLES FLOUS :**

Cette notion est basée sur le principe de l'appartenance partielle d'un élément à un ensemble donné. Cette appartenance est pondérée par un coefficient dit "degré d'appartenance". De ce fait, chaque ensemble est caractérisé par une fonction, dite "fonction d'appartenance", dont les formes usuelles sont : triangulaire, trapézoïdal, gaussienne, ...

Chaque ensemble peut être noté comme suit [Bouc]:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) / x \in X\} \quad \text{forme générale}$$

$$A = \int_x \mu_A(x) / x \quad \text{forme continue.}$$

$$A = \sum_{x \in X} \mu_A(x) / x \quad \text{forme discrète}$$

Avec :

$\mu_A(x)$: Fonction d'appartenance.

X : Ensemble de référence.

x : Valeur prise par une variable floue donnée.

L'univers de discours est l'ensemble qui contient tous les sous-ensembles mis en jeu.

- **Variable linguistique :**

L'idée de base des sous-ensembles flous est d'exprimer, en termes mathématiques, les attributs qualificatifs du langage commun (petit, grand, ...). Ainsi, on a introduit la notion des variables linguistiques. Contrairement à une variable numérique, dont la valeur est un nombre, la valeur d'une variable linguistique est un terme du langage humain, qu'on appelle valeur floue. La représentation mathématique d'une valeur floue est réalisée par l'application de la notion des sous-ensembles flous. Une valeur floue peut être représentée par une fonction d'appartenance. La fonction d'appartenance peut être interprétée comme un moyen d'exprimer le degré d'incertitude du langage humain. Cependant, il ne s'agit pas d'une incertitude sur une grandeur, mais incertitude sur la valeur floue que peut prendre la variable linguistique associée à cette grandeur.

- **OPERATIONS SUR LES SOUS ENSEMBLE FLOUS:**

Afin de manipuler les sous-ensembles flous, il est nécessaire de définir certaines opérations élémentaires.

Soit A et B deux sous-ensembles flous dans X, caractérisés respectivement par $\mu_A(x)$ et $\mu_B(x)$ [Bouc].

- **Egalité :**

On dit que A et B sont égaux si et seulement si :

$$\mu_A(x) = \mu_B(x). \quad \forall x \in X.$$

- **Inclusion :**

On dit que A est inclus dans B, si et seulement si :

$$\mu_A(x) \leq \mu_B(x). \quad \forall x \in X.$$

- **Complément :**

Le complément \bar{A} de A est défini par :

$$\mu_{\bar{A}} = 1 - \mu_A(x) \quad \forall x \in X.$$

- **Insertion :**

L'insertion de A et B est définie par :

$$\mu_{A \cap B}(x) = T(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad \forall x \in X.$$

où T est en général, l'opération Min. C'est une norme triangulaire.

- **Union \cup :**

L'union de A et B est définie par :

$$\mu_{A \cup B}(x) = \perp(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad \forall x \in X.$$

où \perp est, en général, l'opération Max. C'est une conorme triangulaire.

- **Produit cartésien :**

Soient A_1, A_2, \dots, A_n des sous-ensembles flous dans l'espace produit de X_1, X_2, \dots, X_n , ayant pour fonction d'appartenance :

$$\mu_{A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \text{Min}(\mu_{A_1}(x_1), \mu_{A_2}(x_2), \dots, \mu_{A_n}(x_n)) \quad \forall x \in X..$$

- **Relation floue :**

Soient U_1, U_2, \dots, U_n des univers de discours. Une relation floue est un sous-ensemble flou dans $U_1 \times U_2 \times \dots \times U_n$, exprimé comme suit:

$$R_{U_1 \times \dots \times U_n} = \left\{ ((x_1, \dots, x_n), \mu_R(x_1, \dots, x_n)) / (x_1, \dots, x_n) \in U_1 \times \dots \times U_n \right\}$$

- **LES REGLES FLOUES :**

Une règle floue est une relation exprimée à l'aide d'une implication. Par exemple :

Si "erreur est positive" et "variation de l'erreur est négative"
Alors "commande est grande".

Cette règle est constituée de trois propositions :

1. La proposition 1 est "*erreur est positive*".
2. La proposition 2 est "*variation de l'erreur est négative*".
C'est deux propositions forment les prémisses de la règle.
3. La proposition 3 est "*Commande est grande*", elle forme la conclusion de la règle.

La conjonction des prémisses, l'implication et la conclusion forment la règle floue.

- **RAISONNEMENT ET PRISE DE DECISION :**

Cela consiste à manipuler et utiliser les propositions et les règles floues dans le but d'obtenir une décision. Pour cela on utilise deux modes de raisonnement inspirés de la logique classique qui sont : MP, Modus Ponens et MT, Modus Tollens.

Soient P et C deux propositions logiques. On définit :

- **Le modus ponens (MP)** $P \Rightarrow C$

Si P est vraie alors C est vraie

- **Le modus tollens (MT)** $\bar{C} \Rightarrow \bar{P}$

Si C est fausse alors P est fausse.

En logique floue, on généralise ces deux modes.

▪ **Le modus ponens généralisé (GMP) :**

Règle floue : Si X est A alors Y est B.

$$\mu_A \quad \mu_B$$

Fait observé : X est A'

$$\mu_{A'}$$

Conclusion : Y est B.

$$\mu_{B'}$$

▪ **Le modus tollens généralisé (GMT) :**

Règle floue : Si X est A alors Y est B.

$$\mu_A \quad \mu_B$$

Fait observé : Y est B.

$$\mu_{B'}$$

Conclusion : X est A'.

$$\mu_{A'}$$

En commande, on utilise le GMP, pour respecter la causalité.

• **COMMANDE PAR LOGIQUE FLOUE :**

L'objectif de la commande par logique floue consiste à piloter un processus en utilisant les connaissances et l'expérience d'un opérateur humain qualifié "EXPERT". Les connaissances de l'expert sont schématisées à l'aide d'un ensemble de règles de conduite basées sur un vocabulaire symbolique.

