

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



Université de Batna
Faculté des sciences de l'ingénieur
Département d'Electronique



MEMOIRE

Présenté en vue de L'obtention du Diplôme de Magister en Electronique

OPTION : ROBOTIQUE

PAR : MEGUELLATI MOHAMED

THEME

*Commande à distance d'un bras manipulateur en
présence d'un retard de temps constant*

Devant Le Jury :

<i>Président :</i>	Dr. SLIMANE Nouredine	M.C. U. de BATNA
<i>Rapporteur :</i>	Dr. ABDESSEMED Foudil	M.C. U. de BATNA
<i>Co-Rapporteur :</i>	Dr. ABDESSEMED Yassine	M.C. U. de BATNA
<i>Examineurs :</i>	Dr. AMEDDAH Djamel-eddine	M.C. U. de BATNA
	Dr. LOUCHENE Ahmed	M.C. U. de BATNA
	Dr. BENZID Redha	M.C. U. de M'SSILA

Remerciements

Je tiens à remercier tout d'abord DIEU le tout puissant qui m'a donné, durant toutes ces années, la santé, le courage et la foi pour arriver à ce jour.

Je ne peux, réellement, trouver les expressions éloquentes que mérite M. : Djeffal Fayçal afin de le remercier pour sa sympathie, ses encouragements, son aide, son dévouement pour le travail et sa présence totale, au cours de cette modeste étude.

J'adresse mes remerciements aux membres de jury qui m'ont fait l'honneur d'évaluer, d'examiner, et d'enrichir mon modeste travail.

Je tiens à remercier, particulièrement M. : Abdessemed Yassine pour sa gentillesse et sa disponibilité.

Mes remerciements vont également à tous les enseignants et les responsables de notre Institut, surtout : D.ARAR et L. Saidi.

Enfin, j'exprime mes remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Dédicaces

Aux êtres qui me sont les plus chers

« MES PARENTS »

*Pour leur AMOUR, leur EDUCATION et leurs
SACRIFICES.*

A mes gentils frères.

A mes SŒURS.

A mes chers amis et frères.

A toute ma famille.

A tous mes amis.

A tous ceux qui m'ont aidé à faire ce travail.

SOMMAIRE

● INTRODUCTION GENERALE ●

<i>Introduction Générale</i>	1
------------------------------	---

● CHAPITRE I ●

LES SYSTEMES DE TELEOPERATION

<i>I.1/ Introduction</i>	4
<i>I.2/ Buts de conception de contrôleur de téléopération</i>	6
<i>I.3 / Etat de l'art</i>	7
<i>I.4/ Les caractéristiques d'une situation de téléopération</i>	10
<i>I.4.1/ Définition</i>	10
<i>I.4.2 / Etat de l'art sur les engins de téléopération</i>	11
<i>I.4.2.1 /Engins aériens</i>	12
<i>I.4.2.2 /Engins sous-marins</i>	13
<i>I.4.2.3 /Engins terrestres</i>	14
<i>I.4.2.4 /Domaine médical</i>	16
<i>I.4.2.5 /Assistance à l'handicap</i>	19
<i>I.5 /Contraintes techniques</i>	20
<i>I.6 /Contraintes humaines</i>	21

<i>I.6.1. Limitations visuelles</i>	21
<i>I.6.2. Limitations proprioceptives</i>	22
<i>I.6.3. Discordances visuo-kinesthésiques</i>	23
<i>I.7 / Conclusion</i>	24

● CHAPITRE II ●

TRANSPARENCE ET PASSIVITE

<i>II.1/ Introduction</i>	25
<i>II.2/ transparence</i>	25
<i>II.2.1 Définition de la transparence</i>	25
<i>II.2.2/ Les différentes façons d'aborder la transparence</i>	27
<i>II.2.2.1/ Transparence couplée (impédance)</i>	28
<i>II.2.2.2/ Transparence découplée force et vitesse</i>	29
<i>II.2.2.3/ Force désirée donnée par un modèle externe</i>	30
<i>II.3/ Stabilité par la passivité</i>	31
<i>II.3.1/ Définition</i>	31
<i>II.3.2/ Passivité d'un système transparent, en présence de retards</i>	33
<i>II.4/ Exemple de deux méthodes de transfert des données</i>	34
<i>II.4.1 /Architecture favorisant la transparence : modèle de Lawrence</i>	34
<i>II.4.1.1 /Principe</i>	34
<i>II.4.1.2 /La transparence parfaite</i>	35

<i>II.4.2 Méthode favorisant la passivité</i>	39
<i>II.4.2.1 /Définition</i>	39
<i>II.4.2.2 Condition pour passivité</i>	41
<i>II.5 /Predicteur de Smith</i>	43
<i>II.8/ Conclusion</i>	46

● CHAPITRE III ●

COMMANDE DU SYSTEME DE TELEOPERATION

<i>III-1/ Introduction</i>	47
<i>III-2/La Structure du système de téléopération bilatérale</i>	48
<i>III-3 / La modélisation de système</i>	49
<i>III-4 / La commande du système</i>	50
<i>III-4.1/ La commande du système sans temps de retard</i>	50
<i>III-4.2/ Présentation et interprétation des résultats</i>	54
<i>III.4.2.1 / Présentation des résultats</i>	54
<i>III.4.2.2 / Interprétation des résultats</i>	55
<i>III.4.3 / La commande du système avec temps de retard</i>	55
<i>III.4.4 / Présentation et interprétation des résultats</i>	59
<i>III.4.4.1 / Présentation des résultats</i>	59
<i>III.4.4.2 / Interprétation des résultats</i>	68
<i>III.5 /Conclusion</i>	69

● **CONCLUSION GENERALE** ●

Conclusion Générale

70

● **ANNEXE A** ●

● **ANNEXE B** ●

● **BIBLIOGRAPHIE** ●

INTRODUCTION GENERALE

Le besoin à la technologie moderne nécessite le control à distance des taches, les exemples typiques sont la manipulation des matériaux nucléaires, le contrôle des petits modèles et l'exploration de l'espace et des fonds sous-marine. La commande à distance des robots ou la téléopération trouve ses applications dans le contrôle direct à distance (impossible souvent) à cause du risque de la disponibilité nécessaire de l'être humain.

Le soufflage sur le feu est l'une des premières tâches primitive de la téléopération dans l'histoire de l'humanité. Pour être exact, le soufflage sur le feu est une manipulation télé ou éloignée, qui était le premier type de téléopération. Cette tâche est également un bon exemple pour démontrer la différence entre la téléopération et l'utilisation d'outil. Une main humaine est un outil parfait pour bien placer le bois du chauffage et, en fait, habituellement le bois non brûlés est placé à la main dans la cheminée. Après que le feu ait été mis, l'environnement est si hostile qu'un outil plus encombrant doit être utilisé afin de protéger la main. Les outils permettent l'accomplissement d'une tâche comme le découpage (un couteau), ou bien pour améliorer le travail comme creuser (une bêche).

Les manipulateurs mécaniques ont été, par la suite, remplacés par des servoélectromécaniques. En 1954, l'équipe de Goertz a développé le premier manipulateur électromécanique avec la servocommande de contrôle par retour de l'information. Après, la téléopération des manipulateurs et les véhicules s'est prolongée rapidement à de nouvelles branches où les avantages des techniques de téléopération pourraient être employés.

Un des premiers secteurs où des techniques de téléopération ont été employées était l'exploration hauturière. Les profondeurs océaniques sont hostiles, c'est pourquoi la plupart des opérations hauturières sont faites avec des sous-marins téléopérés. Ces sous-marins sont appelés les véhicules pilotés à distance (VPD). Souvent les ROVs sont équipés de télémanipulateurs afin d'accomplir des tâches professionnelles sous-marines. La téléopération est également utilisée dans l'espace et dans des applications militaires. Il est à noter qu'à coté de l'hostilité, l'équipement utilisé dans l'espace pour un pilote humain coûte plus cher qu'un système sophistique de téléopération.

L'histoire de la téléopération moderne a commencé pendant la fin des années 40 où le manipulateur maître/esclave a été développé dans le laboratoire national d'Argonne pour la manipulation de matériau chimique et nucléaire [9]. Après, le développement de la téléopération était rapide. L'adaptation de la rétroaction (Feedback) visuelle de technologie et de force à la téléopération a rendu les premiers systèmes de téléprésence possibles. La technologie informatique a introduit les boucles d'avertissement avancées dans le système de téléopération, et a fini par introduire la réalité virtuelle. En dépit du progrès technologique, l'idée traditionnelle de la téléopération a été basée sur l'idée à ce que l'opérateur humain serait à tout moment disponible pour exercer le contrôle plus ou moins direct.

Pendant ce temps, l'informatique a permis l'automatisation des processus complexes comme ceux qu'on trouve dans les usines chimiques, les machines de papier et les différents traitements par lots. Peu à peu, la technologie de l'automatisation s'est rapidement évolué dans des secteurs tels que les mines, les fermes, la sylviculture, et les chantiers de construction. Cependant, à la différence des tâches d'usine, il n'était pas facile d'automatiser les tâches difficiles et dynamiques des machines ayant un impact sur l'environnement extérieur. On peut constater toujours que la majorité des machines sont encore manuellement contrôlées.

Amorcée pendant les années 1970, l'informatisation professionnelle a récemment élargi son empire du poste de travail isolé à la prise en charge des tâches communicant par réseau.

Les instruments de communication asynchrones tels que les messageries, les forums de discussions ou les serveurs de données ont aujourd'hui conquis une place de plus en plus importante dans les organisations. Cependant, la diffusion de ces outils reste pour l'heure très inégale et l'appréciation de leurs effets sociaux et économiques est sujette à controverse.

L'architecture des futures organisations "virtuelles" reposerait entièrement sur un réseau de machines à coopérer dotées du pouvoir d'abolir les distances et de faire naître entre ses membres une connectivité généralisée. Ces outils de communication, promettent aussi de créer un espace de travail commun permettant de partager des applications, d'échanger des documents animés ou sonores, d'écrire sur un même texte, d'élaborer un

diagnostic médical sur un même cliché, et de faire circuler dans les réseaux des conférences, des cours ou des diagnostics. Enfin la perspective d'une mise `a disposition de tels outils sur des réseaux non nécessairement professionnels (via la téléphonie large bande ou le réseau Internet) ouvre des perspectives d'usages d'applications coopératives.

La téléopération et la téléprésence, ou la présence virtuelle, qui devient de plus en plus courante grâce à l'évolution technologique, implique une ouverture du potentiel du télétravail. En effet, on peut imaginer que certaines actions pourront un jour être effectuées à distance, comme par exemple des opérations chirurgicales accomplies par l'intermédiaire d'un robot piloté par le chirurgien se trouvant loin du patient. On voit que le potentiel du télétravail est fortement lié à la virtualité et à la téléopération, donc aussi à la robotique et à l'informatique, autant qu'aux communications.

Le travail qu'on présente dans ce mémoire traite un système de téléopération à un seul degré de liberté, en concevant une commande à distance d'un bras manipulateur à un seul degré de liberté avec retour de force en présence d'un temps de retard constant.

Ce manuscrit est divisé en trois chapitres, une annexe et une bibliographie. Il est représenté comme suit :

Chapitre I : Une vue générale sur les systèmes de téléopération a été donnée, ainsi un petit historique qui résume les origines de la téléopération et comment cette nouvelle forme de travail est perçue dans le monde, et enfin les différents domaines d'applications.

Chapitre II : Un aperçu sur la technique de variable d'onde, ainsi les théorèmes de passivité et la transparence sont représentés dans ce chapitre, et enfin un profil sur le prédicteur de Smith.

Chapitre III : après la formulation mathématique du problème nous passons à une comparaison de nos résultats avec les résultats théoriques et expérimentaux de la littérature, et finalement, une synthèse et interprétation des résultats.

On finalise notre travail par une conclusion générale.

Pour aider le lecteur à bien s'en servir de ce travail, une annexe et une liste de références bibliographiques ont été ajoutées à la fin de ce manuscrit.

CHAPITRE I:

LES SYSTEMES DE TELEOPERATION

I.1/ Introduction:

Les télémanipulateurs sont conçus pour permettre aux êtres humains de manœuvrer à distance les tâches dangereuses et sensibles par l'intermédiaire des robots manipulateurs assurant les meilleurs rapports de sécurité, le coût faible et la meilleure précision. Comme représenté sur la figure (I,1), un système de téléopération présente généralement cinq composants [3]:

- un opérateur qui voulant exécuter une tâche à distance,
- un contrôleur maître qui est interfacé à l'opérateur,
- un canal de communication par lequel des commandes de contrôle sont transmises,
- un manipulateur esclave qui accomplit la tâche,
- et un environnement à distance sur lequel la tâche est conduite.

En bref, basé sur l'interaction entre l'opérateur et le maître, une commande de contrôle est émet à l'esclave à travers le canal de communication afin d'exécuter la tâche désirée au niveau du manipulateur distant. Afin d'empêcher des dommages, pour réduire le temps d'accomplissement de tâche et pour augmenter la performance, l'information de contact de l'emplacement à distance doit être transmise à l'opérateur. Cette information peut être présentée à l'être 'humain directement par un signal de retour au niveau du contrôleur maître ou bien, présentée indirectement à travers des afficheurs visuels ou acoustiques. Dans le premier cas, l'information de contact sous forme de position mesurée ou de signal de force est convertie en un signal mécanique par l'actionneur au niveau du maître, puis présenté à l'opérateur humain.

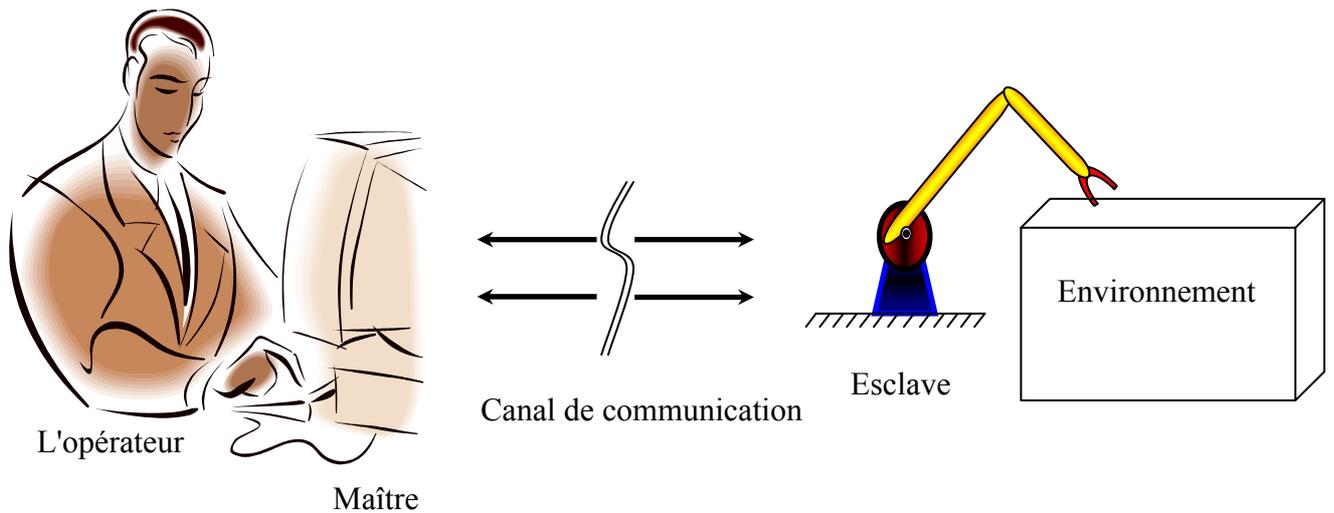


Figure I.1 : Schéma d'un système de téléopération

Dans ce cas, l'opérateur et l'environnement sont cinesthésiquement couplé, et la commande est dite bilatérale, vue que l'information circule dans les deux sens. Bien qu'il a été prouvé que l'affichage graphique de la force améliore de manière significative la commande de la force de contact d'environnement, il s'est avéré que pour des tâches impliquant des manipulateurs à plusieurs degré de liberté (ddl), cette méthode utilisant le retour de l'information n'est pas recommandé pendant que l'opérateur est surchargé.

Le premier télémanipulateur, en fait purement mécanique, a été construit pendant les années 50 par Goertz motivé par la manipulation du carburant radioactif dans un laboratoire nucléaire. Plus tard, des télémanipulateurs électromécaniques ont vu le jour. Ils présentent des servomécanismes employés pour coordonner le mouvement entre des manipulateurs similaires maître et esclave. La conception d'un contrôleur bilatéral généralisé pour les systèmes maître-esclave cinématiquement et dynamiquement non similaires ont permis la conception de bras-maître, tels que les manches ou volants, qui sont optimisée pour la poignet ou le mouvement du bras. Dans les décennies passées, la téléopération a trouvé des applications dans beaucoup de domaines comprenant des technologies de l'espace, les explorations sous-marines, opérations militaires, utilisation matérielle et disposition de rebut de nucléaire/toxique, chirurgie, micro chirurgie, et réadaptations. Récemment, les applications des systèmes de téléopération ont été étendues à la formation, l'éducation, le divertissement, et les secteurs de la réalité virtuelle.

I.2 / Buts de conception du contrôleur de téléopération:

Le but de la conception du contrôleur bilatéral est de maintenir la stabilité dans toutes les circonstances tout en réalisant une performance désirée. La stabilité des systèmes de téléopération, qui est définie comme la limite à la réponse du système excité aux limites ou aux conditions initiales différentes de zéro, ont été étudiées par beaucoup de chercheurs en utilisant la théorie de Lyapunov ou utiliser la théorie de la passivité qui conviennent aux systèmes linéaires et non-linéaires. Pour les systèmes linéaires, les outils d'analyse de stabilité tel que le critère de Nyquist ou la technique de lieu de racine ont été également utilisés [3].

Comme pour la stabilité, la performance dépend du matériel du système, de la tâche qui doit être accomplie et de la conception bilatérale du contrôleur. Plusieurs critères pour la mesure de la performance ont été proposés dans le domaine du temps et de fréquence basée sur différentes définitions de performance. Par exemple, le temps d'accomplissement de la tâche, somme des carrées des forces, dextérité du manipulateur et des efforts articulaires, le dépassement maximum ou largeur de bande minimum exigée et téléprésence pour ne citer que ceux là. Parmi ces derniers, la téléprésence ou la transparence, est interprétée comme retour précis de l'environnement à l'opérateur et remplit le premier objectif de la téléopération, défini comme la "*projection des capacités de sensation et de manipulation humaines aux sites distants*". À cet effet, le matériel du système et le contrôleur bilatéral devraient être capables de fournir à l'opérateur l'information à distance jusqu'à la largeur de bande d'entrer requise. (320 hertz tactiles, cinesthésiques 20 hertz, et 30 hertz proprioceptifs) et rendent d'une façon convenable la sortie de l'opérateur (en dessous de 10 hertz) à l'environnement. Bien que les sensations de peau soient bloquées par le matériel du système et le canal de communication, les sensations musculaires représentées par la force et la position peuvent être transmises avec une grande fidélité. Par conséquent, la transparence est quantitativement définie comme une similitude entre le maître d'une part et les positions et les forces de l'esclave d'autre part, réalisant ainsi la condition de la manipulation directe.

Cependant, dans beaucoup d'applications, dues à la grande différence d'échelle entre l'opérateur et l'environnement, ou même dues aux besoins de sûreté ou à la limitation de la zone de travail principale relativement à la taille de la zone de travail esclave, la correspondance cinématique entre le maître et l'esclave n'est pas limitée à l'unité. Dans la

micro/macro manipulation, la position principale, la force et la puissance se réduisent/augmentent du côté esclave et vice-versa. Pour s'adapter aux correspondances de la position et des forces, Lawrence [1] proposa une nouvelle définition de la transparence basée sur l'impédance, une quantité qui fait correspondre la vitesse d'entrée du système à sa force de sortie, qui est pratiquement liée aux propriétés mécaniques de rigidité, de viscosité et de masse de ce système. En bref, "*un système de téléopération est transparent si l'impédance perçue par l'opérateur est adaptée à l'impédance d'environnement*". La définition de Lawrence de la transparence peut également être étendue aux systèmes de télémanipulation dans lesquels l'opérateur doit percevoir une mesure de l'impédance d'environnement tel que les outils manuels où l'impédance au lieu de la puissance est mesurée. Comme il est mentionné par Colgate [4], la définition ci-dessus exige la similitude dynamique entre les impédances apparentes et réelles. Cependant, dans quelques applications, la similitude dynamique n'est pas souhaitable et des composants de force devraient être mesurés d'une façon non-uniforme. Dans tels cas, l'impédance perçue est formée par le contrôleur bilatéral basé sur la connaissance de l'environnement.

1.3 / Etat de l'art :

La téléopération est un sujet d'actualité qui présente de nombreux avantages à cause de son utilisation, tant au niveau de la sécurité et de l'utilité. La téléopération bilatérale est constituée d'un site maître, canal de communication et un site esclave qui agit sur un environnement. Le but de la téléopération bilatérale est de maintenir la stabilité du système dans toutes les situations tout en optimisant les performances du système. La stabilité est définie comme étant la réponse bornée d'un système à une entrée bornée. Elle est en générale évaluée en utilisant la méthode de Lyapunov ou encore l'analyse de la passivité. L'analyse des performances repose sur différents critères, comme par exemple la fin d'accomplissement d'une tâche, la dextérité des manipulateurs, la téléprésence.

La téléprésence est le critère le plus utilise, elle est connue sous le mot transparence. Ainsi, la transparence est définie quantitativement comme étant une adaptation entre la vitesse et les forces du maître avec ceux de l'esclave. Cependant, lorsque le maître et l'esclave ne sont pas cinématiquement identiques, cette définition n'est plus valable. Ainsi Lawrence [1] a proposé une autre définition de la transparence et qui est la plus répandue actuellement dans le milieu de recherche. Cette définition comprend l'impédance du système, qui est une correspondance de la vitesse d'entrée du système à sa

force de sortie. Pratiquement l'impédance d'un système linéaire mécanique est définie comme $Z = \frac{F}{v}$.

L'un des travaux qui a suscité une grande importance dans le domaine de la téléopération est le travail de Lawrence [2]. Lawrence présente un contrôleur de position et confirme que ce type de contrôleur est souhaitable pour des opérations dans des environnements doux mais sous des circonstances idéales. Cependant, pour arriver à une transparence parfaite, les gains de commande doivent être théoriquement infinis. Seulement, augmenter les gains afin d'améliorer la poursuite en position amène le système à être instable. Par conséquent, cette architecture n'est pas transparente. Pour améliorer les performances on envoie directement au maître la force de contact de l'environnement au lieu de la position de l'esclave. Il est à noter que cette architecture fut adoptée par beaucoup de chercheurs.

D'autres part Kezerooni [5], proposa une architecture force-force dans laquelle le maître et l'esclave échangent des forces. Pour garantir la stabilité il utilisât la méthode H_∞ , et les techniques de réduction du modèle. A cause de l'absence du signal de position, cette méthode souffre du manque de coordination entre le maître et l'esclave.

L'Architecture de téléopération à quatre canaux utilise les signaux de la position et de la force. Cette architecture est très souhaitable pour obtenir une bonne transparence dans les conditions idéales et lorsque l'accélération est utilisée [1]. Aux basses fréquences, cette méthode donne une bonne transparence sans avoir à utiliser l'accélération. Contrairement à cette vision, il a été démontré que l'on peut arriver à une parfaite transparence si la force de retour locale est utilisée.

Malgré que l'architecture à quatre canaux peut donner de meilleurs résultats, elle reste cependant susceptible aux retards de communication ce qu'il lui fait perdre sa robustesse vis-à-vis à la stabilité [5]. Pour améliorer la stabilité, on ajoute une certaine quantité d'amortissement au maître et à l'esclave, ce qui provoque une sensation de lenteur au niveau de l'opérateur. Afin d'améliorer cette sensation, la quantité d'amortissement ajoutée a été ajustée pour donner à l'opérateur une transparence meilleure [5].

Pour améliorer la précision, on a essayé de tirer au clair ce qu'est le temps de retard. Le problème du temps de retard peut être compris en utilisant la passivité. L'ajout d'un temps de retard dans le canal de communication génère de l'énergie et cause une augmentation dans l'énergie du canal de communication, le rendant ainsi instable [6], il existe plusieurs manières de compenser cette augmentation. La théorie du Scattering a été utilisée pour concevoir des contrôleurs qui garantissent la stabilité en rendant le canal de communication une ligne sans perte et passive [6, 7]. Cette architecture garantit la stabilité sous n'importe quel temps de retard du système. Cependant, lorsque le temps de retard augmente, l'utilisation du système diminue du à la diminution de la transparence. Plusieurs méthodes ont été élaborées afin de surmonter ce problème [6]. On remarque à partir de cette méthode qu'à chaque fois que la stabilité est maintenue la transparence diminue. Une solution alternative a été mise au point pour compenser les grands temps de retard en utilisant le contrôle prédictif, Basé sur le prédicteur de Smith. Le contrôleur de Smith a été étendu aux cas de téléopération. La difficulté dans l'utilisation du prédicteur de Smith réside dans l'utilisation d'une dynamique linéaire fixe de l'esclave et de l'environnement. Dans une autre approche [8], l'auteur propose l'utilisation de la variable d'onde avec un prédicteur de Smith modifié. Ces systèmes ont démontré une supériorité en montrant une bonne robustesse face au large temps de retard comprenant la téléopération sur Internet.

