

N° d'ordre : 117/2024-D/GE

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche Scientifique
Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene

Faculté de Génie Electrique



THÈSE DE DOCTORAT EN SCIENCES

Présentée pour l'obtention du grade de DOCTEUR

En : ELECTRONIQUE

Spécialité : Contrôle de Processus et Robotique

Par : OUTAYEB Adel Mohamed

Sujet :

Contribution à la commande bilatérale d'un système télérobotisé

Soutenue publiquement le : 09/11/2024, devant le Jury composé de :

Mme N. Achour	Professeur à l'USTHB	Présidente
Mr F. Ferguene	Professeur à l'USTHB	Directeur de thèse
Mr M. Belhocine	Directeur de recherche au CDTA	Examineur
Mr D. Boukhetala	Professeur à l'ENP	Examineur
Mr M. Guiatni	Professeur à l'EMP	Examineur
Mr K. Boudjit	Maître de conférences à l'USTHB	Examineur
Mr R. Mellah	Professeur à l'UMMTO	Invité

REMERCIEMENTS

Au nom de Dieu, le Clément, le Miséricordieux.

Premièrement et avant tout, je remercie Allah le tout-puissant de m'avoir donné la santé, la volonté et la patience pour mener à terme ce présent travail.

Que mes chers parents, ma grande famille et ma petite famille, trouvent ici l'expression de mes remerciements les plus sincères et les plus profonds en reconnaissance de leurs soutien et encouragement.

Les travaux présentés dans cette thèse ont été réalisés au Laboratoire de Recherche en Robotique, Parallélisme et systèmes Embarqués (LRPE) de la Faculté de Génie électrique de l'USTHB sous la direction de Professeur F. FERGUENE.

Que Monsieur F. Ferguene, trouve ici l'expression de ma profonde gratitude pour avoir dirigé ce travail, et pour la confiance et l'intérêt qu'il a témoignés tout au long de ce travail. Je le remercie aussi, pour tous les conseils avisés qu'il a su me communiquer, ainsi que pour le soutien et le dévouement dont il a fait preuve à mon égard et qui ont joué un rôle important dans l'aboutissement de mon travail de Thèse. Qu'il trouve ici l'expression de tout mon profond respect.

Je remercie également le Professeur R. TOUMI ex-Directeur de laboratoire (LRPE), pour ses conseils précieux, son soutien et sa confiance à mon égard. Qu'il trouve ici l'expression de tout mon profond respect.

Je tiens à exprimer ma gratitude à Monsieur Chenguang (Charlie) Yang, professeur à l'UWE de Bristol, pour m'avoir accueilli et pour l'aide et l'intérêt qu'il m'a apportés dans la finalisation de ce travail.

Mes remerciements distingués vont à madame N. Achour, professeur à l'USTHB pour l'honneur qu'elle me fait en présidant ce Jury.

Mes sincères remerciements s'adressent aussi aux messieurs :

- M. Belhocine, Docteur à CDTA d'Alger.*
- D. Boukhetala, Professeur à l'ENP d'Alger.*
- M. Guiatni, Professeur à l'EMP d'Alger.*
- K. Boudjit, Maître de conférences à l'USTHB d'Alger.*

pour la considération qu'ils accordent à ce travail, en participant à ce jury.

Finalement, je remercie mes amis et toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce modeste travail.

À ma très chère Maman.

Résumé

La téléopération représente un champ d'application crucial dans divers domaines, tels que l'exploration spatiale, la chirurgie et la maintenance industrielle, offrant des solutions innovantes pour effectuer des opérations à distance. Le travail présenté dans cette thèse vise à contribuer dans la commande des systèmes télérobotisés pour augmenter la qualité du geste de l'opérateur en améliorant sa perception via un retour des efforts appliqués à l'environnement distant. Trois structures de commande adaptatives et intelligentes ont été développées pour améliorer le suivi de trajectoire et la performance de la force appliquée dans des environnements complexes, en tenant compte des incertitudes et des défis inhérents à la téléopération, notamment les incertitudes concernant les modèles des robots maître et esclave, la dynamique variable et inconnue de l'environnement, la qualité médiocre des signaux provenant des capteurs de force, ainsi que l'asymétrie entre les robots maître et esclave, posant ainsi des problèmes d'échelle et de mappage de l'espace de travail.

Les deux premières structures de commande bilatérale, que nous avons élaborées, se reposent sur l'architecture de commande à quatre canaux. Elles utilisent toutes les deux, dans leur partie maître, une approche de commande en force/impédance tandis que dans leurs parties esclave, la première structure utilise une approche de commande parallèle force/position et la deuxième exploite une approche de commande en effort externe.

Pour estimer les caractéristiques inconnues de l'environnement, supposées de type ressort, et extraire le bruit indésirable généré par les capteurs de force, nous avons utilisé une technique d'estimation en ligne basée sur la méthode des moindres carrés récurrents à facteur d'oubli (MCR-FO). Pour éliminer les effets des incertitudes dans le modèle dynamique du robot esclave, exploité dans la commande, nous avons utilisé un Compensateur Neuronal (CN) basé sur l'algorithme de rétropropagation du gradient. Les performances des deux structures proposées, en termes de stabilité et de transparence du système global de téléopération, ont été validées en simulation, à l'aide de l'environnement LabVIEW.

La troisième structure de commande bilatérale que nous avons élaborée est une structure de commande adaptative en admittance basée sur une architecture de commande à trois canaux. Elle se caractérise par le fait qu'elle évite d'utiliser une boucle de force dans sa partie esclave. Pour aligner l'interface maître Omni PHANTOM avec le robot PUMA560, une technique de mappage des espaces de travail a été appliquée.

Une stratégie de commande de type PID, combinée avec une approche de commande par découplage non linéaire et un CN, a été synthétisée dans les deux parties maître et esclave pour compenser l'effet des incertitudes dans les modèles dynamiques des manipulateurs.

Pour améliorer d'avantage les réponses en effort du robot esclave, sensibles aux variations des caractéristiques de l'environnement, une solution adaptative basée sur une méthode d'identification en ligne des caractéristiques de type ressort et amortisseur de l'environnement a été proposée. Pour supprimer les irrégularités du modèle d'admittance, un filtre de Butterworth et une fonction de limitation ont été implémentés. Cette combinaison a permis de générer des trajectoires modifiées qui sont transmises par la suite à la boucle de commande en position du robot esclave.

Les résultats des tests de performance de la structure proposée, issus d'une expérience "HUMAIN IN THE LOOP" réalisée dans l'environnement MATLAB, en utilisant une interface OMNI réelle et un robot PUMA560 virtuel en interaction avec un environnement virtuel, illustrent une stabilité remarquable du système global. Ils révèlent également un bon suivi des trajectoires et des forces appliquées dans les trois directions de l'espace, et ce, sous des conditions réalistes de téléopération.

Mots clés : *Téléopération, Commande en admittance, Commande force/position, structure externe, Environnement, Méthode d'estimation, Réseau de neurones, mappage de l'espace de travail.*

Abstract

Teleoperation is a significant application field in various domains, such as space exploration, surgery and industrial maintenance, offering innovative solutions for carrying out remote operations. The work presented in this thesis aims to contribute to the control of telerobotic systems to increase the quality of the operator's gesture by improving his perception via feedback of efforts applied to the remote environment. Three adaptive, intelligent control structures have been developed to improve trajectory tracking and applied force performance in complex environments, taking into account the uncertainties and challenges inherent in teleoperation, including uncertainties concerning master and slave robots, variable and unknown dynamics of the environment, poor quality of signals from force sensors, as well as asymmetry between master and slave robots, posing problems of scale and workspace mapping.

The first two bilateral control structures we have developed are based on the four-channel control architecture. Both use a force/impedance control approach in their master part, while in their slave parts, the first structure uses a parallel force/position control approach and the second exploits an external force control approach.

To estimate the unknown characteristics of the environment, assumed to be spring-like, and extract the undesired noise generated by the force sensors, we used an online estimation technique based on the recursive least squares method with forgetting factor (RLS-FF). To eliminate the effects of uncertainties in the dynamic model of the slave robot, exploited in the control, we used a Neural Compensator (NC) based on the gradient backpropagation algorithm. The performance of the two proposed structures, in terms of stability and transparency of the overall teleoperation system, was validated in simulation, using the LabVIEW environment.

The third bilateral control structure we have developed is an adaptive admittance control structure based on a three-channel control architecture. It is characterized by the fact that it avoids the use of a force loop in its slave part. To align the Omni PHANTOM master interface with the PUMA560 robot, a workspace mapping technique was used. A PID-type control strategy, combined with a non-linear decoupling control approach and a NC, was synthesized in both master and slave parts to compensate for the effect of uncertainties in the manipulators' dynamic models.

To further improve the effort responses of the slave robot, which are sensitive to variations in environmental characteristics, an adaptive solution based on a method of online identification of spring and damper characteristics of the environment was proposed. To eliminate irregularities in the admittance model, a Butterworth filter and a limiting function were implemented. This combination was used to generate modified trajectories which are subsequently transmitted to the slave robot's position control loop. The performance test results of the proposed structure, derived from a "HUMAN IN THE LOOP" experiment carried out in the MATLAB environment, using a real OMNI interface and a virtual PUMA560 robot interacting with a virtual environment, illustrate a remarkable stability of the overall system. They also reveal good tracking of trajectories and applied forces in all three spatial directions, under realistic teleoperation conditions.

Keywords: *Teleoperation, Admittance control, Force/position control, External structure, Environment, Estimation method, Neural network, Workspace mapping.*

المخلص

يعد التشغيل عن بُعد حقلاً تطبيقياً هاماً في مجالات مختلفة، مثل استكشاف الفضاء والجراحة والصيانة الصناعية، حيث يقدم حلولاً مبتكرة لتنفيذ العمليات عن بُعد. يهدف العمل المقدم في هذه الأطروحة إلى المساهمة في التحكم في الأنظمة الآلية عن بُعد لزيادة جودة إيماءة المشغل من خلال تحسين إدراكه عبر التغذية المرتدة للجهود المطبقة على البيئة البعيدة. تم تطوير ثلاثة هياكل تحكم تكيفية وذكية لتحسين تتبع المسار وأداء القوة المطبقة في البيئات المعقدة، مع مراعاة أوجه عدم اليقين والتحديات الكامنة في التشغيل عن بُعد، بما في ذلك أوجه عدم اليقين المتعلقة بالروبوتات الرئيسية والروبوتات التابعة والديناميكيات المتغيرة وغير المعروفة للبيئة، والجودة الرديئة للإشارات الصادرة من أجهزة استشعار القوة، فضلاً عن عدم التماثل بين الروبوتات الرئيسية والروبوتات التابعة مما يطرح مشاكل في النطاق وتخطيط مساحة العمل.

يعتمد أول هيكل تحكم ثنائي قمنا بتطويره على بنية التحكم رباعي القنوات. يستخدم كلاهما نهج التحكم في القوة/المقاومة في جزئه الرئيسي، بينما يستخدم الهيكل الأول نهج التحكم في القوة/الموضع الموازي في جزئه التابع، ويستغل الثاني نهج التحكم في القوة الخارجية.

لتقدير الخصائص غير المعروفة للبيئة، التي يُفترض أنها تشبه الزنبرك، واستخراج التشويش غير المرغوب فيه الناتج عن مستشعرات القوة، استخدمنا تقنية تقدير أونلاين تعتمد على طريقة المربعات الصغرى التكرارية مع عامل النسيان (-RLS FF). وللتخلص من تأثيرات عدم اليقين في النموذج الديناميكي للروبوت التابع، الذي يتم استغلاله في التحكم، استخدمنا معوضاً عصبياً (NC) يعتمد على خوارزمية التدرج العكسي. تم التحقق من صحة أداء الهيكلين المقترحين، من حيث ثبات وشفافية نظام التشغيل عن بُعد الكلي، في المحاكاة، باستخدام بيئة LabVIEW.

هيكل التحكم الثنائي الثالث الذي قمنا بتطويره هو هيكل تحكم في القبول التكيفي يعتمد على بنية تحكم ثلاثية القنوات. ويتميز بأنه يتجنب استخدام حلقة القوة في الجزء التابع له. لمواءمة واجهة Omni PHANTOM الرئيسية مع الروبوت PUMA560، تم استخدام تقنية تخطيط مساحة العمل. تم تصميم استراتيجية تحكم من نوع PID، جنباً إلى جنب مع نهج تحكم غير خطي لفصل الأجزاء الرئيسية والتابعة للتعويض عن تأثير أوجه عدم اليقين في النماذج الديناميكية للروبوتات المعالجة.

ولزيادة تحسين استجابات جهد الروبوت التابع، والتي تكون حساسة للتغيرات في الخصائص البيئية، تم اقتراح حل تكيفي يعتمد على طريقة تحديد خصائص الزنبرك والمثبط للبيئة عبر الأونلاين. وللقضاء على الاختلالات في نموذج القبول، تم تنفيذ مرشح Butterworth ودالة تحديد. تم استخدام هذا المزيج لتوليد مسارات معدلة يتم نقلها لاحقاً إلى حلقة التحكم في موضع الروبوت التابع.

توضح نتائج اختبار الأداء للهيكل المقترح، المستمدة من تجربة "الإنسان في الحلقة" التي تم إجراؤها في بيئة MATLAB، باستخدام واجهة OMNI حقيقية وروبوت PUMA560 افتراضي يتفاعل مع بيئة افتراضية، استقراراً ملحوظاً للنظام الكلي. كما أنها تكشف أيضاً عن تتبع جيد للمسارات والقوى المطبقة في جميع الاتجاهات المكانية الثلاثة، في ظل ظروف تشغيل عن بُعد واقعية.

الكلمات المفتاحية : التشغيل عن بُعد، التحكم في المقبولة، التحكم في القوة/الموضع، الهيكل الخارجي، البيئة، طريقة التقدير، الشبكة العصبية، تخطيط مساحة العمل.

Production scientifique

Communications internationales

Adel Mohamed Outayeb, Ferguene F, Toumi R. “Bilateral control of nonlinear teleoperation system using parallel force/position control approach and online environment estimation”. In: IEEE Int. Conf. On Methods and Models in automation and robotics (MMAR’2016), pages 1110–1115, Poland.

Adel Mohamed Outayeb, Farid F. and Redouane T. “Adaptive Neural Control for Bilateral Teleoperation System using External Force Approach”. In Proceedings of the 14th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics – Vol.2: ICINCO, pages 309-315. DOI: 10.5220/0006419603090315, 2017, Spain

MITICHE Nour, Farid Ferguene and **Adel Mohamed Outayeb** “Optimizing Bilateral Teleoperation Control Architectures : A Comparative Study under Constant and Variable Time Delays”, International Conference on Networking and Advanced Systems (ICNAS), DOI: 10.1109/ICNAS59892.2023.10330458 , 2023, Algeria.

Publications internationales

Adel Mohamed Outayeb, Farid Ferguene, Rabah Mellah and Redouane Toumi “An Online Admittance Control for Asymmetric Teleoperated Arm Robot Interacting with Unknown Environment”, CEAI, Vol.24, No.3, pp. 96-107, 2022, Romania.

Liste des abréviations

BIBO	: Bounded Input-Bounded Output.
CEA	: Commissariat de l’Energie Atomique.
CN	: Compensateur Neuronal.
DDL	: Degrés De Liberté.
DFR	: Direct Force Reflection.
DH	: Denavit-Hartenberg.
ELA	: Extended Lawrence Architecture.
ETS	: Engineering Test Satellite.
FEB	: Force Error Based.
LRPE	: Laboratoire de Recherche en Robotique, Parallélisme et systèmes Embarqués.
LTI	: Linear Time-Invariant.
MCD	: Modèle Cinématique Direct.
MCI	: Modèle Cinématique Inverse
MCR	: Moindres Carrés Récursifs.
MCR-FO	: Moindres Carrés Récursifs à Facteur d'Oubli.
MGD	: Modèle Géométrique Direct.
MGI	: Modèle Géométrique Inverse.
NASA	: National Aeronautics and Space Administration.
NFTSM	: Nonsingular Fast Terminal Sliding Mode.
NL	: Non Linéaire.
PD	: Proportional – Derivative.
PEB	: Position Error Based.
PID	: Proportional – Integral – Derivative.
PUMA	: Programmable Universal Machine for Assembly.
RBFNN	: Radial Basis Function Neural Network.
RNA	: Réseau de Neurone Artificiel.
ROV	: Remotely Operated Vehicle.
TCP	: Transmission Control Protocol.
TME	: Télémanipulateur Maître-Esclave.
UDP	: User Datagram Protocol.
USTHB	: Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene.

Table des matières

Remerciements	I
Résumé	II
Production scientifique	III
Liste des abréviations	IV
Introduction Générale	1
1. Présentation des systèmes de téléopération	6
1.1 Introduction	6
1.2 Début de la téléopération	6
1.3 La téléopération	8
1.4 La télérobotique	8
1.5 La téléprésence	9
1.6 La réalité virtuelle et la téléopération	9
1.7 L'haptique et la téléopération	10
1.8 Les types de système de téléopération	10
1.9 Structure Générale d'un système de téléopération	11
1.10 Caractéristique d'un système de téléopération bilatérale	13
1.10.1 La stabilité	13
1.10.2 La transparence	14
1.10.3 Le compromis transparence / stabilité	15
1.11 Les principales contraintes liées à la téléopération	15
1.12 Applications	16
1.12.1 Domaine médical	16
1.12.2 Domaine spatial	17
1.12.3 Le monde sous-marin	19
1.12.4 Le monde nucléaire	20
1.13 Conclusion	20
2. Etat de l'art sur les architectures de téléopération	22
2.1 Introduction	22
2.2 Modélisation du système de téléopération	22
2.2.1 Modèle du comportement de l'opérateur humain	22
2.2.2 Modèle de l'environnement	23
2.2.3 Modélisation des manipulateurs maître et esclave	24

2.2.1	Modèle de TME	24
2.3	Outils d'évaluation des performances et de la stabilité	26
2.3.1	Performance du système de téléopération	26
2.3.1.1	Inertie et amortissement perçus	26
2.3.1.2	Rigidité perçue	27
2.3.1.3	Glissement	27
2.3.1.4	Suivi de trajectoire	27
2.3.1.5	Les erreurs de suivi	28
2.3.1.6	La bande passante	28
2.3.1.7	L'impédance transmise	29
2.3.1.8	La transparence	30
2.3.2	Stabilité du système de téléopération	32
2.3.2.1	La stabilité avec des modèles connus de l'opérateur et de l'environnement	32
2.3.2.2	La stabilité avec des modèles inconnus de l'opérateur et de l'environnement	33
Méthodes issues de la passivité.....		33
2.4	Architectures de commande bilatérales des systèmes de téléopération	36
2.4.1	Architecture à quatre canaux	36
2.4.2	Architectures à trois canaux	39
2.4.2.1	Compensation de la force de l'environnement	39
2.4.2.2	Compensation de la force de l'opérateur	40
2.4.3	Architectures à deux canaux	40
2.4.3.1	Architecture Position-Position	40
2.4.3.2	Architecture Force-Force	42
2.4.3.3	Architecture Force-Position	44
2.4.3.4	Architecture Position-Force	44
2.4.4	Commande basée sur les variables d'ondes	45
Combinaison avec une architecture à 4-Canaux		47
2.4.5	Commande par mode glissant	48
2.4.6	Approche de commande prédictive.....	51
2.4.7	Approche de commande adaptative	54
2.5	Conclusion	56
3.	Structures de commande bilatérales adaptatives et intelligentes à quatre canaux.....	57
3.1	Introduction	57
3.2	Description des modèles mathématiques des robots maître et esclave	59

3.2.1 Le robot esclave	59
A. Modèle géométrique direct	60
B. Modèle géométrique inverse	60
C. Modèle cinématique direct du premier et du second ordre	60
D. Modèle cinématique inverse du premier et du second ordre	61
E. Modèle dynamique	62
3.2.2 Le robot maître	63
3.3 Architecture de la commande à 4-Canaux	63
3.3.1 Approche de commande bilatérale adaptative et intelligente basée sur une structure parallèle force/position	64
A. Loi de commande force/impédance du robot maître	64
B. Loi de commande dynamique parallèle force/position du robot esclave	65
C. Définition de la tâche	66
D. Résultats de simulation	67
Interprétation des résultats	67
E. Identification de l'impédance variable de l'environnement	72
F. Résultats de simulation	76
Interprétation des résultats	76
G. Compensation des effets des incertitudes et de perturbations avec un contrôleur neuronal	79
G.1. Généralités sur les réseaux de neurones artificiels	79
G.1.1. Neurone biologique	79
G.1.2. Neurone formel	79
G.2. Quelques types de RNAs	80
G.2.1. Réseau de neurones non bouclés	80
G.2.2. Réseau de neurones bouclés (récurrente)	81
G.3. Algorithmes d'apprentissage	81
G.3.1. Apprentissage supervisé.....	82
G.3.2. Apprentissage non supervisé	82
G.3.3. Apprentissage par renforcement.....	82
G.4. Compensateur neuronal à base de l'algorithme de rétropropagation du gradient	82
H. Résultats de simulation	85
Interprétation des résultats	87
3.3.2 Approche de commande adaptative et intelligente en force externe du robot esclave	88