Dans ce qui suit, on montre comment un régulateur, dont la loi de commande est basée sur des règles linguistiques, peut être synthétisé.

• **STRUCTURE GENERALE D'UN REGULATEUR FLOU :**

La structure d'un régulateur par logique floue est représentée sur la *figure(D.1)*. Le régulateur comprend le procédé à réguler et le régulateur par logique floue RLF. Ce dernier fournit le signal de commande u . Il reçoit à son entrée la différence entre les grandeurs de consigne w_c et les grandeurs mesurées correspondantes y_M ainsi que la variation de e . Le vecteur y_M contient en général la ou les grandeurs à réguler y et d'autres grandeurs mesurées qui traduisent l'évolution du système.

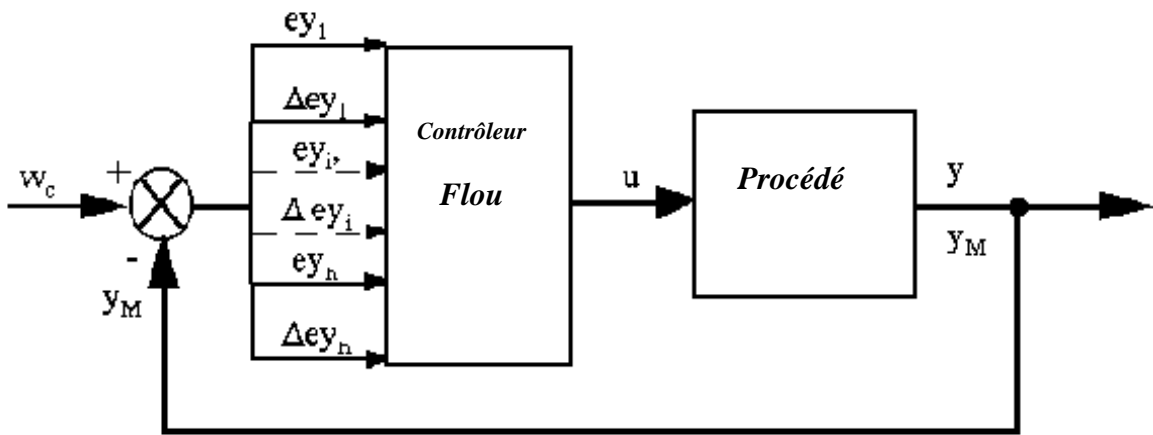


Figure (D.1) : Structure d'un régulateur flou

Comme le montre la *figure (D.2)*, le régulateur flou *RLF* se compose en quatre blocs :

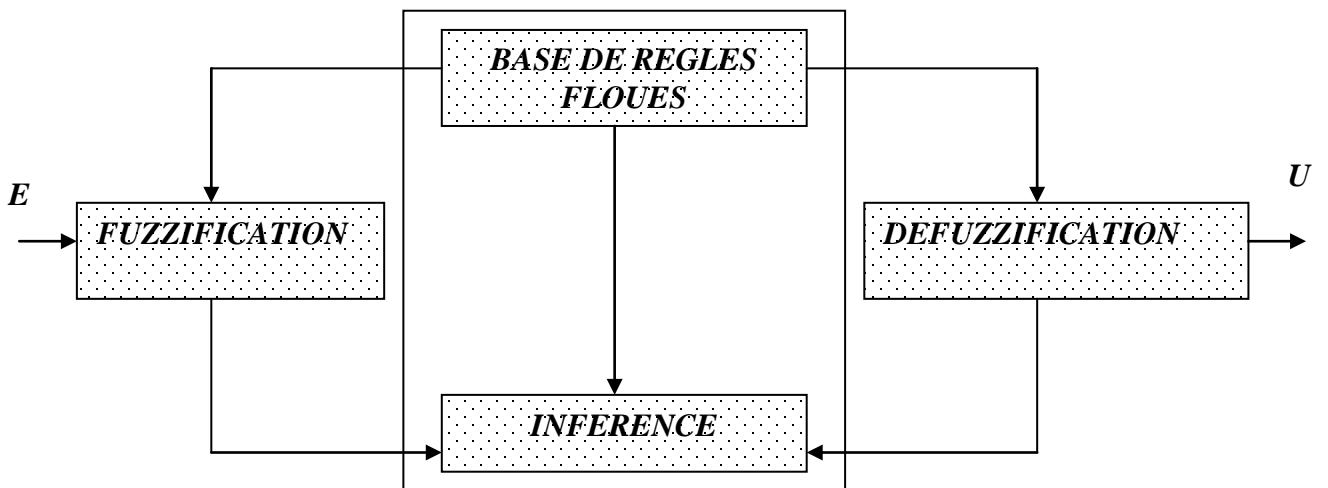


Figure (D.2) : Régulateur flou RLF

- **Fuzzification.**

C'est une interface "Numérique –Linguistique " qui permet de transformer les grandeurs mesurées sur le processus (valeurs numériques) en un ensemble de valeurs floues (valeur linguistique).

- **Inférence.**

C'est un mécanisme de décision qui, en manipulant le bloc des règles, établit une décision. Il existe plusieurs stratégies d'inférence, telles que : la méthode de Mamdani (Max, Min), la méthode de Larsen (Max, Prod) et la méthode de Sugeno(Somme, Prod).

- **Base de règles.:**

Un système est caractérisé par un ensemble de règles, dont les sources, sont :

- L'expertise et l'expérience des opérateurs formulées en terme de règle,
- L'observation et la modélisation du comportement et des actions des opérateurs,

- **Défuzzification.**

C'est une interface "Linguistique-Numérique" qui permet de transformer les valeurs linguistiques (valeurs floues) en des valeurs numériques directement exploitables par le processus. Il existe plusieurs méthodes pour réaliser cette opération , mais pas de procédure permettant de conclure sur le choix de la meilleure méthode. Les méthodes les plus couramment utilisées sont la méthode du centre de gravité ou celle de la moyenne des abscisses des maximums.