Le temps de retard peut être dans l'ordre des millisecondes jusqu'aux secondes ou même aux minutes dans des opérations d'espace extra atmosphérique, Le premier travail sur le temps de retard a été publié dans [9], où le système est conduit dans le mode en boucle ouverte et, par conséquent, l'instabilité n'est pas vérifiée. Plusieurs travaux sont effectués sur les contrôleurs bilatéraux conçus pour optimiser les performances de système afin de garantir la stabilité du système de téléopération et donnent des impédances connues et fixes de l'opérateur et de l'environnement. Ces contrôleurs sont trop lents et exigent trop d'ajustements des poids de calcul. Pour garantir la stabilité de n'importe quel opérateur et environnement passifs, Colgate propose l'utilisation de la valeur singulière structurée pour trouver les paramètres de commande qui garantissent la passivité du réseau. Son architecture est basée sur celle de Lawrence [1], et le choix de l'impédance sur celle utilisée par Spong [10], [11] et [12], qui utilise une structure de contrôle avec un retour de force local. Une méthode de conception du contrôleur de type RST est développée dans les travaux de Anes Fatouh [13], qui permet d'assurer de manière robuste la stabilité en boucle

fermée d'un système de téléopération pour n'importe quelle valeur finie du retard de communication.

Dans les travaux [14], [15], [19], [17], [18], [16] on trouve une structure de contrôle à quatre canaux.

Ces travaux, les plus proches de celle présente ici, supposent qu'un modèle de l'opérateur est connu, l'objectif de cette recherche, par rapport aux précédents travaux, est d'établir une méthode qui puisse s'adapter aux différents objectifs, en vue d'une éventuelle comparaison, et les combiner simultanément de manière optimale. La formulation du système s'effectue tout d'abord avec un environnement supposé inconnu et la structure du système est celle d'un télémanipulateur classique. Le contrôleur a une structure à quatre canaux et la commande s'effectue sur la force et la vitesse (une commande force/position). Cette recherche a été effectuée au Laboratoire d'Automatique de Grenoble entre 1995, 2002. Mais la synthèse du contrôleur final assurant la transparence et la passivité n'a pu être réalisée.

Can dede [24, 25], démontre l'effet des variables d'ondes sur la stabilité d'un système de téléopération à plusieurs degrés de liberté, en présence d'un retard de temps de communication.

Toujours dans le stade de la recherche dans ce domaine, le problème de la passivité et la transparence reste posé [20], [21], [22], [23].

1.4 / Les caractéristiques d'une situation de téléopération :

1.4.1 / Définition :

La téléopération est la réalisation à distance d'une action. Celle-ci est mise en jeu lorsque l'environnement est jugé trop hostile ou inaccessible à l'homme et quand les opérations à effectuer sont trop imprévisibles ou trop complexes pour être automatisées. Dans une telle situation l'opérateur est installé à un poste fixe de pilotage et commande à distance un engin pouvant se présenter sous forme de télémanipulateur fixe ou de plateforme mobile. En retour, il reçoit des informations en provenance de la télérobotique sur un terminal de visualisation de type ordinateur (figure (I.2)). Bien que certains restreignent le terme de téléopération au contrôle direct (non automatisé), nous considérons que la

téléopération englobe tout un spectre allant du contrôle manuel jusqu'à celui de supervision. Pour aller plus loin, nous estimons même que tout bon système de téléopération doit pouvoir fournir un large éventail de types de contrôle et en particulier des modes partagés, essentiels à la réalisation d'une coopération homme-machine [26].

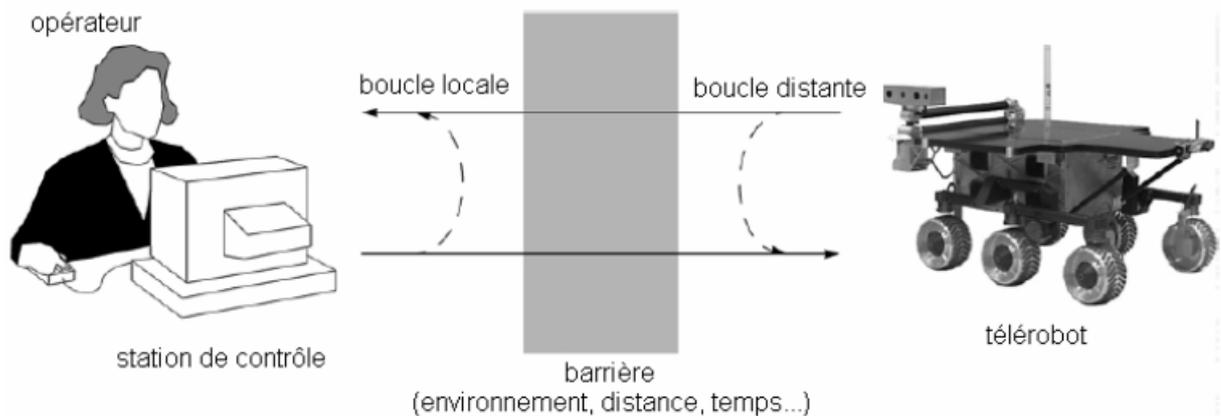


Figure I.2 : Situation de téléopération. Un opérateur génère des commandes depuis une station de contrôle et reçoit des retours sur une interface graphique. L'engin situé à distance exécute les commandes, souvent en utilisant un certain niveau d'autonomie embarquée.

Les engins de téléopération ont plusieurs caractéristiques qui les distinguent des vulgaires dispositifs radiocommandés. Premièrement, les véhicules téléopérés sont des engins qui demandent une grande confiance dans leur système de navigation. En effet, étant donné que ces véhicules évoluent régulièrement dans des environnements inconnus et complexes, des problèmes de navigation peuvent rapidement conduire à une perte du robot.

Deuxièmement, la télérobotique nécessite un générateur de commande du mouvement efficace. Dans de nombreux cas, la réussite de la tâche est directement corrélée à l'efficacité avec laquelle l'engin se déplace. Enfin, le véhicule a besoin de capteurs pour se localiser. Effectivement, du fait que ces robots couvrent de grandes distances, l'élaboration d'une carte du parcours effectuée est un facteur fondamental afin de mener à terme la mission demandée.

I.4.2 / Etat de l'art sur les engins de téléopération:

Les véhicules de téléopération sont apparus au début du 20^{ème} siècle, mais ce n'est que dans les années 70 qu'ils ont commencé à être largement employés. Actuellement ces engins sont utilisés pour des applications aériennes, terrestres et mêmes subaquatiques. Etant donné que leur développement s'est effectué au cours de différentes périodes et dans différents domaines, il n'est pas surprenant qu'ils soient référencés suivant plusieurs terminologies, à partir d'abréviations essentiellement anglo-saxonnes (ROV, RPV, UAV, UGV). Cependant, quels que soit les types de système, on leur retrouve toujours beaucoup de caractéristiques et de traits communs [27].

I.4.2.1 /Engins aériens :

Les appareils aériens sans pilote existent depuis le début des années 1900 [28]. Les premiers engins aériens téléopérés étaient les drones, aussi appelés *Véhicules Pilotés à Distance* (RPV, pour *Remotely Piloted Vehicles*). Ils étaient utilisés pour l'entraînement anti-appareils aériens. Des drones tels que le RP-5 de l'armée américaine (1941) volaient grâce à un plan de vol préprogrammé, bien qu'il puisse être occasionnellement piloté par contrôle radio [29]. Durant les années soixante, la NASA a mis en place un programme de développement de *Véhicules de Recherche Pilotés à Distance* (RPRV, pour *Remotely Piloted Research Vehicles*). A la différence des drones, qui étaient généralement de taille réduite, les RPRV étaient des avions habités, modifiés pour être contrôlés à distance [27].

Aujourd'hui, les *Véhicules Aériens Inhabités* (UAV, pour *Unmanned Air Vehicles*) sont les engins téléopérés les plus communément utilisés. Les UAV modernes sont pilotés à distance grâce à une liaison radio ou satellite et sont utilisés pour des tâches telles que la reconnaissance ou l'identification de cibles. Egalement, différents UAV ont été utilisés pour le combat, tel que l'US Navy Pioneer et l'US Air Force Predator (figure (I.3)).



Figure I.3 : Le UAV Predator transporte une grande variété de capteurs (EO, IR, SAR) et est piloté par un opérateur au sol via une liaison radio ou satellite. Il peut exécuter un plan de vol de manière totalement autonome une fois celui-ci implémenté à bord.

A gauche : l'US Air Force Predator. **A droite :** la station de contrôle du Predator.

I.4.2.2 /Engins sous-marins :

Les *Véhicules Commandés à Distance* (ROV, pour *Remotely Operated Vehicle*) représentent le plus grand marché de ce type d'appareil de téléopération (figure (I.4)). Les ROV sont des sous-marins inhabités qui sont généralement attachés à la surface d'un bateau. Les ROV existent depuis le début du 20^{ème} siècle, mais c'est le succès du *Véhicule de Récupération Sous-marine Contrôlé par Câble I* (CCURV I, pour *Cable Controlled Underwater Recovery Vehicle I*), utilisé par l'US Navy en 1966 pour récupérer une bombe atomique, et la perche dans l'exploitation sous-marine des hydrocarbures qui ont lancé leur développement commercial. Aujourd'hui, les ROV sont utilisés sur une large gamme de tâches (surveillance, inspection, océanographie...) et prennent de plus en plus la place des sous-marins habités ou autres scaphandriers [26].

Enfin, bien que beaucoup de ROV soit contrôlés par joysticks et à travers des moniteurs vidéo, quelques systèmes récents incorporent des fonctions autonomes telles que le maintien de position et le suivi de trajectoires.

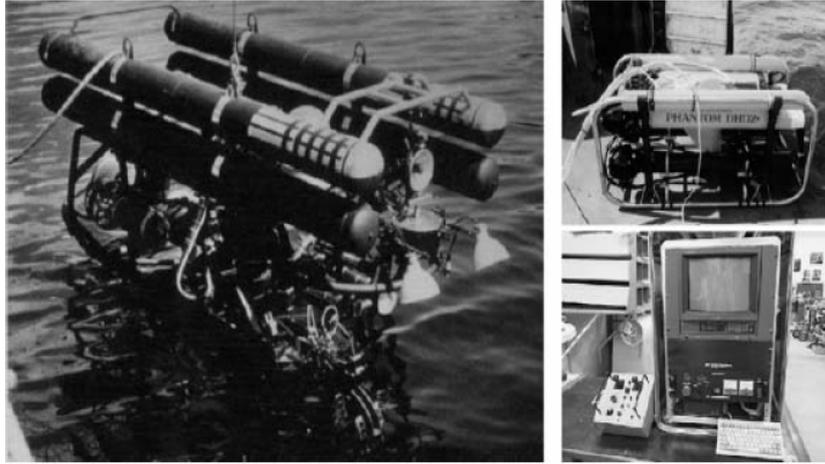


Figure I.4 : Exemples de véhicules sous-marins commandés à distance de type ROV.

A gauche : le véhicule de récupération sous-marine contrôlé par câble CCURV I.

A droite : un ROV commercial utilisé pour l'inspection sous-marine et sa console de contrôle.

I.4.2.3 /Engins terrestres :

Les véhicules terrestres sont communément classifiés en trois catégories : les rôdeurs d'explorations, les *Véhicules Terrestres Inhabités* (UGV, pour *Unmanned Ground Vehicles*), et ceux des missions périlleuses. Les rôdeurs d'exploration sont des engins terrestres conçus pour effectuer à distance des tâches scientifiques, telles que sonder les sols et prélever des échantillons. Le premier rôdeur d'exploration fut le Lunokhods soviétique (figure (I.5)) qui a exploré la lune au début des années 70 [30]. Depuis, la NASA a produit de nombreux véhicules de recherche (la série des Rocky, Dantes I/II, Nomad...) et a fait atterrir le rôdeur Sojourner sur Mars.

Les premiers UGV ont d'abord été utilisés pour des tâches nécessitant une navigation à distance telle que la reconnaissance ou la surveillance. Au début des années 80, le Centre des Systèmes Océanique Naval (NOSC) a développé le *Buggy de Dune Téléopéré* (TODB, pour *TeleOperated Dune Buggy*) et le *Véhicule Téléopéré* (TOV, pour *TeleOperated Vehicle*) (figure (I.6)). Ces deux appareils étaient pilotés par copie de commande et à travers une caméra vidéo à vision stéréoscopique. Durant les années 90, le programme Tactical UGV a produit plusieurs véhicules pouvant être conduits soit par

contrôle direct soit par simple spécification de points de passage sur le trajet menant à la cible [27].

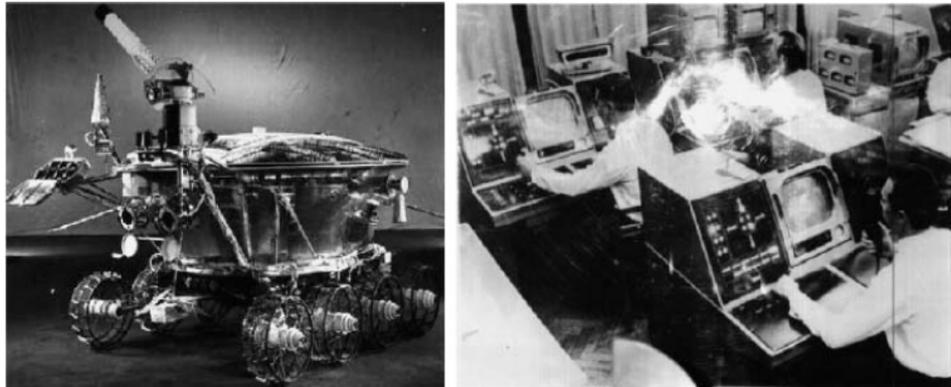


Figure I.5 : Le Lunokhod 1 a évolué sur la lune durant onze mois et couvert 10540 m.

A gauche : le Lunokhod 1.

A droite : la station de contrôle du Lunokhod.



Figure I.6 : Autres illustrations de véhicules terrestres inhabités.

A gauche : le buggy de dune téléopéré TODB.

A droite : le véhicule téléopéré TOV.

Les véhicules de missions périlleuses travaillent dans des conditions pour lesquelles ils sont exposés à de graves dangers. Ces situations peuvent aller notamment jusqu'à la destruction par explosion du véhicule. Les premiers systèmes notables de ce genre furent le *Véhicule de Reconnaissance à Distance* (RRV, pour *Remote Reconnaissance Vehicle*) et l'*Appareil de Carottage Commandé à Distance* (RCB, pour *Remote Core Borer*), qui ont

été utilisés pour explorer et réparer des réacteurs nucléaires [27]. Les missions périlleuses récentes ont couvert des applications relativement étendues telles que :

L'examen méticuleux et la désactivation de mines, le désamorçage de bombes (Graves, 1997), et des diagnostics sur l'état du réacteur de Chernobyl (figure (I.7)).



Figure I.7 : Le robot Pioneer a été conçu pour inspecter et diagnostiquer l'état du réacteur nucléaire de Chernobyl.

A gauche : le robot Pioneer.

A droite : sa station de contrôle.

1.4.2.4 /Domaine médical :

On peut également rencontrer des engins de téléopération qui sont spécifiquement employés pour la télémanipulation. Dans ce type de télérobotique, les avancées les plus remarquables ont été réalisées dans le domaine médical et plus spécifiquement dans celui de la chirurgie. Pour le moment, deux systèmes de robots téléchirurgicaux sont commercialement disponibles : le « Da Vinci » (Intuitive Surgical, Inc.) et le Zeus (Computer Motion, Inc). Les deux systèmes présentent une même architecture de base : deux bras contrôlent les instruments chirurgicaux et un troisième guide la caméra endoscopique. Le chirurgien manipule les bras robotiques à travers une console au niveau de laquelle il peut superviser à distance le déroulement de l'opération [27].

Le système Da Vinci est composé de trois éléments principaux (figure (I.8)). Tout d'abord des moniteurs vidéo qui fournissent des images du site chirurgical ainsi que des

informations utiles pour les assistants. Puis, une table d'opération équipée d'une console où sont fixés trois bras robotiques munis d'instruments chirurgicaux. La particularité des instruments utilisés par le système Da Vinci est qu'ils disposent d'une extrémité distale qui possède deux degrés de liberté supplémentaires, ce qui augmente ainsi significativement leur maniabilité. Enfin, le chirurgien est assis à une autre console depuis laquelle il peut contrôler les instruments chirurgicaux. Du fait de ces degrés de liberté rajoutés au bout de l'outil chirurgical, ces instruments sont appelés, en anglais, « Endo-Wrist tool-ends » pour spécifier que la position de cette articulation s'apparente à celle du poignet.

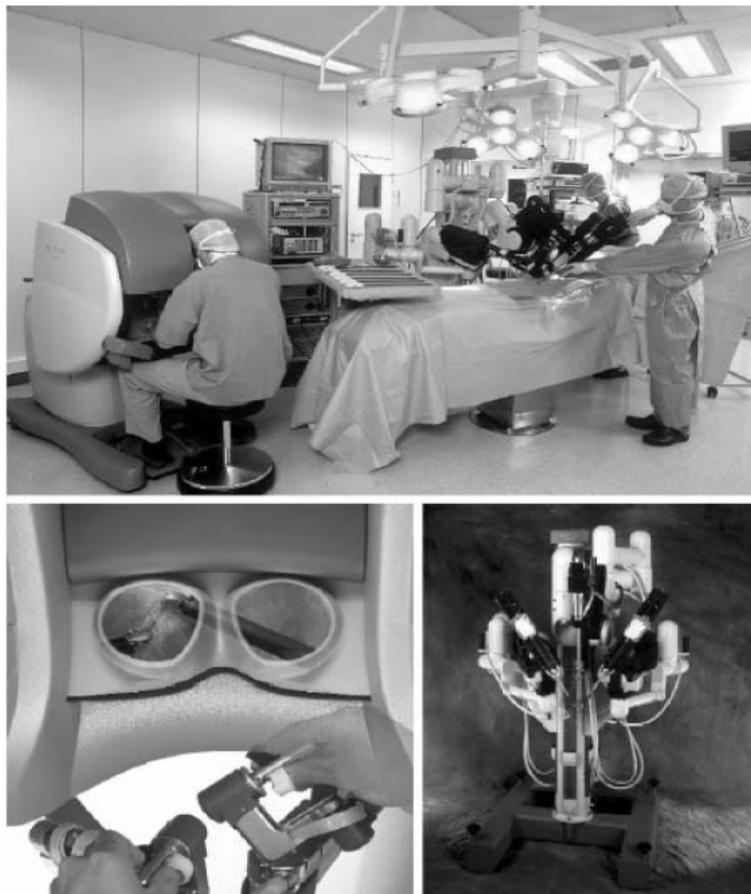


Figure I.8 : Le système Da Vinci.

En haut : une vue globale du dispositif.

En bas à gauche : la console de contrôle d'où opère le chirurgien.

En bas à droite : la console où sont fixés les trois bras robotiques utilisant des instruments *Endo-Wrist tool-ends*.

Malgré sa similarité architecturale avec son concurrent, le système Zeus présente quelques singularités. Les bras robotiques sont directement fixés à la table chirurgicale (figure (I.9)). Ceux-ci peuvent être mobilisés selon trois degrés de liberté, mais ne sont pas équipés d'instruments du type *Endo-Wrist tool-ends*. Cela signifie que le système Zeus présente deux degrés de liberté en moins que le Da Vinci et, donc, qu'il est plus difficilement maniable. En ce qui concerne la position du chirurgien, celle-ci est également localisée au niveau d'une console depuis laquelle il contrôle à distance les bras manipulateurs. Il bénéficie aussi d'une image 3D, mais elle ne peut être vue sur un écran que via le port d'une paire de lunette spéciale. Ce système a néanmoins fait ses preuves lors de l'opération Lindbergh (septembre 2001) qui constitue, à ce jour, l'expérience téléchirurgicale effectuée sur la plus longue distance [27].



Figure I.9 : Le système Zeus rendu célèbre lors de l'opération chirurgicale transatlantique « Lindbergh ».

En haut : un aperçu de la globalité du dispositif.

En bas à gauche : les trois robots manipulateurs.

En bas à droite : l'interface de contrôle du chirurgien.

I.4.2.5 /Assistance à l'handicap :

Un champ d'application de la téléopération qui est resté jusqu'alors encore inexploité est celui de l'assistance aux personnes handicapées. C'est pourquoi a été lancé le projet ARPH (Assistance Robotisée pour Personnes Handicapées) mené en collaboration entre le Laboratoire Systèmes Complexes (LSC) de l'Université d'Evry et l'Association Française de lutte contre les Myopathies (AFM). L'objectif du programme ARPH est d'embarquer un bras manipulateur (MANUS) sur une base mobile autonome (figure (I.10)) pour donner aux personnes handicapées la possibilité de réaliser seules des tâches de la vie quotidienne. Afin de rendre un tel projet viable, ce travail doit répondre à au moins deux nécessités. La première est une écoute des besoins que revendiquent les personnes handicapées. En particulier, celles-ci ne désirent pas que le robot les assiste entièrement mais qu'au contraire, elles restent dans la mesure de leurs capacités les plus actives possibles. La seconde contrainte est d'ordre financière. En effet, le coût de la recherche dans des domaines de hautes technologies tels qu'en téléopération peut devenir rapidement très élevé. Aussi, si l'on veut que ce système soit accessible à la plus grande majorité des personnes concernées, celui-ci doit répondre au plus faible coût financier possible [26].



Figure I.10 : Le robot ARPH est composé d'une plate-forme mobile sur laquelle est embarqué un bras manipulateur. Son but est d'augmenter l'autonomie des personnes à mobilité réduite.

Dans un tel contexte, la coopération homme-machine occupe une place centrale. Les différentes tâches à réaliser sont réparties entre les deux entités afin que la mission se réalise dans les meilleures conditions de satisfaction pour l'opérateur. La détection des erreurs de localisation, la commande de la base mobile et du bras manipulateur sont des fonctions effectuées en collaboration entre l'homme et la machine. Pour cela, le contrôle de la plateforme mobile incorpore trois types de modes de commande. En *manuel*, l'opérateur

pilote directement la base mobile. En *automatique*, l'opérateur se contente de définir la mission, puis le robot la réalise automatiquement. Entre ces deux extrêmes se situent les *modes partagés* qui représentent toutes les combinaisons possibles des deux modes précédents. Dans l'optique d'une CHM efficace, le passage d'un mode à l'autre et l'utilisation des modes partagés nécessitent que l'opérateur comprenne les comportements automatiques du robot.

1.5 /Contraintes techniques :

Les systèmes de téléopération sont sujets à plusieurs types de contraintes. Les premières d'entre-elles concernent le facteur technologique. Il existe trois principales variables qui vont pouvoir affecter fortement l'efficacité et l'aisance de la réalisation d'une mission téléopérée. En premier lieu, il y a la bande passante. Celle-ci va jouer sur la qualité et la quantité d'informations fournies par le robot sur son environnement. Ces caractéristiques sont des éléments clés pour l'opérateur, car ce sont-elles qui lui faciliteront la représentation de la situation et donc la prise des bonnes décisions. Un autre problème lié à la qualité de l'information est le délai de transmission. Ce délai prend en compte le traitement des données et le temps inhérent à leur transfert. Il a été montré [27] qu'au-delà d'un certain délai, il devenait difficile pour un opérateur de contrôler un robot par commande directe (i.e. en utilisant un joystick ou tout autre mécanisme de commande de direction instantanée). Ce délai limite a été quantifié aux environs des 250 millisecondes par des études neuroscientifiques [28].

Enfin, le dernier facteur limitant concerne les capteurs embarqués. En effet, même dans le cas d'une transmission idéale sans délai ni limitation de bande passante, la perception de l'environnement du robot par l'opérateur reste liée au nombre, à l'efficacité et à la diversité des capteurs embarqués sur l'engin. Les capteurs de distance les plus classiques (ultrasons ou infrarouges) offrent des informations très limitées et peu fiables. Une alternative courante à ces capteurs de base est l'utilisation d'une caméra, l'image étant un des outils les plus naturels à l'homme. D'une image simple transmise à l'opérateur jusqu'aux modèles beaucoup plus complexes de reconstruction tridimensionnelle de l'environnement, basés sur la vision stéréoscopique, les applications de vision varient passablement. Le choix est généralement un compromis entre qualité de l'information et temps de traitement/transmission de l'image.

1.6 / Contraintes humaines :

L'être humain possède des capacités remarquables d'adaptation à l'environnement. Il peut ainsi se déplacer et interagir avec les objets du monde extérieur avec une grande facilité et réagir de façon appropriée à bon nombre de situations nouvelles. Ceci est dû en majeure partie à la richesse et à la diversité des informations sensorielles (visuelles, auditives, tactiles, vestibulaires et somesthésiques) le renseignant en permanence sur l'état du monde extérieur, mais également sur l'état de son propre corps. Toutefois, il est des situations inhabituelles pour lesquelles une partie de ces informations sont dégradées, voire absentes. La situation de téléopération en fait partie [29].

Les contraintes de cette condition tendent l'opérateur à surexploiter essentiellement deux modalités sensorielles qui sont, par ordre d'importance, la vision et la proprioception. C'est donc la nature des limitations dans ces deux modalités ainsi que leurs conséquences sur la performance humaine que nous allons détailler dans les sections suivantes.