A. Résultats de simulation	90
Interprétation des résultats	90
3.4 Conclusion	92
4. Structure de commande bilatérale adaptative et intelligente à trois-canaux	94
4.1 Introduction	94
4.2 Description et modélisation du système télérobotisé	95
A. Modélisation de l'être humain	95
B. Le robot maître	96
C. Le robot esclave	98
D. Le modèle de l'environnement	98
E. Canal de communication	98
4.3 Mappage de l'espace de travail	99
Génération de l'espace de travail approximatif	100
4.4 Approche de commande adaptative et intelligente en admittance	102
4.4.1 Le contrôleur maître	102
4.4.2 Le contrôleur esclave	105
A. Le modèle d'admittance adaptatif	105
B. Le filtre de butterworth et fonction de limites	105
C. Estimation en ligne de l'environnement	108
4.5 Expérience de "HUMAN IN THE LOOP"	108
Interprétation des résultats	110
4.6 Conclusion	116
Conclusion générale.....	117
Bibliographie.....	120
Annexes	127

Table des figures

1.1 Schéma bilatéral de téléopération maître/esclave	11
1.2 Continuum de contrôle de la téléopération.....	11
1.3 Les composants de système de téléopération.....	13
1.4 Le robot téléopéré Da Vinci	16
1.5 La mission « Mars Exploration Rovers » avec les deux robots jumeaux Spirit et Opportunity	17
1.6 Le système Zeus	17
1.7 Satellite d'Essai d'Ingénierie (ETS-VII)	19
1.8 Engin sous-marine Victor 6000	19
1.9 Démantèlement d'une installation nucléaire à l'aide d'un bras téléopéré	20
2.1 Représentation sous forme de quadripôle d'un système de téléopération	25
2.2 Analyse de la puissance fournie par un élément à un port	34
2.3 Architecture bilatérale à quatre canaux	37
2.4 Schémas de principe 3-canaux	39
2.5 Architecture de la commande bilatérale PEB	41
2.6 Architectures de la commande bilatérale (a) FEB ; (b) DFR	43
2.7 Structure à variables d'onde.....	45
2.8 Architecture 4-CH appliquant la transmission d'ondes	47
2.9 Schéma bloc de la stratégie de commande par mode glissant	43
2.7 Structure à variables d'onde.....	45
2.8 Architecture 4-CH appliquant la transmission d'ondes	47
2.9 Architecture 4-CH appliquant la transmission d'ondes	47
2.9 Schéma bloc de la stratégie de commande par mode glissant	49
2.10 Les propriétés de stabilité de l'approche prédictive en fonction des paramètres K_e et B_e ..	53
3.1 Géométrie du robot PUMA560	59
3.2 Architecture à quatre canaux	63
3.3 Structure de la commande en force / impédance	65
3.4 Structure dynamique de la commande parallèle force/position	65
3.5 Le profil de l'effort appliqué et le panneau de paramétrage de la tâche	67
3.6 Suivi de la position et de la force appliquée selon les directions X,Z pour $K_e=2000$ N/m	68
3.7 Suivi de la position et de la force appliquée selon les directions X,Y et Z pour $K_e=2000$ N/m	69

3.8 Suivi de la position et de la force appliquée selon les directions X,Y et Z pour $K_e=10000$ N/m	69
3.9 Suivi de la position et de la force appliquée selon les directions X,Y et Z pour $K_e=20000$ N/m	70
3.10 Bruit de capteur de force	71
3.11 Suivi de la position et de la force dans le cas d'un environnement variable $K_e=6000$ N/m .	71
3.12 Suivi de la position et de la force dans le cas d'un environnement variable $K_e=12000$ N/m	72
3.13 Stratégie d'identification et l'ajustement du contrôleur	73
3.14 Schéma de la commande adaptative parallèle force/position utilisant la méthode MCR-FO	76
3.15 Identification de la raideur réelle ; cas (A)	77
3.16 Suivi de la position et de la force avec l'estimateur de MCR-FO ; cas (A)	77
3.17 Identification de la raideur réelle ; cas (B)	77
3.18 Suivi de la position et de la force avec l'estimateur de MCR-FO ; cas (B)	78
3.19 Neurone biologique	79
3.20 Modèle d'un neurone formel	80
3.21 Exemple d'un RNA non bouclé	81
3.22 Exemple d'un RNA bouclé	81
3.23 Architecture du RNA	84
3.24 Schéma de la commande adaptative et intelligente parallèle force/position du robot esclave utilisant la méthode MCR-FO et le compensateur neuronal	85
3.25 Identification de la raideur réelle ; cas (A)	86
3.26 Suivi de la position et de la force avec l'estimateur de MCR-FO et le compensateur neuronal ; cas (A)	86
3.27 Identification de la raideur réelle ; cas (B)	87
3.28 Suivi de la position et de la force avec l'estimateur de MCR-FO et le compensateur neuronal ; cas (B)	87
3.29 Schéma de la commande adaptative et intelligente du robot esclave basé sur la structure de commande en effort externe combinée à l'estimateur MCR-FO et le CN	90
3.30 Identification de la raideur réelle ; cas (A)	91
3.31 Suivi de la position et de la force avec l'estimateur de MCR-FO et le compensateur neuronal ; cas (A) .	91
3.32 Identification de la raideur réelle ; cas (B)	92
3.33 Suivi de la position et de la force avec l'estimateur de MCR-FO et le compensateur neuronal ; cas (B) .	92
4.1 Architecture à trois canaux	94

4.2 Système maître-esclave	95
4.3 La posture initiale d'Omni	96
4.4 Environnement ressort-amortisseur	98
4.5 (a) le référentiel de base de l'OMNI et PUMA 560, (b) le référentiel unifié	100
4.6 Mappage de l'espace de travail, la couleur rouge indique l'OMNI, tandis que la couleur bleue Indique le PUMA560.....	101
4.7 Structure de commande de l'ensemble du système téléopéré	102
4.8 Diagramme de Bode du filtre de butterworth implémenté.....	106
4.9 Scène virtuelle du côté esclave	109
4.10 Résultats sans perturbations.....	111
4.11 Résultats avec perturbations ; Sous-ensemble (A)	112
4.11 Résultats avec perturbations ; Sous-ensemble (B)	113
4.11 Résultats avec perturbations ; Sous-ensemble (C)	114

Introduction générale

Introduction générale

La téléopération se réfère à une "opération à distance", bien que le terme "opération" puisse signifier à peu près tout ce que l'on a besoin à faire. Le terme "à distance" peut représenter un éloignement physique où le robot maître est séparé du robot esclave par une grande distance, mais il peut également se référer à un changement d'échelle, par exemple pour interagir avec une petite zone comme une cavité du corps humain afin d'améliorer les performances chirurgicales en termes d'opérations moins invasives et de positions plus confortables. Aujourd'hui, les systèmes de téléopération trouvent des applications dans de nombreux domaines, notamment les technologies spatiales, l'exploration sous-marine, la manipulation des déchets nucléaires et toxiques, la chirurgie et, plus récemment, la formation et la réalité virtuelle [1,2,3].

En général, les systèmes de téléopération sont composés de cinq entités : l'opérateur, l'interface haptique (maître), le canal de communication, l'esclave et l'environnement [4]. L'opérateur interagit avec l'interface haptique, qui envoie différents signaux de commande par le canal de communication au robot suiveur pour reproduire la même interaction dans l'environnement. À leur tour, les signaux du robot suiveur, tels que la position, la vitesse, la force, la vidéo et la voix, sont renvoyés au maître afin d'améliorer les performances. C'est précisément pour cette raison que l'on parle de téléopération bilatérale.

Les systèmes de commande de téléopération sont conçus pour être stables et transparents. L'architecture de commande à quatre canaux, proposé pour la première fois par Lawrence [5], offre une transparence parfaite dans des conditions idéales et des compromis avec une stabilité robuste en cas de retard de communication.

Les travaux de Hashtrudi-Zaad et Salcudean [6] ont évalué l'effet du retour de force local et révisé les conditions idéales de transparence. Une analyse globale de la transparence de l'architecture de Lawrence étendue (ELA) est fournie dans [7]. Dans [8], une architecture Force-Position à deux canaux, avec régulation de la compliance a été proposée pour assurer la stabilité dans différents modes et avec une faible erreur de position.

Cependant, dans un système de téléopération, la connaissance parfaite de la dynamique du maître et de l'esclave peut ne pas être disponible en raison des incertitudes des modèles. En outre, en raison des délais existants dans le canal de communication et des perturbations dues

principalement aux caractéristiques inconnues de l'environnement, la stabilité et la transparence sont considérablement compromises [9].

Pour résoudre le problème du délai, certains chercheurs ont proposé des techniques de passivité et des contrôleurs robustes pour des délais inférieurs à quelques secondes, le premier travail résolvant ce problème est apparu en 1989. Anderson et Spong [10] ont proposé une nouvelle architecture de communication basée sur la théorie de la diffusion, qui garantit une ligne de transmission passive et sans perte pour un délai constant et un système linéaire invariant dans le temps. Neimeyer et Slotine [11] ont étendu la méthode de diffusion et introduit des variables d'onde, qui sont également basées sur le formalisme de passivité pour assurer la conservation de l'énergie et la stabilité du support de communication. Toutefois, ces méthodes traditionnelles axées uniquement sur la stabilité du système peuvent entraîner un important problème de distorsion du signal entre le maître et l'esclave. Pour résoudre ce problème, de nombreux chercheurs tentent actuellement de modifier l'architecture à ondes variables afin d'améliorer la transparence du système de téléopération [12-14].

Une autre solution pour un meilleur compromis entre la stabilité, la robustesse et les performances est l'utilisation de contrôleurs adaptatifs. Ce type de conception de commande est déployé pour traiter les incertitudes dans le modèle maître/esclave et la dynamique de l'opérateur, et convient également aux situations où la dynamique de l'environnement n'est pas structurée ou varie dans le temps [17].

En considérant des modèles non linéaires pour le maître et l'esclave, Ryu et Kwon ont supposé qu'il y avait des incertitudes dans les deux robots. En outre, en ignorant les incertitudes de l'opérateur et de l'environnement dans les lois d'adaptation, les performances de suivi de position et de force ont été atteintes [18]. Chopra et al. ont proposé un contrôleur adaptatif qui assure la synchronisation des positions et des vitesses locales et distantes en présence d'un délai [19]. En revanche, dans [20, 21], les auteurs ont développé un schéma adaptatif séparé qui prend en compte les modèles non linéaires incertains des robots et les modèles linéaires paramétriques incertains de l'opérateur et de l'environnement.

D'autres stratégies de commande adaptative sont développées dans la littérature, Love et al. ont proposé un contrôleur adaptatif d'impédance utilisant la méthode d'identification des moindres carrés récurrents (MCR) pour réduire l'énergie de l'opérateur afin d'assurer la stabilité, en se basant sur l'impédance estimée [22]. Dans [23], les auteurs ont proposé un schéma de commande adaptative à quatre canaux pour le suivi de la force et de la position basé sur

l'approche de la dynamique inverse, dans l'hypothèse d'une dynamique incertaine des deux robots, de l'opérateur et de l'environnement, et sans tenir compte d'un quelconque délai de communication.

Selon la théorie de Lyapunov, un contrôleur adaptatif à commutation est conçu pour faire face aux saturations d'entrée et aux modèles non homogènes de l'opérateur humain et de l'environnement [24]. Wang et al. ont mis au point un contrôleur neuronal adaptatif utilisant les capacités d'approximation d'un réseau neuronal à fonction de base radiale pour traiter les incertitudes en jeu [25]. Park et Lee ont appliqué une commande floue adaptative et un nouveau mappage de l'espace de travail pour améliorer les performances de suivi sur la trajectoire discontinue résultant de la transformation de l'espace de travail [26]. Dans [27], les auteurs ont proposé des techniques neuro-floues adaptatives pour améliorer les performances de la téléopération dans l'hypothèse d'incertitudes dynamiques du système du maître et de l'esclave.

L'objectif recherché dans ce travail de thèse est d'apporter des solutions en commande des deux parties maître et esclave, permettant d'augmenter la qualité du geste de l'opérateur, en améliorant sa perception au travers un retour des efforts, appliqués à l'environnement distant, et/ou la position même si on est en présence des incertitudes structurés et non structurés sur les robots utilisés, des incertitudes sur l'environnement distant (position et raideur) et certains retards de transmission.

Afin de mettre en œuvre des lois de commande bilatérales robustes et leur implémentation sur un système réel, l'emploi des approches de commandes avancées, devient impératif. Ces approches de commandes devront tenir compte de :

- La modélisation du système maître/esclave réel
- Choix de l'interface haptique du site maître
- Des effets et la nature du retard de transmission vis-à-vis de l'application réelle.
- La nature de l'environnement du site esclave.

Notre contribution dans ce travail de recherche réside dans la proposition de trois nouvelles structures de commande bilatérales adaptatives et intelligentes pour améliorer les performances en suivi de trajectoires et de forces appliquées par des robots distants sur des environnements complexes, toute en considérant que le délai de communication est négligeable. Ces structures sont conçues pour tenir compte des incertitudes dans les modèles des robots maître et esclave, de la dynamique inconnue et variable de l'environnement, de la mauvaise qualité des signaux

issus des capteurs de force et de l'asymétrie des robots maître et esclave qui impliquent le problème de l'échelle différente et du mappage de l'espace de travail.

Ce manuscrit est subdivisé en quatre chapitres, une annexe et une bibliographie. Il est présenté comme suit :

Dans le premier chapitre, nous débuterons par présenter un bref historique qui résume les origines de la téléopération et la terminologie courante utilisée pour décrire ces systèmes. Ensuite, nous décrivons les différentes composantes de système de téléopération, ainsi que les aspects fondamentaux à prendre en compte lors de la mise en œuvre d'un contrôleur de système de téléopération. Notamment, nous aborderons le compromis stabilité-transparence inhérent aux systèmes de téléopération bilatérales. A la fin, nous donnerons quelques applications de ces systèmes.

Le chapitre 2 présente un état de l'art non exhaustif sur la commande bilatérale des systèmes de téléopération. Nous allons d'abord exposer les notions théoriques et pratiques indispensables à la compréhension des travaux présentés dans la littérature et dans le présent travail. Dans cette étude, nous définirons d'abord le modèle du système de téléopération bilatérale. Ensuite, nous examinerons les méthodes d'analyse de la stabilité et de mesure de la performance de ces systèmes. Enfin, nous explorons un éventail de schémas de commande existants pour la téléopération bilatérale.

Le chapitre 3 est consacré à la proposition de deux nouvelles structures de commande bilatérales adaptatives et intelligentes d'un système de téléopération basées sur une architecture à 4-canaux. Dans cette étude, nous allons concevoir le premier schéma qui sera basé sur une approche de commande adaptative et intelligente parallèle force/position. Le second schéma que nous aurons développé se base aussi sur l'approche de commande adaptative et intelligente mais qui utilise cette fois-ci une structure de commande hiérarchique force/position (structure de commande en effort externe). Dans ces deux approches, nous allons intégrer une première technique d'estimation en ligne de l'environnement basée sur la méthode des moindres carrés récurrents à facteur d'oubli pour estimer les caractéristiques de raideur inconnues de l'environnement et extraire le bruit généré par les capteurs de force, supposés de mauvaise qualité, installés sur le terminal de l'effecteur, tandis qu'une deuxième technique de compensation neuronale est appliquée pour éliminer les effets des incertitudes dans le modèle dynamique du robot esclave. Afin de tester la validité des schémas de commande proposés, des

simulations sous l'environnement LabVIEW seront effectuées et analysées à la fin de chaque phase de ce chapitre.

Le dernier chapitre sera dédié au développement d'une troisième structure de commande adaptative et intelligente en admittance qui se base sur une architecture à trois canaux. Nous entamons l'étude par la formulation mathématique du système de téléopération non linéaire à N degrés de liberté (DDL). Dans une étape subséquente, nous exposons en détail la méthodologie de mappage de l'espace de travail pour l'interface maître Omni PHANTOM par rapport au robot PUMA560. Par la suite, nous procéderons au développement des lois de commande appliquées pour l'interface maître et le robot esclave. Cette étape impliquera l'utilisation d'une technique d'estimation de MCR-FO, d'un filtre de Butterworth et de fonction de limitation pour éliminer les irrégularités à la sortie du modèle d'une part, et un contrôleur basé sur les réseaux de neurones artificiels pour compenser l'effet des incertitudes sur les modèles des robots utilisés de l'autre part.

Enfin, pour démontrer l'efficacité de schéma de commande proposé, nous exposons les résultats d'une expérience "HUMAN IN THE LOOP" réalisée dans l'environnement MATLAB, utilisant une interface Omni réelle et un robot PUMA560 virtuel.

Enfin, nous terminons ce travail de recherche par une conclusion générale et quelques perspectives. Une annexe et une liste de références bibliographiques sont également fournies pour aider le lecteur à bien se servir de ce travail.

CHAPITRE 1

Présentation des systèmes de téléopération

1.1 Introduction

Les êtres humains ont une capacité remarquable à manipuler des objets avec leurs mains. Ce haut niveau de dextérité est obtenu grâce à des mécanismes sensorimoteurs complexes utilisant des informations visuelles et tactiles ainsi que la structure physique de la main. Grâce à ces capacités, les humains peuvent moduler les forces de préhension, positionner des objets avec précision et détecter des caractéristiques de surface fines. Il suffit de penser à la facilité avec laquelle on peut visser une ampoule électrique. Cette action nécessite une préhension délicate pour éviter la casse, ainsi qu'un contrôle minutieux de la force d'insertion et de la position pour engager les filets. Les êtres humains sont également capables de faire face facilement aux incertitudes de l'environnement ou de s'adapter à ses changements.

Dans certaines situations, les robots sont mieux adaptés que leurs homologues humains. Par exemple, les robots utilisés dans les usines automobiles peuvent assembler des composants avec plus de rapidité, de précision et d'endurance qu'un travailleur humain. Les robots peuvent également être utilisés dans des environnements dangereux pour l'homme (par exemple, les sites radioactifs) ou difficiles d'accès (par exemple, les profondeurs sous-marines ou l'espace) ou qui ne sont pas à l'échelle humaine (par exemple, la microchirurgie). Aujourd'hui, le fonctionnement autonome des robots n'est pratique que lorsque l'environnement est très structuré (par exemple, l'automatisation des usines). Il est extrêmement difficile de programmer des systèmes robotiques pour exécuter des tâches de manière autonome dans des environnements non structurés. Même dans les environnements structurés, les robots sont relégués à des manipulations relativement simples impliquant le contrôle de la force et du mouvement du bras et du poignet du robot. La manipulation dextrogyre, dans laquelle les mouvements et forces fins sont transmis par le bout des doigts, reste un sujet de recherche.

1.2 Début de la téléopération

L'histoire de la téléopération a commencé après la première guerre mondiale comme un besoin impératif de protection contre les effets nocifs des rayonnements des produits radioactifs. La première solution au problème d'irradiation consistait à manipuler les objets contaminés avec des pinces plus ou moins longues. La manipulation de sources de plus en plus puissantes obligeait à placer des matériaux de protection entre l'opérateur et l'objet : blindage, vitres épaisses. Mais ce type d'outil demande une certaine dextérité de la part de l'opérateur (notamment du fait de l'inversion du mouvement).

En 1948, Goertz et son équipe de **l'Argonne National Laboratory** ont construit le premier système de téléopération à liaison mécanique. Ce nouveau système a permis à l'utilisateur de transmettre des mouvements plus naturels et a fourni un retour haptique de l'environnement distant [28]. Cependant, les systèmes à liaison mécanique ne peuvent être opérationnels que sur une distance limitée, ce qui a conduit Goertz à reconnaître la valeur des manipulateurs à couplage électrique et à jeter les bases du domaine moderne de la télérobotique [29].