- ***Méthode du maximum :***

Elle donne comme valeur celle qui a le plus grand degré d'appartenance.

- ***Méthode de la moyenne des maxima :***

Elle donne comme valeur la moyenne des valeurs dont le degré d'appartenance est maximal.

- ***Méthode du centre de gravité :***

Elle donne comme valeur le centre de gravité de l'ensemble flou.

$$Z_0 = \frac{\sum_{j=1}^n \mu_Z(w_j)w_j}{\sum_{j=1}^n \mu_Z(w_j)}$$

- **Elaboration d'un contrôleur flou.**

L'élaboration d'un contrôleur flou va comprendre les quatre étapes suivantes:

- choix des paramètres capables de traduire le bon fonctionnement du système et de ceux capables de contrôler le système,
- fuzzification des paramètres choisis,
- écriture des règles linguistiques décrivant le système,
- défuzzification pour obtenir une valeur numérique à appliquer au contrôleur.

- **Type de Régulateurs Flous :**

Il existe plusieurs types de régulateurs, parmi eux on cite :

- Mamdani,
- Sugéno.

Régulateur flou de type Mamdani : Les régulateurs de type Mamdani utilisent des règles à prémisses et conclusions symboliques, L'inférence (Max, Min) et la défuzzification par centre de gravité.

Exemple :

Si " e est NG" et "de est PS" alors "la commande est GR"

Régulateur de type Sugéno : Les règles de type Sugéno sont les règles, dont les prémisses sont symboliques, tandis que les conclusions sont numériques. Exemple:

Si " e est NG" et "de est NG" alors "U =1+3e-2de "

- **Régulateur de type Mamdani :**

Considérons un système de n valeurs mesurées $x_1, x_2, \dots, x_n \in X_1, X_2, \dots, X_n$, respectivement et une valeur de contrôle $y \in Y$. Pour créer les règles pour la base de connaissance du contrôleur flou, les ensembles X_1, X_2, \dots, X_n , et Y sont repartis en plusieurs domaines flous, c.à.d pour l'ensemble X_i il y a p différents ensembles flous $\mu_1^{(i)}, \dots, \mu_p^{(i)}$ qui sont définis et associés avec différents termes linguistiques tels que: Positif Petit, par exemple.

Généralement les ensembles $X_i \in \mathbb{R}$, et les ensembles flous sont déterminés par des fonctions triangulaires.

La figure (D.3), représente un ensemble *d'appartenance* décomposé en 7 sous-ensembles flous correspondant aux variables linguistiques suivantes: négatif-grand (NG), négatif-moyen (NM), négatif-petit (NP), zéro (ZE), positif-petit (PP), positif-moyen (PM), positif-grand (PG). Les fonctions d'appartenance associées à ces dernières sont de forme triangulaire.

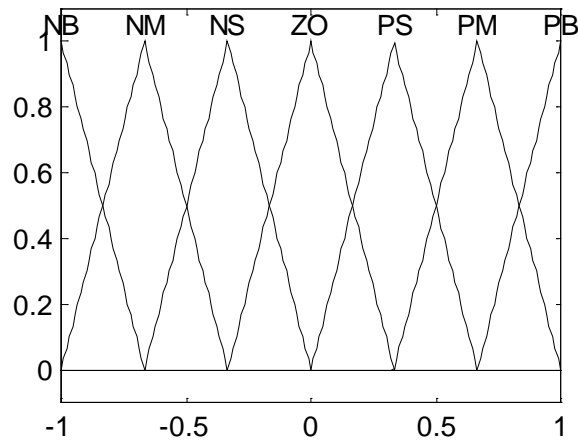


Figure (D.3) :Fonctions d'appartenance avec 7 sous-ensembles.

La base des règles est constituée de règles de forme suivante [Full 95]:

$$R_r : \text{if } \varepsilon_1 \text{ est } A_{i_1,r}^{(1)} \text{ et ...et } \varepsilon_n \text{ est } A_{i_n,r}^{(n)} \text{ alors } \eta \text{ est } B_{i_r} \quad (r = 1, \dots, k),$$

Où, $A_{i_1,r}^{(1)}, \dots, A_{i_n,r}^{(n)}, B_{i_r}$, sont les termes linguistiques attribués aux fonctions d'appartenance $\mu_{i_1,r}^{(1)}, \dots, \mu_{i_n,r}^{(n)}, \mu_{i_r}$, correspondants à la subdivision floue des ensembles X_1, \dots, X_n et Y_n , respectivement.

Cette règle représente une fonction définie par morceaux, c.à.d, Les k règles correspondent à la fonction définie $\eta = \phi(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n)$ avec:

$$\eta = \begin{cases} B_{i_1} & \text{si } \xi_1 = A_{i_1,1}^{(1)} & \text{et... et } \xi_n = A_{i_n,1}^{(n)} \\ \vdots & & \vdots \\ \vdots & & \vdots \\ B_{i_k} & \text{si } \xi_1 = A_{i_1,k}^{(1)} & \text{et... et } \xi_n = A_{i_n,k}^{(n)} \end{cases}$$

Le moteur d'inférence : Celui-ci combine les entrées après fuzzification et les règles floues pour tirer des conclusions. Cette opération regroupe : la conjonction des prémisses, l'implication floue et l'agrégation des règles.

En premier lieu, cette opération commence par évaluer chaque règle de façon indépendante. . Pour chaque règle R_r , le degré d'appartenance des variables mesurées est déterminé. Ceci est fait en calculant la valeur $\mu_{i_v,r}^{(v)}(x_v)$ pour $v = 1, \dots, n$, qui est le degré au quel x_i correspond à la fonction floue $\mu_{i_v,r}^{(v)}$.