1.6.1. Limitations visuelles :

L'utilisation d'un écran vidéo pour le guidage des déplacements segmentaires (saisie et déplacement d'objets, graphismes...) s'accompagne souvent d'une détérioration des performances par rapport à une situation de contrôle direct, ceci même lorsque la taille et l'orientation de la scène visuelle ne sont pas modifiées [29]. Cette détérioration se traduit par une difficulté à évaluer les positions relatives des éléments structurant la scène visuelle, ce qui affecte en particulier l'évaluation des distances relatives. Selon Massimo et Sheridan (1989) cette baisse de performance résulterait de la constriction du champ visuel, du fait d'une réduction des indices permettant en situation naturelle la perception de la structure de l'espace d'action. Cette réduction concerne au niveau rétinien les indices monoculaires statiques (interposition, taille, luminance relative et disparité monoculaire) et dynamiques (parallaxe de mouvement et accommodation) de profondeur spatiale. Par ailleurs, la scène visuelle est projetée sur un plan bidimensionnel rendant inopérants certains indices binoculaires de profondeur comme la disparité et la parallaxe binoculaire [30]. A cela s'ajoute le fait que les mouvements de l'observateur ne génèrent pas de flux optique (déplacement sagittal) ou de parallaxe de mouvement (déplacement latéral), information intervenant également dans la perception de la profondeur spatiale.

De même, il devient impossible de déterminer la distance à laquelle se trouve un objet uniquement à partir de sa taille rétinienne (dans l'hypothèse d'un objet familier), puisque cette dernière ne dépend plus uniquement de la distance à laquelle se trouve l'objet par rapport au point d'observation, mais également de sa distance par rapport à l'objectif de la caméra. Les seuls indices subsistants semblent être certains indices picturaux, tels que la distance relative sur l'écran, la variation progressive de la taille ou de la densité des éléments composant les surfaces (texture) et la perspective. Cependant, les informations de distance fournies par ces indices sont nécessairement dépendantes du rapport d'échelle entre l'espace physique et l'espace visuel projeté, ce qui rend difficile l'estimation de la position des objets relativement à l'observateur. Cette estimation est d'autant plus difficile à réaliser que l'environnement visuel est parfois peu texturé (i.e. exploration d'une surface homogène) et que la qualité de l'image est souvent réduite.

Dans le cas de la téléchirurgie, par exemple, la résolution spatiale de l'image est faible, la lentille de l'endoscope souvent entachée de particules provenant des tissus internes, l'éclairage est faible... [27]. En définitive, il apparaît que la baisse de performance observée en téléopération est due en grande partie à la réduction des indices spatiaux permettant la perception de la profondeur. C'est ce que confirme les travaux réalisés en psychophysiques qui mettent en évidence, en condition naturelle, une diminution de la précision spatiale des mouvements lorsque ceux-ci sont exécutés à travers un espace visuel de taille réduite [20] ou peu structuré [26].

1.6.2. Limitations proprioceptives :

Les situations de téléopération induisent généralement une baisse d'efficacité des systèmes proprioceptifs et tactilo-kinesthésiques. Or, le contrôle de la motricité fine s'appuie justement sur les propriétés kinesthésiques du mouvement, en particulier les retours de force résultant de l'interaction avec les objets qui offrent une résistance à la déformation. En chirurgie classique, par exemple, l'incision d'un tissu organique repose en partie sur une évaluation kinesthésique et tactile de sa résistance au contact des outils. Cependant, la même opération chirurgicale réalisée sous contrôle vidéo limite l'utilisation de ces informations dynamiques. En raison du moment d'inertie induit par la longueur des outils utilisés, les retours de forces sont moins susceptibles de permettre une évaluation des caractéristiques du mouvement, ainsi que de la structure et de la résistance des tissus manipulés. Par ailleurs, les contraintes mécaniques liées au nombre de degrés de liberté du

télémanipulateur et à leur coordination diminuent la précision du guidage tridimensionnel du mouvement [27].

Pour remédier à ces difficultés, on voit se développer des aides au guidage manuel s'appuyant sur une augmentation du sens du toucher par un dispositif de retour de force amplifié. En absence de ces systèmes palliatifs (qui sont pour la plupart encore en phase de développement), la discrimination des variations fines des textures et de la résistance des surfaces à la déformation doit davantage s'appuyer sur les informations visuelles que kinesthésiques ou somatosensorielles, notamment pour les structures présentant de faibles variations de densité. Cette dernière observation confirme bien le rôle primordial de la vision dans l'organisation et le contrôle des actions, puisque selon certains auteurs elle serait responsable d'environ 80% de la performance du téléopérateur.

1.6.3. Discordances visuo-kinesthésiques :

En situation naturelle, l'organisation et le guidage des segments corporels s'appuient largement sur une mise en correspondance des informations proprioceptives (plus généralement tactilo-kinesthésiques) et visuelles [27].

Dans les tâches visuomanuelles (saisie et déplacement d'objets, pointage sur des éléments de l'espace proche...), les mouvements sont en effet plus précis lorsque ces informations sont disponibles avant et pendant le déroulement de l'action. Ce gain d'efficacité se caractérise essentiellement par une variabilité spatiale et temporelle plus faible des trajectoires. Or, l'introduction d'un écran vidéo entre le geste perçu et le geste réellement effectué en situation de télémanipulation entraîne un décalage entre ces deux sources d'informations induisant une détérioration des performances motrices.

Une première source de difficulté provient de l'impossibilité de visualiser et de réaliser des mouvements dans un même plan de l'espace. En effet, l'écran vidéo servant au contrôle des mouvements étant positionné verticalement en face ou sur le côté de l'opérateur, les mouvements de manipulation d'objets est suivi visuellement dans le plan frontoparallèle, alors qu'ils sont habituellement réalisés dans le plan sagittal. Par ailleurs, l'orientation de la scène visuelle sur l'écran vidéo va dépendre de la position et de l'orientation de la caméra. De ce fait, une absence d'isomorphisme entre la direction du mouvement dans l'espace de travail et celle dans l'espace de l'opérateur est fréquente. En

outre, l'éloignement de la caméra ainsi que les variations de la distance focale de l'optique utilisée vont influencer la taille apparente des éléments présents dans le champ visuel ainsi que les écarts relatifs entre ces éléments. L'opérateur doit donc apprendre à réorganiser son espace sensori-moteur afin de pouvoir réaliser des tâches de haute précision.

Ceci justifie pleinement la nécessité d'étudier la manière de s'approprier un système d'action médiatisé, dans le but de concevoir un dispositif plus ergonomiquement adapté à l'homme.

1.7 / Conclusion :

Dans ce chapitre on a essayé de donner un aperçu sur les systèmes de téléopération avec leurs différentes composantes, ainsi que les applications multiples de ces systèmes.

Les différentes architectures des systèmes de téléopération et les propriétés de passivité et de transparence avec leurs différentes variantes seront présentées dans le deuxième chapitre.

CHAPITRE II:

TRANSPARENCE ET PASSIVITE

II.1/ Introduction :

La télérobotique est considérée par plusieurs travaux récemment publiés comme un des principaux domaines de la robotique [31]. Elle voit s'ouvrir devant elle, grâce aux progrès des moyens de communication, un vaste champ d'applications : opérations téléopérées dans des sites difficiles d'accès (espace, milieu marin), en milieux à risques (sites nucléaires) ou encore dans le milieu médical avec la téléchirurgie...

Un des principaux problèmes posés par la téléopération est le temps de retard dans les communications qui tend à déstabiliser le système lorsque l'on désire un couplage fort entre le site maître et le site esclave. Donc, ce chapitre est consacré à la présentation des différentes définitions de la téléprésence, la passivité, la technique de variable d'onde et le Prédicteur de Smith.

II.2/ transparence :

II.2.1 Définition de la transparence :

A partir d'une analogie avec l'électricité, on peut modéliser le système de téléopération par un ensemble de blocs en cascade, représentant le site maître, le site esclave et entre les deux le réseau de communication identifié par un quadripôle à deux ports de matrice hybride $H(s)$ figure (II.1).[32]

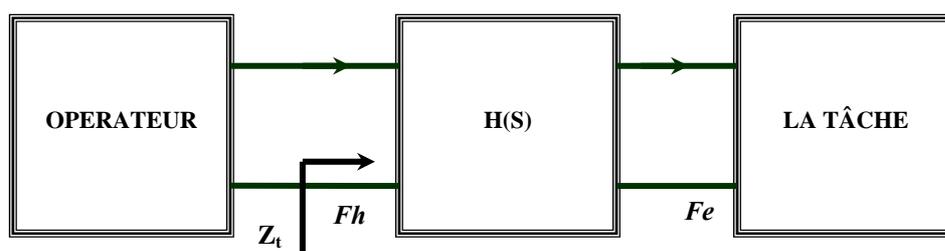


Figure II.1 : Représentation sous forme de réseau d'un système de téléopération.

Les forces sont analogues à des tensions et les vitesses à des intensités. Cette analogie est possible si on considère que le système de téléopération est linéaire. Lorsque le robot esclave est en contact avec son environnement, la vitesse de l'effecteur de l'esclave V_e et la force F_e qu'il exerce sur son environnement n'est plus indépendante. Elles sont reliées par l'impédance Z_{te} transmise par l'environnement de l'esclave [31] :

$$F_e = Z_{te}(V_e) \quad (\text{II.1})$$

Si l'opérateur perçoit l'environnement distant comme s'il était sur place, alors la force exercée par l'opérateur sur le bras maître F_h et la vitesse du bras maître V_h devraient avoir la même relation : c'est-à-dire pour les mêmes forces $F_e = F_h$ on désire obtenir les mêmes vitesses, soit $V_e = V_h$. Ceci nécessite que l'impédance transmise Z_{th} ou ressentie par l'opérateur, définie par :

$$F_h = Z_{th}(V_h) \quad (\text{II.2})$$

Satisfasse la condition de transparence :

$$Z_{th} = Z_{te} \quad (\text{II.3})$$

Il faut une deuxième condition pour que la transparence soit parfaite, on l'impose sur les vitesses :

$$V_h = V_e \quad (\text{II.4})$$

Remarque 1 : on préfère utiliser une condition sur les impédances plutôt que sur les forces, car dans ce cas on peut mieux réaliser une analogie avec l'électricité [31]. De plus, il se peut que l'on désire utiliser un facteur d'échelle entre les grandeurs des deux différents sites, dans ce cas la condition de transparence sur les vitesses sera modifiée :

$$V_h = V_e / n \quad (\text{II.5})$$

Où n est le facteur d'échelle. On aura une condition similaire sur les forces, alors que la condition sur les impédances reste inchangée. Mais surtout les impédances permettent de mieux caractériser la transparence car ce sont les paramètres que ressent directement l'opérateur. Par exemple, si l'environnement éloigné est un ressort, l'opérateur ressent directement, en ligne, s'il est en contact avec un ressort, alors que la vérification

d'égalité des forces et vitesses entre maître et esclave ne peut se faire qu'a posteriori. C'est pourquoi dans le cas général on préfère la condition sur les impédances [32].

Remarque 2 : soient F_e^* les forces de perturbation qui peuvent être générées dans l'environnement distant et Z_e l'impédance de cet environnement. Alors la force retransmise du poste esclave vaudra $F_e = F_e^* + Z_e(V_e)$. Dans le cas d'un environnement passif (soit $F_e^* = 0$) on a $Z_{te} = Z_e$, dans ce cas la condition de transparence entraîne que l'opérateur ressent la vraie impédance de l'environnement de travail.

II.2.2/ Les différentes façons d'aborder la transparence :

Il existe différentes façons d'aborder la transparence [33] :

- Transparence force-vitesse, de manière couplée (la force et la vitesse sont interdépendantes), avec une approche basée sur le choix d'une impédance désirée pour le système,
- Transparence force-force et vitesse-vitesse avec minimisation de la différence entre les mesures effectuées du côté conducteur et celles prises au niveau des roues,
- Transparence force-force uniquement avec un modèle de comportement à reproduire, comme celui d'une conduite assistée (modèle non-linéaire).

Ces trois approches sont détaillées ci-dessous.

II.2.2.1/ Transparence couplée (impédance) :

Cette approche, basée sur la caractérisation du comportement d'un système en définissant son impédance, a été développée dans [1] puis [33] et [38]. Lors de la synthèse du contrôleur, le but est de construire un système aux paramètres fictifs, qui se comportera de la même manière qu'un objet physique dont le comportement est connu.

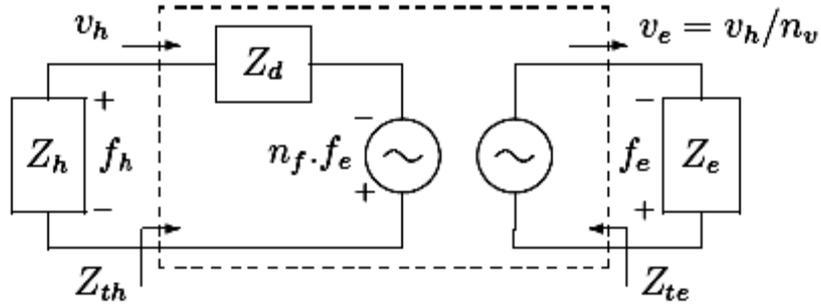


Figure II.2 : Représentation à deux ports d'un manipulateur idéal

Une représentation à deux ports d'un manipulateur idéal est présentée sur Figure (II.2). Le manipulateur P peut être idéalisé comme un objet passif d'admittance Y_d (dynamique de P souhaitée, d'impédance Z_d). Z_{th} est l'impédance perçue par l'opérateur et Z_{te} celle transmise à l'environnement. Le conducteur et l'environnement sont considérés comme des objets passifs d'impédances Z_h et Z_e , respectivement. Ces dernières sont reliées au modèle par :

$$H = s.Z_h \quad (II.6)$$

$$E = s.Z_e \quad (II.7)$$

La force exercée par l'environnement est directement transmise à l'opérateur et amplifiée d'un facteur n_f et la commande sur le déplacement fournie par l'opérateur est divisée par n_v . La dynamique du bloc P est donnée par les équations suivantes (loi des boucles de Kirchoff) :

$$v_h = y_h^d (f_h + n_f f_e) \quad (II.8)$$

$$v_e = y_e^d \left(\frac{1}{n_v} + \frac{n_f}{n_v} \right) f_e \quad (II.9)$$

Où $y_h^d(s)$ et $y_e^d(s)$ sont des fonctions de transfert désirées caractéristiques du système, sous forme admittance, et n_f et n_v sont des paramètres de réglage scalaire dépendant de l'application envisagée. A noter que ces paramètres peuvent aussi être dépendants de la fréquence. L'admittance désirée $Y_d(s)$ peut être exprimée sous la forme synthétique [33]:

$$Y_d(s) = \begin{bmatrix} y_h^d & 0 \\ 0 & y_e^d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & n_f \\ 1/n_v & n_f/n_v \end{bmatrix} y_d(s) \quad (\text{II.9})$$

Théorème.1 : [37] (Zhu-Salcudean-Loewen). Les propriétés du système \mathbf{P} peuvent être résumées ainsi :

1. $Z_{th} = Z_d + \frac{n_f}{n_v} Z_e$ et $Z_{te} = \frac{n_v}{n_f} Z_d + \frac{n_v}{n_f} Z_e$
2. Si $y_h^d(s)$ et $y_e^d(s)$ sont passives, alors $Y_d(s)$ l'est aussi si et seulement si $n_f(j\omega)n_v^*(j\omega) = 1, \forall \omega \in \Re$

Cette définition de la transparence nécessite un choix et une caractérisation de l'objet dont on veut reproduire le comportement ; la définition suivante, plus directe, ne fait appel qu'aux coefficients d'amplification sur la force ou la vitesse.

II.2.2.2/ Transparence découplée force et vitesse :

Dans cette approche, dont l'idée générale est décrite dans [31], la force et la vitesse sont considérées de manière indépendante : chacune va constituer son propre critère qui n'aura de relation avec l'autre que son optimisation simultanée.

Le but est de reproduire le plus fidèlement possible ce qui se passe des deux cotés du système, avec éventuellement un facteur d'amplification ou de réduction, comme dans la précédente approche. Les deux critères à minimiser sont pondérés par un filtre afin que l'optimisation s'effectue dans un domaine fréquentiel à l'aide des équations suivantes [37] :

$$z_1 = W_1(f_h + f_m - n_f(f_e + f_s)) \quad (\text{II.10})$$

$$z_2 = W_2(v_h - n_v v_e) \quad (\text{II.11})$$

Où z_1 et z_2 sont l'erreur de poursuite de force et de vitesse, respectivement. W_1 et W_2 sont, dans les deux cas, des filtres passe-bas. Si \mathbf{H} est identifié et connu, alors l'entrée considérée du côté conducteur est f_{ext} et le critère à minimiser s'exprime par :

$$z_1' = W_1(f_h - n_f f_e) \quad (\text{II.12})$$

Cette approche est exactement celle proposée par [31] mais ne sera pas concrètement explorée ici, faute de modèle précis pour H_2 . Le comportement de force à reproduire peut parfois être plus complexe qu'un simple coefficient associé à une fonction de transfert : ce cas est le dernier envisagé pour la transparence.

II.2.2.3/ Force désirée donnée par un modèle externe :

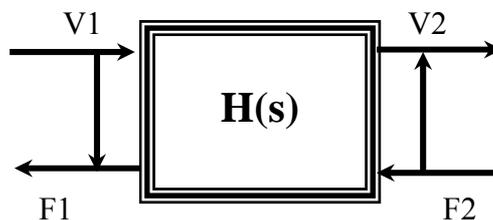
Le but ici, étant donné un modèle de comportement, est de chercher à le reproduire le plus fidèlement possible. Ce modèle est dans le cas présent celui d'une conduite assistée, étudié et présenté dans [34]. La force à reproduire sur la crémaillère est la somme de celle fournie par le conducteur et celle apportée par la conduite assistée, notée f_a . Les impédances du conducteur et de l'environnement sont toujours supposées inconnues ; l'objectif est ainsi similaire au premier cas présenté ci-dessus :

$$z_{1a} = W_1(f_h + f_a + f_m - (f_e + f_s)) \quad (\text{II.13})$$

II.3/ Stabilité par la passivité :

II.3.1/ Définition :

Le système de communication peut être modélisé par un quadripôle à 2 ports caractérisé par sa matrice hybride $H(s)$ figure (II.3).



où $V1, V2 > 0$

Figure II.3 : Quadripôle schématisant le bloc de communication [32].

La référence est choisie de façon à ce que les vitesses rentrantes dans le quadripôle soient positives. La matrice hybride de ce système est définie par [31] :

$$\begin{bmatrix} F_1(s) \\ V_2(s) \end{bmatrix} = H(s) \begin{bmatrix} V_1(s) \\ F_2(s) \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

Où s est la variable de Laplace.

Une condition nécessaire et suffisante pour la stabilité est extrêmement difficile à obtenir puisque le système est multi-variables (plusieurs entrées, plusieurs sorties). Cependant, une condition suffisante pour la stabilité basée sur la passivité est bien adaptée à cette application [31].

Cette méthode permet en plus de s'affranchir des contraintes imposées par les impédances de l'opérateur et de l'environnement éloigné, et ainsi de garder le système stable quels que soient ces deux derniers facteurs. On définit les vecteurs suivants : $F(t)=[F_1 \ F_2]^T$ et $V(t)=[V_1 \ -V_2]^T$ qui sont des fonctions du temps de carré sommable (T dénote la transposition). Alors le système est passif si on a :

$$\int_0^t F^T(t)V(t)dt = -S_0 \quad t > 0 \quad (\text{II.17})$$

Où S_0 est un nombre fixé souvent associé avec une énergie initiale stockée à $t = 0$.

Si le système est initialement relaxé, c'est-à-dire si les sources du système sont 0 à $t = 0$, et aucune des inerties n'a de vitesse initiale, alors $S_0 = 0$. Et lorsque l'inégalité devient une égalité, le système est dite non dissipatif où sans pertes. Plus concrètement, on voit que $F^T V$ représente une puissance et que son intégration représente une énergie. Le système est passif si l'énergie qu'il voit rentrer est plus importante que celle qu'il fournit à l'extérieur [32]. On comprend ainsi qu'un système passif est nécessairement stable.

A partir de la matrice hybride du système on peut déterminer si celui-ci est passif ou non, on définit $S(s)$ matrice de dispersion du système définie par l'expression suivante [36, 37] :

$$F(s) - V(s) = S(s)(F(s) + V(s)) \quad (\text{II.18})$$

Ce qui entraîne d'après (II.16) et (II.18) :

$$S(s) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} (H(s)-1)(H(s)+1)^{-1} \quad (\text{II.19})$$

On définit également :

$$\|S\| = \sup_{\substack{x \in L_2^n(\mathbb{R}^+) \\ \|x\| \neq 0}} \left(\frac{\|Sx\|_2}{\|x\|_2} \right) \quad (\text{II.20})$$

Où $L_2^n(\mathbb{R}^+)$ est l'ensemble des fonctions de carré sommable défini par :

$$\|f(t)\|_2 = \int_0^\infty \|f(t)\|^2 dt < \infty \quad \text{si } f \in L_2^n(\mathbb{R}^+) \quad (\text{II.21})$$

Théorème :

Un système est passif (ne produit pas d'énergie autre que de dissipation) [36, 37], quelles que soient ses entrées F et V et seulement si : $\|S\| = I$.

II.3.2/ Passivité d'un système transparent, en présence de retards :

En présence du retard T la transparence est caractérisée par les relations suivantes dans le domaine temporel [35]:

$$F_1(t) = F_2(t-T) \quad (\text{II.22})$$

$$V_2(t) = V_1(t-T) \quad (\text{II.23})$$

Dans ce cas la matrice hybride s'écrit :

$$H(s) = \begin{bmatrix} 0 & e^{-sT} \\ e^{-sT} & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.24})$$

On en déduit la norme de la matrice de dispersion : $\|S\| > I$

Le système est non passif ce qui est source d'instabilités.

II.4/ Exemple de deux méthodes de transfert des données :

II.4.1 Architecture favorisant la transparence : modèle de Lawrence :

II.4.1.1 Principe :

Afin de réaliser des tests de stabilité et de transparence sur notre plate-forme de téléopération nous basons sur l'architecture à 4 canaux proposée par Lawrence. Le schéma de fonctionnement est présenté sur la figure (II.4).

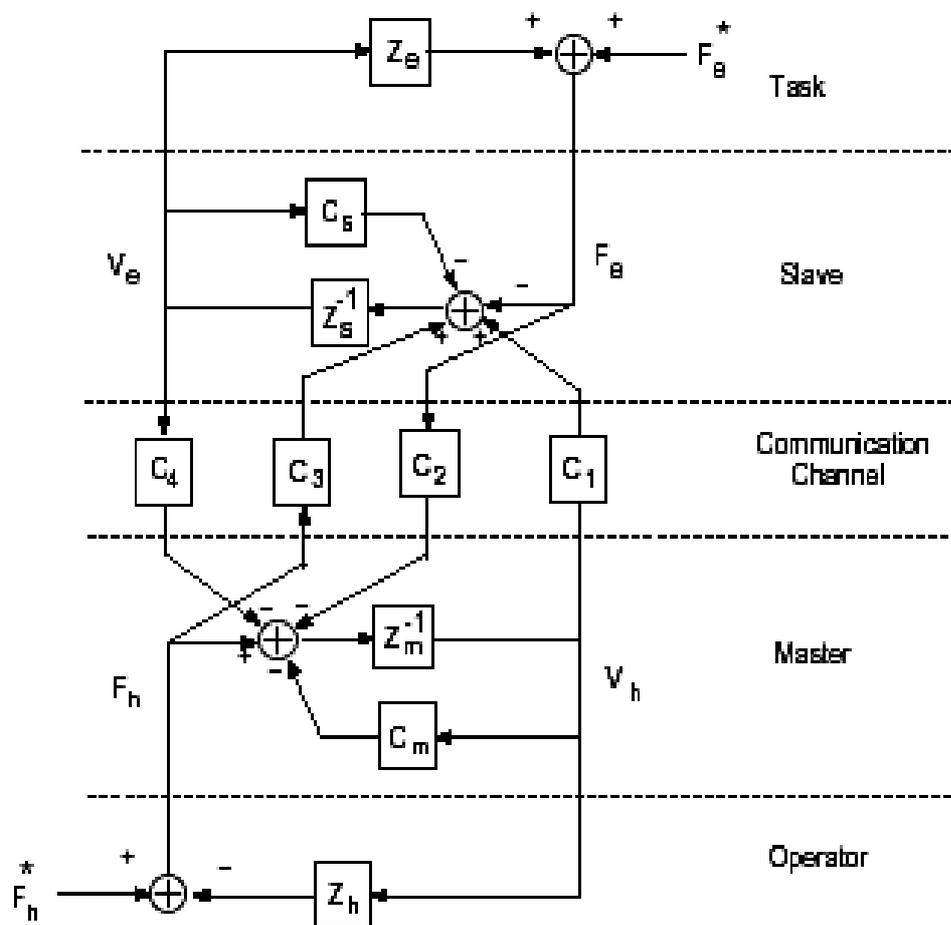


Figure II.4 : Structure générale de téléopération bilatérale

d'après le formalisme de Lawrence [1].

La description des paramètres est la suivante :

Z_s : impédance du bras esclave

$Z_s = M_s s$: représente le modèle dynamique de l'esclave

Z_m : impédance du bras maître

$Z_m = M_m s$: représente le modèle dynamique du maître

C_s : contrôleur côté esclave $C_s = B_s + K_s s$ (correcteur PI)

C_m : contrôleur côté maître $C_m = B_m + K_m s$ (correcteur PI)

C_i ($i = 1.. 4$) : canaux de communication.