En 1965, Ferrel a démontré l'instabilité d'un télémanipulateur opéré via une commande bilatérale en présence de délai de transmission de l'ordre de 0,1s [30]. En 1981, Vertut réussit à stabiliser le téléopérateur opéré dans [30] par une diminution de la bande passante des signaux échangés entre le maître et l'esclave au prix de vitesses limitées à 10 cm/s [31]. En filtrant ces signaux, il évitait ainsi que le système ne s'accroche sur des fréquences de résonance rendant le système instable.

De nombreuses solutions ont été développées dans les décennies suivantes, tels que le modèle **M2 du Central Research Laboratory** (1982), qui était le premier système télérobotique comprenant un retour d'effort avec une électronique séparée pour le robot maître et le robot distant, et qui a été utilisé pour différentes tâches de démonstration dans des applications militaires, spatiales et nucléaires [32].

Dans les années 1980 et 1990, les travaux liés au nucléaire ont décliné et l'intérêt s'est déplacé vers d'autres domaines tels que la robotique spatiale, médicale et sous-marine, ce qui a également été facilité par la puissance accrue des ordinateurs et le développement de dispositifs haptiques tels que le dispositif PHANToM [33]. En 2001, la première téléchirurgie transatlantique a été réalisée avec le patient à Strasbourg, et le chirurgien à New York, en s'appuyant uniquement sur un retour visuel [34]. Cette expérience réussie a montré les nombreux avantages de la téléchirurgie, de la suppression des contraintes géographiques à l'accès aux soins de santé, les patients des communautés moins avancées ou dans une situation urgente devant bénéficier d'interventions chirurgicales par un chirurgien expérimenté.

Jusqu'à nos jours, l'utilisation des ordinateurs, l'avènement de l'Internet et des technologies de communication modernes ont permis aux chercheurs de se concentrer sur le développement des commandes bilatérales avancées [35,14,36], afin de satisfaire les besoins de cahier de charge des systèmes de plus en plus performants dans divers fonctions : le dépannage de satellite, l'exploration de volcans ,le déminage, l'aide aux personnes handicapées (avec, par exemple les fauteuils roulants intelligents...etc.).

1.3 La téléopération

Une alternative pratique à la manipulation dextre autonome est la télémanipulation dextre. La téléopération permet aux opérateurs humains de voir, toucher et sentir des objets à distance. Dans la téléopération, un véhicule, une machine ou un robot distant est contrôlé par un humain et interagit avec un environnement tout en relayant des informations à l'humain. En d'autres termes, un système téléopéré étend la capacité de détection et/ou de manipulation d'une personne à un endroit éloigné [37]. En ayant l'humain "dans la boucle", le système bénéficie des capacités humaines naturelles en matière de raisonnement spatial, de planification des tâches et d'adaptation, ce qui réduit la complexité par rapport à un système purement autonome. En outre, les systèmes de téléopération peuvent permettre d'accéder à des environnements hostiles, dangereux ou difficiles d'accès. De cette façon, la téléopération représente un moyen terme entre la tâche à exécuter et l'être humain.

1.4 La télérobotique

La télérobotique est une forme de téléopération qui permet la commande à distance de robots situés à des endroits éloignés de leur opérateur. La télérobotique est en fait le résultat de la fusion des deux domaines initialement séparés qui sont la téléopération et la robotique. En effet, la robotique autonome n'étant pas encore tout à fait au point, le robot doit présentement être opéré à distance par un opérateur humain. On doit donc tenir compte des principes développés en téléopération. Cependant, comme le robot peut exécuter des tâches élémentaires de façon autonome, on parle de télérobotique plutôt que de téléopération.

La condition principale de développement de la télérobotique est sa capacité à concurrencer l'intervention directe d'un homme ou l'utilisation d'un système robotique très spécialisé. Dans le premier cas, l'atout de la télérobotique est tout d'abord le remplacement d'un travail humain pénible ou dangereux par un autre, plus sûr et confortable. Dans le second cas il faut montrer l'intérêt d'un matériel plus versatile que le système automatique dédié à l'application envisagée.

Pour répondre à la question pourquoi la télérobotique, Sheridan du MIT [37] fournit les raisons suivantes :

- Pour améliorer la performance et la fiabilité dans l'accomplissement des tâches,
- Pour améliorer la sécurité de l'opérateur,
- Pour réduire le travail humain.

1.5 La téléprésence

De multiples systèmes de télémanipulation actuels reposent essentiellement sur le retour visuel et sûr des opérateurs expérimentés. Le sentiment de téléprésence procuré à l'opérateur peut être grandement amélioré par l'ajout d'un retour de force (ou haptique) qui se réfère généralement à l'application d'une force et/ou de stimulations tactiles à un opérateur par un moyen mécanique. La téléprésence signifie que l'opérateur reçoit suffisamment d'informations de l'environnement distant, affichées d'une manière suffisamment naturelle, pour qu'il se sente physiquement présent sur le site distant [37].

1.6 La réalité virtuelle et la téléopération

Dans les années 1950, de laboratoires de NASA et studios de cinéma ont commencé des recherches sur la réalité virtuelle. Le mot n'a commencé à être populaire que ces dernières décennies. De multiples définitions sont proposées afin de cerner le champ d'application de la Réalité Virtuelle, et ce en raison des nombreuses contraintes qu'elle rencontre. Cependant, aucun consensus universel n'a été atteint à cet égard. Nous avons cependant retenu deux interprétations qui représentent convenablement le domaine de la RV.

Définition fonctionnelle de la RV : La réalité virtuelle va permettre de s'extraire de la réalité physique pour changer virtuellement de temps, de lieu et(ou) de type d'interaction : interaction avec un environnement simulant la réalité ou interaction avec un monde imaginaire ou symbolique [38].

Définition technique de la RV : La réalité virtuelle est un domaine scientifique et technique exploitant l'informatique et des interfaces comportementales en vue de simuler dans un monde virtuel le comportement d'entités 3D, qui sont en interaction en temps réel entre elles et avec un ou des utilisateurs en immersion pseudo-naturelle par l'intermédiaire de canaux sensori-moteurs [38].

Les techniques de RV en télérobotique sont susceptibles de remplir deux fonctions. La première est la simulation, qui permet à l'utilisateur de s'entraîner (à manipuler le robot) et de programmer des tâches que le robot pourrait exécuter ultérieurement. La deuxième fonction est de servir d'interface entre l'opérateur et le robot au cours d'une mission, par laquelle l'opérateur peut manipuler le robot et l'assister.

1.7 L'haptique et la téléopération

La définition générale de l'haptique se réfère au sens du toucher de l'être humain. En utilisant les récepteurs kinesthésiques (force/position) et cutanés (tactile), les humains sont capables de percevoir, d'interagir et de manipuler les objets qui les entourent. Des exemples simples de la vie quotidienne démontrent l'importance de ce sens, par exemple pour écrire, essayer d'atteindre un objet dans l'obscurité ou boutonner une chemise. Néanmoins, même des tâches plus élémentaires ne pourraient être accomplies sans informations haptiques. Par exemple, les êtres humains ne seraient pas capables de marcher, de bouger leurs membres ou de saisir des objets même en plein jour sans les sensations cutanées sous leurs pieds ou au bout de leurs doigts. Dans la littérature sur la robotique et la réalité virtuelle, l'haptique est définie comme les diverses combinaisons d'interactions kinesthésiques ou tactiles réelles et simulées entre les robots, les humains et les environnements réels, distants ou simulés. Ces interactions sont rendues possibles par des interfaces haptiques, qui permettent aux opérateurs humains d'expérimenter le sens du toucher dans des environnements distants (téléopérés) ou simulés (virtuels) [39].

1.8 Les types de système de téléopération

En général, les systèmes de téléopération sont classés en deux catégories : la téléopération unilatérale et la téléopération bilatérale. Tout d'abord, dans la téléopération unilatérale, l'opérateur humain commande le robot esclave sans feedback de la part de l'esclave vers le maître, autrement dit, l'opérateur humain est découplé du système global, et l'impédance de l'opérateur ne peut pas affecter les performances du système [40]. La téléopération unilatérale est plus stable et plus facile à mettre en œuvre que la téléopération bilatérale.

Dans la plupart des cas, en téléopération unilatérale, le système esclave dispose d'un système de commande local en boucle fermée pour assurer le bon fonctionnement du système. Des stratégies de commande de supervision peuvent être utilisées dans la conception, auquel cas un opérateur humain agit en tant que superviseur et confère plus "d'intelligence" au robot esclave distant pour accomplir des tâches de manière autonome [41]. Cependant, comme d'autres méthodes, la commande de supervision dans le cas unilatéral ne peut assurer que des performances limitées du système (suivi de position et de vitesse) sans transmission d'informations de l'esclave vers le maître, ce qui limite l'application de la téléopération unilatérale.

En revanche, nous utilisons le terme de téléopération bilatérale (ou directe) pour décrire un système où la force et/ou les mouvements de l'esclave sont contrôlés en continu par l'opérateur, qui reçoit en permanence un retour d'information de la part du robot distant [42], [43]. Cette information de retour permet à l'opérateur de mieux percevoir l'environnement distant, notamment lors de la manipulation d'objets de masses différentes. Bien que la téléopération bilatérale améliore la téléprésence, la stabilité du système est compromise lorsqu'il y a un retard sur le support de communication reliant le robot distant de l'interface maître. Cela fait des années que l'on sait qu'un retard, même minime, peut entraîner une instabilité lors d'une téléopération bilatérale [30].

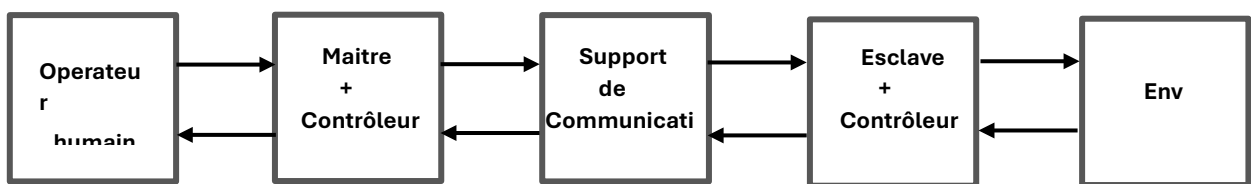


Figure 1.1 : Schéma bilatéral de téléopération maître/esclave.

La commande partagée se situe entre la commande de supervision et la commande bilatérale dans le sens où l'homme a la capacité de commander et de recevoir un retour d'information du robot distant à un niveau bas, tout en conservant la capacité de fournir des commandes à un niveau élevé (voir Figure 1-2). Dans ce mode de commande, l'opérateur humain peut intervenir dans une tâche autonome exécutée par le robot et le robot peut augmenter les commandes directes générées par l'opérateur [44].



Figure 1.2 : Continuum de commande de la téléopération.

1.9 Structure Générale d'un système de téléopération

Un système de téléopération actuel peut intégrer des composants technologiques très variés : des interfaces haptiques sophistiquées (exosquelettes), des robots avec une certaine capacité de décision, des techniques de visualisation avancées (réalité virtuelle) et divers outils (schémas de commande partagée, planification). Le système de téléopération peut être divisé en cinq

composants principaux, y compris l'opérateur humain, le maître, l'esclave, le canal de communication et l'environnement distant, comme illustré à la Figure 1.3

- ✚ **Opérateur humain** : il exécute une tâche précise à distance. Ses gestes sont transmis par l'ensemble du dispositif de téléopération pour atteindre le site en question. Cet opérateur perçoit en contrepartie un retour d'effort représentant les interactions avec l'environnement distant. Il peut également recevoir, selon l'application, un retour visuel affiché sur un moniteur vidéo.
- ✚ **Le Maître** : C'est le dispositif physique avec lequel l'opérateur humain interagit. Il est susceptible d'acquérir des informations sur les actions de manipulation désirées, ainsi d'exécuter des lois de commande de type "logiciel" reproduisant au mieux les efforts perçus sur le site distant, et offrant à l'opérateur la meilleure perception des sensations représentant les interactions avec l'environnement. Le maître peut être constitué de différentes unités hardware, telles qu'un affichage visuel, une unité auditive, des dispositifs tactiles, des joysticks ou des consoles. Pour les systèmes de téléopération bilatérales, le maître comprend une interface haptique, qui est un dispositif actif, capable d'exercer des forces sur l'opérateur humain.
- ✚ **Canal de communication** : C'est le support qui assure la transmission des informations et le couplage des deux sites de télémanipulation. L'échange d'informations peut se faire par câble, par radio ou même par satellite, selon l'emplacement physique des deux sites, le matériel disponible et les exigences de la tâche. Le canal de communication peut être source de retards, de limitations de la bande passante ou de pertes d'informations en conséquence du bruit de la communication.
- ✚ **L'esclave** : C'est le dispositif robotique chargé de l'interaction physique avec l'environnement (distant), donc il imite le comportement de l'utilisateur à distance et exécute la tâche requise. Ce dispositif peut être équipé de capteurs pour acquérir des informations utiles sur l'évolution de la tâche et les renvoyer au maître. Et cela, à travers l'exécution des lois de commande de type "logiciel" permettant de calculer les couples/efforts nécessaires à réaliser et suivre les consignes et les mouvements imposés par le maître et contraints par l'environnement. En outre, il doit être le plus robuste possible par exemple par rapport au retard de transmission, des incertitudes liés au robot ou encore par rapport aux caractéristiques de l'environnement distant.
- ✚ **Environnement distant** : L'environnement est lointain dans le sens où il est le plus souvent difficile d'y accéder directement. L'obstacle peut être une distance (par ex. applications

spatiales, sous-marines, chirurgie endoscopie), un environnement hasardeux (par ex. les centrales nucléaires), ou même une différence d'échelle (par ex. la micromanipulation). L'environnement est formé de différents objets avec lesquels il est en mesure d'interagir. Sur le plan physique, c'est le robot esclave qui manipule ces objets en réponse aux demandes de l'opérateur. Ces objets peuvent être a priori connus ou structurés (par ex. pendant l'assemblage) ou être inconnus et non structurés (comme pendant la téléchirurgie).

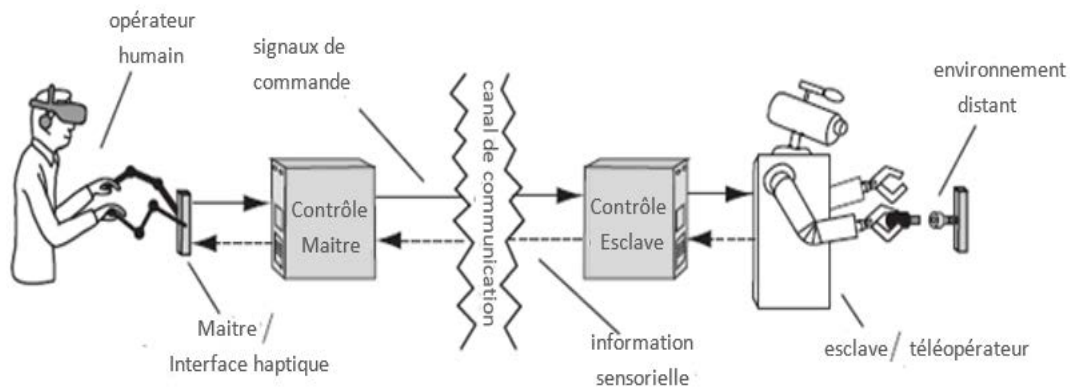


Figure 1.3 : Les composants de système de téléopération.

1.10 Caractéristique d'un système de téléopération bilatérale

En général, un système de téléopération bilatérale peut être caractérisé par deux défis majeurs lors de sa création. Le premier est de préserver la stabilité lorsque l'esclave interagit avec l'environnement. Deuxièmement, dans un système de téléopération parfait, l'opérateur doit être en mesure d'interagir avec le retour confronté comme il est directement préservé de l'environnement distant, ce qui signifie que le système doit être transparent.

1.10.1 La stabilité

Elle se réfère à la capacité du système de téléopération à maintenir des performances adéquates et à réagir de manière appropriée aux entrées externes et aux perturbations.

Pour analyser la stabilité des systèmes de téléopération, différentes définitions de la stabilité ont été proposées. Le premier concept est la stabilité BIBO (bounded input-bounded output). Un système est dit BIBO si chaque entrée limitée produit des sorties limitées quel que soit l'état du système [45]. Un autre concept de stabilité, issu de Lyapunov, est que la sortie et toutes les variables internes ne deviennent jamais non bornées lorsque le temps tend vers l'infini pour des

conditions initiales suffisamment petites. C'est ce qu'on appelle la stabilité interne asymptotique.

La stabilité est généralement évaluée en utilisant la théorie de Lyapunov ou l'analyse de passivité [10, 46]. Ces méthodes peuvent être appliquées aux systèmes linéaires et non linéaires. Pour les systèmes linéaires, on peut également utiliser le critère de Nyquist [5] ou la technique du lieu des racines [47] pour l'analyse de la stabilité.

1.10.2 La transparence

L'analyse des performances peut être évaluée selon différents critères, tels que le temps d'exécution de la tâche [48], l'inertie et la rigidité perçue [49], et la téléprésence [10, 50]. La téléprésence est le critère le plus utilisé, elle est connue sous le mot transparence.

La transparence exprime la capacité du système à transmettre avec fidélité la meilleure perception possible des interactions réalisées entre le manipulateur esclave et l'environnement distant. L'opérateur a alors les mêmes sensations que s'il agissait directement sur l'environnement distant. Ainsi, la boucle de téléopération lui paraît inexistante. Ainsi, la transparence est définie quantitativement comme étant une égalité entre la vitesse et la force du maître avec ceux de l'esclave [50].

$$\forall t : v_s(t) = v_m(t) \quad (1.1)$$

$$f_e(t) = f_h(t)$$

Cependant, dans les applications où une tâche est susceptible d'être exécutée à des échelles différentes, en termes de positions (ou de vitesses), de forces, ou des deux [51], un facteur d'échelle intervient dans la relation de correspondance. Cela a conduit à une autre définition basée sur l'impédance et qui est la plus répandue actuellement dans le milieu de la recherche [5], selon laquelle un système de téléopération est dit transparent si l'impédance transmise par l'opérateur, Z_{to} , est égale à l'impédance de l'environnement Z_e , c'est-à-dire

$$Z_{to} := \frac{F_h}{V_h} \Big|_{F_e^* = 0} = Z_e \quad \forall w \geq 0, Z_e \quad (1.2)$$

Avec, Z_e représente les caractéristiques dynamiques de l'environnement, Z_{to} représente la dynamique que l'opérateur ressent à distance et w représente la pulsation.

1.10.3 Le compromis transparence / stabilité

Dans un système de téléopération, il est souhaitable que le système soit stable et transparent afin d'obtenir une téléopération sécurisée et de haute performance, néanmoins la stabilité et la transparence restent deux objectifs concurrents, plus précisément lorsqu'un retard de transmission existe. Ce retard peut être de l'ordre de la milliseconde, voire de quelques secondes dans les opérations à longue distance.

Le premier travail portant la question du retard a été publié en [30], où le système était opérationnel en boucle ouverte et, par conséquent, aucune instabilité n'a été observée [10]. Les expériences ont conclu que la plupart des opérateurs ont adopté une stratégie "move and wait" pour faire face à l'effet d'un retard important. En 1966 et par la suite, il a été établi qu'un retard même inférieur à 50 (ms) peut déstabiliser les contrôleurs bilatéraux [48, 52]. Dans [5], l'auteur suggère de faire un compromis entre la stabilité et la transparence en ne considérant pas une transparence parfaite mais plutôt une transparence désirée du schéma de téléopération.

1.11 Les principales contraintes liées à la téléopération

Les systèmes de téléopération sont sujets à plusieurs types de contrainte. Il existe de nombreuses variables qui affectent fortement l'efficacité et l'aisance de la réalisation d'une mission téléopérés.

- 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 l'environnement. Ces caractéristiques sont des éléments clés pour l'opérateur, car ce sont elles qui lui facilitent la représentation de la situation et donc la prise de bonne décision.
- Un autre problème lié à la qualité de l'information est le délai de transmission. Ce délai prend en compte le traitement de données et le temps inhérent à leurs transferts. Il a été montré qu'au-delà d'un certain délai il devient difficile pour l'opérateur de contrôler un robot par commande directe.
- D'autre contrainte relative aux robots exploités concerne leurs dynamiques, et leurs prises en compte peuvent être complexes selon les modèles initiaux considérés. Il y a aussi des problèmes émanant de l'environnement qui concerne essentiellement la méconnaissance des caractéristiques de l'objet en contact avec le robot esclave.
- Enfin, le dernier facteur 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. Les capteurs de distance classique (ultrason ou infrarouge) offrent des informations très limitées et peu fiables. L'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.