La conjonction des prémisses est réalisée par l'opération Min, comme suit :

$$\alpha_r = \text{Min}\{ \mu_{i_1,r}^{(1)}(x_1), \dots, \mu_{i_n,r}^{(n)}(x_n) \}$$

La valeur α_r est le degré d'appartenance de l'antécédent de la règle R_r . La sortie de la règle R_r est l'ensemble flou des variables de commande obtenu en découpant l'ensemble flou de la sortie μ_{i_r} de la règle R_r au degré d'appartenance déterminé par α_r . Ainsi la règle R_r induit à l'ensemble flou suivant:

$$\mu_{x_1, \dots, x_n}^{\text{sortie}(R_r)} : Y \rightarrow [0,1], y \rightarrow \text{Min}\{ \mu_{i_1,r}^{(1)}(x_1), \dots, \mu_{i_n,r}^{(n)}(x_n), \mu_{i_r}^{(n)}(y) \}.$$

Après que toutes les règles soient évaluées les ensembles flous résultants devront être combinés en un seul ensemble flou en utilisant l'opérateur Max (union), comme suit :

$$\mu_{x_1, \dots, x_n}^{sortie(R_r)} : Y \rightarrow [0, 1], \quad \eta \rightarrow \max_{r \in \{1, \dots, k\}} \{ \text{Min} \{ \mu_{i,r}^{(1)}(x_1), \dots, \mu_{i,r}^{(n)}(x_n), \mu_{i,r}(\eta) \} \}.$$

Cet ensemble flou résultant doit être transformé en une valeur de commande par l'interface de défuzzification.

Annexe E

I) Implémentation de la commande coordonnée en Impédance (Méthode de Nagai) :

Le procédé de l'implémentation de la commande coordonnée en impédance (méthode de *Nagai*) est le suivant :

1/ Fixer : $T_{max}, K_e, M_{Rd}, B_{Rd}, K_{Rd}, M_{Ad}, B_{Ad}, K_{Ad}$.

2/ Initialiser : $\theta^1, \dot{\theta}^1, \theta^2, \dot{\theta}^2$

3/ Si $t \leq T_{max}$ alors :

4/ Générer les consignes de position $X_{1d} = \begin{pmatrix} x_{1d} \\ y_{1d} \\ \alpha_{1d} \end{pmatrix}$ et $X_{2d} = \begin{pmatrix} x_{2d} \\ y_{2d} \\ \alpha_{2d} \end{pmatrix}$

5/ Déduire la position absolue et la position relative désirée :

$$X_{Ad} = \frac{M_1 X_{1d} + M_2 X_{2d}}{M_1 + M_2}, \quad X_{Rd} = X_{1d} - X_{2d}.$$

6/ calculer les erreurs :

$$e_A(t) = X_A - X_{Ad}; \quad \dot{e}_A(t) = \dot{X}_A - \dot{X}_{Ad}; \quad e_R(t) = X_R - X_{Rd},$$

$$\dot{e}_A(t) = \dot{X}_A - \dot{X}_{Ad}$$

7/ calculer la commande $\tau = \begin{pmatrix} \tau^1 \\ \tau^2 \end{pmatrix}$ à partir de l'équation (3.22):

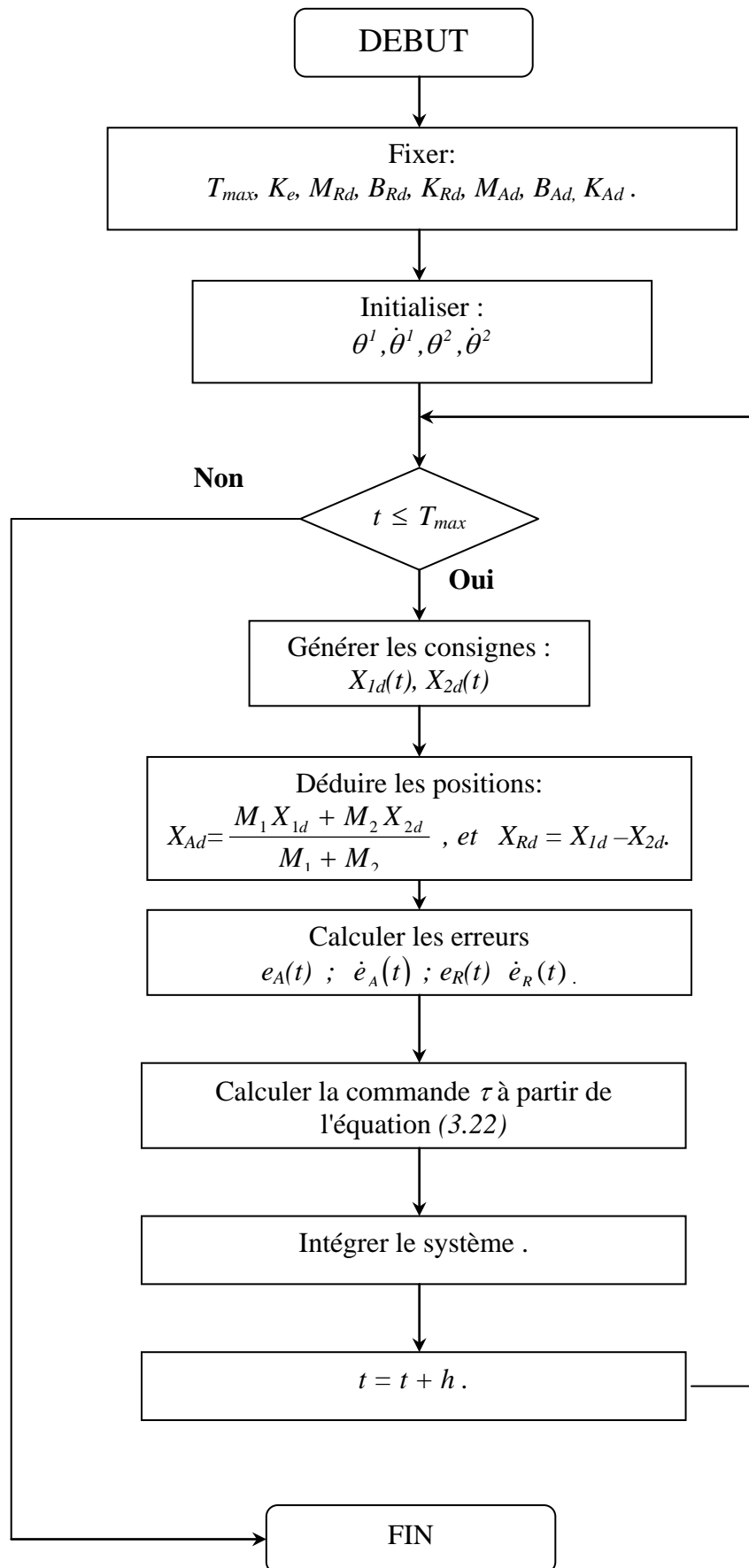
8/ détermination de $\theta = \begin{pmatrix} \theta^1 \\ \theta^2 \end{pmatrix}$ par l'intégration du système par la méthode de