Z_h : est l'impédance de la main de l'opérateur humain (indépendante de l'architecture de contrôle).

Z_e : est l'impédance de l'environnement éloigné (indépendante de l'architecture de contrôle).

F_h^* : est la force que développe l'opérateur, elle modélise la force volontairement créée par la main de l'opérateur.

F_e^* : est une force de perturbation provenant de l'environnement.

V_h : vitesse de la main de l'opérateur, qui est aussi la vitesse du bras maître.

V_e : vitesse de l'esclave.

F_h : force totale exercée par l'opérateur sur le bras maître.

On a $F_h = F_h^* - Z_h V_h$, où $Z_h V_h$ est la force en retour ressentie par l'opérateur humain.

F_e : est la force qu'exerce l'environnement sur le bras esclave.

De même on a $F_e = F_e^* + Z_e V_e$, la plupart du temps on considère un environnement passif, donc $F_e^* = 0$ et $F_e = Z_e V_e$.

II.4.1.2 La transparence parfaite :

Les équations dynamiques d'un tel système sont les suivantes [37] :

$$(Z_m + C_m)Vh = F_h - C_4V_e - C_2F_e \quad (\text{II.25})$$

$$(Z_s + C_s)V_e = -F_e + C_1V_h + C_3F_h \quad (\text{II.26})$$

Le système de téléopération est caractérisé par sa matrice hybride $H(s)$:

$$\begin{bmatrix} F_h \\ -V_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_h \\ F_e \end{bmatrix} \quad (\text{II.27})$$

Les conditions de transparence parfaite sont :

$$V_h = V_e \Rightarrow h_{21} = -I, h_{22} = 0$$

$$Z_{th} = Z_{te} \Rightarrow h_{11} = 0, h_{12} = I$$

On détermine les coefficients h_{ij} d'après l'architecture de Lawrence figure (II.3), on trouve:

$$h_{11} = Z_m + C_m + C_4 D^{-1} (C_1 + C_3 (Z_m + C_m)) \quad (\text{II.28})$$

$$h_{12} = C_2 + C_4 D^{-1} (C_3 C_2 - I) \quad (\text{II.29})$$

$$h_{21} = -D^{-1} (C_1 + C_3 (Z_m + C_m)) \quad (\text{II.30})$$

$$h_{22} = D^{-1} (I - C_3 C_2) \quad (\text{II.31})$$

$$\text{Où } D = Z_s + C_s - C_3 C_4 \quad (\text{II.32})$$

On obtient finalement les quatre conditions suivantes pour la transparence parfaite dans le cas du formalisme de Lawrence :

$$C_1 = Z_s + C_s \quad (\text{II.33})$$

$$C_2 = I \quad (\text{II.34})$$

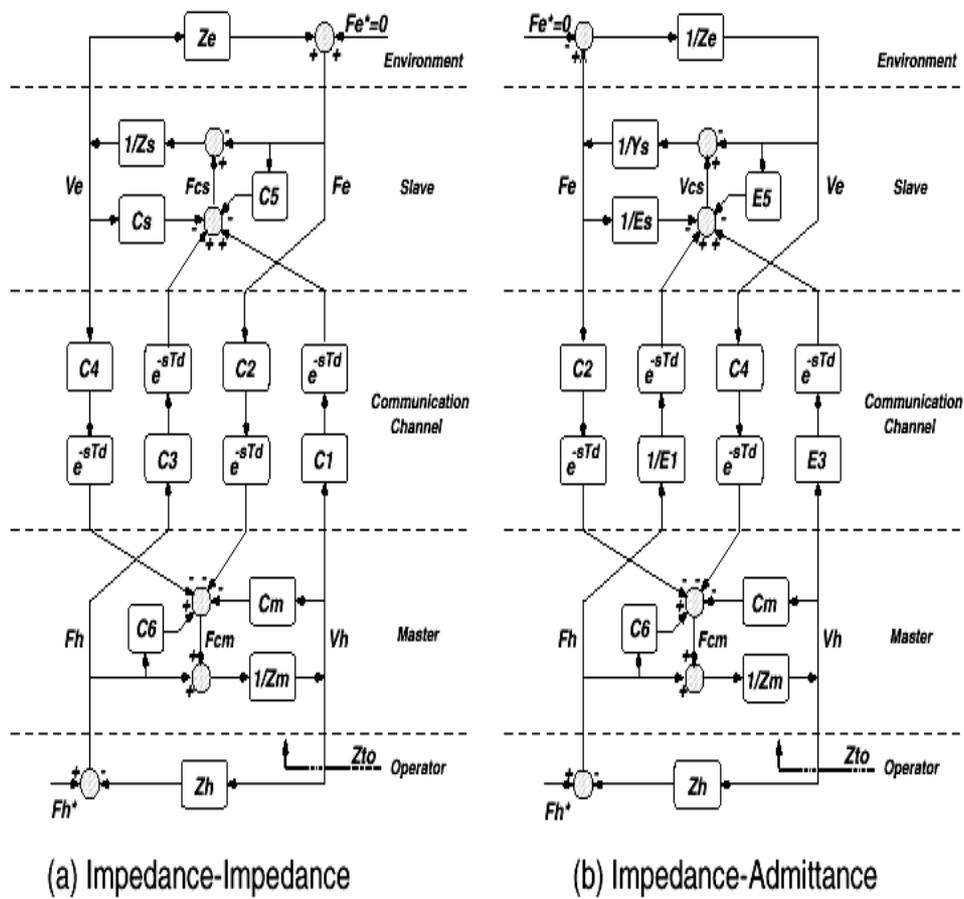
$$C_3 = I \quad (\text{II.35})$$

$$C_4 = - (Z_m + C_m) \quad (\text{II.36})$$

Chaque canal se voit imposer une condition pour assurer la transparence parfaite, d'où la nécessité d'utiliser quatre canaux de communication. Différentes variantes à cette structure peuvent être utilisées pour renforcer la stabilité [1], [6].

Les systèmes de téléopération sont basés sur quatre architectures des contrôleurs à quatre canaux bilatéraux, qui sont [36, 37] :

- ✚ Impédance- Impédance.
- ✚ Impédance- Admittance.
- ✚ Admittance- Impédance.
- ✚ Admittance- Admittance.



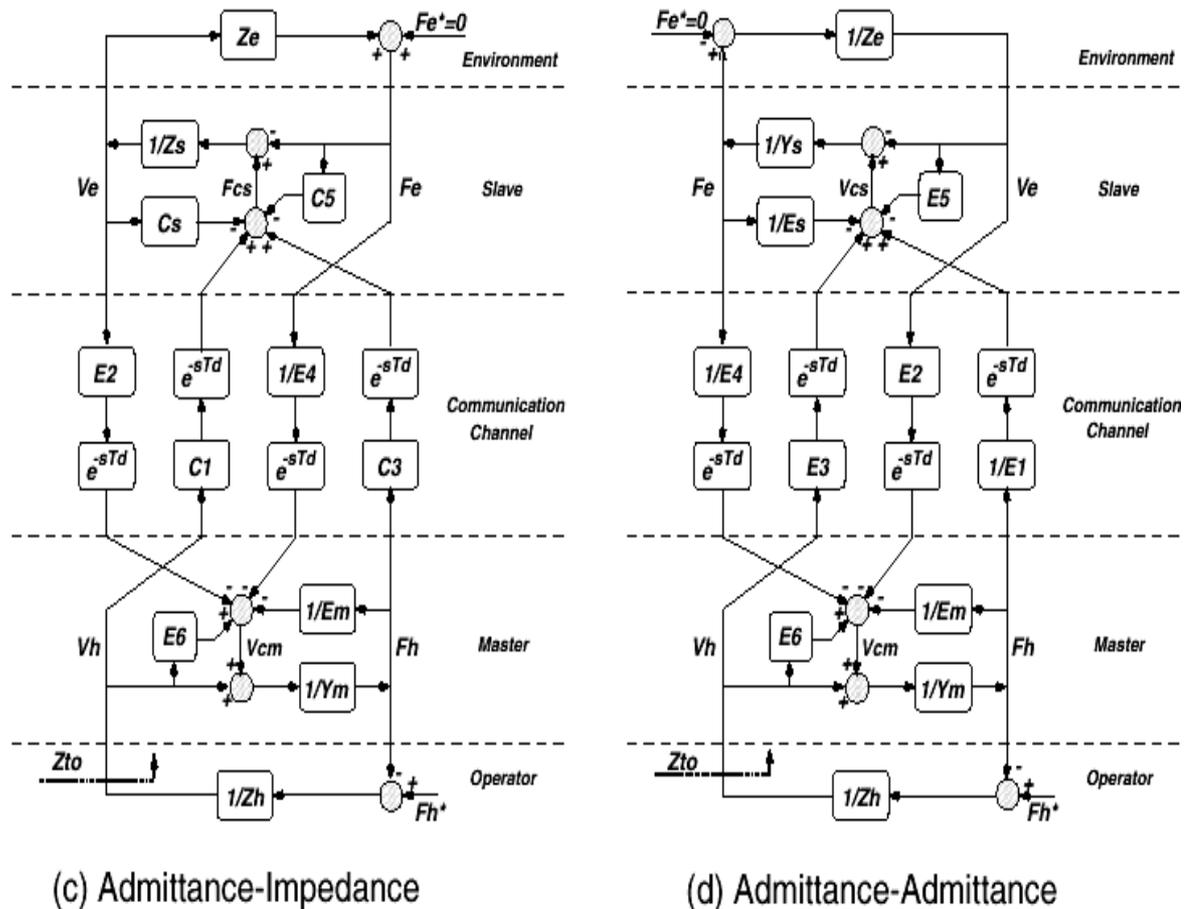


Figure II.5 : Le diagramme de quatre types du bloc pour les systèmes de téléopération contrôler par des contrôleurs à quatre canaux bilatéraux.

Pour plus de détails concernant les architectures de commande, voir l'annexe A.

II.4.2 Méthode favorisant la passivité :

Utilisation des grandeurs d'onde d'après Slotine :

Les variables d'ondes présentent une modification ou une extension de la théorie de passivité qui crée une fermeté de (robusticité) aux temps de retards arbitraires. Basées seulement sur le concept de la puissance et l'énergie, elles sont applicables aux systèmes non linéaires et peuvent maintenir des modèles inconnus et des grandes incertitudes.

Comme elles sont bien adoptées pour l'interaction avec les environnements physiques réels et la téléopération.

Pour parvenir à ses buts les variables d'ondes fournissent une autre information en codant les schémas aux variables de puissance standard. Les informations requises sont extrêmement simples et préservent toutes les informations.

II.4.2.1 Définition :

De façon générale, on définit les variables d'ondes la en considérant le plan de référence à la sortie du quadripôle représentant le poste maître figure (II.6).

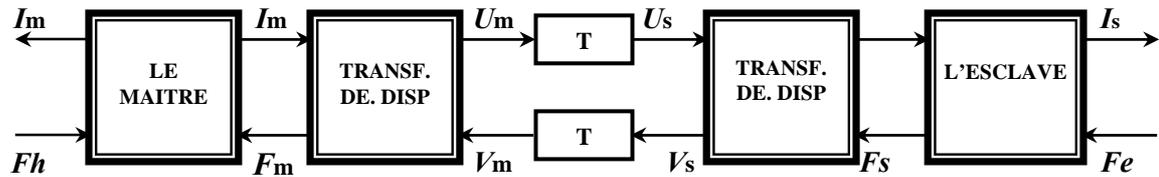


Figure II.6 : la transformation de scattering pour la téléopération avec temps de retard

Tous les concepts des variables d'ondes sont basés sur la structure de la passivité et en particulier ont été motivés par les opérateurs de dispersion [6]. La définition de la puissance est donnée par

$$P = \dot{X}^T F = \frac{1}{2} U^T U - \frac{1}{2} V^T V \quad (\text{II.37})$$

Noter la force F et la vitesse \dot{x} , les variables peuvent être remplacées par d'autres paramètres qui sont l'effort et le flux. Cependant, notre application est mécanique en nature alors nous continuons à utiliser cette notation mécanique. En accord avec que $\frac{1}{2} U^T U$ caractérise la puissance flux (circulante) tout le long de la direction principale qui ramène à une valeur positive pour P . D'autre part $\frac{1}{2} V^T V$ caractérise la puissance circulaire contre la direction principale et introduit un élément négatif dans P . Dans ce sens, nous définissons U pour l'onde en avant allant vers la droite au moment où V note l'onde allant vers la gauche.

Les variables d'onde (U, V) peuvent être calculées à partir des variables de puissance standards (X, F) par la transformation suivante [32, 6] :

Onde transmise :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{pour le maitre} : U_m = \frac{b \dot{X}_m + F_m}{\sqrt{2b}} \\ \text{pour l' esclave} : U_s = \frac{b \dot{X}_s + F_s}{\sqrt{2b}} \end{array} \right. \quad (\text{II.38})$$

Onde reçue :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{pour le maitre} : V_m = \frac{b \dot{X}_m - F_m}{\sqrt{2b}} \\ \text{pour l' esclave} : V_s = \frac{b \dot{X}_s - F_s}{\sqrt{2b}} \end{array} \right. \quad (\text{III.29})$$

Où b est l'impédance d'onde caractéristique, et peut être une constante positive ou une matrice définie positive et symétrique...

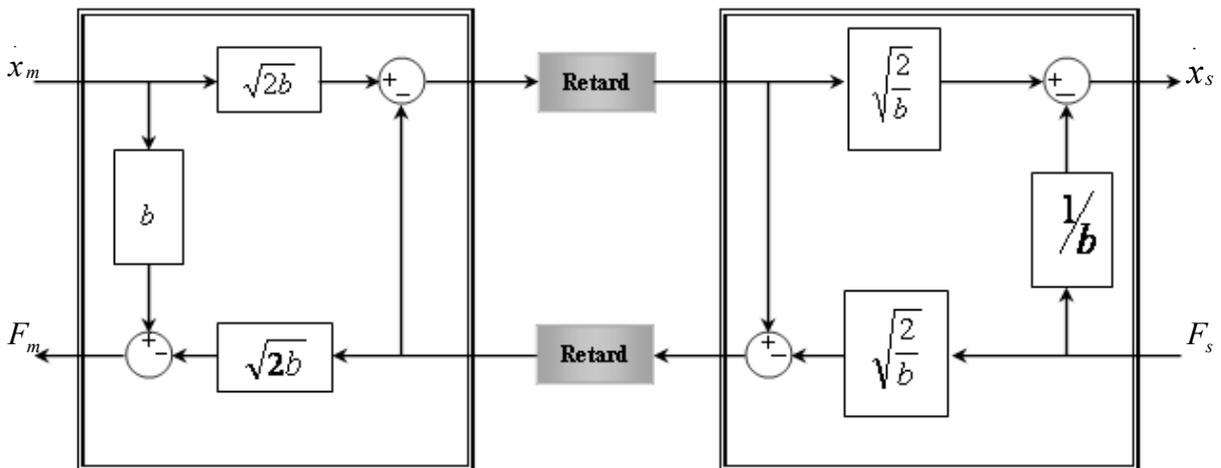


Figure II.7 : la transformation bilatéral de variable d'onde d'un système à s d.d.l.

Cette transformation est bijective, c'est-à-dire un à un, alors ceci est toujours unique et réversible aucune information n'est perdue où gagnée par le codage des variables par cette façons. Nous pouvons donc calculer les variables de puissance comme suit :

$$b \dot{X} = \sqrt{\frac{b}{2}}(U + V) \quad F = \sqrt{\frac{b}{2}}(U - V) \quad (\text{II.40})$$

Finalement la transformation de l'onde peut être utilisée pour déterminer n'importe quelle variable de puissance et d'onde. Ceci dit, chaque deux des quatre variables peuvent être choisies comme entrée ou sortie.

Par exemple, considérons la vitesse \dot{X} et l'onde allant à gauche V comme entrées. La transformation appropriée déterminera alors la force F et l'onde allant à droite U .

$$F = b \dot{X} \sqrt{2b} V \quad U = -V + \sqrt{2b} \dot{X} \quad (\text{II.41})$$

II.4.2.2 Condition pour la passivité:

Une des principales raisons pour traiter les variables d'ondes est leur effet sur la condition pour la passivité. Nous savons qu'un système est passif s'il ne peut pas produire de l'énergie. Nous ré-exprimons maintenant cette condition dans le domaine des variables d'ondes. Dans le domaine de puissance la passivité est alors testée par la condition [32, 6] :

$$\int_0^t P_{in} d\tau = \int_0^t \dot{X}^T F d\tau = E_{store}(t) - E_{store}(0) + \int_0^t P_{diss} d\tau \quad (\text{II.42})$$

Où l'énergie emmagasinée $E_{store}(t)$, l'énergie emmagasinée initiale $E_{store}(0)$, et la puissance de dissipation $P_{diss}(t)$ doivent tous être non négatifs. En remplaçant le flux de puissance redéfini (II.37), qui formait les bases pour les définitions d'onde, nous trouvons :

$$\int_0^t P_{in} d\tau = \int_0^t \frac{1}{2} U^T U - \frac{1}{2} V^T V d\tau \quad (\text{II.43})$$

Cela nous amène à la condition de passivité dans le domaine d'onde :

$$\int_0^t \frac{1}{2} V^T V d\tau = \int_0^t \frac{1}{2} U^T U d\tau - E_{store}(t) + E_{store}(0) - \int_0^t P_{diss} d\tau \quad \forall t \geq 0 \quad (\text{II.44})$$

Ou dans la forme simplifiée :

$$\int_0^t \frac{1}{2} V^T V d\tau \leq \int_0^t \frac{1}{2} U^T U d\tau + E_{store}(0) \quad \forall t \geq 0 \quad (\text{II.45})$$

Logiquement nous trouvons qu'un système peut être passif si l'énergie dans l'onde sortante (dans ce cas V) est limitée à l'énergie donnée par l'onde entrante (dans ce cas U) emmagasinée initialement. L'interaction devrait survenir sur la cote droite, l'onde allant vers la droite doit assumer le rôle de sortie, au moment où l'onde allant vers la gauche donne les entrées.

Dans ce cas, leurs rôles respectifs dans la condition (II.45) sont aussi inversés, alors l'onde de sortie reste limitée. Plus important, la nouvelle condition élimine la dépendance multiplicative des variables de puissance vus dans (II.42). Dans l'ancienne forme, la passivité dépend sur le produit des deux variables. Si la variable de sortie est retardée, l'effet sur le résultat et la passivité est imprédictible. Dans la nouvelle forme, cependant, la passivité compare seulement les amplitudes intégrées.

Si la variable de sortie est retardée, sa puissance est temporairement emmagasinée sans le changement de la passivité.

Par exemple, considérons un retard simple. $V(t) = U(t - T)$, la condition de passivité (II.45)

devient :

$$\int_0^t \frac{1}{2} U^T U d\tau \geq 0$$

Qui est clairement satisfaite. Noté que l'énergie emmagasinée initialement : $E(0)$, est zéro (acceptons, que $U \equiv 0$ pour tout $t < 0$).

A partir de (II.44) nous trouvons aussi que l'énergie emmagasinée est donnée comme :

$$E_{store}(t) = \int_{t-T}^t \frac{1}{2} U^T U d\tau$$

Qui véritablement garde la puissance de l'entrée pour la durée du retard, et la dissipation d'énergie est 0, faisant du retard sans pertes. Alors tous les systèmes, qui étaient passifs dans la notation des variables d'ondes, resteront passifs après transformation en des variables d'ondes. Mais aussi, les temps de retard sont maintenant aussi des éléments passifs. Alors le système exprimé dans des variables d'ondes, devient complètement robuste aux retards de valeur quelconque.

Finalement, nous voyons qu'une simple liaison des éléments de base de l'onde passive reste passive. L'intérêt principal de coder les informations au format de variables d'onde pour la transmission, réside dans le fait qu'elles permettent de contrôler et de gérer l'évolution de l'énergie du système.

II.5:Prédicteur de Smith :

Le Predicteur de Smith est un outil de régulation pour les systèmes asymptotiquement stables en boucle ouverte retardés mono- variables [38]. Des généralisations aux cas multi- variables et pour les systèmes instables sont possibles mais alors il n'est plus possible de réaliser le bouclage avec un transfert rationnel. On utilise alors des bouclages à retard répartis faisant apparaître des fractions rationnelles en s et $e^{-\Delta s}$ nous ne présentons ici que la version historique publiée par smith.

Dans ce contexte ; un retard sur l'entrée ou la sortie est équivalent. En effet les formes, d'état suivantes possèdent la même fonction de transfert :

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t - \Delta), y(t) = Cx(t)$$

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), y(t) = Cx(t - \Delta)$$

Où $x \in R^n, u \in R$ et $y \in R$. Cette fonction de transfert est un produit d'une fonction rationnelle propre et d'un opérateur à retard :

$$G(s) \equiv G_0(s)e^{-\Delta s} = C(sI - A)^{-1} B e^{-\Delta s}$$

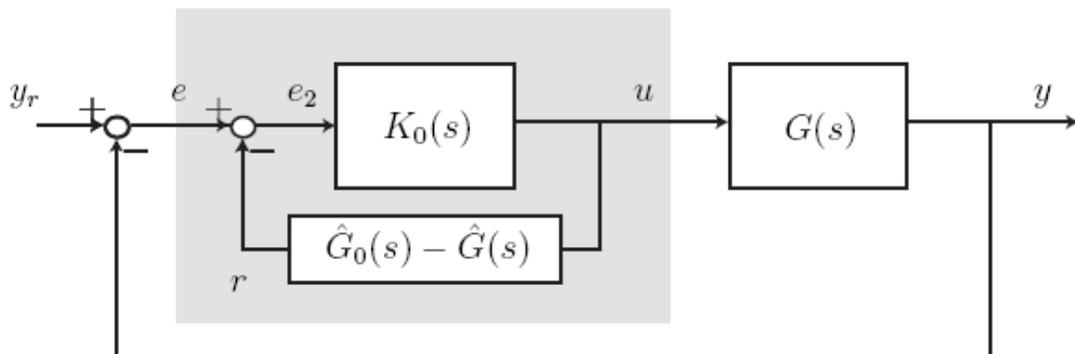


Figure II.8 : Le predicteur de Smith (zone grisée).

K_0 conçu pour le système sans retard $G_0(s)$ en l'insérant dans le schéma général de la Figure (II.8) Les blocs additionnels \hat{G}_0 et $\hat{G}(s)$ représentent la connaissance du système. Idéalement, on a $\hat{G}_0 = G_0$ et $\hat{G} = G$. On suppose donc le transfert G_0 stable.

C'est sous cette hypothèse qu'on comprend le fonctionnement du prédicteur de Smith. Grâce à la boucle interne au prédicteur (dans la zone grisée de la Figure (II.8)), le signal entrant dans le contrôleur K_0 est

$$e_2 = y_r - G(s)u - (G_0(s) - G(s))u = y_r - G_0(s)u$$

Ce terme est la différence entre la référence et la prédiction de la valeur de sortie du système à l'horizon Δ .

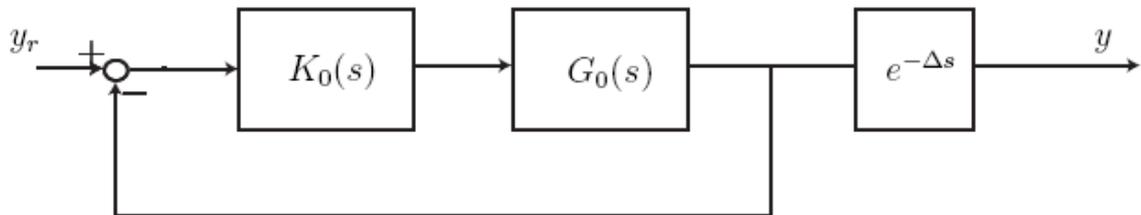


Figure II.9 : Forme équivalente du système bouclé avec prédicteur de Smith.

Le comportement entrée-sortie du système bouclé par le prédicteur de Smith est équivalent à celui du système donné sur la Figure (II.9). Artificiellement, on a réussi à intercepter le signal de mesure avant le bloc retard et donc à nous ramener à un problème de régulation d'un système sans retard. On notera toutefois que le retard est toujours présent sur la sortie. Il n'a pas disparu du problème mais il n'interfère pas avec la régulation [39].

En pratique, le prédicteur de Smith souffre d'un manque de robustesse par rapport à une incertitude sur le retard, alors que la robustesse par rapport aux paramètres est moins problématique. Dans ce cas, \hat{G} et G sont différents, de même que \hat{G}_0 et G_0 . Il ne suffit pas toujours de calculer un contrôleur K_0 procurant de bonnes marges de stabilité au système G_0 bouclé. Certaines conditions suffisantes de robustesse sont exposées dans [38] ; elles portent sur le choix du contrôleur K_0 mais sont difficiles à mettre en oeuvre. Il est

indispensable de l'utiliser dans la configuration proposée sur la Figure (II.10). On a rajouté dans la boucle externe un filtre "de robustesse" qu'on peut ajuster pour dégrader les performances mais assurer une stabilité en boucle fermée en dépit d'une incertitude sur le retard. Lorsque ce filtre $F(s)$ vaut 1 on retrouve le prédicteur de Smith des Figures (II.8 et II.9).