1.12 Applications

1.12.1 Domaine médical

La téléopération se retrouve dans des applications médicales telles que la téléchirurgie, qui permet l'échange d'expertise médicale à travers le monde sans que le médecin ait à se déplacer. En général, la téléchirurgie permet d'économiser du temps, de l'argent et des efforts en mettant la salle de chirurgie éloignée à la portée du chirurgien. À ce jour, les deux systèmes de chirurgie robotique téléopérés disponibles dans le commerce, l'un étant le système ZEUS de Computer Motion (Goleta, CA, USA), l'autre le système da Vinci d'Intuitive Surgical (Sunnyvale, CA, USA).

Da Vinci (Figure 1.4) est un système qui donne au chirurgien une intuition de mouvement proche de celle des interventions ouvertes. Il est composé d'un bras équipé d'un endoscope stéréoscopique et d'un robot équipé de deux bras d'instrumentation [2]. Ce dernier est subordonné aux deux bras maîtres de la console de commande à partir de laquelle le chirurgien opère à distance. Grâce à l'endoscope stéréoscopique, il est facile de visualiser l'intérieur du patient. En outre, 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.



Figure 1.4 : Le robot téléopéré Da Vinci : (a) Station maître du robot, (b) station esclave avec deux bras porte-outils et un bras porte-endoscope (c) l'ensemble des instruments EndoWrist.

Le concept de téléopération mise en œuvre sur Da Vinci a été développé à l'extrême avec Zeus (Figure 1.5). A la différence qu'il présente quelques singularités. Les bras robotiques sont directement fixés à la table chirurgicale, et cela signifie qu'il présente deux degrés de liberté en moins que le Da Vinci et, donc, qu'il est plus difficilement maniable. En septembre 2001, ce système a fait ses preuves lors de « l'opération Lindbergh » qui a été téléopéré depuis New York en réalisant avec succès une cholécystectomie (ablation de la vésicule biliaire) sur une patiente hospitalisée à Strasbourg. Le délai entre le geste du chirurgien sur la console du maître et le retour visuel des mouvements des manipulateurs a pu être réduit à 150 ms [53].



Figure 1.5 : Le système Zeus : à gauche la console de commande avec les bras maîtres, à droite, les manipulateurs esclaves.

Le domaine d'aide aux personnes handicapées est extrêmement riche de possibilités. De nombreux projets ont été étudiés et mis en œuvre afin d'aider des handicapés à mieux vivre. On peut citer par exemple le projet SPARTACUS et le projet MASTER du CEA (Commissariat de l'énergie atomique) qui ont permis l'automatisation de quelques tâches quotidiennes à partir d'une commande utilisant les mobilités disponibles de l'handicapé. Plusieurs projets ont pour objectif d'embarquer un bras manipulateur sur une base mobile autonome pour donner aux personnes handicapées la possibilité de réaliser seules des tâches de la vie quotidienne, soit dans un environnement proche en vision directe, soit dans un environnement plus lointain en vision indirecte (en mode de téléopération) [54].

1.12.2 Domaine spatial

La technologie de la téléopération est importante pour les applications spatiales où les tâches de maintenance, de réparation et d'exploration dans l'espace sont coûteuses, et mettent la vie en danger lors des missions de longue durée. D'autre part, l'éloignement du site de travail et le temps important de transmission impliquent l'utilisation de robots dotés d'une grande

autonomie. Les délais augmentent et atteignent 6 secondes lorsque l'opération se produit dans l'espace lointain, ou dans l'orbite quand les systèmes sont contrôlés en boucle fermée [55]. Sur la base des différentes tâches, les applications spatiales sont divisées en différents groupes.

- **Robots d'exploration spatiale**

Dans les activités d'exploration de la Lune, de Mars ou du système solaire, il est nécessaire d'utiliser des véhicules de navigation qui sont indéniables pour la collecte d'informations spatiales. Les véhicules d'exploration comprennent des robots d'atterrissage (par exemple, Rocky I-IV (NASA), Lunakhod 1 (Russie), Yutu (Chine)), des sondes d'exploration (par exemple, Voyager (NASA)), des observateurs de l'espace profond (par exemple, l'observatoire Hubble) [56]. En janvier 2004, la NASA a lancé la mission « *Mars Exploration Rovers* » avec les deux robots jumeaux d'exploration « Spirit et Opportunity », et qui se sont posés sur le sol martien et explorent la surface de la planète à la recherche de preuves supplémentaires sur la présence d'eau liquide sur Mars dans un lointain passé. Cette mission est sans doute l'un des systèmes téléopérés les plus célèbres à ce jour. Il s'agit de la téléportation à longue distance la plus spectaculaire et la plus difficile à résoudre.



Figure 1.6 : La mission « Mars Exploration Rovers » avec les deux robots jumeaux Spirit et Opportunity.

- **Robots manipulateurs spatiaux**

Afin d'éviter les risques encourus par un être humain travaillant dans la station spatiale internationale et dans le but d'effectuer les différentes tâches, plusieurs robots manipulateurs ont été construits et qui peuvent être téléopérés par des opérateurs qualifiés. Un exemple typique peut être vu dans le satellite d'essai technique VII "Kiku-7" (ETS-VII) de l'Agence japonaise d'exploration aérospatiale (Figure 1.7).

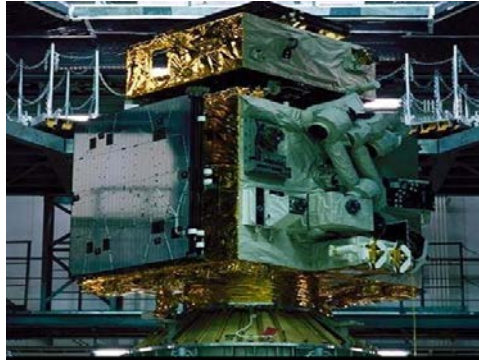


Figure 1.7 : Satellite d'Essai d'Ingénierie (ETS-VII).

1.12.3 Le monde sous-marin

Les opérations sous-marines englobent aussi bien l'usage militaire que l'usage commercial et sont utilisées pour la surveillance, la maintenance, les inspections en mer et les applications de sécurité. L'une des applications est la recherche de nouveaux gisements pétrolifères qui implique l'exploration des haut-fond. Si dans le cas spatial la distance est le principal facteur de retard, ici, c'est le milieu aquatique lui-même qui se prête mal aux transmissions. Les Véhicules Commandés à Distance (ROV, pour *Remotely Operated Vehicle*) représentent le plus grand marché de ce type d'appareil de téléopération, et sont généralement des submersibles inhabités et généralement attachés à la surface d'un bateau. L'IFREMER possède plusieurs ROV, la figure 1.8 présente l'un d'entre eux : Victor 6000. Il s'agit d'un engin à câble piloté à partir d'un navire support. Il a été conçu pour faire de l'investigation optique et effectuer des missions locales incluant l'imagerie, la mise en œuvre d'instrumentation ainsi que des prélèvements d'eau, de sédiments ou de roches.

Enfin, bien que beaucoup de ROV soient contrôlés par joysticks et à travers des moniteurs vidéo, quelques systèmes récents incorporent des fonctions autonomes telles que le maintien de position et le suivie de trajectoires. Une introduction assez complète sur les problèmes liés à la téléopération sous-marine est développée dans [57, 55].



Figure 1.8 : Engin sous-marin Victor 6000.

1.12.4 Domaine nucléaire

La téléopération est utilisée dans le domaine nucléaire pour permettre aux opérateurs de contrôler à distance les systèmes et les équipements critiques dans des environnements dangereux ou radioactifs. Cela peut inclure le nettoyage et la maintenance d'équipements nucléaires, le déclassé de installations nucléaires, la manipulation de matières radioactives et la surveillance de réacteurs nucléaires. La téléopération utilise généralement des robots spécialement conçus pour ce type d'application, équipés de caméras, de bras robotiques et de capteurs pour transmettre des informations à distance aux opérateurs. Ces derniers sont conçus pour être fiables, sécurisés et capables de fonctionner dans des conditions difficiles pour garantir la sécurité des travailleurs et de l'environnement.

Certaines applications récentes sont apparues dans [58] pour la détection de fuites de matériaux radioactifs scellés, dans [59] pour le démantèlement nucléaire, dans [60] pour les usines de retraitement de combustible nucléaire usé, etc. La figure 1.9 illustre l'utilisation d'un système de télérobotique pour le démantèlement d'installation et l'intervention dans le milieu nucléaire.



Figure 1.9 : Démantèlement d'une installation nucléaire à l'aide d'un bras téléopéré.

1.13 Conclusion

Ce chapitre a présenté une terminologie courante pour décrire les systèmes de téléopération et de télérobotique avec leurs différentes composantes, ainsi que les applications multiples de ces systèmes. En outre, nous avons présenté les aspects fondamentaux à prendre en compte lors de la mise en œuvre d'un contrôleur de système de téléopération en vue d'améliorer les performances. En particulier, le compromis stabilité-transparence inhérent aux systèmes de téléopération bilatérale a été abordé.

Une étude bibliographique sur les architectures de base des systèmes de téléopération bilatérales, ainsi qu'une description des différentes méthodes d'analyse de stabilité et de mesure des performances seront présentées dans le deuxième chapitre.

CHAPITRE 2

Etat de l'art sur les architectures de téléopération

2.1 Introduction

Les systèmes de téléopération sont conçus et développés pour exécuter des tâches éloignées ou dangereuses. L'objectif des architectures de commande de téléopération est de maintenir la stabilité tout en réalisant la performance désirée, connue sous le terme de "transparence". L'existence de retards dans les canaux de communication, et d'incertitudes dynamiques sur les robots utilisés et sur l'environnement distant constitue un véritable défi pour la conception de contrôleurs transparents et stables.

La première section de cet état de l'art définit le modèle de Télémanipulateur Maître-Esclave (TME), telle qu'il sera utilisé tout au long du présent chapitre. La section suivante présente les méthodes d'analyse de stabilité et de mesure des performances. Enfin, la troisième section explorera les différents schémas de commande existants pour la téléopération bilatérale, en utilisant diverses techniques et approches de commande.

2.2 Modélisation du système de téléopération

Les blocs de téléopération sont constitués d'un opérateur humain qui interagit avec un environnement par l'intermédiaire d'un système téléopéré. Ce dernier se compose généralement d'un maître et d'un esclave avec une liaison de communication entre eux. Les dispositifs du maître peuvent aller d'un joystick à un degré de liberté jusqu'à des interfaces de gants immersifs. De même, le dispositif esclave peut aller d'un "manipulateur" à un degré de liberté jusqu'à un système complexe comprenant une main de robot dextre fixée sur un manipulateur de plusieurs degrés de liberté. Les deux côtés du système de télémanipulation disposent généralement d'un certain type de commande locale de position, de vitesse et/ou de force. Les systèmes maître et esclave peuvent être commandés sur le même ordinateur ou être séparés par des centaines de kilomètres.

2.2.1 Modèle du comportement de l'opérateur humain

La modélisation de l'être humain en interaction avec un système électromécanique est depuis très longtemps un domaine de recherche très actif. Les premiers travaux sur le sujet datent de la fin des années 70, avec les modèles de McRuer ou de Kleinman afin de modéliser le comportement des pilotes de l'aérospatiale [61]. Tous s'accordent aujourd'hui pour dire que l'être humain est un système extrêmement difficile à modéliser, Car il est à la fois un système multi-modèles et adaptatif, ayant la capacité d'apprendre et pouvant ajuster son comportement aux sollicitations extérieures.

En téléopération, l'opérateur tient le robot maître avec sa main. En contractant plus ou moins les muscles des doigts, des bras, des épaules, du haut du corps, voire du corps entier s'il est debout, il transmet plus ou moins d'effort sur le robot maître, et le comportement de l'opérateur humain dépend non seulement des dynamiques du système nerveux central (SNC), mais aussi des propriétés mécaniques et dynamiques du bras. Cela rend la modélisation très difficile, en particulier si l'on considère les dynamiques du SNC.

Les modèles d'utilisateur pour la simulation, la synthèse et l'analyse des systèmes sont généralement définis pour une posture donnée, on peut donc proposer un modèle linéaire autour d'un point de fonctionnement donné : l'opérateur est considéré comme système générateur de force qui est transmise au robot maître à travers une impédance mécanique Z_h , cela permet de réduire le modèle à des éléments physiques de base, tels que des masses, des ressorts ou encore des amortisseurs (MAR). Le modèle MAR peut s'écrire sous la forme suivante :

$$f_h(t) = F_h^*(t) - m_h \frac{d^2 x_h}{dt^2} - b_h \frac{dx_h}{dt} - k_h x_h(t) \quad (2.1)$$

Où m_h est la masse du bras, b_h le coefficient d'amortissement et k_h le coefficient de raideur du bras de l'utilisateur. F_h^* est l'effort d'intention résultant de l'activation des muscles et f_h est la force totale appliquée par l'être humain. Dans le domaine de Laplace, l'équation (2.1) s'écrit :

$$F_h(s) = F_h^*(s) - Z_h(s)V_h(s) \quad (2.2)$$

Avec $V_h(s)$ et $Z_h(s)$ sont la vitesse et l'impédance mécanique du bras de l'être humain.

2.2.2 Modèle de l'environnement

D'une manière générale en télérobotique la perception et l'interaction avec l'environnement posent des problèmes. En effet, les objets manipulés ont des propriétés mécaniques différentes les uns des autres, ce qui rend leur modélisation a priori difficile. Cependant, pour cette démonstration l'environnement peut être décrit par une impédance mécanique équivalente mettant en relation les vitesses $V_e(t)$, les efforts d'interaction $F_e(t)$ et les efforts internes $F_e^*(t)$. Les efforts internes représentent les efforts propres à l'environnement, qui ne résultent pas de l'interaction. Lorsque le manipulateur esclave est en interaction avec un tel environnement, la relation dans le domaine de Laplace entre vitesse et efforts s'écrit :

$$F_e(s) = F_e^*(s) - Z_e(s)V_e(s) \quad (2.3)$$

Avec $Z_e(s)$ l'impédance mécanique équivalente de l'environnement. Dans la littérature, la majorité des applications supposent que $F_e^*(s) = 0$.

2.2.3 Modélisation des manipulateurs maître et esclave

En télémanipulation, les manipulateurs sont classés en deux familles, d'après les caractéristiques structurelles et le type d'actionneurs utilisés [62] :

- Les manipulateurs de type impédance sont comparables à des sources de force, car leurs actionneurs sont commandés en force. Lors d'une interaction avec un environnement, ils appliquent une force en réponse à un déplacement de celui-ci [63]. Généralement ils ont une faible inertie et sont réversibles. Dans la littérature, la plupart des interfaces haptiques sont de ce type.
- Les manipulateurs de type admittance sont comparables à des sources de position, ou de vitesse, car leurs actionneurs sont commandés en position, ou en vitesse. Lors d'une interaction avec un environnement, ils appliquent une position, ou une vitesse, à cet environnement en réponse à un contact avec celui-ci [63]. Ces manipulateurs sont généralement non réversibles et présentent une grande raideur. La majorité des robots industriels sont de ce type.

Pour la suite de cette démonstration nous allons considérer que les deux manipulateurs sont de type impédance représentés par un système masse-amortisseur à un degré de liberté.

En supposant que l'opérateur est en contact avec le maître et que l'esclave est en contact avec l'environnement, la dynamique du maître et de l'esclave est modélisée comme suit :

$$Z_m V_h = F_h + u_m \quad (2.4)$$

$$Z_s V_e = -F_e + u_s \quad (2.5)$$

Avec u_m et u_s sont les signaux de commande et Z_m et Z_s représentent la dynamique linéaire invariante dans le temps (LTI) des manipulateurs maître et esclave.

2.2.4 Modèle de TME

La figure 2.1 présente le bloc diagramme d'un système de téléopération typique dans lequel le maître, l'esclave et le canal de communication sont modélisés par un réseau LTI à deux ports appelé télémanipulateur maître-esclave. Cette représentation sous forme de quadripôle ou port d'interaction est empruntée de la théorie des systèmes électriques. Particulièrement bien adaptée à l'analyse et la modélisation des systèmes de téléopération avec retour d'efforts, elle

permet de représenter de manière assez intuitive les échanges d'énergie et les interactions entre les différents éléments d'un système de téléopération.

L'opérateur et l'environnement sont également modélisés par des réseaux LTI à un port. De plus, l'analogie force/tension est appliquée, dans laquelle les tensions et les courants sont respectivement assignés à des forces et à des vitesses [64]. Ces systèmes peuvent être non linéaires, mais ils doivent être linéarisés autour de leurs points de fonctionnement pour être intégrés dans cette structure.

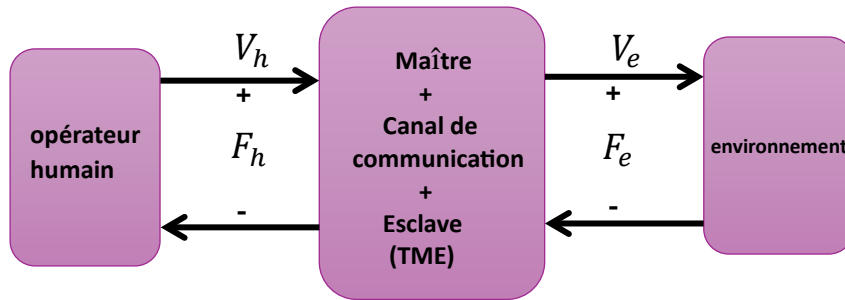


Figure 2.1 : Représentation sous forme de quadripôle d'un système de téléopération.

Selon le choix des variables d'entrée et de sortie du TME, les chercheurs ont travaillé avec une variété de représentations de réseaux [65], telles que *l'impédance* $Z(s)$, *l'hybride* $H(s)$, *l'admittance* $Y(s)$, et *la diffusion* $S(s)$ pour analyser la stabilité et la performance du système, et synthétiser une variété d'architectures de commande bilatérales.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} F_h(s) \\ F_e(s) \end{bmatrix} &= Z(s) \begin{bmatrix} V_h(s) \\ V_e(s) \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} V_h(s) \\ V_e(s) \end{bmatrix} &= Y(s) \begin{bmatrix} F_h(s) \\ F_e(s) \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} a_1(s) \\ a_2(s) \end{bmatrix} &= S(s) \begin{bmatrix} b_1(s) \\ b_2(s) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.6)$$

La représentation sous forme hybride est certainement la plus utilisée, les relations entre les efforts et les vitesses s'écrivent de la manière suivante :

$$\begin{bmatrix} F_h(s) \\ -V_e(s) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} h_{11}(s) = \frac{F_h}{V_h} |_{F_e=0} & h_{12}(s) = \frac{F_h}{F_e} |_{V_h=0} \\ h_{21}(s) = -\frac{V_e}{V_h} |_{F_e=0} & h_{22}(s) = -\frac{V_s}{F_e} |_{V_h=0} \end{bmatrix}}_{h_{ij}(s)} \begin{bmatrix} V_h(s) \\ F_e(s) \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Dans ce formalisme hybride, les paramètres de matrice h_{ij} peuvent être interprétés physiquement comme suit :

h_{11} : représentent l'impédance mécanique perçue par l'opérateur en mouvement libre.

h_{12} : représente la capacité du schéma de téléopération à transmettre les efforts appliqués par le manipulateur esclave.

h_{21} : représente la capacité du bras esclave à suivre les mouvements du bras maître.

h_{22} : représentent l'admittance mécanique vue par l'environnement en mouvement libre.

2.3 Outils d'évaluation des performances et de la stabilité

Comme nous l'avons souligné dans le chapitre (1) et comme nous le verrons plus tard, les performances et la robustesse de la stabilisation se dégradent en raison des retards dans le canal de communication et des incertitudes dans la dynamique des opérateurs et surtout de l'environnement. En fait, il y a toujours un compromis entre ces deux objectifs. Les outils d'évaluation des performances sont décrits ci-dessous.

2.3.1 Performance du système de téléopération

Au cours des dernières décennies, de nombreuses recherches ont été menées sur les performances de la téléopération haptique, car il s'agit du critère clé pour évaluer les architectures de commande proposées. Dans ce qui suit, une vue d'ensemble des critères de performance les plus importants, exprimés en fonction d'un modèle linéaire (matrice H), est donnée.