Runge-Kutta :

9/ $t = t+h$.

10/ Aller à l'étape (3).

11/ Sinon fin .



Organigramme de la commande coordonnée en Impédance (Méthode de Nagai).

II) Résultat de simulation de la commande coordonnée en impédance (Méthode de " Nagai"):

II.1) Réglage des paramètres :

La raideur des pièces, est fixée à :

$$K_e = 157000 \text{ N/m.}$$

Le réglage des paramètres d'impédance relative M_{Rd} , B_{Rd} et K_{Rd} , ainsi que les paramètres d'impédance absolue M_{Ad} , B_{Ad} et K_{Ad} , a été fait par essais successifs, afin de déterminer les meilleures valeurs, permettant d'assurer un bon asservissement.

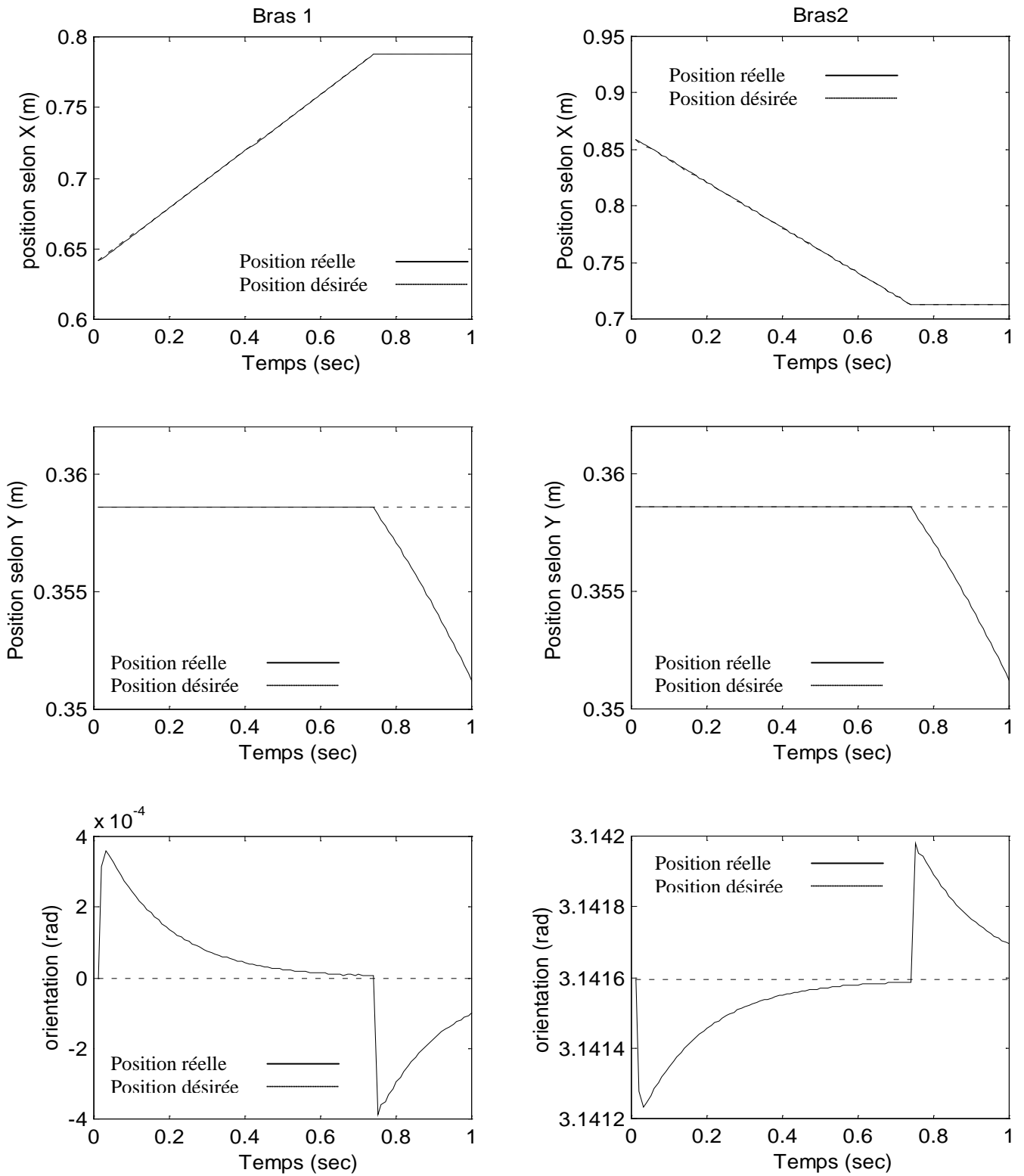
Le choix des paramètres a été, comme suit:

$$M_{Rd} = \text{diag} [0.08, 0.08, 0.08] \text{ Kg} , \quad B_{Rd} = \text{diag} [16, 16, 16] \text{ NS/m}, \quad K_{Rd} = \text{diag} [90, 90, 90] \text{ N/m}$$

$$M_{Ad} = \text{diag} [1, 1, 1] \text{ Kg} , \quad B_{Ad} = \text{diag} [160, 160, 160] \text{ NS/m}, \quad K_{Ad} = \text{diag} [9000, 9000, 9000] \text{ N/m} .$$

II.2) Poursuite des consignes en positions:

La figure (E.1), représente la poursuite de la consigne en position selon l'axe X et Y ainsi que l'orientation, pour le Bras₁ et le Bras₂.