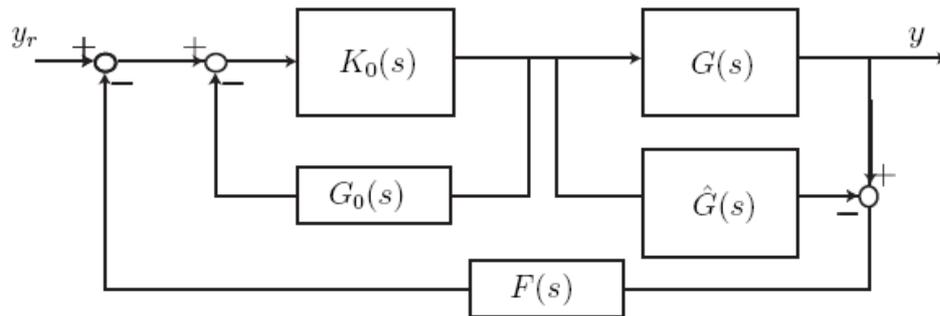


Figure II.10 : Implémentation du prédicteur de Smith avec filtre additionnel de robustesse.

II.6/ Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté la technique des variables d'onde et les différentes architectures à quatre canaux du système de téléopération, et on a donné un aperçu sur les théories de téléprésence et de la passivité, qui sont les éléments les plus intéressants dans le domaine de téléopération. Des études récemment publiées ont montré que la théorie de stabilité par la passivité est le meilleur moyen de mettre le système en état stable ou passif. Ainsi la technique des variables d'onde reste la plus adoptée pour l'interaction avec les environnements physiques réels de la téléopération.

CHAPITRE III:

COMMANDE DU SYSTEME DE TELEOPERATION

III-1/ Introduction :

Un dispositif de téléopération est un système électromécanique utilisé pour effectuer une tâche à distance. Il se compose d'un dispositif maître manipulé par l'utilisateur et d'un dispositif esclave situé au niveau de l'environnement distant et censé reproduire la tâche imposée par le maître. Pour limiter la perte de perception liée à l'éloignement de l'opérateur par rapport à la tâche à effectuer, l'idéal veut que le système de téléopération se comporte comme un prolongement de la main de l'utilisateur, c'est-à-dire que le dispositif soit transparent. Cela implique la mise en œuvre d'un retour d'effort pour permettre à l'utilisateur de ressentir les changements de raideur de l'environnement exploré. Pour assurer la stabilité quelle que soit l'environnement, une technique consiste à dimensionner les régulateurs de manière telle que le système soit passif (la quantité d'énergie absorbée par le système est supérieure à la quantité d'énergie émise) quel que soit l'environnement rencontré. L'inconvénient de cette approche est une forte détérioration de la transparence.

Ce chapitre est consacré à la commande d'un bras manipulateur à distance en présence d'un retard de temps constant avec retour de force dans un environnement connu, en utilisant les Concepts de passivité et de transparence, en ce basant sur la technique des grandeurs d'ondes préconisé par Slotine, et enfin la présentation et l'interprétation des résultats obtenus.

III-2/La structure du système de téléopération bilatérale :

Un système de téléopération bilatérale est un système qui permet de réaliser une tâche à distance.



Généralement composé de trois blocs principaux qui sont :

- **Le site maître :** ce bloc consiste à un opérateur humain et un contrôleur maître, l'opérateur humain celui qui manipule la manette pour mettre en marche à distance la tâche que fait l'esclave, et c'est lui qui donne la vitesse et la position V_h désiré à l'esclave. La force de l'opérateur F_h est supposée constante.
- **Le site esclave :** ce bloc consiste à un contrôleur esclave et un bras manipulateur qui contacte un environnement aléatoire (libre, soft ou hard), le contrôleur esclave permet de transférer les données de maître vers le bras manipulateur, et aussi la force de retour F_e de l'environnement vers le site maître.
- **Le canal de communication :** c'est le canal de communication entre les deux sites, dans notre cas c'est le réseaux internet. Le temps de communication est supposé constante, on suppose aussi que le retard d'allure est égal à retard de retour. Notre simulation est effectuée avec différents retards de temps (0.1s, 0.2s, 0.5s, 1s).



Figure III.1 : Schéma présente les différents blocs du système de téléopération complète.

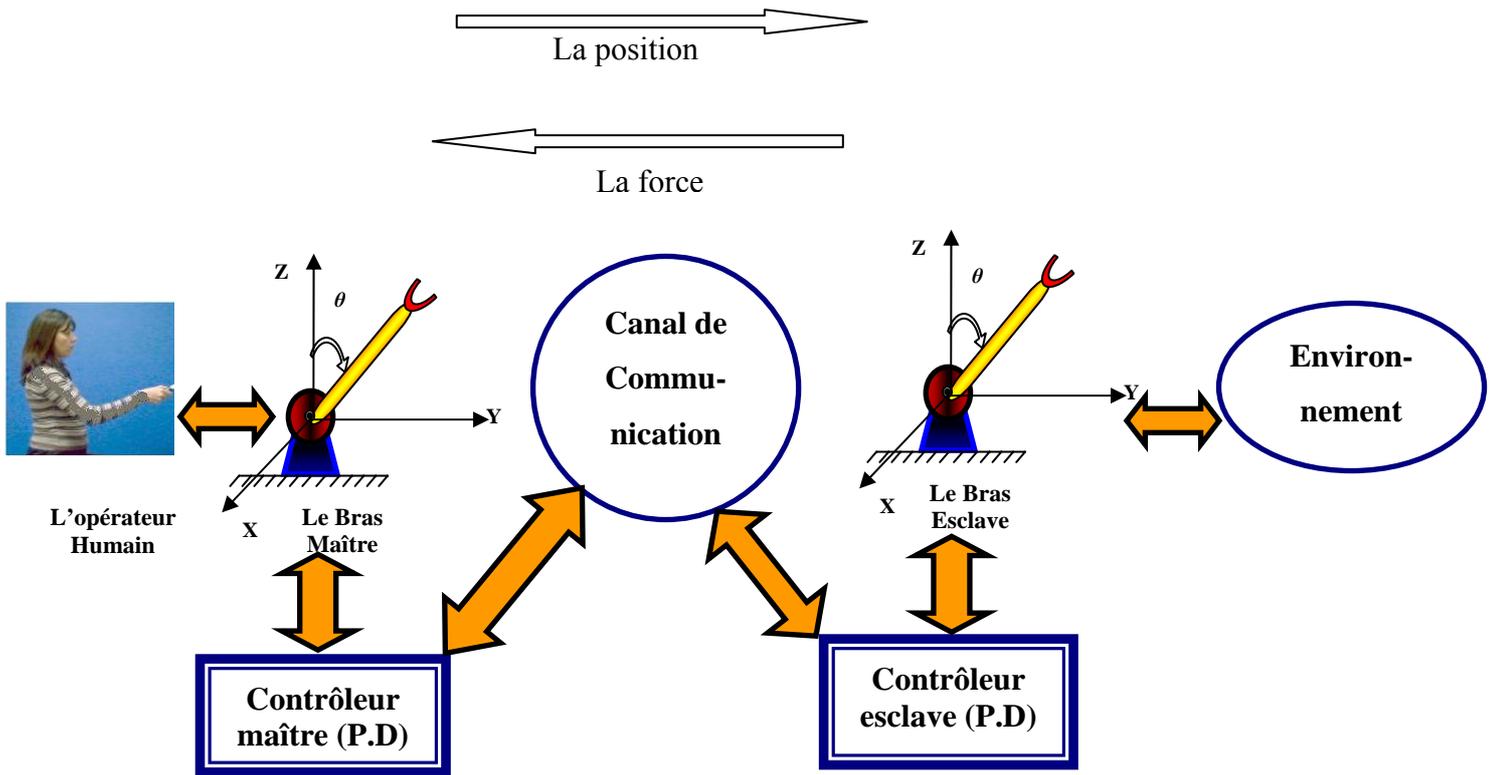


Figure III.2 : Le système de téléopération complète

III-3 / La modélisation du système :

Le système modélisé est à un seul degré de liberté, nous appelons le système total comprenant le bras maître, le bras esclave, et leurs arrangements de commande en tant que système maître-esclave.

Le bras maître et le bras esclave sont identiques, ce implique que leurs impédances sont égales. Les impédances du bras maître et le bras esclave sont (voir l'annexe B) :

$$\frac{\dot{x}(s)}{F(s)} = Z_m^{-1} = Z_m^{-1} = \frac{s}{\frac{mL^2}{3}s^2 + g\frac{mL}{2}}$$

Où s dénote l'opérateur de Laplace.

L'application numérique donne:

$$\frac{\dot{x}(s)}{F(s)} = \frac{s}{0.7s^2 + 50}$$

Les caractéristiques dynamiques des bras maître et esclave, de l'opérateur et de l'environnement sont représentées respectivement par les impédances Z_m , Z_s , Z_h , and Z_e .

III-4/ La commande du système :

Pour déterminer la commande du système, on note que la passivité n'est pas seulement suffisante mais nécessaire pour la stabilité, si nous mettons tous les blocs du système passive. Alors sans aucune connaissance de l'environnement, et sans vouloir remettre toute restriction à cet égard, il paraît tout naturellement d'exiger la passivité de notre système.

III-4.1/ La commande du système sans temps de retard :

Nous sommes utilisée la commande classique par P.D pour le bras manipulateurs, les paramètres de correcteur P.D calculer par la méthode de Ziegler-Nichols.

Le comportement désiré pour le bloc de communication est donné par les équations :

$$\begin{cases} F_{md} = F_e \\ \dot{x}_{sd} = \dot{x}_m \end{cases}$$

C'est le cas de l'absence de temps de retard.

Où :

F_{md} : la force de retour désiré de l'esclave vers le maître.

F_e : la force de l'environnement.

\dot{x}_{sd} : la vitesse désirée de l'esclave.

\dot{x}_m : la vitesse du maître.

Le système est passif puisque le temps de retard sera nul, et transparent à cause de l'identité du bras maître et le bras esclave. Le système devient comme le montre dans la figure ci-dessous, où C_m , C_s sont respectivement les contrôleurs P.D. du maître et d'esclave; Z_h , Z_e sont respectivement les impédances de l'opérateur humain et de l'environnement.

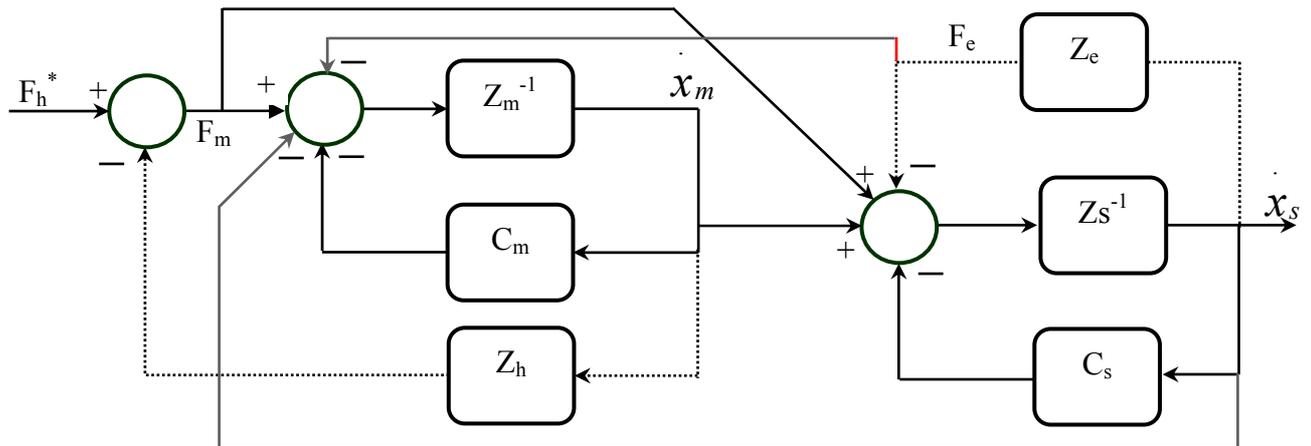


Figure III.3: Système maître-esclave avec retour d'effort sans retard de temps de communication (Système Désiré)

- **L'impédance de l'opérateur humain :**

L'impédance de transparence Z_t est donnée par la formule suivante :

$$Z_t = \frac{F_h}{V_h}$$

La différence entre l'impédance Z_t et l'impédance Z_e est interprétée comme mesure de transparence. Dans le cas de système sans temps de retard, la transparence est achevée si : $Z_t = Z_e + Z_m$ pour n'importe quelle valeur de Z_e .

- **L'impédance de l'environnement :**

Le bras manipulateur de l'esclave interagit avec un environnement aléatoire, il peut trouver un obstacle soft, hard ou se déplace librement dans l'environnement. On constate trois situations du bras dans l'environnement qui sont :

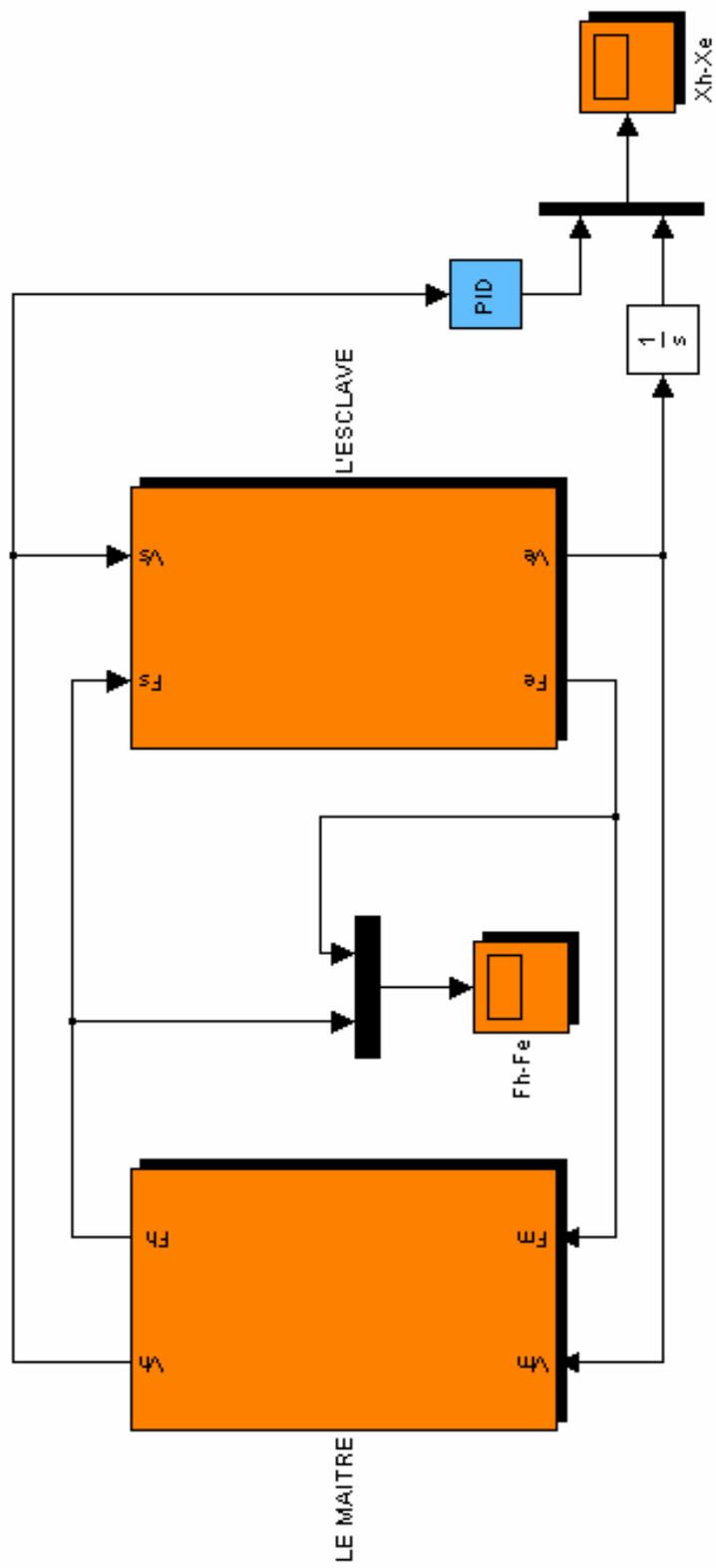
1. **mouvement libre :** la force d'environnement est égale à zéro F_e .
2. **contact soft:** la force d'environnement F_e est inférieure à la force d'esclave, dans notre travail on a supposé que la force d'environnement est égale à la moitié de la force d'esclave.
3. **contact hard:** la force d'environnement F_e supérieur à la force d'esclave, dans notre travail on a supposé que la force d'environnement prend la valeur double de la force d'esclave.

L'impédance de point final du système est l'impédance vue par le côté de l'esclave. Cette impédance peut être donnée par la formule suivante :

$$Z_{end} = -\frac{F_e}{V_e} = Z_h$$

Il est intéressant de noter que cette impédance désirée doit être égale à celle de la main humaine.

Dans la commande robotique par impédance, le but est de créer une impédance désirée à l'extrémité d'un bras manipulateur ; mais en pratique cette impédance désirée n'est pas souvent la meilleure pour la tâche de ce manipulateur. L'expérience a montré que la main humaine offre des impédances ajustables, idéales lors des tâches de manipulations des différents objets et ceci sans problèmes de stabilité.



III.4.2 / Présentation et interprétation des résultats:

III.4.2.1 / Présentation des résultats:

Les courbes représentant les formes des positions et des forces dans les trois cas de bras pour un système sans temps de retard sont données sur les figures suivantes :

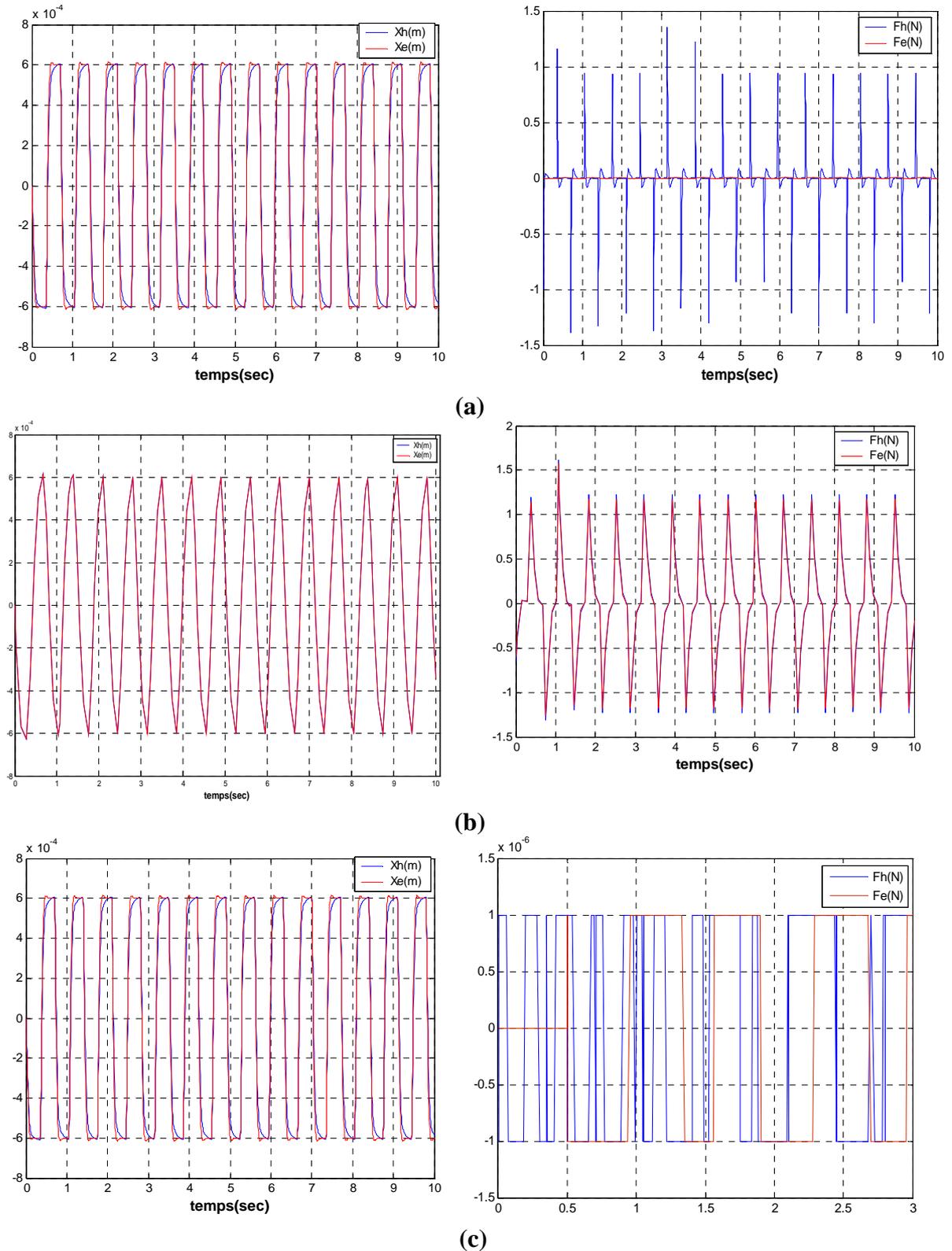


Figure III.6 : Téléopération transparente sans retard : l'esclave on : mouvement libre ; (b) contact soft ; (c) contact hard

III.4.2.2 / Interprétation des résultats:

La figure (III.6) présente le système sans temps de retard, on peut distinguer trois configurations possibles selon que le bras manipulateur est en mouvement libre, ou en contact soft ou en contact hard avec l'environnement dans lequel il se déplace.

- les courbes représentent les positions de l'opérateur humain et celles du bras manipulateur sont confondues dans les deux premiers cas. Car notre système est parfaitement passif et transparent (temps de retard nulle) et presque nulle dans le cas du contact hard. Du fait que le bras maître et esclave sont bloqués à cause de l'obstacle hard de l'environnement.
- Pour les courbes représentent les forces :
 - Dans le cas du mouvement libre de bras manipulateur la force exercée par l'environnement sur le bras est nulle. Puisque le bras ne rencontre aucune résistance lors de son mouvement.
 - Pour le cas du contact soft, les courbes représentent les forces sont confondues.
- Pour le cas du contact hard, les amplitudes des signaux des forces sont presque nulles, du fait que le bras maître et esclave sont bloqués à cause de l'obstacle hard de l'environnement.

III-4.3/ La commande du système avec temps de retard :

Dans le cas de l'existence d'un temps de retard de communication, les équations de bloc de communication deviennent :

$$\begin{cases} F_{md}(t) = F_s(t - T) \\ v_{sd}(t) = v_m(t - T) \end{cases} \quad \text{(III.10)}$$

Ce retard produit la non passivité et l'instabilité du système, la technique de variable d'onde préconisée par Slotine permet de résoudre ce problème en rendant le système passif. Les équations suivantes donnent les paramètres d'ondes en fonctions des paramètres de puissances :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{pour le maitre} : U_m = \frac{b \dot{X}_m + F_m}{\sqrt{2b}} \\ \text{pour l' esclave} : U_s = \frac{b \dot{X}_s + F_s}{\sqrt{2b}} \end{array} \right. \quad (\text{III.11})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{pour le maitre} : V_m = \frac{b \dot{X}_m - F_m}{\sqrt{2b}} \\ \text{pour l' esclave} : V_s = \frac{b \dot{X}_s - F_s}{\sqrt{2b}} \end{array} \right. \quad (\text{III.12})$$

Où b : l'impédance d'onde caractéristique dans notre cas est égale à une constante (puisque notre système est à un seul degré de liberté).

La puissance d'entrée pin d'un système peut être définie comme le produit scalaire des vecteurs d'entrées x avec le vecteur de sortie y . ce type de système est dit passif si et seulement si :

$$\int_0^t P_{in} d\tau = \int_0^t \dot{X} F d\tau = E_{store}(t) - E_{store}(0) + \int_0^t P_{diss} d\tau$$

Où $E(t)$ est l'énergie emmagasinée à l'instant t , et $E(0)$ est l'énergie initiale emmagasinée.