2.3.1.1 Inertie et amortissement perçus

Dans un scénario idéal de mouvement libre, l'opérateur humain ne devrait pas percevoir d'inertie ou d'amortissement. Cependant, dans la réalité, il peut y avoir une certaine sensation d'inertie et d'amortissement causée par les dispositifs maître et esclave. Dans ce cas, l'inertie et l'amortissement perçus par le maître peuvent être décrits au moyen de la fonction de transfert suivante [49].

$$G_1(s) = \left(\frac{x_h}{f_h} \Big|_{F_e=0} \right)^{-1} \quad (2.8)$$

On peut l'écrire comme suit :

$$G_1(s) = M_{eq}s^2 + B_{eq}s + G_1^*(s)$$

où M_{eq} , B_{eq} représentent l'inertie et l'amortissement équivalents perçus au niveau du maître et $G_1^*(s)$ contient des termes négligeables aux basses fréquences, c'est-à-dire des termes du

troisième ordre et plus, qui satisfont à la condition suivante $\lim_{s \rightarrow 0} \frac{G_1^*(s)}{s^2} = 0$.

2.3.1.2 Rigidité perçue

Dans un mouvement de contact idéal, l'opérateur humain ne doit ressentir que la rigidité de l'environnement. En réalité, cependant, une certaine impédance supplémentaire peut être ressentie en raison des propriétés de rigidité des dispositifs maître et esclave. Par conséquent, sur la base du modèle d'environnement simple composé de la rigidité et de l'amortissement, la rigidité perçue est estimée par la fonction de transfert suivante [49].

$$G_2(s) = \left(\frac{x_h}{f_h} \Big|_{F_e = -(B_e s + K_e)x_e} \right)^{-1} \quad (2.9)$$

On peut également l'écrire comme suit :

$$G_2(s) = K_{eq} G_2^*(s)$$

où K_{eq} représente la rigidité perçue équivalente du côté maître en cas de contact.

Avec $G_2^*(s)$ satisfait $\lim_{s \rightarrow 0} G_2^*(s) = 1$.

2.3.1.3 Glissement

le glissement entre le maître et l'esclave a été évalué lorsqu'il y a interaction avec un environnement distant, avec la rigidité K_e et l'amortissement B_e . La fonction de transfert suivante a été définie pour évaluer la dérive de la position.

$$G_3(s) = \left(\frac{x_m - x_s}{f_h} \Big|_{F_e = -(B_e s + K_e)x_e} \right) \quad (2.10)$$

On peut définir un terme principal constant qui représente le glissement de la position aux basses fréquences.

$$G_3(s) = \Delta G_3^*(s)$$

Avec $G_3^*(s)$ satisfait $\lim_{s \rightarrow 0} G_3^*(s) = 1$.

2.3.1.4 Suivi de trajectoire

En l'absence d'interaction, le suivi, au niveau de l'esclave, du mouvement imposé du côté maître peut être mesuré à l'aide de la fonction de transfert suivante :

$$G_4(s) = \left(\frac{x_m - x_s}{f_h} \Big|_{F_e = 0} \right) \quad (2.11)$$

Dans ce cas, on peut mettre en évidence un terme principal constant δ , qui représente l'erreur en régime permanent entre les positions du maître et de l'esclave à la suite d'un échelon unitaire dans f_h .

$$G_4(s) = \delta G_4^*(s)$$

Avec $G_4^*(s)$ satisfait $\lim_{s \rightarrow 0} G_4^*(s) = 1$.

2.3.1.5 Les erreurs de suivi

La méthode la plus explicite pour évaluer le fonctionnement d'un téléopérateur consiste à comparer les mouvements et les forces du maître et de l'esclave. Les erreurs de suivi de la position et de la force ont également été les premières mesures utilisées pour quantifier les performances du téléopérateur [50]. Le suivi de position est calculé lorsque le robot esclave est en mouvement libre ($F_e = 0$), et le suivi de la force lorsque le robot esclave est en contact avec un objet dur ($X_m = 0$).

L'utilisation de l'erreur maximale dans (2.12) et (2.13) sur la plage de fréquences de la tâche a été introduite par [66]. Toutefois, en se concentrant sur le gain de la fonction de fréquence, les effets importants du décalage de phase ne sont pas quantifiés. Par conséquent, cette mesure de performance n'est pas adaptée aux systèmes de téléopération présentant un retard temporel important.

$$\max |\Delta X(s)| = \max \left| \frac{X_m - X_s}{X_m} \right| = \max_w |1 + h_{21}| \quad (2.12)$$

$$\max |\Delta F(s)| = \max \left| \frac{F_h - F_e}{F_e} \right| = \max_w |h_{12} - 1| \quad (2.13)$$

2.3.1.6 La bande passante

La largeur de bande est liée au transfert d'informations entre l'opérateur et l'environnement distant. Les exigences en matière de transfert d'informations dans les deux directions diffèrent considérablement [5]. L'opérateur humain donne des ordres de force et de mouvement avec un contenu de fréquence relativement faible, de l'ordre de 0 à 10 Hz, alors que les informations de contact du côté de l'esclave contiennent souvent des fréquences allant jusqu'à 1000 Hz pour les environnements rigides.

Il est généralement recommandé que la largeur de bande soit la plus élevée possible, et une limite inférieure est souvent spécifiée [67]. Chacune des quatre fonctions de transfert $h_{ij}(s)$ entre les forces et les positions possède sa propre largeur de bande. Cela correspond aux largeurs

de bande des positions du maître à l'esclave ($\omega_{x,m \rightarrow s}$), de l'esclave au maître ($\omega_{x,s \rightarrow m}$); et aux largeurs de bande des forces avec des notations similaires ($\omega_{f,m \rightarrow s}$) et ($\omega_{f,s \rightarrow m}$).

La largeur de bande de position est définie comme la fréquence à laquelle l'erreur de suivi est inférieure de 3 dB du gain à basse fréquence [68], et se calcule en résolvant l'équation suivante :

$$|1 + h_{21}(j\omega_{x,m \rightarrow s})| = \frac{1}{\sqrt{2}} |1 + h_{21}(0)| \quad (2.14)$$

La largeur de bande de la force est calculée de la même manière, comme la solution de

$$|1 + h_{12}(j\omega_{f,m \rightarrow s})| = \frac{1}{\sqrt{2}} |1 + h_{12}(0)| \quad (2.15)$$

Tout comme pour l'erreur de suivi, la mesure de performance de la largeur de bande ne contient aucune information sur les retards ou le décalage de phase, ce qui doit être considéré comme un point de vigilance. Deux systèmes ayant la même largeur de bande et un décalage de phase différent peut donner une sensation très différente.

2.3.1.7 L'impédance transmise

Un autre aspect de l'évaluation du téléopérateur est lié à la perception du système (lourdeur, amortissement, élasticité), lorsque le manipulateur esclave est en mouvement libre ou en contact avec divers objets distants. En pratique, l'opérateur ne percevra jamais exactement la même impédance au niveau du dispositif maître que celle de l'environnement réel [5]. En considérant l'impédance de l'environnement distant Z_e , les impédances transmises ressenties par l'opérateur Z_{to} et par l'environnement Z_{te} peuvent être calculées (2.16), (2.17) à partir du modèle de la matrice H (2.17)

$$Z_{to} = \frac{h_{11} + (h_{11}h_{22} - h_{12}h_{21})Z_e}{1 + h_{22}Z_e} \quad (2.16)$$

$$Z_{te} = \frac{h_{11} + Z_h}{h_{11}h_{22} - h_{12}h_{21} + h_{22}Z_h} \quad (2.17)$$

En théorie, l'impédance transmise devrait être exactement la même que celle à distance (c'est-à-dire $Z_{to} = Z_{te}$), de sorte que l'opérateur ressent exactement les mêmes forces pour le même mouvement que s'il touchait l'objet à pleine main [50].

Il convient de noter qu'en cas de mouvement en espace libre (c'est-à-dire $Z_e = 0$), l'impédance transmise Z_{to} est simplifiée au paramètre h_{11} . En revanche, en cas de contact dur (c'est-à-dire $Z_e \rightarrow \infty$), (2.16) devient :

$$Z_{to} = \begin{cases} h_{11} - h_{12}h_{21}h_{22}^{-1} & \text{si } h_{22} \neq 0 \\ h_{12}h_{21}Z_e & \text{si } h_{22} = 0 \end{cases} \quad (2.18)$$

On constate que lorsque $h_{22} \neq 0$, Z_{to} est insensible à Z_e , ce qui se traduit par une perception dégradée de l'opérateur.

2.3.1.8 La transparence

La transparence est le critère de performance le plus récurrent dans la littérature. La transparence parfaite est exprimée en termes de compatibilité des impédances [5] et est atteinte lorsque l'impédance ressentie par l'opérateur (Z_{to}) est la même que l'impédance environnementale Z_e et que l'impédance de l'effecteur (Z_{te}) est contrôlée pour émuler l'impédance adaptative du bras de l'opérateur humain (Z_h) :

$$\begin{cases} Z_{to} = Z_e \\ Z_{te} = Z_h \end{cases} \quad (2.19)$$

Selon Yokokhoji et Yoshikawa, la transparence est obtenue lorsque les réponses de position et de force du bras maître sont systématiquement égales aux réponses de position et de force lorsque l'opérateur manipule l'objet directement [50] :

$$\forall t : \begin{cases} x_e(t) = x_m(t) \\ f_m(t) = f_e(t) \end{cases} \quad (2.20)$$

Pour analyser les performances du système, d'autres chercheurs partent de la représentation hybride telle qu'elle est décrite au point expression (2.7). L'état idéal de transparence parfaite correspond à une valeur particulière de la matrice hybride [64]

$$H_{ideal}(s) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Un critère mathématique de la mesure de transparence peut être défini comme l'écart pondérée entre la matrice hybride d'un système de téléopération et la matrice idéale H_{ideal} [69] :

$$d = \sum_{i,j} a_{ij} |h_{ij} - h_{ideal,ij}| \quad (2.22)$$

Avec a_{ij} sont des facteurs de pondération positifs. Ces facteurs de pondération définissent l'importance des quatre distances par rapport à la valeur idéale (pour chacun des éléments de la matrice hybride).

Afin de mieux évaluer l'influence de l'environnement sur la perception de l'opérateur, [70] a défini la transparence comme le quotient entre l'impédance transmise et l'impédance à distance.

$$T_z = \frac{Z_{to}}{Z_e} = \frac{h_{11}Z_e^{-1} + (h_{11}h_{22} - h_{12}h_{21})Z_e}{1 + h_{22}Z_e} \quad (2.23)$$

La transparence devrait idéalement être égale à l'unité pour toutes les fréquences. Comme nous le voyons dans (2.23), la transparence dépend à la fois des propriétés du téléopérateur (paramètres H) et de l'impédance distante (Z_e). Dans notre cas, où l'impédance de l'environnement est inconnue, l'utilisation des conditions de transparence dans (2.20) pour le domaine temporel et dans (2.21) pour le domaine des fréquences semblent plus appropriées (voir chapitre 3 et 4).

Colgate et Brown [71] ont étudié l'impédance perçue par l'opérateur pour deux cas extrêmes d'impédance environnementale $Z_{inmin} = Z_{in/Z_e=0}$ et $Z_{inmax} = Z_{in/Z_e \rightarrow \infty}$, et ont introduit la gamme dynamique de l'impédance atteinte, Z -width, comme mesure de la performance des interfaces haptiques. Hashtrudi-Zaad et Salcudean [72] ont utilisé ces facteurs pour évaluer les performances de la téléopération pour les impédances transmises à l'environnement et à l'opérateur. Ces indices sont reliés à la matrice hybride comme suit :

$$\begin{aligned} Z_{to,min} &= Z_{to/Z_e=0} = h_{11} \\ Z_{to,largeur} &= Z_{to/Z_e \rightarrow \infty} - Z_{to,min} = \frac{-h_{12}h_{21}}{h_{22}} \\ Z_{te,min} &= Z_{te/Z_h=0} = \frac{h_{11}}{\Delta h} \\ Z_{te,largeur} &= Z_{te/Z_h \rightarrow \infty} - Z_{te,min} = \frac{-h_{12}h_{21}}{h_{22}\Delta h} \end{aligned} \quad (2.24)$$

Avec $\Delta h = h_{11}h_{22} - h_{12}h_{21}$

Les meilleures performances sont donc caractérisées par

$$|Z_{to,min}| \rightarrow 0, \quad |Z_{te,min}| \rightarrow 0, \quad |Z_{to,largeur}^{-1}| \rightarrow 0, \quad |Z_{te,largeur}^{-1}| \rightarrow 0$$

Çavusoğlu et al [73], considèrent qu'une transparence idéale est celle qui permet une meilleure perception des variations de l'environnement. Ils proposent alors d'étudier la sensibilité de l'impédance transmise par rapport aux variations de l'impédance réelle en mesurant

$$\left\| W_s \frac{dZ_t}{dZ_e} \Big|_{Z_e=\hat{Z}_e} \right\|_2 \quad (2.25)$$

Où W_s est un filtre passe-bas dont la fréquence de coupure représente la fréquence à laquelle la transparence n'est plus assurée et \hat{Z}_e est une estimation de l'impédance de l'environnement.

Enfin, les performances sont toujours obtenues au prix d'un compromis sur la stabilité. Dans la sous-section suivante, quelques critères de stabilité populaires seront étudiés.

2.3.2 Stabilité du système de téléopération

L'analyse de stabilité nécessite de traiter un sujet difficile et sensible en raison de l'imprévisibilité inhérente aux opérateurs humains ainsi que de la nature fortement non linéaire de son environnement. De plus, les délais de communication requis par le canal de communication provoquent une instabilité du système. Dans la section qui suit, quelques critères de stabilité courants seront abordés. En supposant dans une première famille les impédances Z_h et Z_e sont connues et dans la deuxième famille ces impédances ne sont pas connues avec précision mais respectent certaines conditions (par exemple la passivité). Le deuxième ensemble représente des exigences plus sévères pour les systèmes de téléopération, car il garantit que le système reste stable au contact d'une gamme plus large d'impédances humaines et environnementales.

2.3.2.1 La stabilité avec des modèles connus de l'opérateur et de l'environnement

En 1989, Hannaford [74] a précisé qu'il est important, pour la stabilité du système, de prendre en compte l'ensemble du système, y compris la dynamique du matériel utilisé, ainsi que la dynamique de l'opérateur et de l'environnement.

En assumant un modèle fixe pour l'impédance humain Z_h et certaine raideur caractéristique pour l'environnement Z_e , le lieu de racine en fonction de k_e fournit un outil puissant pour analyser la stabilité du système et la marge de gain du système en contact avec différents environnements [47]. Dans [5], Lawrence a utilisé une approche fréquentielle pour montrer que le schéma de téléopération position - position est plus stable que celui de position - force. Dans [72], Zaad et Salcudean ont démontré la stabilité du schéma à 3 canaux en présence d'un retard de transmission en appliquant le critère de stabilité de Nyquist. Le même critère a été considéré par Fite, Speich, et Goldfarb [75] pour étudier la stabilité du schéma de téléopération position - force en absence et en présence d'un retard de transmission. La stabilité a été quantifiée en évaluant les marges de gain et de phase.

Dans cette partie, seule la méthode de Lyapunov est exposée. En effet, par rapport aux autres méthodes, la méthode de Lyapunov offre la possibilité de traiter les systèmes non linéaires utilisés dans la plupart des applications actuel.

La stabilité de Lyapunov est basée sur une représentation en espace d'état (2.26), où x est un vecteur d'état.

$$\dot{x} = f(x) \quad (2.26)$$

Il est supposé que les équations ont été réécrites de telle sorte que $x = 0$ est un point d'équilibre, c'est-à-dire que $f(0) = 0$. La fonction de Lyapunov $V(x)$ doit vérifier les propriétés suivantes

1. $V(0) = 0$
2. $V(x) > 0, \|x\| \neq 0$
3. V et sa dérivée sont continues sur tous les composants de x
4. $\dot{V}(x) \leq 0$

Le théorème affirme que s'il existe une fonction de Lyapunov pour les équations d'état et si, en addition, $\dot{V}(x) < 0$, alors la stabilité est asymptotique. Dans le cas d'un système linéaire, la dernière condition mentionnée ne peut s'appliquer que si tous les pôles du système se trouvent dans le demi-plan gauche.

2.3.2.2 La stabilité avec des modèles inconnus de l'opérateur et de l'environnement

En général, la connaissance de l'opérateur humain et de la dynamique de l'environnement, en plus du modèle du téléopérateur, est nécessaire pour l'analyse de la stabilité du système de téléopération (2.7). Toutefois, si Z_h et Z_e sont tous les deux des systèmes passifs, il est possible de dériver des conditions de stabilité indépendantes de l'opérateur humain et de l'environnement. Dans de telles conditions, la théorie de la passivité est utilisée et considérée comme une des approches les plus répondues en littérature car d'un point de vue pratique, cette notion est bien souvent suffisante et offre un cadre théorique simple à mettre en œuvre, ce qui la rend très populaire auprès de la communauté de la télérobotique [45].

Méthodes issues de la passivité

La théorie de la passivité procure un outil efficace pour analyser la stabilité d'un système en observant uniquement les propriétés d'entrée et de sortie du système. Comme la théorie de la passivité ne s'intéresse qu'à ces propriétés et non au modèle d'état interne, elle constitue un instrument robuste pour l'analyse de la stabilité de divers systèmes, notamment les systèmes linéaires, non linéaires, continus, discrets et non causaux. En plus, la théorie de la passivité peut être appliquée aux systèmes en cascade, comme dans le cas de la téléopération bilatérale illustrée à la figure 2.1, ce qui permet d'évaluer la stabilité globale de ces systèmes.

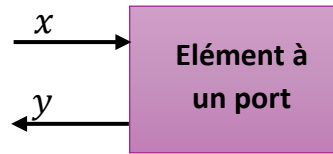


Figure 2.2: Analyse de la puissance fournie par un élément à un port.

Pour un système à un port tel que représenté à la figure 2.2 avec un vecteur d'entrée x et un vecteur de sortie y , la puissance d'entrée au système peut être exprimée comme suit

$$P_{in} = x^T y \quad (2.27)$$

Tout comme la relation entre les fonctions de Lyapunov et l'énergie, l'équation (2.27) peut, ou ne peut pas nécessairement, décrire la puissance physique du système. Un système est dit passif s'il absorbe toujours plus d'énergie qu'il n'en produit. Autrement dit, la puissance d'entrée, P_{in} , doit être soit stockée, soit dissipée. Par conséquent

$$P_{in} = \frac{dE_{sto}}{dt} + P_{diss} \quad (2.28)$$

où E_{sto} est l'énergie stockée et P_{diss} la puissance dissipée par le système. L'énergie stockée, E_{sto} , est limitée par l'énergie minimale du système, $E_{sto} \geq E_{min}$, tandis que la puissance dissipée est une constante non négative, $P_{diss} \geq 0$. L'équation (2.28) peut être représentée sous sa forme énergétique comme indiqué ci-dessous :

$$\int_0^t P_{en}(\tau) d\tau = E_{sto}(t) - E_{sto}(0) + \int_0^t P_{diss}(\tau) d\tau \geq -E_{sto}(0) \quad \forall t \geq 0 \quad (2.29)$$

Cela signifie que le système ne peut pas générer de l'énergie au-delà de la quantité initialement stockée. Si l'énergie initiale emmagasinée dans le système est égale à zéro, l'équation (2.29) doit toujours être supérieure ou égale à zéro. En outre, si la puissance dissipée, P_{diss} , est égale à zéro, le système est dit sans perte. La passivité est une condition suffisante pour la stabilité.