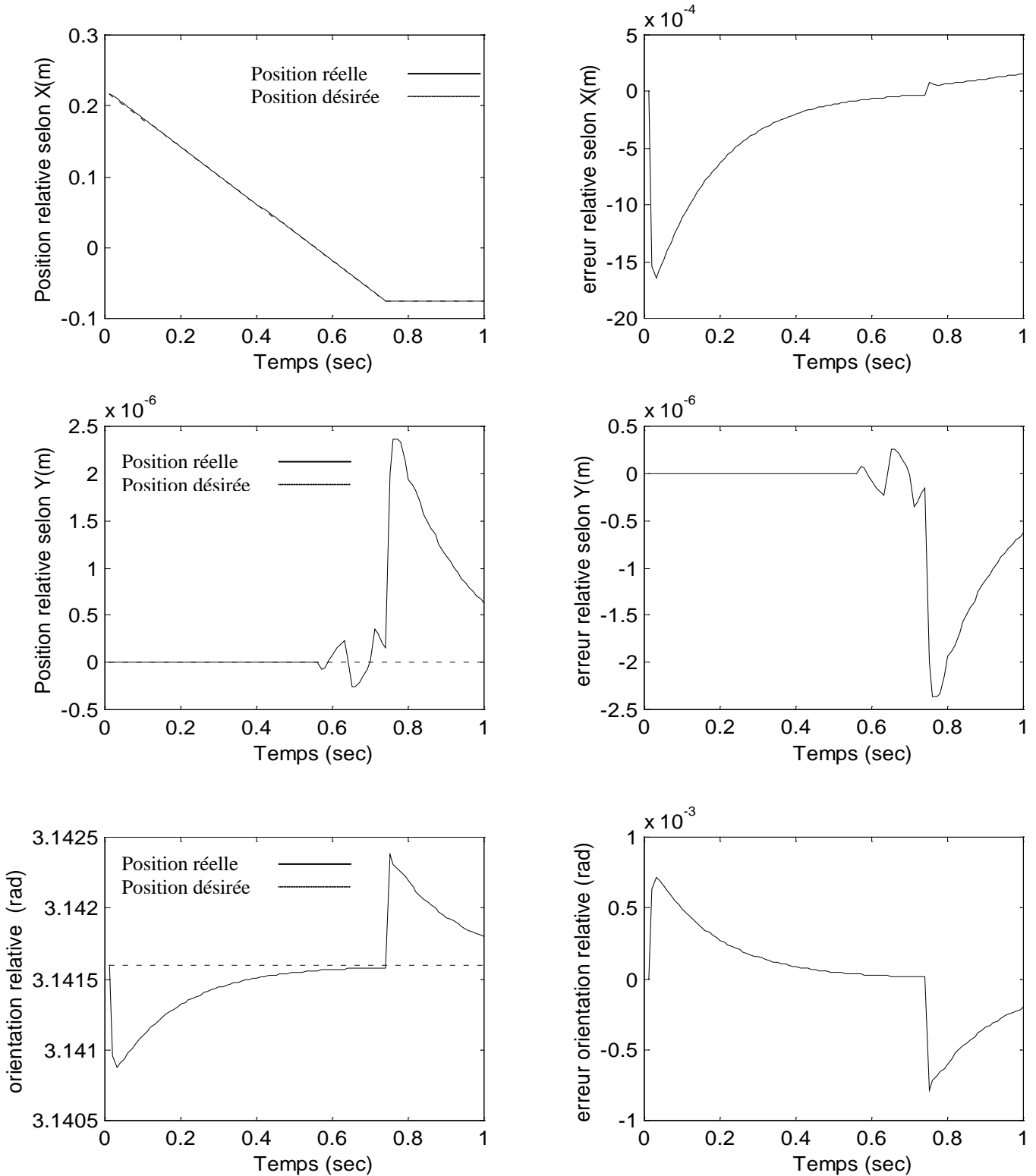
(a) Bras 1

(b) Bras 2.

Figure(E.1) :Position selon X, selon Y et orientation :(a) Bras1;(b) Bras2.

La Figure (E.2) donne la position relative des bras ainsi que son erreur. Les erreurs moyennes et les erreurs maximales de positions relatives des deux effecteurs suivant l'axe X et Y ainsi que l'orientation sont données, respectivement comme suit :

$$\begin{aligned} e_{R_{xmoy}} &= -0.28 \text{ mm} & e_{R_{ymoy}} &= 1.44 \cdot 10^{-4} \text{ mm}, & e_{R_{\alpha moy}} &= 2.31 \cdot 10^{-5} \text{ rad.} \\ e_{R_{xmax}} &= 1.6 \text{ mm} & e_{R_{ymax}} &= 9.69 \cdot 10^{-4} \text{ mm} & e_{R_{\alpha max}} &= 7.76 \cdot 10^{-4} \text{ rad.} \end{aligned}$$