La puissance dans le bloc de communication est donnée par :

$$P_{in}(t) = \dot{x}_{md}(t)F_m(t) - \dot{x}_{sd}(t)F_s(t) \quad (\text{III.13})$$

Dans le cas d'un temps de retard de communication T constant :

$$u_s(t) = u_m(t - T)$$

$$v_m(t) = v_s(t - T)$$

Substituant ces équations dans (III.13), et supposant l'énergie initiale nulle, il a été calculé que l'énergie totale emmagasinée dans les communications durant la transmission du signal entre le maître et esclave est donnée par :

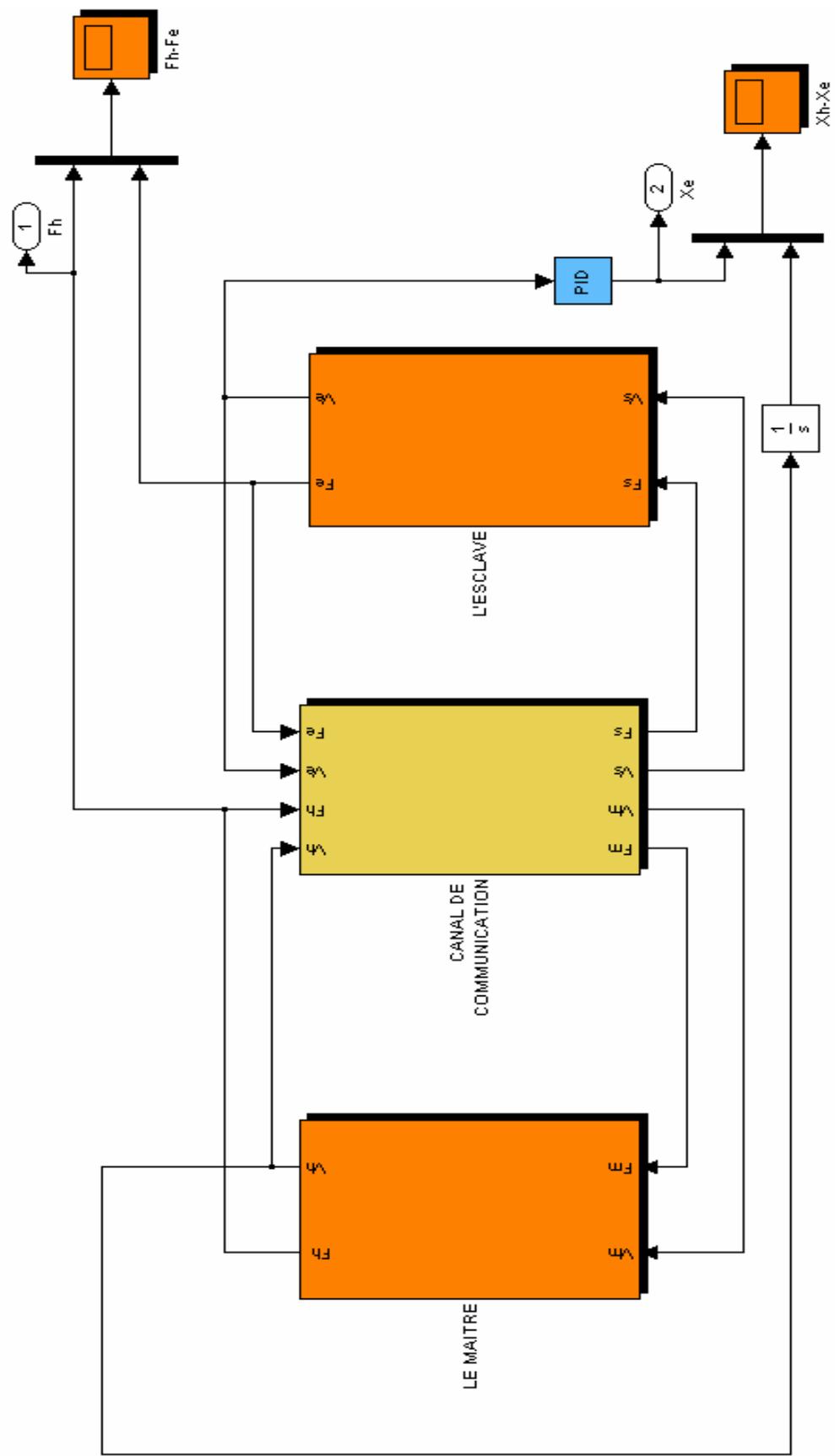
$$\begin{aligned}
 E &= \int_0^t P_{in} d\tau = \int_0^t \left(\dot{x}_{md} F_m(\tau) - \dot{x}_{sd} F_s(\tau) \right) d\tau \\
 &= \frac{1}{2} \int_0^t \left(u_m^T(\tau) u_m(\tau) - v_m^T(\tau) v_m(\tau) + v_s^T(\tau) v_s(\tau) - u_s^T(\tau) u_s(\tau) \right) d\tau \\
 &= \frac{1}{2} \int_{t-T}^t \left(u_m^T(\tau) u_m(\tau) + v_s^T(\tau) v_s(\tau) \right) d\tau \geq 0
 \end{aligned}$$

Ainsi donc, le système est passif indépendamment de l'amplitude du temps de retard T; autrement dit ce temps de retard ne produit pas d'énergie si on utilise la technique des ondes variables.

Par conséquent la stabilité est garantie pour la téléopération avec temps de retard.

Il à noter que, notre simulation est basée sur les hypothèses suivantes :

- Le temps de retard est constant et aussi le même durant l'aller et le retour de l'information. $\tau_{ms} = \tau_{sm} = \tau$.
- $F_h(t)$ est supposée constante.



III.4.4 / Présentation et interprétation des résultats:

III.4.4.1 / Présentation des résultats:

Les courbes représentant les formes des positions et des forces dans les trois cas de bras pour différentes valeurs du temps de retard, sont données sur les Figures III.7, 8, 9, et 10. Le temps de retard dans notre travail est pris constant (entre 0s et 1s), ce temps peut être en milli-second (le cas de l'Internet) en micro-second (le cas d'un système GPRS) ou en quelques seconds (le cas des réseaux classiques). Plus le temps de retard augmente le système perd sa passivité et sa transparence, c'est pourquoi nous avons choisis un temps de retard suffisamment grand pour que notre système garde. Nous n'avons pas pris en considération un réseau spécifié,

TEMPS DE RETARD = 0.1s :

MOUVEMENT LIBRE :

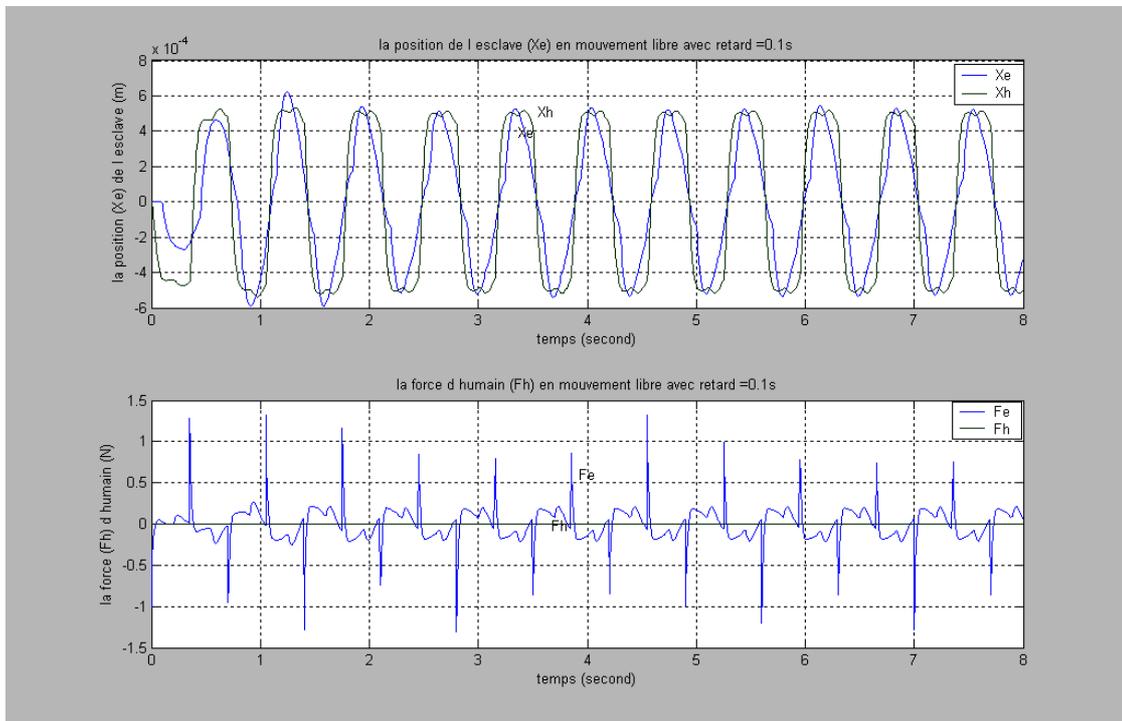


Figure III.7 : Visualisation des positions (X_e , X_h) ainsi les forces (F_h , F_e) en mouvement libre

CONTACT SOFT :

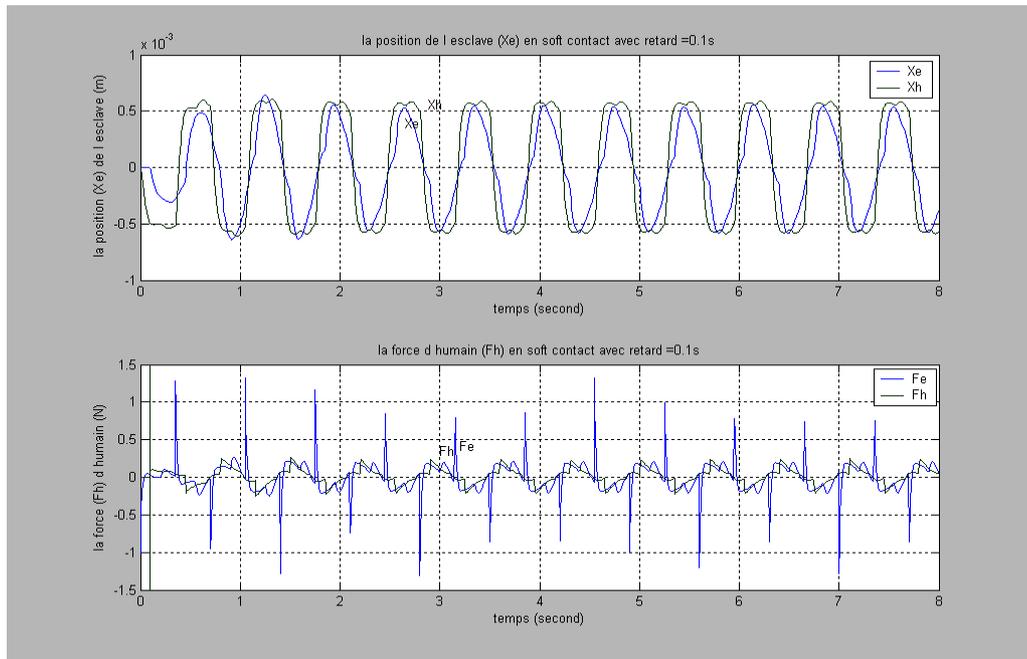


Figure III.8 : Visualisation des positions (X_e , X_h) ainsi les forces (F_h , F_e) en contact soft

CONTACT HARD :

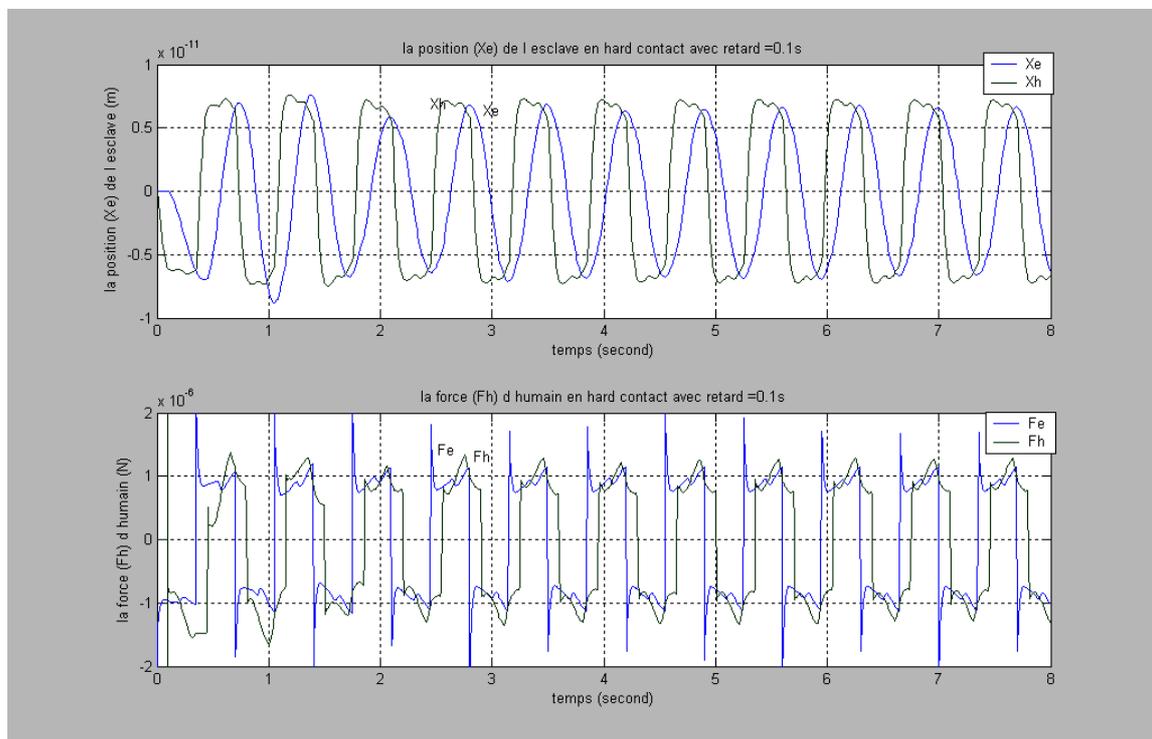


Figure III.9 : Visualisation des positions (X_e , X_h) ainsi les forces (F_h , F_e) en contact hard

Ces figures présentent le système avec temps de retard égale 0.1 s. les résultats sont presque garde les mêmes forme que celles du cas de système sans retard, on a achevé un certain transparence souhaitable.

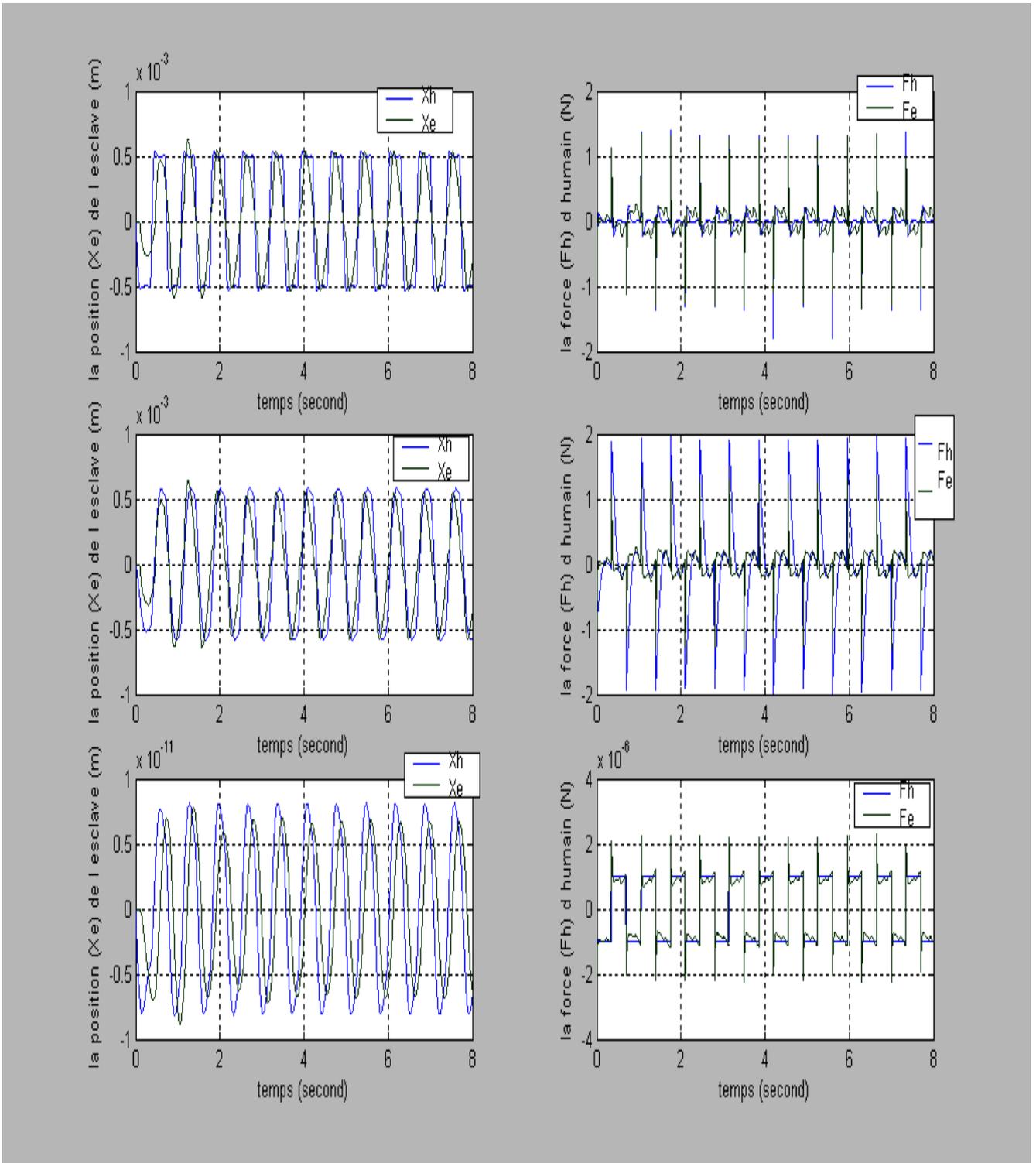


Figure III.10 : Visualisation des positions (X_e , X_h) sans et avec retard (0.1s) ainsi les forces (F_h , F_e) en : mouvement libre ; (b) contact soft ; (c) contact hard

LES COURBES REPRESENTANT LES DIFFERENT RETARD (0.1s ; 0.2s ; 0.5s ; 1s) :

MOUVEMENT LIBRE :

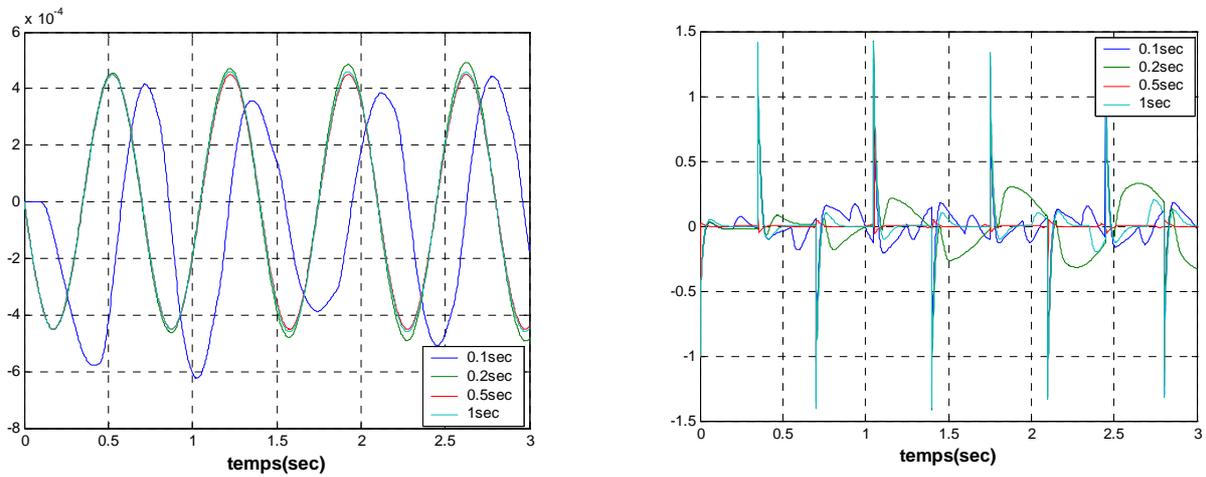


Figure III.11 : Visualisation des positions (X_e , X_h) ainsi les forces (F_h , F_e) en mouvement libre.

CONTACT SOFT :

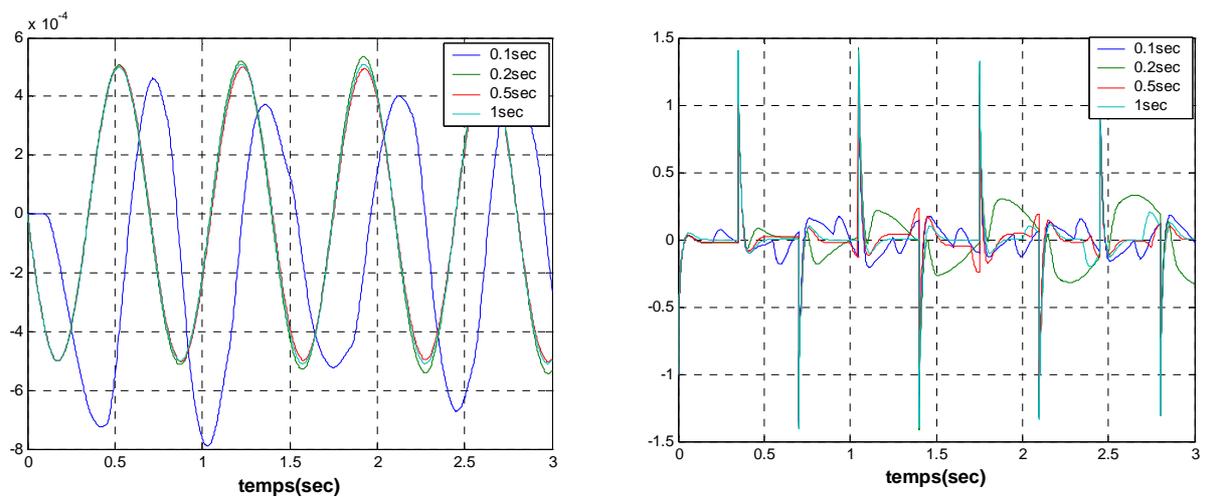


Figure III.12 : Visualisation des positions (X_e , X_h) ainsi les forces (F_h , F_e) en contact soft

CONTACT HARD:

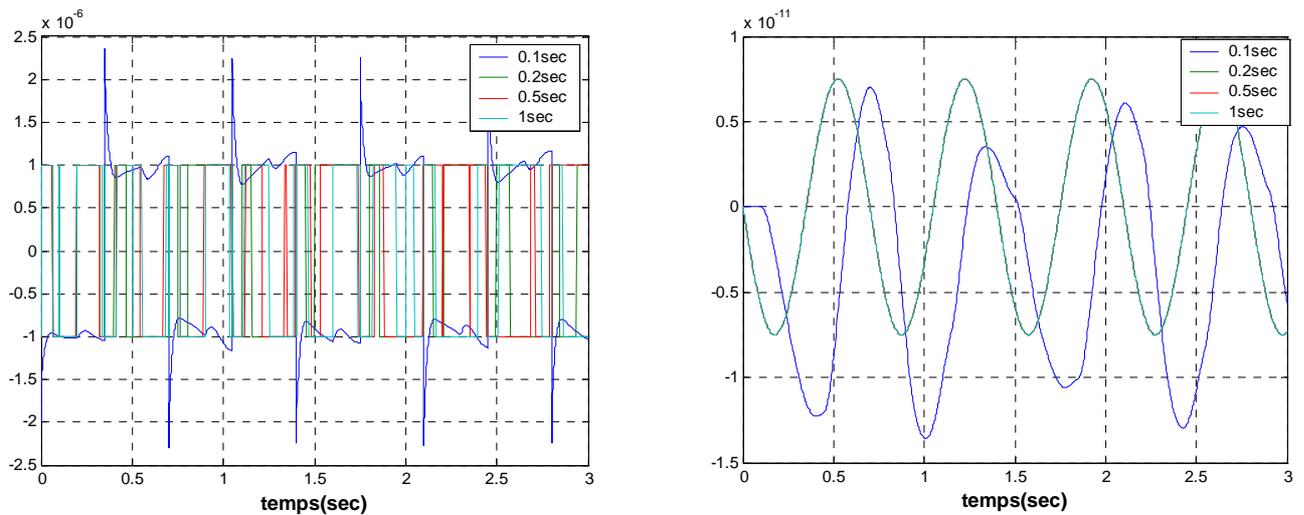


Figure III.13 : Visualisation des positions (X_e , X_h) ainsi les forces (F_h , F_e) en contact hard

Les figures (III.11, III.12, III.13) présente notre système avec différent temps de retard, les courbes présentent les vitesses et les forces sont presque confondues, ce implique que l'effet de temps de retard est éliminer par la technique de variable d'onde, et enfin on peut voir une certaine passivité et transparence souhaitable.

Les figures si dessous pressentent les résultats de simulation pour différent temps de retard (0.2s ; 0.5s; 1s), on compare ces résultats de simulation avec l'autre du système sans retard.