Pour le TME de la figure 2.1, qui est un réseau à deux ports et qui se compose de deux paires d'éléments d'entrée-sortie, ou d'une simple séquence en cascade des éléments d'entrée-sortie, la condition de passivité est exprimée comme celle utilisée par Anderson et Spong [10] :

$$\int_0^t [f_h(\tau)v_h(\tau) - f_e(\tau)v_e(\tau)] d\tau \geq 0 \quad \forall t \geq 0 \quad (2.30)$$

Une approche très intuitive basée sur la passivité est **le critère de Llewellyn** [9] dont l'énoncé est le suivant : Un système de téléopération représenté par sa matrice hybride $H(s)$, dont les

paramètres sont linéaires invariants dans le temps, est inconditionnellement stable si et seulement si [65] :

- $h_{11}(s)$ et $h_{22}(s)$ ne possèdent pas de pôles dans le demi-plan droit .
- Tous les pôles de $h_{11}(s)$ et $h_{22}(s)$ sur l'axe imaginaire sont simples avec des résidus réels et positifs.
- Pour $s = j\omega$ et avec toutes les valeurs réelles de ω , les inégalités suivantes sont vérifiées :

$$\begin{aligned} R(h_{11}) &\geq 0 \\ R(h_{22}) &\geq 0 \\ 2R(h_{11})R(h_{22}) - R(h_{12}h_{21}) - |h_{12}h_{21}| &\geq 0 \end{aligned}$$

La dernière équation de la condition 3 peut également être réécrite [9] comme suit :

$$\eta \geq 1$$

où η est appelé paramètre de stabilité du réseau et est défini comme suit

$$n(j\omega) = -\frac{R_e(h_{12}(j\omega)h_{21}(j\omega))}{|h_{12}(j\omega)h_{21}(j\omega)|} + 2\frac{R_e(h_{11}(j\omega))R_e(h_{22}(j\omega))}{|h_{12}(j\omega)h_{21}(j\omega)|} \quad (2.31)$$

Il est toutefois curieux de savoir qu'avec des forces et des vitesses identiques du côté du maître et du côté de l'esclave (2.20), $\eta = 1$. Cela veut dire que le système parfaitement transparent est marginalement absolument stable. Par conséquent, pour obtenir une plus grande robustesse de la stabilité, la transparence parfaite doit être compromise. Il s'agit là d'une autre illustration du compromis classique entre stabilité et performance.

Dans Anderson et Spong [10], **la théorie de la dispersion (diffusion)** a été introduite pour simplifier la démonstration de non passivité des systèmes de téléopération avec retard de transmission. Son principe repose sur le fait que les signaux incidents qui sont appliqués à l'entrée d'un réseau à n-ports, se diffusent et se dispersent en plusieurs signaux réfléchis à la sortie du réseau. Celui-là est alors dit passif si l'énergie des signaux d'entrée est totalement diffusée et ne peut être supérieure à celle des signaux de sortie [45].

L'opérateur de diffusion d'un système est la fonction mathématique de réseau $S(s)$, qui relie les efforts plus les flux aux efforts moins les flux.

$$\varepsilon - \phi = S[\varepsilon + \phi] \quad (2.32)$$

Pour le système à deux ports illustrés dans la Figure 2.1, l'opérateur de diffusion S peut être exprimé par l'expression suivante [10]:

$$\varepsilon(s) - \phi(s) = S(s)[\varepsilon(s) + \phi(s)] \quad (2.33)$$

avec

$$\varepsilon(s) = \begin{bmatrix} F_h(s) \\ F_e(s) \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \phi(s) = \begin{bmatrix} V_h(s) \\ V_e(s) \end{bmatrix}$$

où s est l'opérateur de Laplace et S est la matrice de diffusion, définie par

$$S(s) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} (H(s) - I)(H(s) + I)^{-1} \quad (2.34)$$

Avec I la matrice d'identité de dimension (2×2) .

En présence d'un retard de transmission, il est facile de considérer ce dernier dans la relation (2.34) en l'introduisant directement dans la matrice S . La passivité du système est garantie si et seulement si la norme ∞ de sa matrice de diffusion n'est pas supérieure à l'unité [10], donnée par :

$$\|S(j\omega)\|_{\infty} \leq 1 \quad (2.35)$$

Entre autres, Niemeyer et Slotine se sont inspirés de ce concept de diffusion et ils ont défini le formalisme de variables d'onde dans laquelle l'impédance des lignes de transmission est prise en compte [11].

2.4 Architectures de commande bilatérales des systèmes de téléopération

Dans un système de téléopération bilatérale typique, le maître et l'esclave sont conçus pour imiter les actions de l'un et de l'autre, tout en reflétant la dynamique de l'environnement de téléopération au maître. Une classification générale des stratégies de commande est fondée en termes d'architecture qui se base sur le nombre de voies de transmission (deux, trois ou quatre voies nécessaires à la transmission des signaux de position et de force du maître à l'esclave et vice versa), et d'approche de commande implémentée, selon lesquelles cette exigence est généralement vérifiée. Cette section présente un état de l'art sur plusieurs méthodes courantes proposées dans la littérature.

2.4.1 Architecture à quatre canaux

L'architecture à quatre canaux est une représentation générale d'un système de téléopération proposé par Lawrence [5]. C'est un schéma à 4 canaux de communications à travers lesquels

les sites local et distant communiquent de façon bilatérale leurs positions (X_m et X_s) et les forces qui y sont appliquées (F_h et F_e). Le schéma bloc de cette structure, avec les manipulateurs maître et esclave de type impédance, est représenté par la figure suivante :

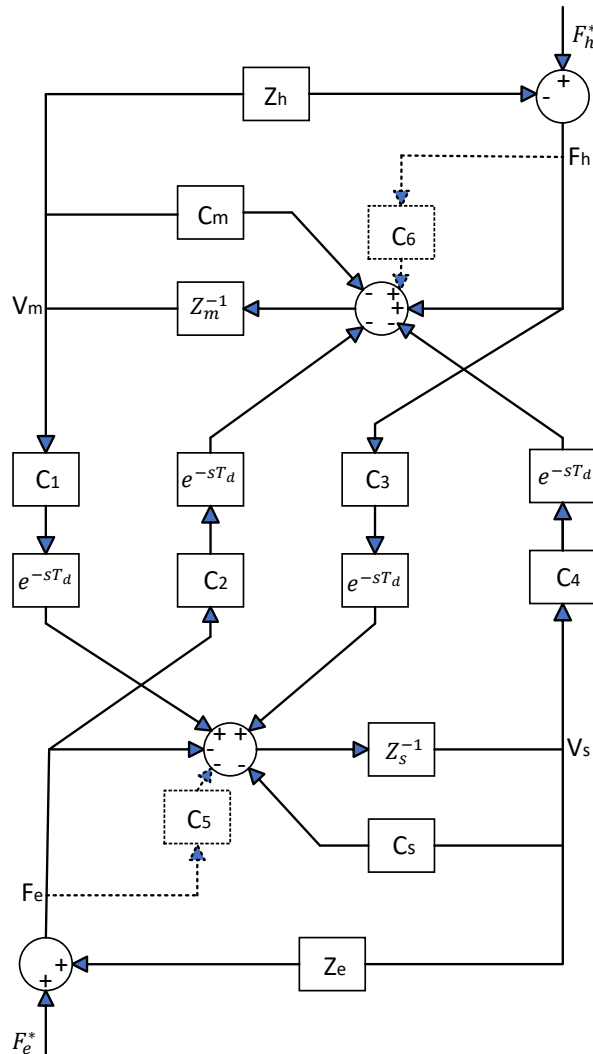


Figure 2.3 : Architecture bilatérale à quatre canaux.

(Z_m , C_m) et (Z_s , C_s) décrivent respectivement les manipulateurs maître et esclave avec respectivement, leurs contrôleurs locaux de position. Les blocs C_1 à C_4 sont les paramètres de réseau de communication qui peuvent représenter des filtres, des gains ou des correcteurs. 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.

Il faut souligner que la version initiale proposée par Lawrence en 1993 contient uniquement les blocs représentés par les traits pleins. Les autres blocs en traits pointillés représentés par C_5 et C_6 correspondent à deux boucles de commande locales de force permettant d'améliorer les performances du schéma de téléopération et d'atteindre la transparence parfaite. Néanmoins,

en ajustant correctement les paramètres C_5 et C_6 , il est possible d'obtenir deux classes d'architectures à trois canaux, qui peuvent être aussi performantes que le système à 4 canaux [9]. Les lois de commande du maître et de l'esclave s'écrivent respectivement :

$$F_m(s) = C_6 F_h - C_2 e^{-sT_d} F_e - C_4 e^{-sT_d} V_e - C_m V_h \quad (2.36)$$

$$F_s(s) = C_3 e^{-sT_d} F_h - C_5 F_e - C_s V_e + C_1 e^{-sT_d} V_h \quad (2.37)$$

En utilisant la représentation sous forme de quadripôle, les paramètres de la matrice hybride (2.7) s'écrivent :

$$\begin{aligned} h_{11} &= \frac{Z_{cm} Z_{cs} + C_1 C_4 e^{-2sT_d}}{(1 + C_6) Z_{cs} - C_4 C_3 e^{-2sT_d}} \\ h_{12} &= \frac{C_2 Z_{cs} e^{-sT_d} - (1 + C_5) C_4 e^{-sT_d}}{(1 + C_6) Z_{cs} - C_4 C_3 e^{-2sT_d}} \\ h_{21} &= -\frac{C_3 Z_{cm} e^{-sT_d} + (1 + C_6) C_1 e^{-sT_d}}{(1 + C_6) Z_{cs} - C_4 C_3 e^{-2sT_d}} \\ h_{22} &= \frac{(1 + C_5)(1 + C_6) - C_2 C_3 e^{-2sT_d}}{(1 + C_6) Z_{cs} - C_4 C_3 e^{-2sT_d}} \end{aligned} \quad (2.38)$$

avec : $Z_{cm} = Z_m + C_m$ et $Z_{cs} = Z_s + C_s$.

Pour le choix des contrôleurs mentionnés ci-dessus, l'impédance transmise, lorsque le délai est négligeable, devient :

$$Z_{to} = \frac{Z_{cm} Z_{cs} + C_1 C_4 + Z_e [(1 + C_5) Z_{cm} + C_1 C_2]}{(1 + C_6) Z_{cs} - C_3 C_4 + Z_e [(1 + C_5)(1 + C_6) - C_2 C_3]} \quad (2.39)$$

Et pour garantir la transparence parfaite, la matrice hybride doit être égale à l'expression (2.21).

Donc, cela est obtenue si les canaux respectent les conditions suivantes :

$$\begin{aligned} C_1(s) &= Z_{cs}(s) \\ C_2(s) &= 1 + C_6(s) \\ C_3(s) &= 1 + C_5(s) \\ C_4(s) &= -Z_{cm}(s) \end{aligned} \quad (2.40)$$

L'interprétation physique de (2.40) implique que pour obtenir la transparence, la dynamique du maître et de l'esclave doit être annulée par la dynamique inverse et que les forces d'anticipation doivent correspondre aux forces nettes exercées par l'opérateur ou bien l'environnement sur le maître ou l'esclave.

2.4.2 Architectures à trois canaux

Un avantage de l'architecture de base 4-Canaux illustrée à la figure 2.3 est qu'en ajustant convenablement les paramètres de commande, il est possible de générer deux classes d'architectures de commande 3-Canaux qui peuvent être transparentes dans des conditions idéales.

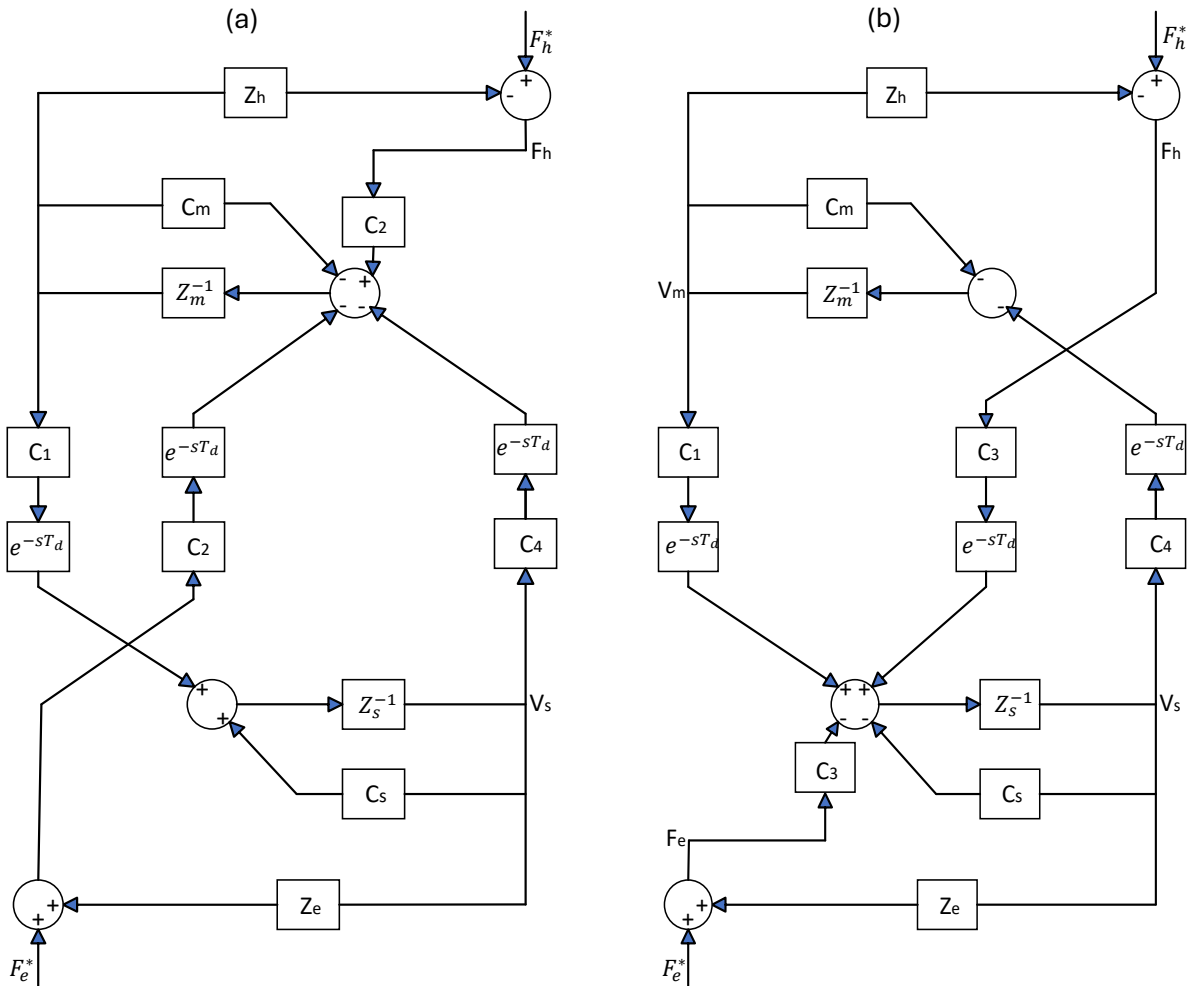


Figure 2.4 : Schémas de principe 3-canaux : (a) Compensation de la force de l'environnement; (b) : Compensation de la force de l'opérateur.

2.4.2.1 Compensation de la force de l'environnement

La première classe d'architectures 3-Canaux (voir Figure 2.4(a)) est obtenue en réglant $C_2 = 1$ et $C_3 = 0$. En conséquence, $C_5 = -1$ et $C_6 = 0$. De cette manière, il n'est pas nécessaire de mesurer la force d'interaction entre le maître et l'opérateur [76]. Dans ce cas :

$$h_{11} = \frac{Z_{cm}}{C_2} (1 - e^{-2sT_d}); \quad h_{12} = e^{-sT_d}; \quad h_{21} = -e^{-sT_d}; \quad h_{22} = 0 \quad (2.41)$$

et les impédances transmises (2.16)-(2.17) se simplifient en :

$$Z_{to} = \frac{Z_{cm}}{C_2} (1 - e^{-2sT_d}) + Z_e e^{-2sT_d} \quad (2.42)$$

$$Z_{te} = \frac{Z_{cm}}{C_2} (e^{2sT_d} - 1) + Z_h e^{2sT_d} \quad (2.43)$$

2.4.2.2 Compensation de la force de l'opérateur

La deuxième classe d'architectures 3-Canaux (voir Figure 2.4(b)) est obtenue en réglant $C_2 = 0$ et $C_3 = 1$, auquel cas la mesure de la force du côté esclave n'est pas nécessaire. La nécessité de réduire le nombre de capteurs de force sans dégrader la transparence rend les architectures 3CH intéressantes du point de vue de la mise en œuvre [77]. Dans ce cas :

$$h_{11} = \frac{Z_s + C_s}{C_3} (e^{2sT_d} - 1) ; \quad h_{12} = e^{sT_d} ; \quad h_{21} = -e^{sT_d} ; \quad h_{22} = 0 \quad (2.44)$$

et les impédances transmises (2.12)-(2.13) se simplifient en

$$Z_{to} = \frac{Z_{cs}}{C_3} (e^{2sT_d} - 1) + Z_e e^{2sT_d} \quad (2.45)$$

$$Z_{te} = \frac{Z_{cs}}{C_3} (1 - e^{-2sT_d}) + Z_h e^{-2sT_d} \quad (2.46)$$

2.4.3 Architectures à deux canaux

Les architectures à deux canaux se caractérisent par la transmission d'un seul signal, position/vitesse ou force, du maître à l'esclave et vice versa. Elles sont typiquement classées en quatre catégories : les architectures position-force (avec commande de la position au niveau du maître et commande de la force au niveau de l'esclave), force-position, position-position et force-force. Ces architectures ont fait l'objet de plusieurs travaux de recherche en raison de leur simplicité et du fait que leur mise en œuvre nécessite moins de capteurs. De plus, en éliminant deux des quatre canaux de transmission de données, l'analyse des systèmes à deux canaux est relativement simple.

2.4.3.1 Architecture Position-Position

L'architecture Position-Position (P-P), également appelée "Position error based (PEB)", a été la première approche de commande bilatérale proposée et mise en œuvre par Goertz dans les années 1950 [28]. Depuis, plusieurs variantes et améliorations ont été proposées et étudiées dans [11,17,78,10,5]. La version originale de la commande position-position, représentée par le schéma de la Figure 2.5, utilise uniquement les mesures de position des manipulateurs maître et esclave. Ce qui est souvent la solution la moins coûteuse à mettre en œuvre. De plus, elle est

bien adaptée aux systèmes qui nécessitent un faible encombrement ou pour lesquels la mesure d'effort est difficile, comme c'est le cas dans le domaine médical.

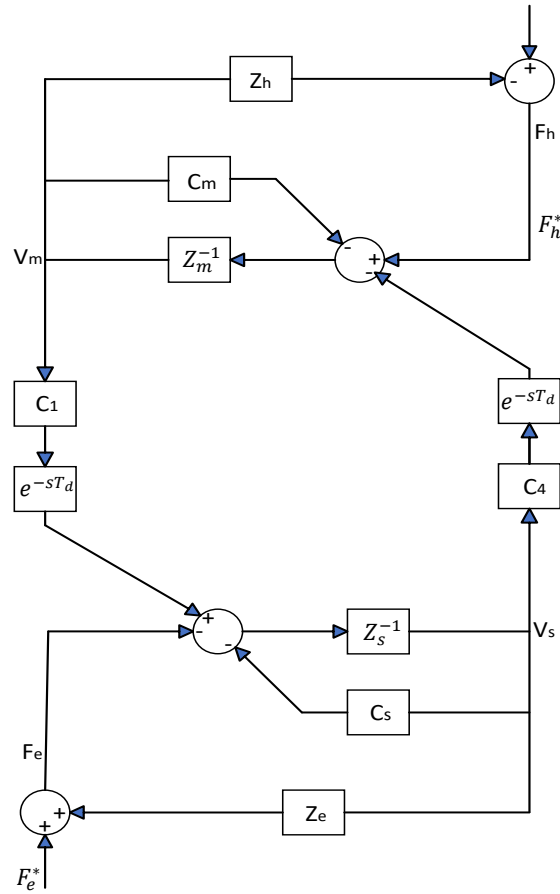


Figure 2.5 : Architecture de la commande bilatérale PEB.