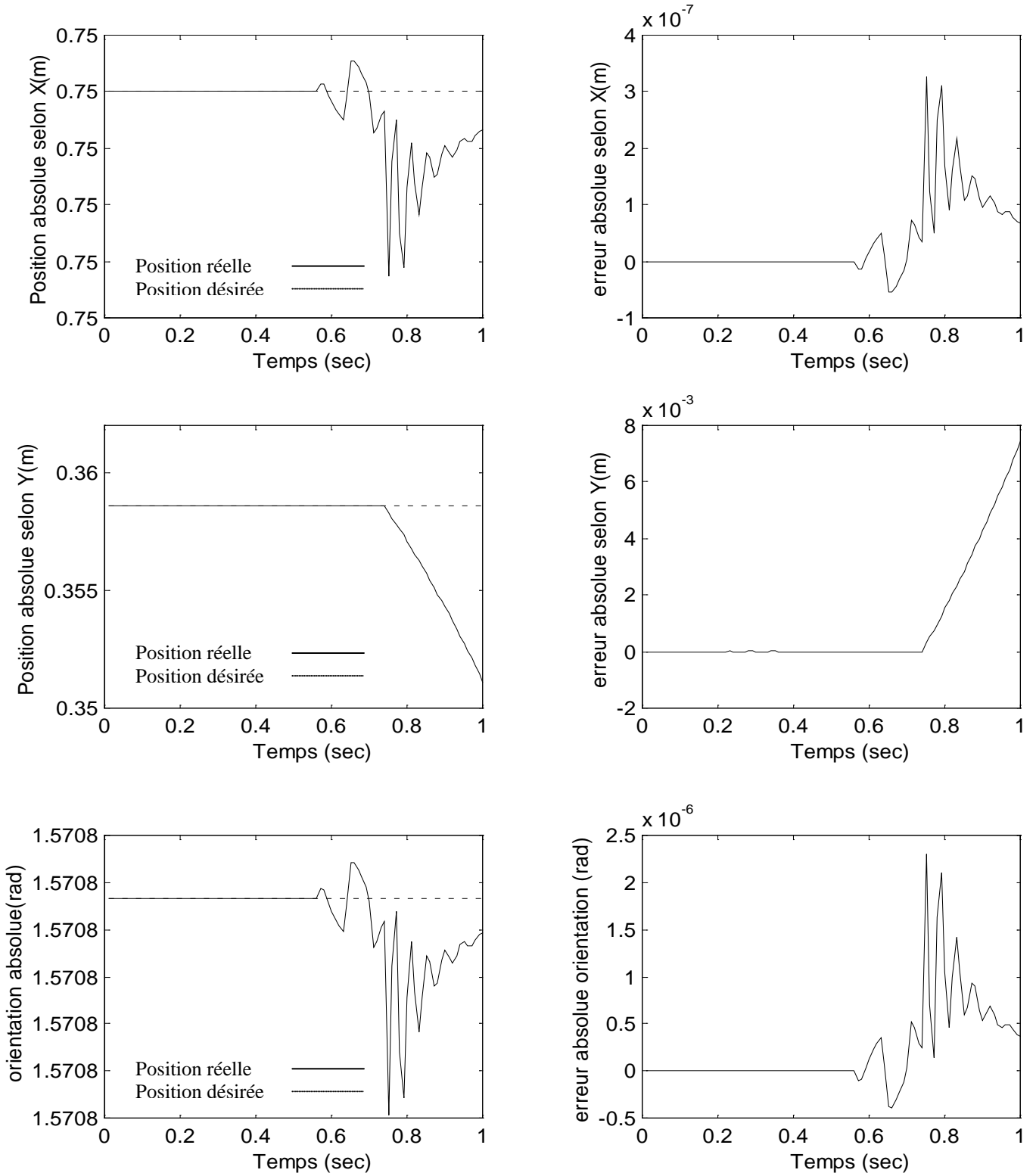


Figure(E.2): Position relative et leur erreur.

Les suivis de la position absolue et de l'erreur en position absolue sont présentés en *figure(E.3)*, les erreurs moyennes et maximales sont données comme suit :

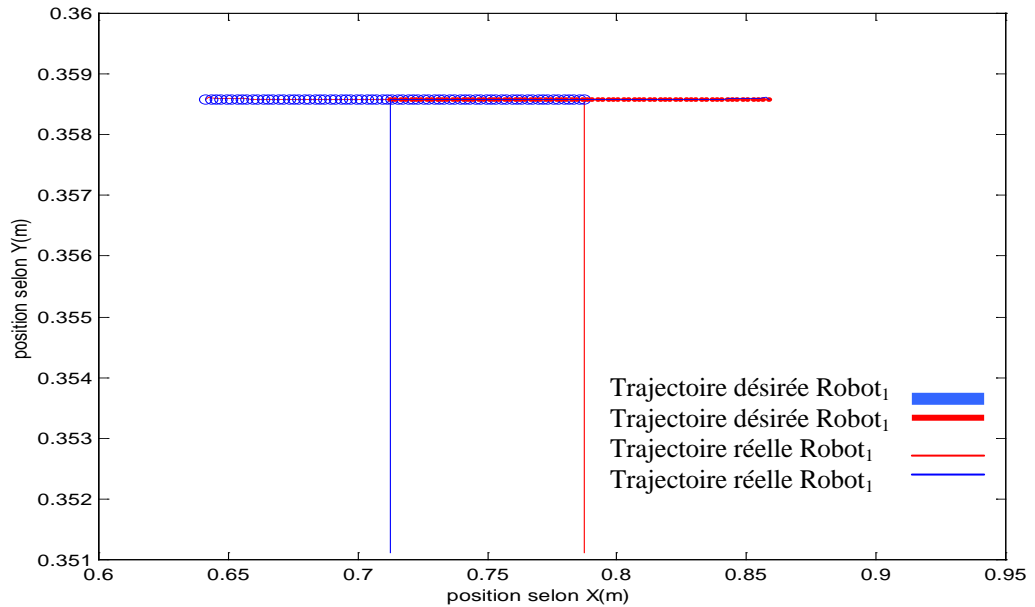
$$e_{Axmoy} = 1.39 \cdot 10^{-5} \text{ mm}, \quad e_{Aymoy} = 9.45 \cdot 10^{-1} \text{ mm}, \quad e_{Ac\alpha moy} = -8.44 \cdot 10^{-8} \text{ rad.}$$

$$e_{Axmax} = 1.95 \cdot 10^{-4} \text{ mm} \quad e_{Aymax} = 7.4 \text{ mm} \quad e_{Ac\alpha max} = 1.41 \cdot 10^{-6} \text{ rad}$$



Figure(E.3):position absolue et son erreur

Le mouvement des deux bras dans le plan est représenté par la *figure(E.4)*.