RESULTATS DE SIMULATION POUR DIFFERENTS TEMPS DE RETARD (0.2s ; 0.5s; 1s) :

TEMPS DE RETARD = 0.2s :

MOUVEMENT LIBRE :

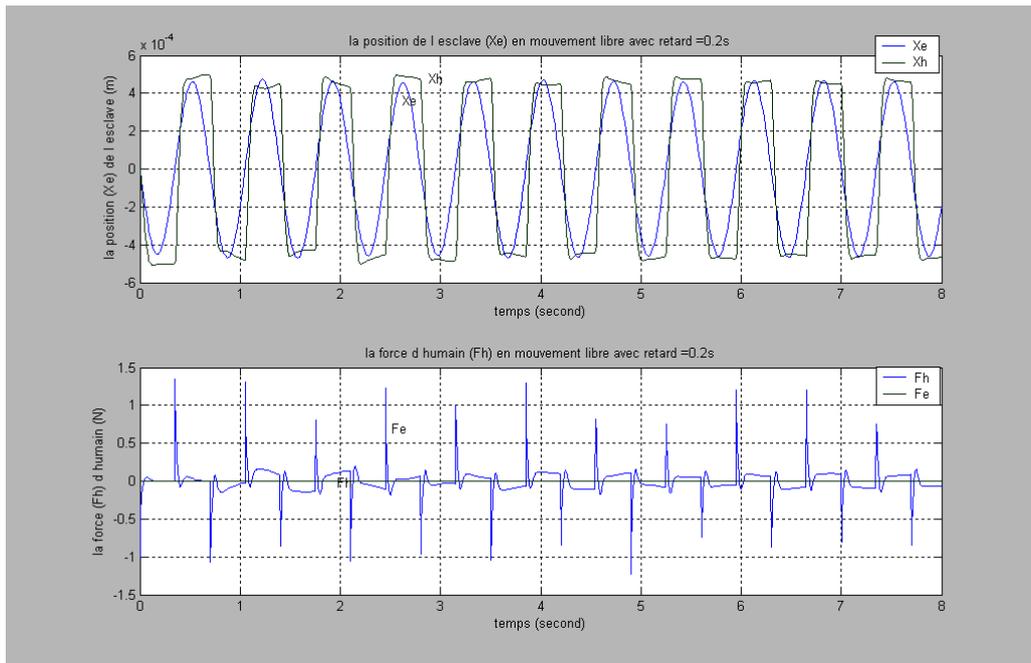


Figure III.14 : Visualisation des positions (X_e , X_h) ainsi les forces (F_h , F_e) en mouvement libre

CONTACT SOFT :

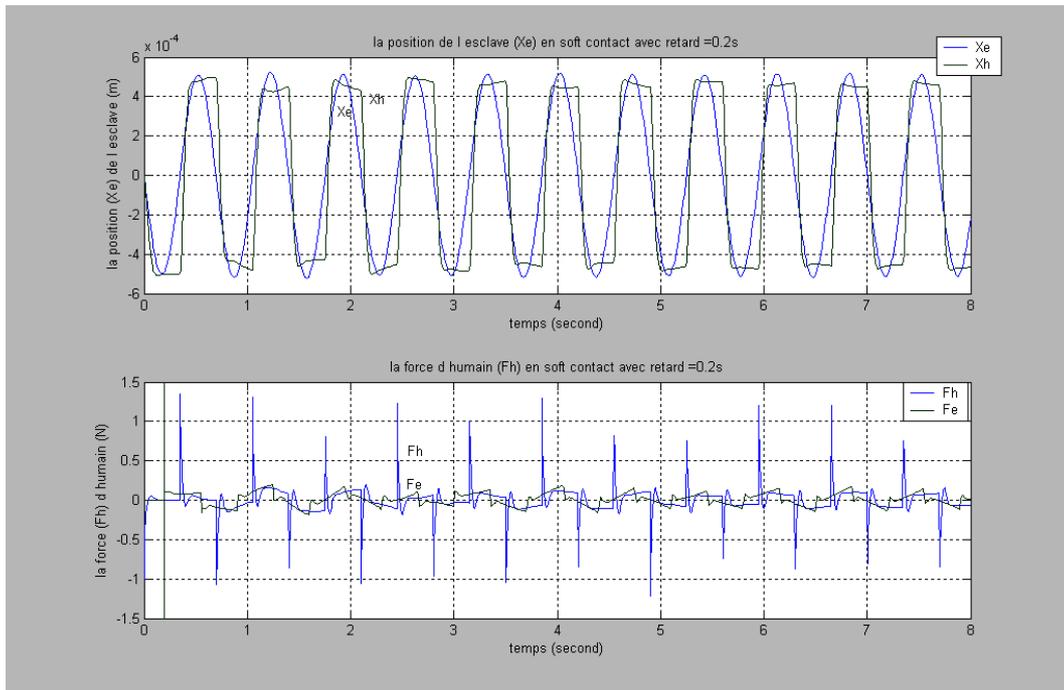


Figure III.15 : Visualisation des positions (X_e , X_h) ainsi les forces (F_h , F_e) en contact soft

CONTACT HARD :

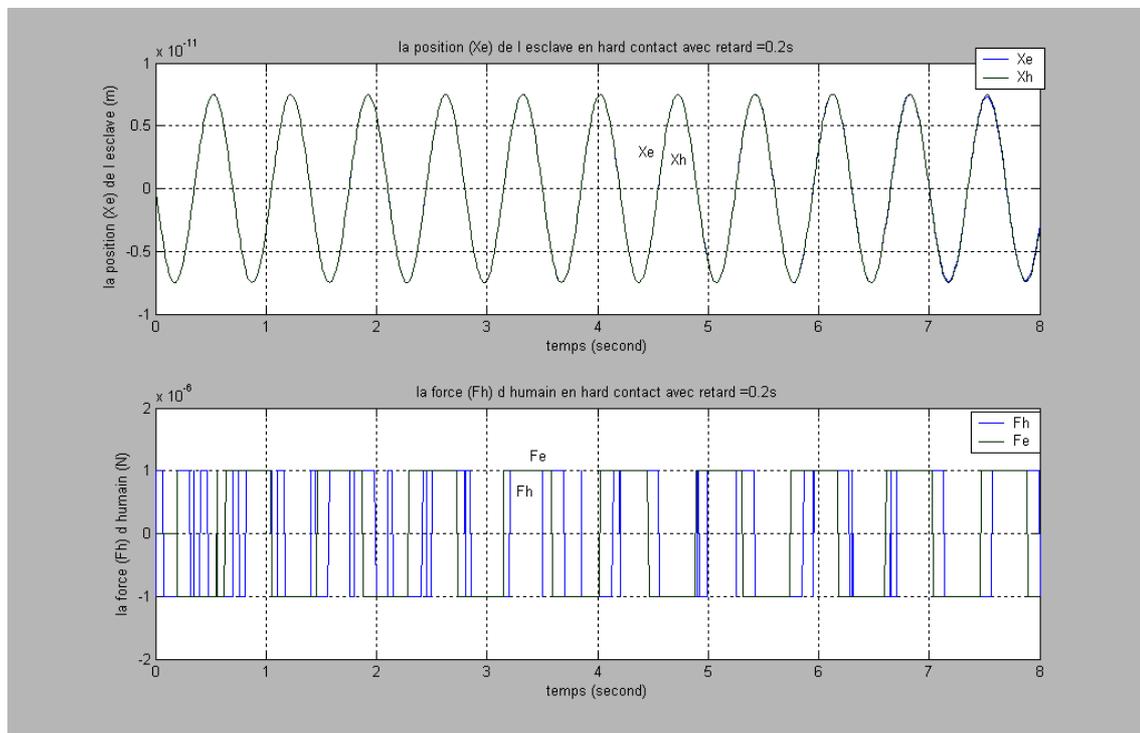


Figure III.16 : Visualisation des positions (X_e , X_h) ainsi les forces (F_h , F_e) en contact hard

TEMPS DE RETARD = 0.5s :

MOUVEMENT LIBRE :

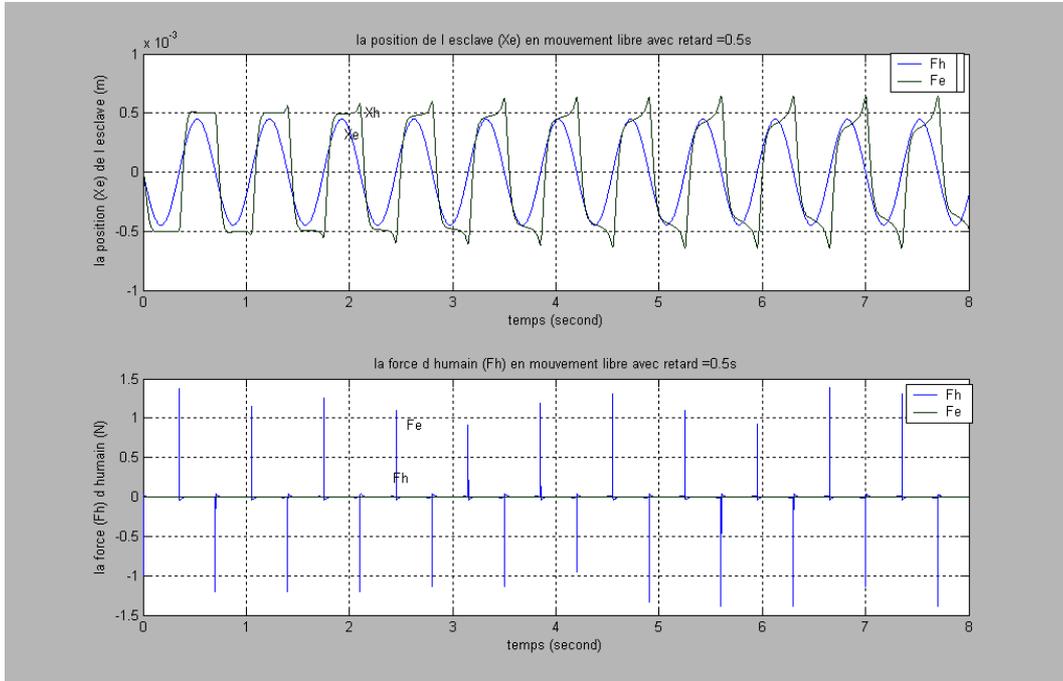


Figure III.17 : Visualisation des positions (X_e , X_h) ainsi les forces (F_h , F_e) en mouvement libre

CONTACT SOFT :

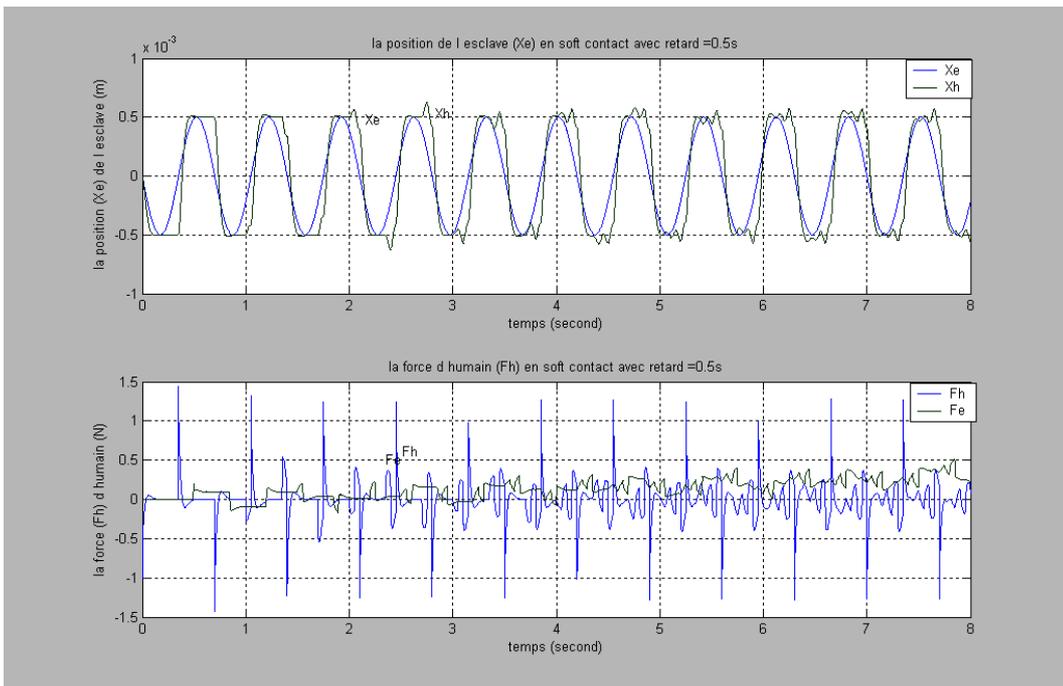


Figure III.18 : Visualisation des positions (X_e , X_h) ainsi les forces (F_h , F_e) en contact soft

CONTACT HARD :

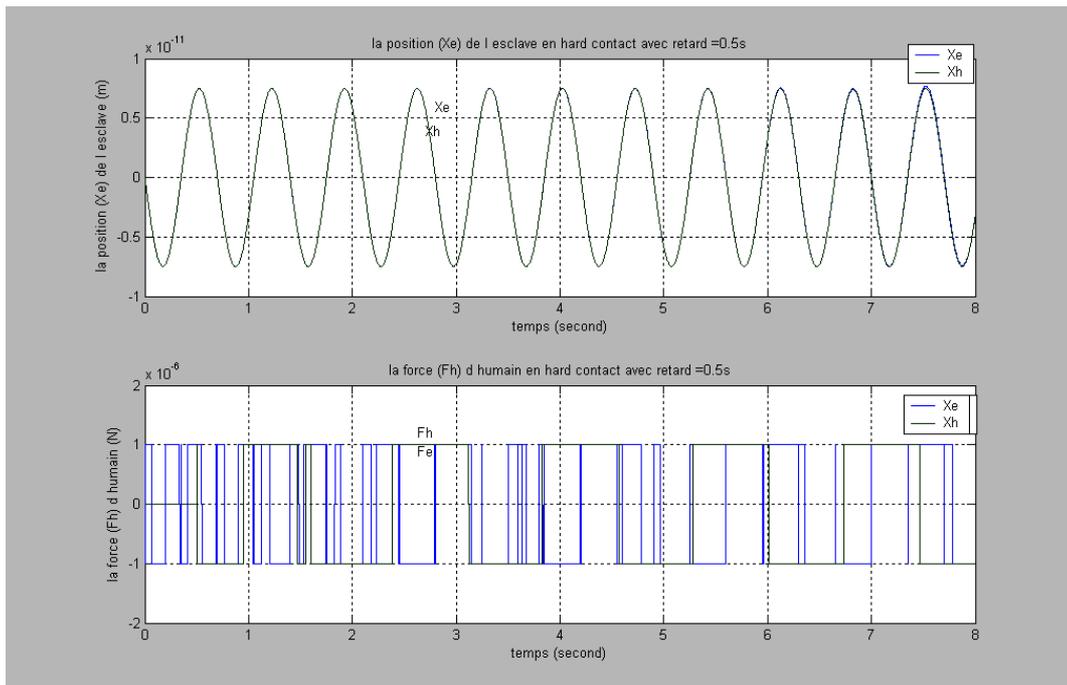


Figure III.19 : Visualisation des positions (X_e , X_h) ainsi les forces (F_h , F_e) en contact hard

TEMPS DE RETARD = 1s :

MOUVEMENT LIBRE :

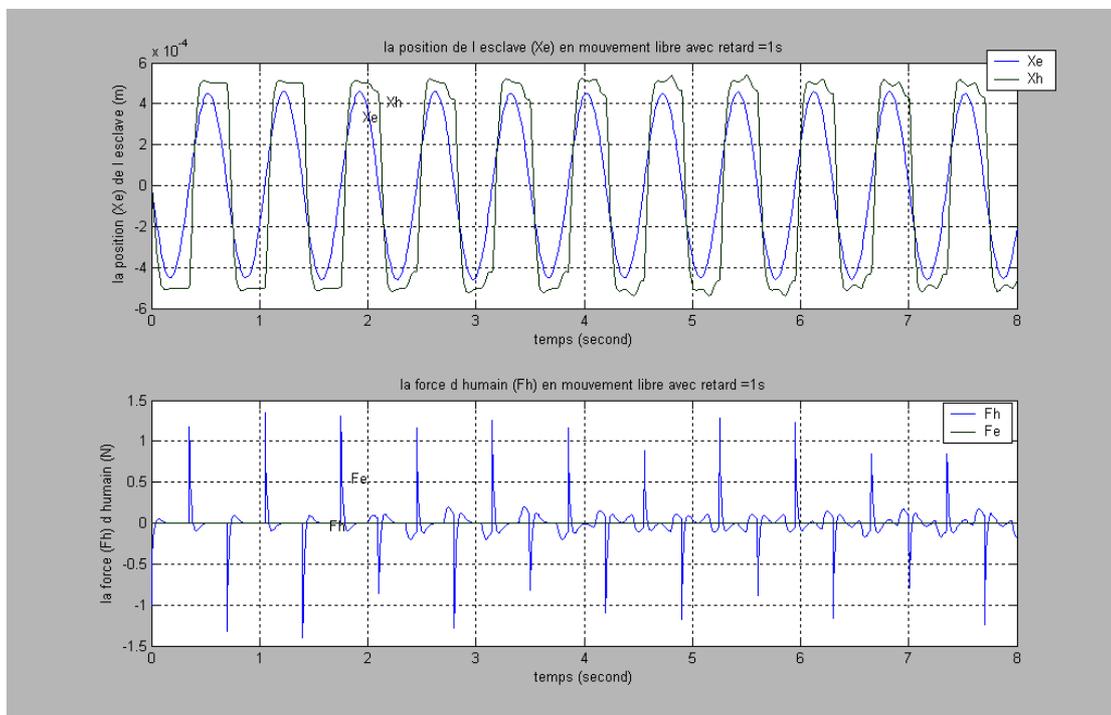


Figure III.20 : Visualisation des positions (X_e , X_h) ainsi les forces (F_h , F_e) en mouvement libre

CONTACT SOFT :

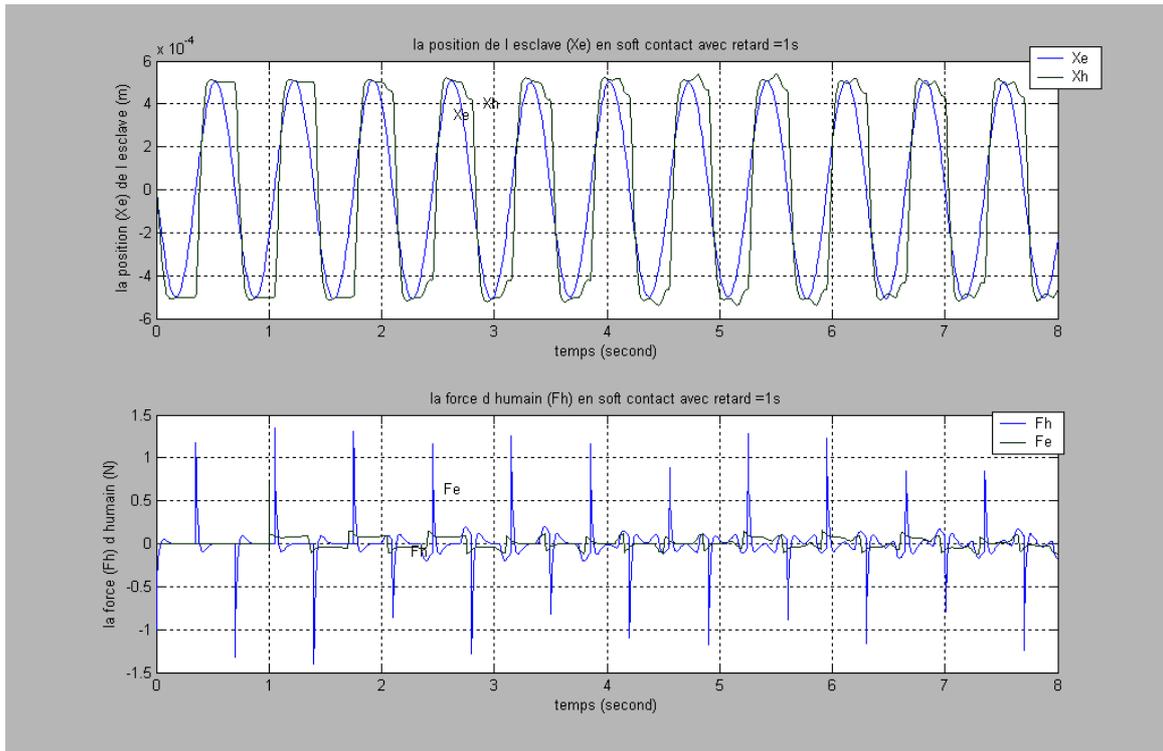


Figure III.21 : Visualisation des positions (X_e , X_h) ainsi les forces (F_h , F_e) en contact soft

CONTACT HARD :

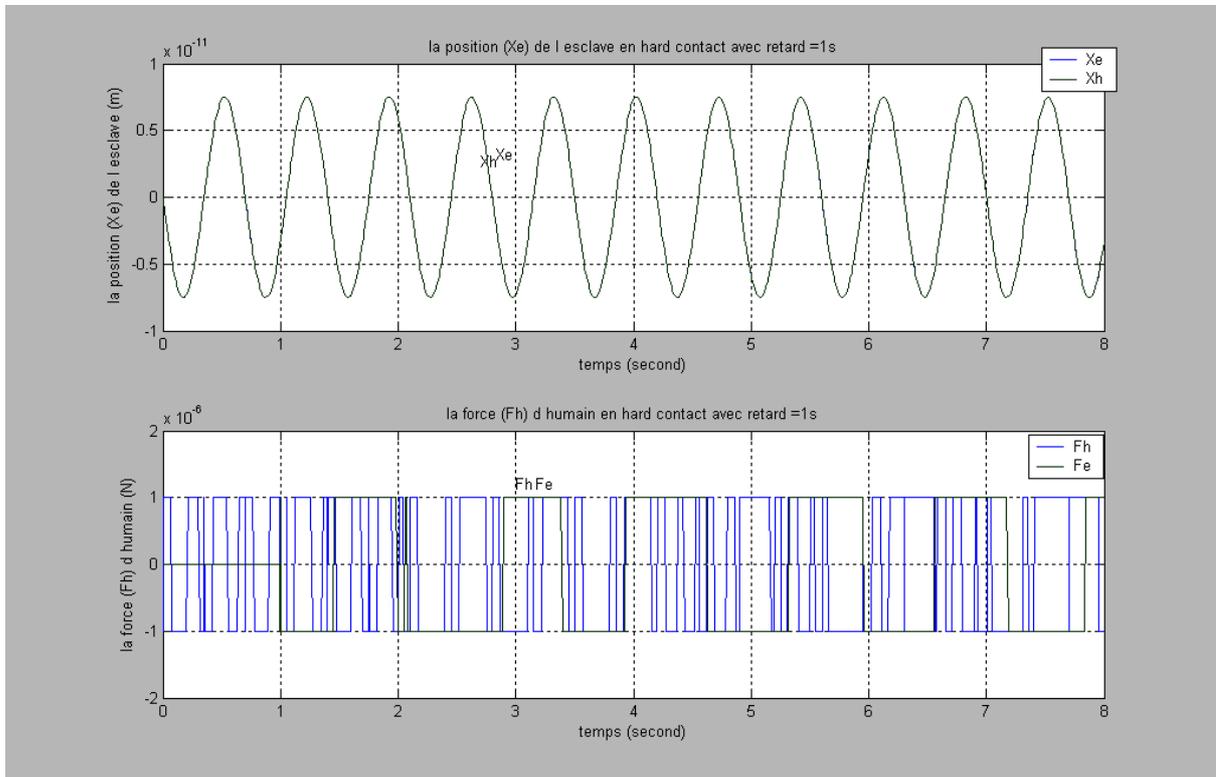


Figure III.22 : Visualisation des positions (X_e , X_h) ainsi les forces (F_h , F_e) en contact hard

III.4.4.2 / Interprétation des résultats obtenus:

On distingue trois configurations possibles selon que le bras manipulateur est en mouvement libre, ou en contact soft ou en contact hard avec l'environnement dans lequel il se déplace.

I/ système sans temps de retard : les résultats sont totalement passifs et transparents.

II/ système avec temps de retard :

- Les courbes représentent les positions et les forces de l'opérateur humain et celles du bras manipulateur garde les mêmes forme que celles du cas de système sans retard figure (III.7).
- Contrairement au cas sans retard les courbes représentent les positions de l'opérateur humain et celles du bras manipulateur ne sont plus confondues les unes avec les autres. Cela est essentiellement du à l'influence du temps de retard sur la passivité du système.
- Au fur et à mesure que le temps de retard augmente le décalage entre les signaux augmente aussi, cela est du à l'erreur qui se produit entre les forces et les positions de l'opérateur humain et celles de l'environnement. Car les informations qui arrivent à l'opérateur humain de l'environnement mettent un temps avant d'arriver ce qui fait qu'elles ne sont pas traitées en temps réel.
- Dans le cas de contact soft les signaux de la force de l'opérateur humain suivent ceux de l'environnement. L'opérateur humain interagit avec l'environnement.
- Dans le cas de contact hard les signaux sont bruités et presque nulle, car le bras manipulateur ne peut plus se déplacer ou transpercé l'obstacle.

Nous avons comparé nos résultats avec ceux trouvés dans la littérature [33], [34].

III.5 /Conclusion :

Ce chapitre a été consacré à la commande à distance d'un bras manipulateur à un seul degré de liberté avec retour de force, on a utilisé une architecture de téléopération à quatre canaux de communication. Cette architecture utilise les signaux de la position et de la force. Cette dernière est très souhaitable pour obtenir une bonne transparence avec une certaine instabilité du système dans les conditions idéales. Les résultats obtenus par notre approche nous permettent d'améliorer la transparence et la passivité des systèmes.

CONCLUSION GENERALE

La téléopération nécessite une modélisation qui permet de prendre en compte les effets de la passivité et la transparence du système, le temps de retard de communication et le retour de force dans le but d'évaluer des nouvelles architectures prometteuses. Dans le cadre du projet de ce mémoire, nous avons présenté une contribution à l'étude et la simulation d'une commande à distance d'un bras manipulateur à un seul degré de liberté avec retour de force en présence d'un temps de retard constant. On s'intéresse principalement à l'amélioration de la passivité et la transparence du système en se basant sur la technique de la variable d'onde.

Le premier chapitre de ce manuscrit constitue d'un état de l'art sur les engins de téléopération (Engins aériens, Engins sous-marins, Engins terrestres, Domaine médical, Assistance à l'handicap), et un bref historique sur les systèmes de téléopération, ainsi les différents domaines d'applications de ces systèmes. Nous espérons qu'une telle synthèse, bien qu'elle soit connue pour certains, elle servira comme point de départ à d'autres travaux dans le domaine de la téléopération.

Les architectures des systèmes de téléopération et la technique de variable d'onde ainsi les théories de transparence et la passivité font l'objet du second chapitre. Deux architectures ont commencé à être mises en place, l'une favorise la transparence (architecture de Lawrence), l'autre favorise la stabilité du système (utilisation des grandeurs d'onde). La méthode de variable d'onde qui la technique adoptée dans notre étude permet de s'affranchir des contraintes imposées par l'instabilité de système qui créer par le temps de retard et de l'environnement éloigné, et ainsi de garder le système stable quels que soient ces deux derniers facteurs.