Ce schéma se déduit de l'architecture à quatre canaux en choisissant $C_2(s) = C_3(s) = C_5(s) = C_6(s) = 0$. Alors, les lois de commande s'écrivent :

$$F_m(s) = -C_4 e^{-sT_d} V_e - C_m V_h \quad (2.47)$$

$$F_s(s) = C_1 e^{-sT_d} V_h - C_s V_e \quad (2.48)$$

où $C_1 = C_s$ et $C_4 = -C_m$, les paramètres de la matrice hybride du TME peuvent alors s'écrire sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} h_{11} &= Z_{cm} - \frac{C_m C_s e^{-2sT_d}}{Z_{cs}} \\ h_{12} &= -\frac{C_m e^{-sT_d}}{Z_{cs}} \\ h_{21} &= -\frac{C_s e^{-sT_d}}{Z_{cs}} \end{aligned} \quad (2.49)$$

$$h_{22} = \frac{1}{Z_{cs}}$$

D'après, l'équation (2.16) l'impédance perçue par l'opérateur devient

$$Z_{to} = Z_{cm} - \frac{C_m C_s e^{-2sT_d}}{Z_{cs} + Z_e} \quad (2.50)$$

Par conséquent, la méthode de commande basée sur l'erreur de position (PEB) présente des imprécisions dans des conditions de mouvement libre (où $h_{11} \neq 0$), ce qui signifie que sans capteur de force du côté de l'esclave, les erreurs de commande peuvent faire en sorte que l'utilisateur reçoit un retour de force proportionnel, même lorsque l'esclave n'est pas en contact avec l'environnement [77]. Dans les situations où il y a contact, le suivi non idéal de la force (où $h_{12} \neq 1$) peut faire perdre à l'opérateur l'impression de manipuler directement l'objet et détériorer son ressenti du contact. Ce que l'opérateur ressent est déterminé par l'erreur de suivi de la position ainsi que par les paramètres du contrôleur, plutôt que par l'impédance de l'environnement. Par exemple, une valeur élevée de C_m ou une différence importante entre V_m et V_s peut donner à l'opérateur l'impression d'un contact avec un objet, même lorsque l'esclave est complètement libre de ses mouvements.

En ce qui concerne le suivi de la position, sa performance peut être améliorée en choisissant le contrôleur C_s aussi grand que possible. Dans ce cas, lorsque la dynamique de l'esclave Z_s est suffisamment faible, nous avons $C_s + Z_s \approx C_s$, donc $h_{21} \approx -1$ et une bonne précision de mouvement peut être obtenue.

2.4.3.2 Architecture Force-Force

Le diagramme de la Figure 2.6(a) illustre une architecture de téléopération Force-Force, connue sous le nom de "Force error based (FEB)". Il convient de noter que ce système diffère du système PEB dans la mesure où les capteurs de position ont été remplacés par des capteurs de force. Mis à part [79], qui a proposé cette architecture, la littérature ne montre pas beaucoup d'intérêt pour le contrôleur FEB car deux capteurs de force sont nécessaires, sans que cela ne se traduise par une amélioration significative des performances. En fixant les régulateurs à $C_1 = C_4 = C_s = C_m = 0$, $C_2 = C_6 + 1$, $C_3 = C_5 + 1$, et en considérant le retard est négligeable, nous avons :

$$h_{11} = \frac{Z_m}{C_2} \quad (2.51)$$

$$h_{12} = 1$$

$$h_{21} = -\frac{Z_m C_3}{Z_s C_2}$$

$$h_{22} = 0$$

Selon [49], bien que le contrôleur FEB renforce la largeur de bande de communication entre les manipulateurs maîtres et esclaves, le système global peut subir une accumulation progressive d'erreurs de position. On voit dans (2.51) que lorsque les manipulateurs maître et esclave sont identiques ($Z_m = Z_s$), on peut théoriquement obtenir une bonne précision de position ($h_{21} = -1$) en prenant $C_2 = C_3$. Cependant, en pratique, il est difficile de garantir l'égalité de ces deux impédances car elles dépendent de la dynamique du système.

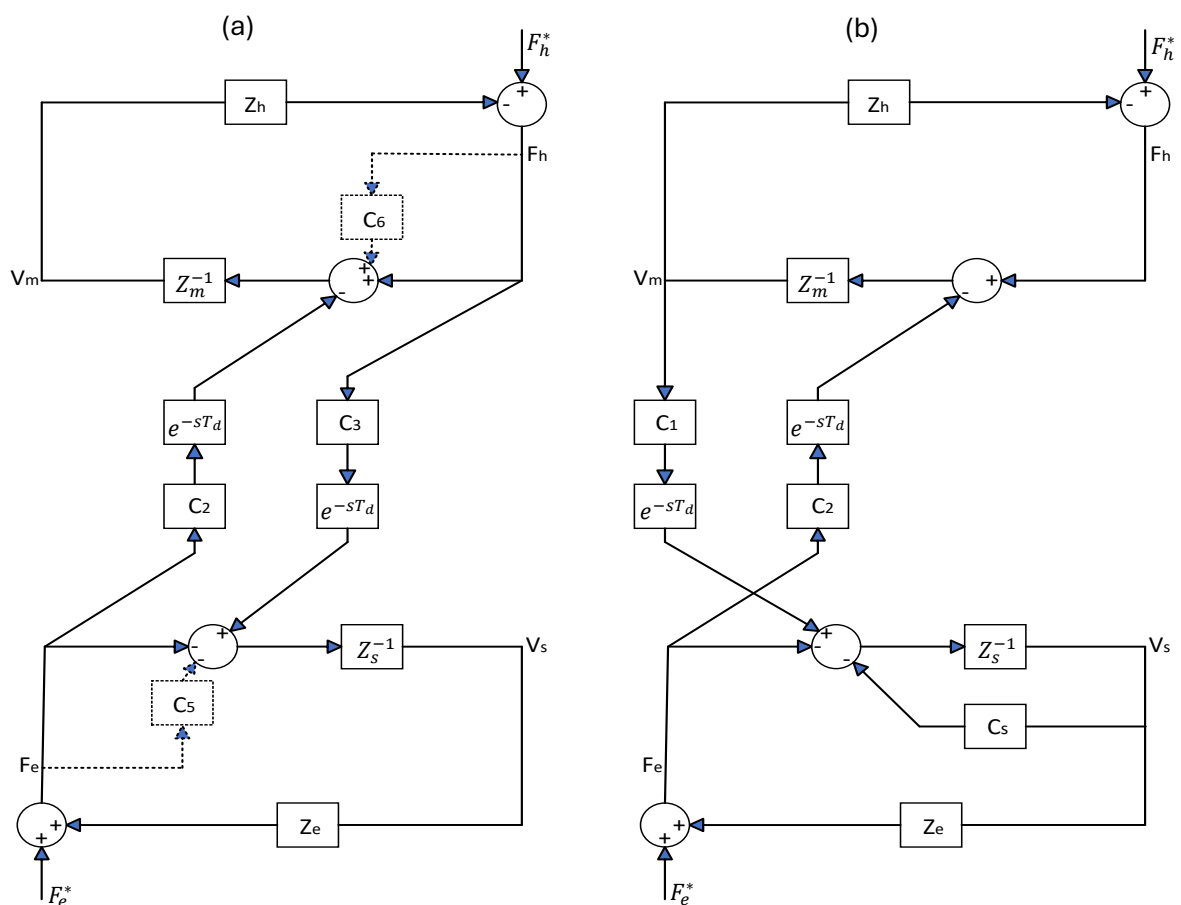


Figure 2.6 : Architectures de la commande bilatérales (a) FEB ; (b) DFR.

En revanche, l'architecture FEB assure un suivi efficace de la force ($h_{12} = 1$) lors d'un contact rigide ($V_m = 0$). En outre, la valeur idéale de l'admittance de sortie ($h_{22} = 0$) dans cette architecture indique que lorsque le maître reste immobile, l'esclave converge rapidement vers un déplacement nul en réponse à des perturbations de la force externe. On obtient alors une excellente rigidité pour le manipulateur esclave.

2.4.3.3 Architecture Force-Position

La Figure 2.6(b) présente une architecture de téléopération Force-Position, également appelée " direct force reflection (DFR) ". Le système DFR a été développé et analysé par de nombreux chercheurs [80,81]. Cette méthode nécessite un capteur de force pour mesurer les interactions entre l'esclave et l'environnement. On obtient ce contrôleur avec $C_3 = C_4 = C_5 = C_6 = C_m = 0$, $C_1 = C_s$ et $C_2 = 1$. La matrice hybride est donc :

$$\begin{aligned} h_{11} &= Z_m \\ h_{12} &= 1 \\ h_{21} &= -\frac{C_s}{Z_{cs}} \\ h_{22} &= \frac{1}{Z_{cs}} \end{aligned} \quad (2.52)$$

Par conséquent, bien que la perception d'un mouvement libre ne soit pas encore idéale ($h_{11} \neq 0$), la méthode DFR permet un suivi parfait de la force ($h_{12} = 1$). Néanmoins, par rapport à la méthode PEB, h_{11} est beaucoup plus proche de zéro dans la méthode DFR et l'utilisateur ne ressent la dynamique de l'interface maître que lorsque l'esclave n'est pas en contact. Malgré la performance supérieure de la méthode DFR par rapport à la méthode PEB, les deux méthodes souffrent des valeurs h_{21} et h_{22} qui ne sont pas idéales, ce qui se traduit par une réponse médiocre en matière de suivi de la position et de rigidité de l'esclave.

En conclusion, l'architecture DFR combine les points positifs des architectures PEB et FEB en termes de suivi de position et de force. Cependant, elle n'est pas recommandée pour les applications impliquant un contact extrêmement rigide [77] ou les situations qui exigent une bande passante élevée avec des mouvements rapides effectués à la fois par le maître et l'esclave [82].

2.4.3.4 Architecture Position-Force

En contact avec un environnement déformable, on pourrait déclarer que l'inverse de la commande à force reflétée est la manière normale de l'interaction. En effet, si l'opérateur humain exerce une certaine force sur le maître, cette force est transmise à l'esclave ainsi à l'environnement, et cela apportera selon son impédance la position esclave correspondante. Cette dernière est alors communiquée au site maître comme consigne de position.

Kobayashi et Nakamura ont signalé des problèmes pratiques d'implémentation [83], à savoir aucune mise en pratique de cette structure n'est encore rapportée.

2.4.4 Commande basée sur les variables d'ondes

Lorsqu'un canal de transmission subit un retard de transmission, il a été démontré que l'opérateur de diffusion n'est pas borné. Cette situation affecte directement la passivité d'un système de téléopération.

Basé sur la théorie de la passivité et l'approche de la diffusion, le concept de l'approche des variables d'ondes comme notion d'énergie est introduit [11], qui est un algorithme de commande passif. Son effet est de modifier et d'étendre la théorie de la passivité afin d'atténuer les effets négatifs du retard temporel dans un système de contrôle.

Par conséquent, un nouvel ensemble d'informations, connu sous le nom de variables d'onde, remplace les variables de puissance pendant la transmission à travers le canal de communication. Ces variables d'onde, représentées par (u, v) , capturent les signaux originaux et fonctionnent comme un processus de codage et de décodage. Pour illustrer cette transformation, la Figure 2.7 présente un schéma fonctionnel.

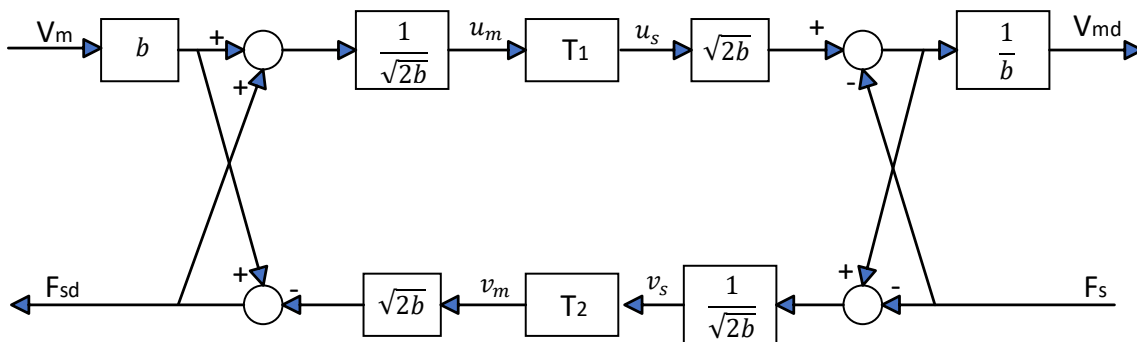


Figure 2.7 : Structure à variables d'onde.

La relation entre les variables d'onde et les signaux d'origine est donnée par les formules suivantes :

$$\begin{aligned}
 u_m &= \frac{1}{\sqrt{2b}} (bV_m + F_{sd}) \\
 v_m &= \frac{1}{\sqrt{2b}} (bV_m - F_{sd}) \\
 u_s &= \frac{1}{\sqrt{2b}} (bV_{md} + F_s)
 \end{aligned} \tag{2.53}$$

$$v_s = \frac{1}{\sqrt{2b}}(bV_{md} - F_s)$$

L'impédance caractéristique ou impédance d'onde, désignée par le paramètre strictement positif b , peut être choisie en fonction des exigences spécifiques de la tâche. Elle permet d'attribuer une pondération relative entre les signaux d'entrée et de sortie et d'ajuster ainsi le comportement du système en conséquence. u_m et u_s sont interprétés comme des ondes directes, tandis que v_m et v_s sont interprétés comme des ondes de retours. De même, u_m et v_s sont appelés ondes d'entrée, tandis que u_s et v_m sont appelés ondes de sortie. Les variables de puissance peuvent également être calculées en termes de variables d'ondes comme :

$$\begin{aligned} V_m &= \sqrt{\frac{1}{2b}}(u_m + v_m), & F_{sd} &= \sqrt{\frac{b}{2}}(u_m - v_m) \\ V_{md} &= \sqrt{\frac{1}{2b}}(u_s + v_s), & F_s &= \sqrt{\frac{b}{2}}(u_s - v_s) \end{aligned} \quad (2.54)$$

Comme le montre la Figure 2.7, les variables de l'onde en fonction des délais T_1 , T_2 peuvent être représentées comme suit :

$$\begin{aligned} u_s(t) &= u_m(t - T_1) \\ v_m(t) &= v_s(t - T_2) \end{aligned} \quad (2.55)$$

En combinant les équations (2.27), (2.54) et (2.55), le flux de puissance peut être décrit sous forme de variable d'onde comme suit :

$$\begin{aligned} P_{in} &= V_m^T F_{sd} - V_{md}^T F_s = \frac{1}{2} u_m^T u_m - \frac{1}{2} v_m^T v_m + \frac{1}{2} v_s^T v_s - \frac{1}{2} u_s^T u_s \\ &= \frac{d}{dt} \left[\frac{1}{2} \int_0^t u_m^T(\tau) u_m(\tau) - v_m^T(\tau) v_m(\tau) + v_s^T(\tau) v_s(\tau) - u_s^T(\tau) u_s(\tau) d\tau \right] \\ &= \frac{d}{dt} \left[\frac{1}{2} \int_{t-T_1}^t u_m^T(\tau) u_m(\tau) d\tau + \frac{1}{2} \int_{t-T_2}^t v_s^T(\tau) v_s(\tau) d\tau \right] = \frac{dE}{dt} \geq 0 \end{aligned} \quad (2.56)$$

Le résultat de la transformation onde-variable montre que la dissipation de puissance devient nulle. Par conséquent, le bloc de communication fonctionne comme un sous-système passif avec une fonction de stockage d'énergie positive. Il intègre essentiellement la puissance des ondes pendant la transmission dans les deux sens. Cette transformation en variables d'ondes garantit notamment que la propriété de passivité du sous-système de communication n'est pas affectée par la durée réelle du retard.

Il est important de noter que la transformation de la variable d'onde est bijective, ce qui signifie qu'elle est à la fois unique et inversible. Cela implique que le processus de codage et de

décodage des variables est sans perte et réversible. Aucune information n'est perdue ou augmentée, ce qui garantit la préservation des données d'origine.

L'équation (2.54) peut facilement être réarrangée en expressions exprimant deux variables quelconques en fonction des deux autres. Une formulation plus pratique, souvent utilisée pour le codage et le décodage des ondes, est donnée ci-dessous (étant donné que V_m, v_m, F_s, u_s sont des signaux d'entrée de chaque côté de la transformation onde-variable) :

$$u_m = \sqrt{2b}V_m - v_m, \quad V_{md} = \sqrt{\frac{2}{b}}u_s - \frac{1}{b}F_s \quad (2.57)$$

$$v_s = u_s - \sqrt{\frac{2}{b}}F_s, \quad F_{sd} = bV_m - \sqrt{2b}v_m$$

Combinaison avec une architecture à 4-Canaux

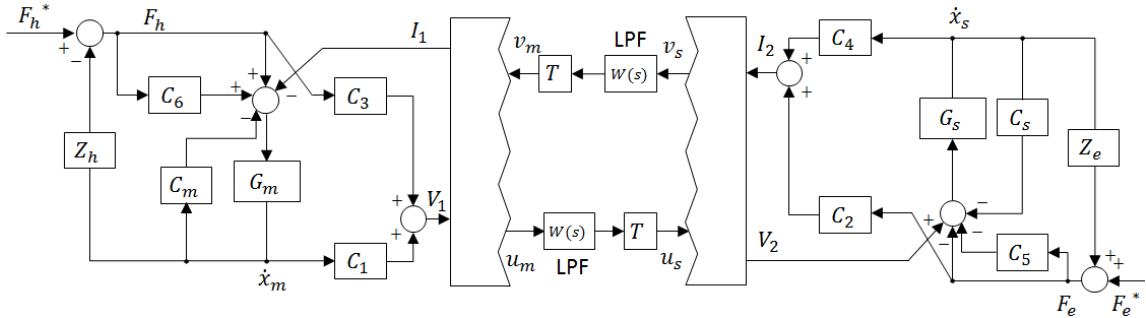


Figure 2.8 : Architecture 4-CH appliquant la transmission d'ondes [84].

Pour tirer parti de l'avantage clé de la méthode de la variable d'onde qui garantit la passivité du système, Aziminejad et al [84], étendent la transmission d'onde à l'architecture 4-Canaux, dans le but d'améliorer les performances globales du système de téléopération. Une architecture similaire est également proposée dans [85]. Pour combiner la transmission par ondes avec l'architecture 4-Canaux, la partie canal de communication du système 4-Canaux de Lawrence étendu et illustré dans [6] doit être séparée en tant que réseau à deux ports, comme le montre la figure 2.8. Aussi, l'effort d'entrée et le flux de sortie non physique du canal de communication sont exprimés comme suit :

$$\begin{aligned} V_1 &= C_3 F_h + C_1 \dot{x}_m, & V_2 &= F_e (1 + C_5) + \dot{x}_s (M_s s + C_s) \\ I_1 &= F_h (1 + C_6) - \dot{x}_m (M_m s + C_m), & I_2 &= C_2 F_e + C_4 \dot{x}_s \end{aligned} \quad (2.58)$$

Dans ce schéma, les variables d'onde peuvent être écrites comme suit :

$$u = \frac{bI + V}{\sqrt{2b}}, \quad v = \frac{bI - V}{\sqrt{2b}}$$

En appliquant la méthode de la variable d'onde à l'architecture 4-CH, le compromis entre la stabilité et la transparence de la téléopération bilatérale est amélioré par rapport à l'architecture 4-CH conventionnelle.

Dans [35], une solution de commande avec l'architecture quatre canaux a été investiguée. Le "Radial basis function neural network (RBFNN)" et la technique de la variable d'onde sont efficacement combinés pour résoudre les problèmes causés par les incertitudes et les retards temporels. Une analyse théorique approfondie a été menée pour établir la propriété passive et la stabilité du système de téléopération, tandis que des expériences comparatives ont été réalisées pour valider l'efficacité de la méthode proposée.

Huang *et al.* [14] ont proposé une nouvelle méthode de compensation asymétrique des variables d'ondes au sein de l'architecture dual maître dual esclave. Cette méthode réduit efficacement l'erreur de suivi de trajectoire dans le canal de communication en amont et l'erreur de suivi de force dans le canal de communication en aval. De plus, l'adoption d'un régulateur d'énergie garantit la passivité du système. À travers des simulations et des expériences, l'auteur démontre l'amélioration des performances de suivi de force et de trajectoire obtenue par cette méthode.

Dans [36], l'approche développée compense efficacement le retard temporel, améliorant ainsi le suivi de position et de force. En outre, elle permet également de compenser les distorsions et de réduire les effets de réflexion des ondes.

2.4.5 Commande par mode glissant

Les méthodes fréquentielles destinées à la commande des systèmes de téléopération comme les approches présentées ci-dessus exigent que le délai de transmission soit connu, alors que la majorité des protocoles publique actuel de transmission de données ne garantissent pas la constance de ces délais. En effet indépendamment de la taille des données transmises, le délai peut varier d'une manière très aléatoire pour certains protocoles de transmission tel que l'UDP ou le TCP. La commande par mode glissant est une commande connue pour sa robustesse et permet de palier un grand nombre de problèmes liés aux incertitudes paramétriques et aux perturbations externes, c'est pourquoi elle a été introduite dans le domaine de la téléopération bilatérale pour régler le problème des retards variable.