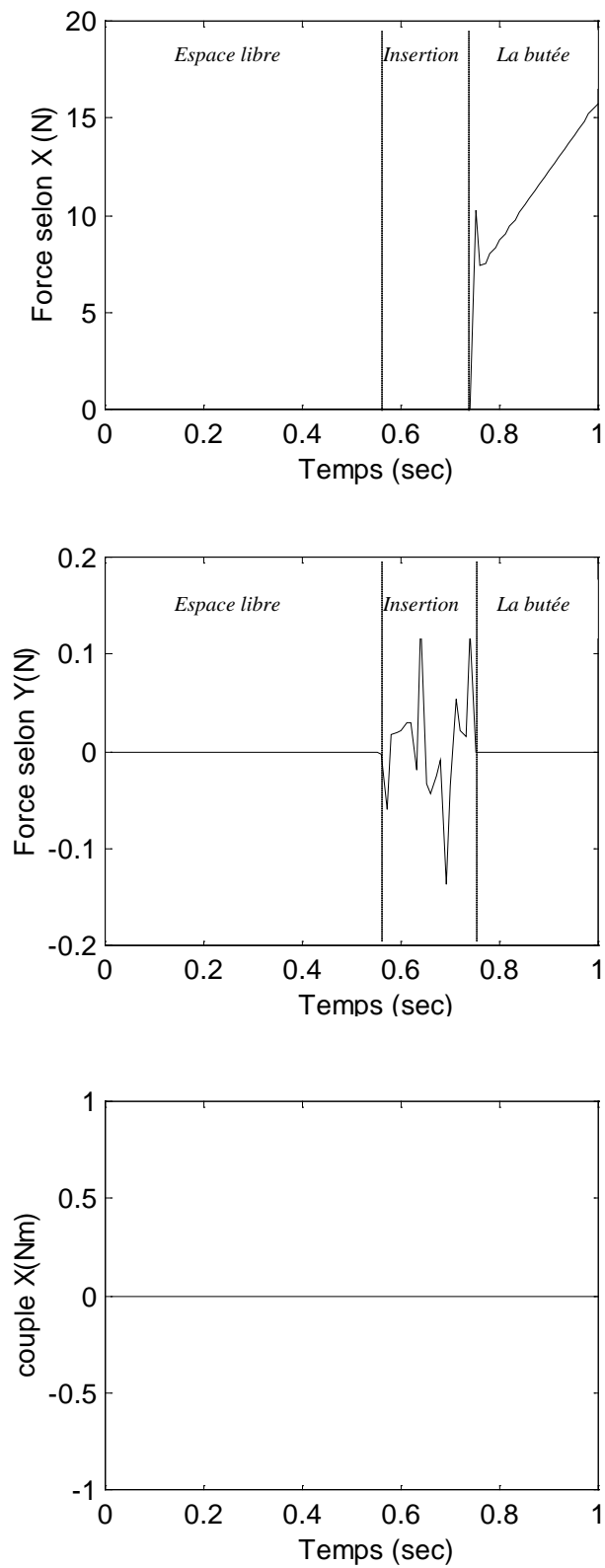


Figure(E.4) : Trajectoire des deux bras dans le plan.

II.3) La force d'interaction:

La *figure (E.5)*, présente la force d'interaction mesurée pendant l'opération d'assemblage: Selon l'axe X , selon l'axe Y et le moment appliqué dans le plan (X,Y).

La force d'interaction pendant l'insertion, c'est à dire suivant l'axe Y , F_{Iy} est maintenue très faible: de l'ordre de $10^{-1}N$. Mais à la fin de l'assemblage, La composante selon l'axe Y s'annule et la composante selon l'axe X augmente jusqu'à dépasser $F_{Ix} = 16N$, *figure (E.5)*. Cela est dû au contact des extrémités des pièces à assembler (le moment où elles butent). La force interne n'est pas asservie explicitement.



Figure(E.5) :La force d'interaction .

II.4) Interprétation des résultats:

A partir des différents résultats présentés dans ce paragraphe, nous constatons que la position relative est parfaitement commandée et cela suivant les deux axes X et Y, ainsi que l'orientation relative des deux pièces.

La commande de la position absolue de chaque effecteur donne un bon résultat suivant l'axe X et au niveau de l'orientation, mais suivant l'axe Y, le système tend à diverger. Ainsi les deux effecteurs sortent complètement de leur trajectoire à la fin de l'assemblage. Cela est dû à la définition de la position absolue.

Dans la commande coordonnée en impédance de *Nagai*, la définition de la position absolue est comme suit (Voir paragraphe I.5.4):

$$X_A = \frac{M_1 X_1 + M_2 X_2}{M_A} \quad (E.1)$$

$$M_A = M_1 + M_2. \quad (E.2)$$

M_i : Matrice d'inertie du bras i , exprimée dans le repère opérationnel.

Nagai, dans sa présentation de la méthode, impose la relation suivante $\frac{d}{dt} \{M_A^{-1} M_i\} \cong 0$. C'est à dire, que la configuration des robots ne doit pas varier dans le temps. Or, dans notre cas, et en analysant les différentes étapes de calcul, nous constatons que pour $\frac{d}{dt} \{M_A^{-1} M_i\}$ seuls les éléments de la 1^{ère} collone et la 3^{ème} colonne sont nuls, les éléments correspondant à l'axe Y sont $\neq 0$.

Ceci justifie le choix de la définition de la position absolue, qui est une définition indépendante de l'inertie mais en fonction de la position des deux effecteurs seulement, c.à.d, définir la position absolue comme étant la valeur moyenne de la position des deux effecteurs [Dauc 90].

Si la force d'interaction n'est pas asservie, cela est dû seulement à la commande en impédance qui ne permet pas de commander explicitement la force.