Le troisième chapitre a été consacré à la commande à distance d'un bras manipulateur à un seul degré de liberté avec retour de force, on a utilisé une architecture de téléopération à quatre canaux de communication. Cette architecture utilise les signaux de la position et de la force. Cette dernière est très souhaitable pour obtenir une bonne transparence avec une certaine instabilité du système dans les conditions idéales.

Afin d'améliorer les performances de la commande à distance des systèmes, l'objectif de ce travail est cherché à combiner les deux architectures adoptées pour la

téléopération qui sont l'architecture de Lawrence qui favorise la transparence et l'autre de slotine qui favorise la stabilité (utilisation des grandeurs d'onde).

Les résultats obtenus par notre approche nous permettent d'améliorer la transparence et la passivité de système.

Une perspective à courts termes, certaines améliorations et certaines innovatrices idées peuvent contribuer à l'étude et à une meilleure connaissance des phénomènes abordés dans le cadre de ce travail:

Au niveau d'architecture de système de téléopération, il serait de fusionner les deux en rendant le système stable et robuste quels que soient les retards en prenant le formalisme des grandeurs d'ondes, et d'obtenir une transparence optimale grâce à des asservissements aux deux postes distants comparables à ceux du modèle de Lawrence.

ANNEXE A

Contrôleur à quatre canaux pour Téléopérateurs avec Admittance Maître et/ou esclave

Dans cette annexe, des architectures générales à quatre canaux de commande pour les types Impédance - Admittance, Admittance -Impédance et Admittance - Admittance des systèmes de téléopération sont présentés. En outre, la stabilité et les conditions de transparence suppose les temps de retards négligeables sont dérivés.

A.1/ le type Impédance -Admittance de téléopérateurs :

La figure A.1 montre le schéma fonctionnel général d'un système de téléopération de type d'Impédance- Admittance est commandé par un contrôleur bilatéral à quatre canaux avec temps de retard T_d de communication . Puisque l'esclave est un dispositif Admittance, le bloc esclave - environnement « d » de la figure III.3 est utilisé. Par conséquence, des commandes de position sont reçues sur le côté esclave.

Ici, E_1 et E_3 dénotent l'alimentation progressive à distance, E_5 la position locale de retour, et E_s^{-1} les fonctions transfert rationnelles de la force progressive utilisées dans la loi de commande d'esclave :

$$V_{es} = -E_5 V_e - E_s^{-1} F_e + E_3 e^{-sT_d} V_h + E_1^{-1} e^{-sT_d} F_h \quad (A.1)$$

Notez que E_1 et E_s comme C_m et C_4 sont des filtres de type Impédance. Après fermeture de la boucle de control, la dynamique du maître et l'esclave sont régis par :

$$(1 + E_5) V_e - E_3 e^{-sT_d} V_h = E_1 e^{-sT_d} F_h - Y_{es} F_e \quad (A.2)$$

Où $Y_{es} = Y_s + E_s^{-1}$ dénote la dynamique de l'esclave après la force de retour. Comme avant, pour analyser la stabilité et la performance du système, le M.S.N.

$$Z_{to} = \frac{[(1+E_2)Z_{cm} + E_3 C_4 e^{-2sT_d}] + [Z_{cm} Y_{es} + C_2 E_3 e^{-2sT_d}] Z_e}{[(1+E_2)(1+C_6) - E_1^{-1} C_4 e^{-2sT_d}] + [(1+C_6) Y_{es} + E_1^{-1} C_2 e^{-2sT_d}] Z_e} \quad (A.7)$$

$$Z_{te} = \frac{[(1+E_2)Z_{cm} + E_3 C_4 e^{-2sT_d}] + [(1+E_2)(1+C_6) - E_1^{-1} C_4 e^{-2sT_d}] Z_h}{[Z_{cm} Y_{es} + C_2 E_3 e^{-2sT_d}] + [(1+C_6) Y_{es} + E_1^{-1} C_2 e^{-2sT_d}] Z_h} \quad (A.8)$$

Dans les conditions idéales ou en négliger le temps retard, le système de téléopération de type Impédance - Admittance devient parfaitement transparent, si et seulement si :

$$\begin{cases} E_1^{-1} = Y_{es} \\ C_2 = 1 + C_6 \\ E_3 = 1 + E_5 \\ C_4 = -Z_{cm} \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{Ensemble de conditions d'une Impédance} \\ \\ \text{Admittance parfaitement transparente} \end{array} \quad (B.9)$$

Et $(C_2, E_3) \neq (0, 0)$ est pris. Similairement au cas d'Impédance - Impédance, la dynamique du maître et d'esclave sont rejeté et le système est parfaitement transparent avec une stabilité marginale absolue. Note qu'à partir de (A.9), théoriquement, en remplaçant le paramètre de force de control C_6 du maître ou le paramètre de control E_5 d'esclave par (-1) , il est possible d'éliminer la force du maître ou la position d'esclave, respectivement, et obtenu une architecture de commande à trois canaux transparent.

A.2/ téléopérateurs de type Admittance –Impédance :

La figure A.2 montre le schéma fonctionnel général d'un système de téléopération de type Admittance -Impédance est commandé par un contrôleur bilatéral à quatre canaux.

Comme pour le système précédent, le maître est un dispositif d'Admittance et les commandes de position sont Reçu sur le côté maître. Ici, E_2 et E_4^{-1} dénotent l'alimentation du maître à distance de position, E_6 le retour locale de position, et E_m^{-1} les fonctions transfert rationnelle de la force local du maître utilisées dans la loi commande du maître :

$$V_{cm} = E_6 V_h - E_m^{-1} F_h - E_2 e^{-sT_d} V_e - E_4^{-1} e^{-sT_d} F_e \quad (A.10)$$

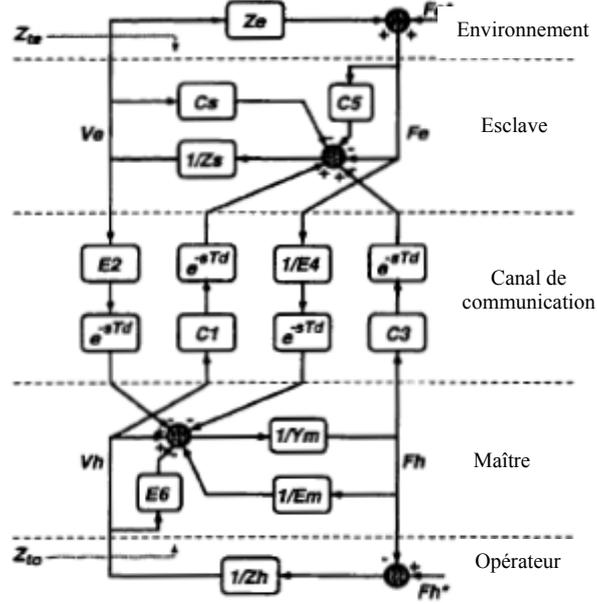


Figure A.2: Schéma fonctionnel d'un type d'Admittance -Impédance de système de téléopération commandé par un contrôleur de quatre canaux général.

La dynamique du système en circuit fermé du maître et de l'esclave est régie par :

$$(1 + E_6)V_h - E_2 e^{-sTd} V_e = Y_{em} F_h + E_4^{-1} e^{-sTd} F_e \quad (A.11)$$

Où $Y_{em} = Y_m + E_m^{-1}$ est la dynamique du maître après le retour de la force locale. En utilisant les paramètres qu'hybrides du MSN les Impédances de transmission sont obtenues comme :

$$Z_{to} = \frac{[(1+E_6)Z_{cs} - C_1 E_2 e^{-2sTd}] + [(1+C_2)(1+E_6) - C_1 E_4^{-1} e^{-2sTd}] Z_e}{[Y_{em} Z_{cs} + E_2 C_3 e^{-2sTd}] + [(1+C_2)Y_{em} + C_3 E_4^{-1} e^{-2sTd}] Z_e} \quad (A.12)$$

$$Z_{te} = \frac{[(1+E_6)Z_{cs} - C_1 E_2 e^{-2sTd}] + [Y_{em} Z_{cs} + E_2 C_3 e^{-2sTd}] Z_h}{[(1+C_2)(1+E_6) - C_1 E_4^{-1} e^{-2sTd}] + [(1+C_2)Y_{em} + C_3 E_4^{-1} e^{-2sTd}] Z_h} \quad (A.13)$$

Pour ce type de système de téléopération, la loi de commande d'optimisation de transparence est :

$$\left\{ \begin{array}{l} C_1 = Z_{cs} \\ E_2 = 1 + E_6 \\ C_3 = 1 + C_5 \\ E_4^{-1} = -Y_{em} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{Ensemble de conditions d'une Admittance} \\ \\ \text{Impédance parfaitement transparente} \end{array} \quad (\text{A.14})$$

Et $(E_2, C_3) \neq (0, 0)$. Similairement aux deux autres cas précédents, la dynamique du maître et d'esclave est annulée et le système devient parfaitement transparent avec une stabilité marginale absolue. Noter qu'à partir de (A.14), conjuguant exactement au cas d'Impédance Admittance, théoriquement, en plaçant le paramètre de commande local *de* position du maître E_6 ou le paramètre de commande de force local d'esclave C_6 par (-1) , il est possible d'éliminer l'alimentation direct du maître ou la force direct d'esclave, respectivement, et obtiennent des architectures de commande à trois-canaux transparent.

A.3/ téléopérateurs du Type Admittance -Admittance :

La figure A.3 montre le schéma fonctionnel général d'un système de téléopération du type Admittance -Admittance commandé par un contrôleur bilatéral général à quatre canaux. Dans ce système le maître et l'esclave sont des dispositifs d'Admittance et acceptent des positions comme commandes de control. Les contrôleurs du maître et d'esclave sont exprimés dans (A.10) et (A.1) et la dynamique du système fermé est régie par (A.11) et (A.2).

En utilisant les paramètres hybrides de MSN, l'opérateur et l'environnement transmises les Impédances sont obtenus comme :

$$Z_{to} = \frac{[(1 + E_5)(1 + E_6) - E_2 E_3 e^{-2sT_d}] + [(1 + E_6)Y_{es} + E_3 E_4^{-1} e^{-2sT_d}]Z_e}{[(1 + E_5)Y_{em} + E_1^{-1} E_2 e^{-2sT_d}] + [Y_{em} Y_{es} + E_1^{-1} E_4^{-1} e^{-2sT_d}]Z_e} \quad (\text{A.15})$$

$$Z_{te} = \frac{[(1 + E_2)(1 + E_6) - E_2 E_3 e^{-2sT_d}] + [(1 + E_2)Y_{em} + E_1^{-1} E_2 e^{-2sT_d}]Z_h}{[(1 + E_6)Y_{es} + E_3 E_4^{-1} e^{-2sT_d}] + [Y_{em} Y_{es} + E_1^{-1} E_4^{-1} e^{-2sT_d}]Z_h} \quad (\text{A.16})$$

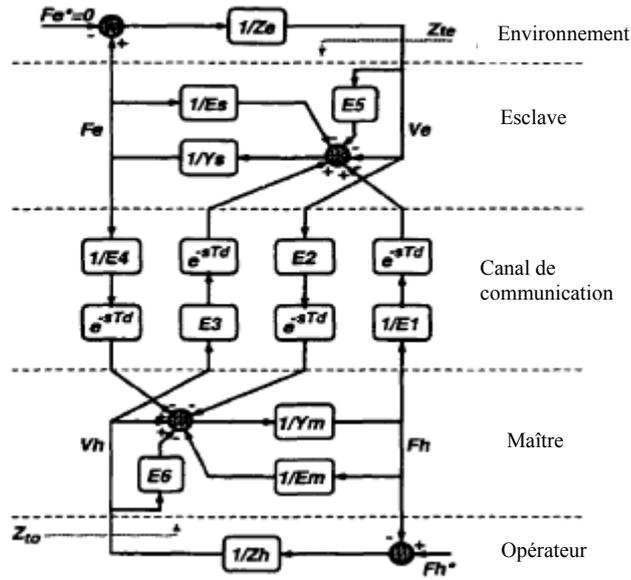


Figure A.3: Schéma fonctionnel d'un système de téléopération de type d'Admittance - Admittance commandé par un contrôleur général à quatre canaux.

Le transparent parfait sous les conditions idéales est réalisé si et seulement si :

$$\left\{ \begin{array}{l} E_1^{-1} = Y_{es} \\ E_2 = 1 + E_6 \\ E_3 = 1 + E_5 \\ E_4 = -Y_{em} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{Ensemble des conditions d'une} \\ \text{transparence parfaite de type} \\ \text{Admittance - Admittance} \end{array} \quad (A.17)$$

Et $(E_2, E_3) \neq (0,0)$ est pris, où Y_{em} , et Y_{es} , ont été définis plus tôt. En utilisant la loi de commande d'optimisation de transparence (A.17), le système devient marginalement absolument stable. De (A.17) il est observé que conjugué à duel aux systèmes d'Impédance - Impédance, dans la théorie, en plaçant le paramètre local principal E_6 de commande de position ou le paramètre local slave es de commande de position à -1, il est possible pour éliminer direct le feedforward de position au maître ou le feedforward direct de position à l'esclave, respectivement, et obtiennent des architectures transparentes du trois-canal de control.

ANNEXE B

B-1 La Modélisation Du Bras Manipulateur :

Le bras manipulateur qui utilise dans le maître et l'esclave est à un seul degré de liberté et sa rotation est autour de l'axe (x) comme le montre la figure suivante :

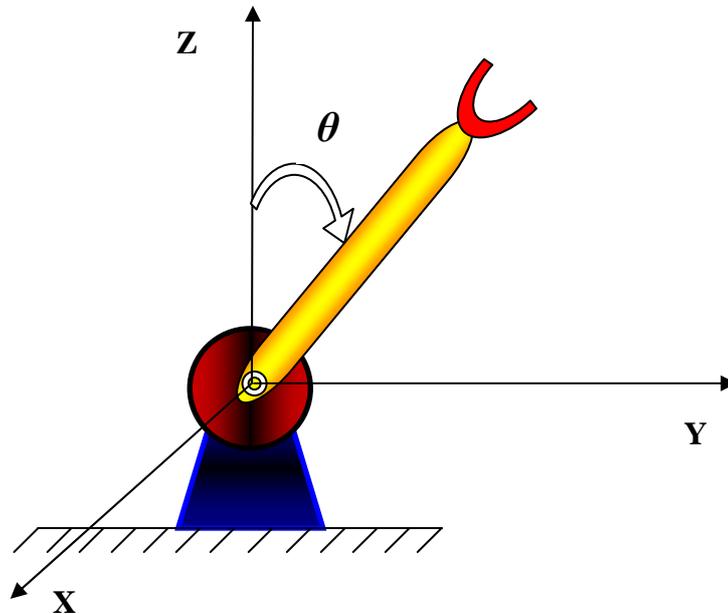


Figure B : présente le bras manipulateur un seul degré de liberté (une rotation autour de l'axe (x)) qui a été utilisé dans le site maître et esclave

➤ **Modèle Dynamique :**

La dynamique d'étude des lois et des causes du mouvement est fondée principalement sur la mécanique classique issue des de NEWTON. Les notions de masse (grandeur associée au système) et de force (grandeur décrivant l'action du monde extérieur sur le système) y jouent un rôle essentiel.

Le formalisme de Lagrange est utilisé pour modéliser le comportement dynamique d'un robot, cette approche particulière est assez simple à mettre en œuvre et elle est bien adaptée aux techniques de calcul manuel ainsi qu'aux méthodes de calcul assisté par ordinateur :

- Equation de Lagrange

Les équations de Lagrange opèrent à partir de l'énergie cinématique et de l'énergie potentielle d'un système. Le Lagrangien L s'écrit:

$$L = E_c - E_p \quad (\text{B.1})$$

E_c : Energie cinétique

E_p : Energie potentielle.

Les équations de Lagrange sont définies par:

$$\sum_{i=1}^N \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \Gamma_i \quad (\text{B.2})$$

q_i : Les variables articulaires des systèmes à N degrés de liberté.

Γ_i : Représente le couple ou la force F_i qui agit sur le système de rang i .

Ce formalisme de mise en équation d'un système est le plus pratique car les énergies cinétiques et potentielles sont des grandeurs qui sont additives.

On va décrire le comportement du bras manipulateur sous forme d'un modèle de connaissance, et pour cela on introduit le Lagrangien suivant les équations (B.1) et (B.2), ceci est donné par:

$$L = E_c - E_p$$

$$E_c = \frac{1}{2} J^T \dot{x}^2$$

On note que : $x = q$

D'après la loi de Huignz le Jacobien J du bras par rapport a leur centre de gravité, est donné par :

$$J = \frac{mL^2}{12} + \frac{mL^2}{4} = \frac{mL^2}{3}$$

On aura, donc :

$$E_c = \frac{1}{6}mL^2 \dot{x}^2$$

$$E_p = mg \frac{L}{2} \cos(x)$$

Avec m, L sont la masse et la longueur du bras respectivement.

Soit l'équation d'euler-Lagrange suivante:

$$\sum_{i=1}^N \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \Gamma_i$$

$N=1$; pour un degré de liberté.

$\Gamma = F$; la force d'entrée de système.

Les équations différentielles sont données comme:

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} = \frac{1}{3}mL^2 \dot{x}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) = \frac{1}{3}mL^2 \ddot{x}$$

$$\frac{\partial L}{\partial x} = -mg \frac{L}{2} \sin(x)$$

D'après l'expression de Lagrange, on exprime l'équation du bras comme suit:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial L}{\partial x} = F \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{3}mL^2 \ddot{x} + mg \frac{L}{2} \sin(x) = F$$

Pour: $x \leq 10^\circ$, $\sin(x) = x$

On déterminant la transformation de Laplace de l'équation précédente, et on écrit l'équation sous la forme:

$$\frac{x(s)}{F(s)} = Z_m^{-1} = Z_m^{-1} = \frac{s}{\frac{mL^2}{3}s^2 + g\frac{mL}{2}}$$

Où s dénote l'opérateur de Laplace.

L'application numérique donne:

$$\frac{x(s)}{F(s)} = \frac{s}{0.7s^2 + 50}$$

BIBLIOGRAPHIE

- [1] D.A. Lawrence. Stability and Transparency in Bilateral teleoperation. IEEE Transaction on Robotics and Automation , 9(5):624-637, October 1993.
- [2] D.A. Lawrence. Impedance control stability and properties in common implementations. In Proceedings of the IEEE International conference on Robotics and Automation, volume 2, pages 1185-1190, Philadelphia, PA, April 1988.
- [3] Ph.D thesis, design, implementation and evaluation of stable bilateral teleoperation control architectures for enhanced telepresence, by keyvan hashtrudi-zaad, M.SC.cocordia university, 1995.
- [4] J.E. Colgate and N. Hogan. Robust control of dynamically interacting systems. Int. Jour. Cont., 48(1) :65-88, 1988.
- [5] S.E. Salcudean, N.M. Wong, and R.L. Hollis. Design and Control of a force-reflectin teleoperation system with magnetically levitated master and wrist. IEEE Transaction on Robotics and Automation , 11(6):844-858, December 1995.
- [6] G. niemeyer et al, improving perception in time delayed teleoperation, IEEE transactions on robotics, vol 11, N° 7, december 2006
- [7] Niemeyer & Slotine : Stable Adaptive teleoperation, IEEE Jour. Of oceanic Engineering, 16(1), 152-162, 1991
- [8] Ganjefar et al: Teleoperation system design using augmented wave variables and Smith predictormethod for reducing time delay effects. In proc. Of the ieeetr. Symposium on Intelligent control, pp333-338, 2002
- [9] Vertut J., Coiffet P., Teleoperation and Robotics Evolution and Development, Robot Technology Volume 3A, Kogan Page5-9, 1985.

- [10] K. Hashtrudi-Zaad et S.E. Salcudean, "On the use of local force feedback for transparent teleoperation" Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Detroit, Michigan, mai 1999.
- [11] M. Zhu and S.E. Salcudean, "Achieving Transparency for Teleoperator Systems under Position and Rate Control. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Pittsburgh, PA, August 5–9, 1995.
- [12] Joseph Yan and S. E. Salcudean, Member, IEEE "Teleoperation controller design using H_{∞} optimization with application to motion- scaling. Ieee transactions on control systems technology, vol. 4, N^o 3, may 1996.
- [13] Anas Fattouh et al, Force feedback joystick control of a powered wheelchair: preliminary study(2004), IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics 2003.
- [14] s. salcudean et al, adaptive transparent impedance reflecting teleoperation, IEEE transactions on robotics, vol 5, N^o 3, december 1996.
- [15] S. Tafazoli, S.E. Salcudean, K. Hashtrudi-Zaad and P.D. Lawrence, "Impedance Control of a Teleoperated Excavator", IEEE Trans. Contr. Sys. Tech., 10(3), pp.355-367, May 2002.
- [16] K. Hashtrudi-Zaad and S.E. Salcudean, "Bilateral Parallel Force/Position Teleoperation Control", J. Robotic Sys., 19(4), pp.155-168, April 2002.
- [17] S.E. Salcudean, M. Zhu, W.H. Zhu, and K. Hashtrudi-Zaad, "Transparent Bilateral Teleoperation under Position and Rate Control", Intl. J. Robotics Research, Vol. 19, No. 12, December 2000, pp. 1185-1202.
- [18] W.H. Zhu and S.E. Salcudean, "Stability-guaranteed Teleoperation: An adaptive Motion/Force Control Approach", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 45, No. 11, pp. 1951--1969, November 2000.
- [19] S.E. Salcudean, K. Hashtrudi-Zaad, S. Tafazoli, S.P. DiMaio, and C. Reboulet, "Bilateral Matched-Impedance Teleoperation with Applications to Excavator Control", Control Systems Magazine, Vol.19, No.6, pp.29-37, December 1999.

[20] Wei Wang and Jean-Jacques E. Slotine \ Contraction Analysis of Time-Delayed Communications and Group Cooperation, *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 51, N^o. 4, April 2006

[21] F. Khatounian et al, \PARAMETER IDENTIFICATION OF A SINGLE DEGREE OF FREEDOM HAPTIC INTERFACE, 14th IFAC Symposium on System Identification, Newcastle, Australia, 2006.

[22] Ya-Jun Pan et al, A New Predictive Approach for Bilateral Teleoperation With Applications to Drive-by-Wire Systems, *IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS*, VOL. 22, NO. 6, DECEMBER 2006

[23] Narjes Khezami, Un Système Multi-Agent pour l'analyse, la conception et l'évaluation de la collaboration, appliquée au Télétravail Collaboratif via Internet. Soutenue le 2004

[24] M. Can Dede et al, a study on multiple degree of freedom force reflecting teleoperation, *IEEE ICM'04*, Istanbul, Turkey, June 3-5, 2004.

[25] M. Can Dede, effects of time delay on force-feedback teleoperation system, *IEEE /CCS MED'04*, Kusadasi, Aydin, Turkey, June 6-9, 2004.

[26] Fong, T., & Thorpe, C. (2001). Vehicle teleoperation interface. *Autonomous Robots*, 11, 9-18.

[27] THESE Commande des systèmes avec intervention humaine Application à la commande

Drive by Wire Emmanuel Witrant Soutenance le : 2 Juillet 2002.

[28] Jones, C. (1997). Unmanned aerial vehicles (UAVS). An assessment of historical operations and future possibilities. Air Command and Staff College.

[29] Bailey, B. (1996). Drones in southeast Asia. 55th Strategic Reconnaissance Wing Association. Navarre, USA.

[30] Carrier, D. (1992). Soviet rover systems. In *Proceedings of the AIAA Space Programs and Technologies Conference*. Huntsville, USA.

- [31] A. Gourdon, Ph Poignet, G. Poisson, P. Vieyres & P. Marché, “*A New Robotic Mechanism for Medical Application*”, IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Atlanta, September 19-23, 1999, pp. 33-38.
- [32] Fabien Courreges « DETERMINATION D’UNE ARCHITECTURE DE TELEOPERATION BILATERALE EN PRESENCE DE RETARDS », 2000, 17p.
- [33] C. Andriot et R. Fournier, Bilateral control of teleoperators with flexible joints by the H infinity approach", SPIE, Vol. 1833 Telemanipulator Technology, 1992.
- [34] C. Canudas-De-Wit, S. Guegan et A. Richard, \Control design for an electro power steering system: part I the reference model", 2001.
- [35] Robert J. Anderson et Mark W. Spong, “*Bilateral Control of Teleoperators with Time Delay*”, IEEE Trans. on Auto. Cont., Vol. 34, May 1989, No 5, pp 494-501.
- [36] K. Hashtrudi-Zaad et S.E. Salcudean, “*On the Use of Local Force Feedback for Transparent Teleoperation*”, Proc. of IEEE, International Conference on Rob. & Auto. Detroit, Michigan, May 1999, pp 1863-1869.
- [37] W.H. Zhu, S.E. Salcudean et P.D. Loewen, \Optimization-based teleoperation design", 13th World Congress of IFAC, San Francisco, CA, USA, June-July 1996.
- [38] O.J.M. Smith. Closer control of loops with dead time. Chemical Engineering Progress, 53(5) :217–219, 1958.
- [39] Z. J. Palmor. Stability properties of Smith dead-time compensator controller. Int. J. Control, 32(6) :937–949, 1980.