Dans ce qui suit nous allons présenter une commande en impédance coté maître et une commande par modes glissant coté esclave [86]. La Figure 2.9 illustre cette stratégie de contrôle.

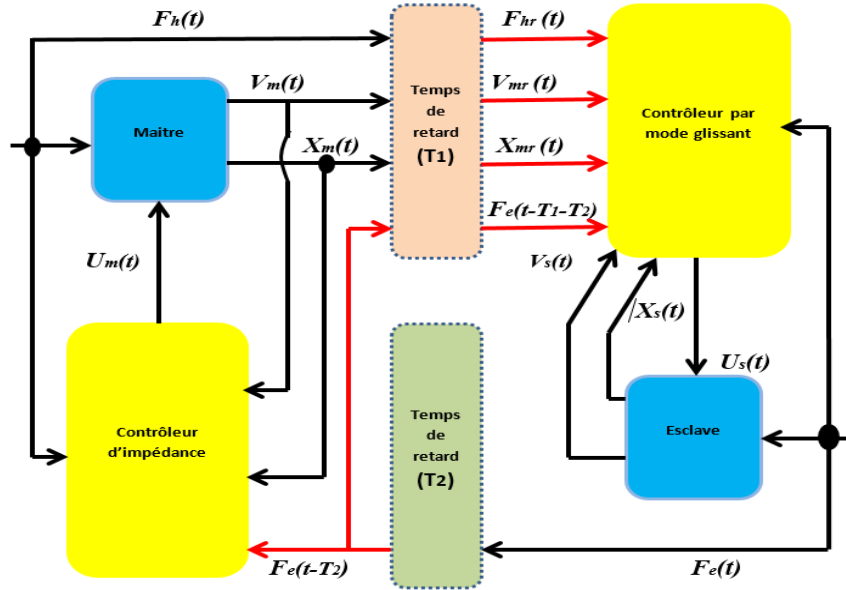


Figure 2.9 : schéma bloc de la stratégie de commande par mode glissant.

L'impédance caractéristique désirée coté maitre est :

$$M\ddot{x} + B\dot{x} + Kx_m = f_h - k_f f_e \quad (2.59)$$

M , B et K représentent l'inertie, le coefficient d'amortissement et la raideur de l'impédance désirée. En combinant les équations (2.59) et (2.4), La loi de commande du maitre est :

$$U_m = \left(B_m - \frac{M_m}{M} B \right) V_m + \left(\frac{M_m}{M} - 1 \right) f_h - \frac{M_m}{M} (k_f f_e + Kx_m) \quad (2.60)$$

La commande par mode glissant est implémentée coté esclave pour permettre à ce dernier de suivre la position du maitre. En choisissant la surface de glissement $s(t)$ comme :

$$s(t) = \dot{e}(t) + \lambda e(t) \quad (2.61)$$

Avec : $e(t) = x_s(t) - x_m(t)$ est l'erreur de suivi entre les positions du maître et de l'esclave et λ est constante positive. La loi de commande de l'esclave s'écrit :

$$U_s = B_s V_s + f_e - \frac{k_p M_s}{M} (B v_m - f_h + k_f f_e + k x_m) - \lambda M_s \dot{e} - K_g \text{sign}(s(t)) \quad (2.62)$$

En prenant en compte les temps de retard variable :

$$\begin{aligned} V_{mr}(t) &= V_m(t - T_1(t)) \\ f_{hr}(t) &= f_h(t - T_1(t)) \\ f_{er}(t) &= f_e(t - T_2(t)) \end{aligned} \quad (2.63)$$

ou T_1 est le temps nécessaire pour que l'information parcourt la distance du poste maitre vers l'esclave et T_2 de l'esclave vers le maitre. Les lois de commande (2.60) et (2.62) deviennent :

$$U_m(t) = \left(B_m - \frac{M_m}{M}\right)V_m(t) + \left(\frac{M_m}{M} - 1\right)f_h(t) - \frac{M_m}{M}\left(k_f f_{er}(t) + Kx_m(t)\right) \quad (2.64)$$

$$U_s(t) = B_s V_s(t) + f_e(t) - \frac{K_p M_s}{M} \left(B x_{mr} + Kx_{mr}(t) + k_f f_e(t) - f_{hr}(t)\right) - M_s \lambda \dot{e}_r - K_g \text{sign}(s_r(t)) \quad (2.65)$$

Où K_g est le gain non linéaire et s_r la nouvelle surface de glissement tel que : $s_r = \dot{e}_r + \lambda e_r$
où $e_r = x_s - x_{mr}$

Analyse de la stabilité

La fonction de Lyapunov candidate pour analyser la stabilité est la suivante :

$$V = \frac{1}{2} S^2 \quad (2.66)$$

Pour que le système soit stable il faudrait satisfaire la condition de glissement :

$$\dot{V} = S\dot{S} \leq 0 \quad (2.67)$$

En dérivant l'équation de Lyapunov on trouve :

$$\dot{V} = -S \left(\frac{k_p k_f}{M} (f_e(t) - f_e(t - T_1 - T_2)) - \frac{K_g}{M_s} \text{sign}(S_d(t)) \right) \quad (2.68)$$

Pour satisfaire la condition de glissement (2.67), le gain non linéaire doit être :

$$K_g \geq |S| \frac{k_p k_f M_s}{M} (f_e(t) - f_e(t - T_1 - T_2))$$

Nous pouvons remarquer que le choix du gain est toujours en fonctions des retards de transmission. Pour le rendre indépendant du délai de transmission une petite modification dans la loi de commande s'impose et l'équation (2.65) devient :

$$U_s(t) = B_s V_s(t) + f_e(t) - \frac{K_p M_s}{M} (B x_{mr} + Kx_{mr}(t) + k_f f_e(t - T_1 - T_2) - f_{hr}(t)) - M_s \lambda \dot{e}_r(t) - K_g \text{sign}(s_r(t)) \quad (2.69)$$

La nouveauté dans cette nouvelle loi de commande par rapport à celle donnée par l'équation (2.65) réside dans la substitution du terme $f_e(t)$ par le terme $f_e(t - T_1 - T_2)$.

Avec cette nouvelle loi, la dérivée de la fonction de Lyapunov est :

$$\dot{V} = -S_r \frac{K_g}{M_s} \text{sign}(S_r(t)) = -\frac{K_g}{M_s} |S_r| \quad (2.70)$$

L'équation précédente n'est pas en fonction des retards de transmission donc nous pouvons négliger l'effet du retard en choisissant le paramètre non linéaire positif et ainsi la stabilité est vérifiée.

En absence des retards de transmission, cette stratégie de commande donne de très bons résultats car on peut constater un bon suivi de position dans le cas libre et contraint, avec une erreur entre X_m et X_s presque nulle même après un contact avec l'environnement. Concernant les forces, les pics observés ont moins d'importance que ceux notés lors des deux architectures précédentes (à 2 canaux et 4 canaux) et les oscillations ont considérablement diminuées. De plus, en présence des retards de transmission constants, les résultats montrent de meilleures performances que les deux architectures à 4 canaux et à 2 canaux.

D'autres recherches ont été également rapportés. Par exemple, La commande par mode glissant du premier ordre est appliquée à la téléopération en présence de délais de communication variables asymétriques [87], mais il ne peut pas gérer la situation où l'esclave est en contact avec un environnement rigide. Par conséquent, un contrôleur de mode glissant d'ordre supérieur est proposé pour garantir un suivi robuste [88]. La commande par mode glissant à temps discret basée sur la théorie de Lyapunov est développée dans [89]. Et dans [90], une solution de commande par mode glissant appelée " nonsingular fast terminal sliding mode (NFTSM)" est mise au point pour assurer une convergence plus rapide et une plus grande précision pour la téléopération bilatérale avec un retard temporel constant.

Toutefois, dans la pratique, la méthode de la commande par mode de glissement se heurte au problème du chattering à haute fréquence, qui est une caractéristique inhérente à la commande par mode de glissement et qui est généralement difficile à surmonter [91].

2.4.6 Approche de commande prédictive

Le concept de la commande prédictive a été initialement introduit par Smith pour résoudre le problème du "Dead time" dans les boucles de commande chimique [49]. Dans l'approche proposée par Smith, une approximation linéaire de tout le système est placée dans une boucle de commande qui inclut un retard, communément appelé le prédicteur de Smith. Si l'estimation linéaire de celle-ci est précise, l'effet du retard peut être rejeté en dehors de la boucle de contrôle, ce qui améliore la stabilité et les performances du système.

Récemment, l'étude a été étendue aux systèmes de téléopération, dans lesquels l'opérateur reçoit à travers l'interface haptique, un signal de force kinesthésique qui est reproduit localement et qui simule la dynamique de l'esclave et de l'environnement. La difficulté liée à l'utilisation des prédicteurs de Smith dans les architectures de téléopération réside dans l'utilisation d'estimations dynamiques linéaires fixes de l'esclave et de l'environnement. Cependant, dans la

pratique, l'esclave et l'environnement présentent un comportement dynamique non linéaire variable dans le temps.

Dans [49], Le prédicteur de Smith est utilisé du côté du maître afin d'anticiper le calcul de l'information retardée provenant de l'esclave, tandis qu'un simple contrôleur de PD est mis en place au niveau de l'esclave. Ce schéma de télémanipulation est très similaire au schéma DFR, la force appliquée au maître étant calculée à l'aide du prédicteur et du retour de force de l'esclave. Les contrôleurs sont :

$$f_{mc} = G_c \left[\frac{(m_s s^2 + b_s s)(B_c s + K_c)}{m_s s^2 + (b_s + B_c)s + K_c} (1 - e^{-2sT})x_m + f_{sd} \right] \quad (2.71)$$

$$f_{sc} = (B_c s + K_c)(x_{md} - x_s)$$

Le terme de prédiction est évident dans la première expression (loi de commande principale). G_c , B_c et K_c sont des paramètres de commande. Les informations transmises sont :

$$x_{md} = e^{-sT} x_d, \quad F_{sd} = e^{-sT} F_{sc}.$$

Cette structure de commande est très similaire au schéma DFR. La seule différence est que le prédicteur de Smith calcule le retour d'effort à l'avance, en employant la position actuelle du maître. Les paramètres idéaux dans (2.71) sont $K_c \gg 0$ et $G_c = 1$, qui mènent aux résultats identiques à ceux obtenus pour la structure à force reflétée (les valeurs de l'inertie et de l'amortissement ont doublé $M_{eq} = 2M_m$ et $B_{eq} = 2B_m$; l'erreur de suivi dépend du retard $\delta = T/2B_m$; Une correcte perception de la rigidité de l'environnement $K_{eq} = K_e$. Glissement de position nul $\Delta = 0$) [49]. Pour l'analyse de stabilité, deux problèmes principaux sont impliqués : l'erreur dans le temps de retard dans le prédicteur de Smith et la nature des forces externes agissant sur l'esclave (les forces de perturbations par exemple). En fait, pour remédier au problème de retard, on doit prendre G_c inférieur à 1, ce qui fait une dégradation au niveau des avantages apportés dans la perception de la rigidité et l'annulation de glissement.

Dans le cas de la connaissance parfaite du retard T et dans le cas où on prend ($m_m = m_s = 10$ et $b_m = b_s = 1$, $K_c = 100$, $B_c = 10$ et $G_c = 1$). On obtient les résultats de T_{max} , en fonction de la raideur K_e et de l'amortissement B_e , illustrées dans la figure 2.10.

Les valeurs de T_{\max} correspondantes à chacun de K_e et B_e sont données respectivement dans la table 2.1.

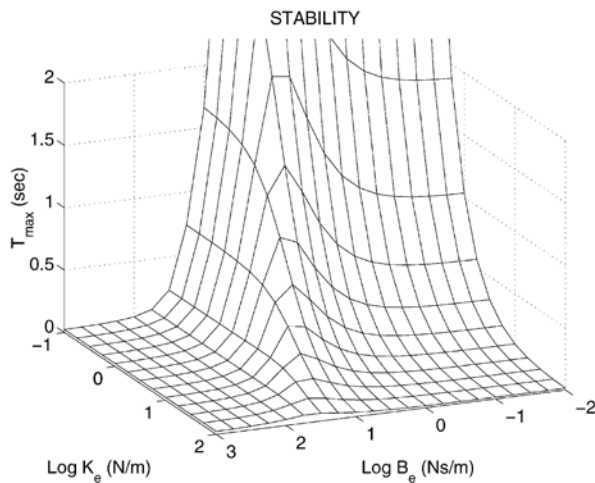


Figure 2.10 : Les propriétés de stabilité de l'approche prédictive en fonction des paramètres K_e et B_e .

($B_e = 0.5$)

K_e	1	10	100
T_{\max}	1.270	0.120	0.016

(a)

($K_e = 1$)

B_e	0.01	0.1	1	10	100	1000
T_{\max}	1.034	1.078	1.493	1.473	0.054	0.024

(b)

Tab.2.1 : Maximum de Retard de communication admissible par l'architecture prédictive (a) : $B_e = 0.5$; (b) : $K_e = 1$

Munir et al [92], ont recours à un filtre de Kalman pour l'estimation de la position du dispositif esclave et ont utilisé des variables d'onde pour transmettre des informations par le canal de communication, ce qui permet la mise en œuvre d'un prédicteur de Smith modifié. Les résultats expérimentaux concernant la téléopération via l'internet montrent que ces systèmes présentent une grande stabilité et une grande robustesse face à des retards importants et fluctuants. Cependant, cette approche nécessite une connaissance précise de la dynamique du système, car toute imprécision ou incertitude du modèle peut entraîner une déstabilisation rapide du système. En outre, pour obtenir des performances optimales, il est nécessaire de bien estimer le délai de communication.

Dans [93], Huang et al. ont proposé d'utiliser les réseaux de neurones dans le contrôleur de l'esclave pour supprimer les effets dynamiques non linéaires de l'esclave et de l'environnement afin que la dynamique linéaire restante puisse être estimée avec précision dans une architecture de prédicteur de Smith. Cependant, bien que ce travail compense le retard et puisse le faire sur des dynamiques non linéaires de l'esclave et de l'environnement, il n'est pas en mesure de s'adapter à des dynamiques inconnues ou changeantes. Un prédicteur à temps discret a été introduit dans [94], qui a utilisé une méthode de reconception de Lyapunov afin de traiter la présence d'incertitudes dans le système. Cependant, le schéma de commande était basé sur l'hypothèse de perturbations limitées, ce qui pourrait ne pas être réaliste dans des environnements non structurés.

Une intéressante contribution, [94], a fourni une étude comparative et une analyse complète des différentes approches de la commande prédictive. Cet article couvre principalement les approches basées sur des modèles dans le domaine de la téléopération.

2.4.7 Approche de commande adaptative

Une autre alternative pour un meilleur compromis entre stabilité, robustesse et performance est l'utilisation de contrôleurs adaptatifs qui ajustent leurs paramètres en fonction des informations de contact ou de l'impédance de l'opérateur et de l'environnement [95]. Ce type de contrôleur est également bien adapté aux situations où la dynamique de l'environnement n'est pas structurée ou variable dans le temps.

Chopra, Spong et Lozano [96] considèrent un schéma adaptatif qui traite de l'incertitude paramétrique, où un nouveau signal mixte position-vitesse est transmis dans les équations d'ondes (2.49) au lieu de la seule vitesse. Considérant le modèle non linéaire (NL) qui peut être exprimé à partir des équations de Lagrange de la manière suivante :

$$M_m(q_m)\ddot{q}_m + C_m(q_m, \dot{q}_m)\dot{q}_m = \tau_m + f_h \quad (2.72)$$

$$M_s(q_s)\ddot{q}_s + C_s(q_s, \dot{q}_s)\dot{q}_s = \tau_s - f_e$$

où M_* (* = m ou s) est la matrice d'inertie, et la matrice $C_*(q_*, \dot{q}_*)$ comprend les termes de Coriolis et de centrifugation, q_* , \dot{q}_* , \ddot{q}_* sont les vecteurs des déplacements, des vitesses et des accélérations des articulations. De même, les signaux suivants sont définis pour le maître et l'esclave, respectivement :

$$r_m := \dot{q}_m + \lambda q_m \quad (2.73)$$

$$r_s := \dot{q}_s + \lambda q_s$$

Ainsi, en utilisant le fait que le modèle (NL) est linéairement paramétrable [97], et en utilisant la loi de feedback suivante :

$$\tau_m = -\tau_{md} - \widehat{M}_m(q_m)\lambda\dot{q}_m - \widehat{C}_m(q_m, \dot{q}_m)\lambda q_m \quad (2.74)$$

$$:= -\tau_{md} - Y_m \widehat{\theta}_m$$

$$\tau_s = -\tau_{sd} - \widehat{M}_s(q_s)\lambda\dot{q}_s - \widehat{C}_s(q_s, \dot{q}_s)\lambda q_s$$

$$:= -\tau_{sd} - Y_s \widehat{\theta}_s$$

On obtient le système en boucle fermée suivant :

$$M_m \dot{r}_m + C_m r_m = Y_m \tilde{\theta}_m + f_h - \tau_{md} \quad (2.75)$$

$$M_s \dot{r}_s + C_s r_s = Y_s \tilde{\theta}_s + \tau_{sd} - f_e$$

avec Y_m , Y_s sont des fonctions connues des coordonnées généralisées. $\tilde{\theta}_m = \theta_m - \hat{\theta}_m$, $\tilde{\theta}_s = \theta_s - \hat{\theta}_s$ sont les erreurs d'estimation. Les lois de d'adaptation des paramètres ($\hat{\theta}_m$ et $\hat{\theta}_s$) peuvent être déduites à partir de l'argument de Lyapunov comme suit :

$$\dot{\hat{\theta}}_m = \Gamma Y_m^T r_m \quad (2.76)$$

$$\dot{\hat{\theta}}_s = \Lambda Y_s^T r_s$$

avec Γ et Λ sont des matrices définies positives et constantes.

En utilisant ce schéma, on peut montrer que les erreurs d'estimation des paramètres restent bornées et que les erreurs définies entre les positions du maître et de l'esclave convergent vers zéro de manière asymptotique.

Les réseaux de neurones ont été utilisés pour caractériser le comportement entrée-sortie de systèmes présentant une dynamique non linéaire, tels que les robots manipulateurs [98], ou pour identifier les paramètres d'un modèle dynamique d'environnement non linéaire [99]. Ces méthodes utilisent souvent des techniques d'apprentissage hors ligne qui limitent leurs applications.

Love et al. ont proposé une méthode pour identifier l'impédance de l'environnement en utilisant les moindres carrés récurrents et en ajustant l'amortissement artificiel au niveau du maître pour assurer la stabilité sur la base de l'impédance estimée [22]. Par conséquent, le système réduit considérablement les efforts et la fatigue de l'opérateur. Il est important de noter que la transparence n'est pas abordée dans cette étude.

Dans [100], un observateur d'état basé sur une commande par mode glissant avec des propriétés de convergence en temps fini est utilisé en présence d'un retard variable avec un maximum de 0,5 s, et leurs résultats expérimentaux montrent l'efficacité de la commande dans cette limite de retard.

Une commande adaptative bilatérale basée sur un réseau neuronal est développée [101], en présence d'un retard constant, des perturbations externes et un frottement interne. Le contrôleur utilise un réseau de neurones pour approximer le modèle du système et emploie une méthode adaptative pour estimer les frottements internes inconnus et les perturbations externes. La stabilité du système de téléopération bilatérale est garantie et ses performances de suivi sont améliorées.

Comme il est constaté auparavant, chaque structure possède des aspects positifs et négatifs. Donc il est indispensable de choisir la structure de commande selon l'application envisagée. Dans ce qui suit, nous allons rappeler les principaux critères obtenus de l'analyse précédente.

- Le premier critère à considérer se base sur le délai de transmission T . En fait, le retard pourra être très petit (quelques millisecondes), moyen (quelques dixièmes d'une seconde) ou grand (quelques secondes ou plus). il pourra même être constant ou variable. Cette connaissance préalable du temps nous ramène à choisir quelques structures de télémanipulation et pas d'autres.
- Le deuxième critère à tenir en compte est les performances exigées telles que le suivi de trajectoire, la bande passante, le glissement et les impédances transmises.
- La troisième question est liée aux aspects d'implémentation et d'équipement disponibles pour le développement du contrôleur (capteur, puissance de calcul, largeur de bande passante de transmission, etc...).
- En dernier, un critère qui est important est la nécessité de connaître la structure de l'environnement, ainsi que d'avoir l'information sur la valeur maximale de la force à exercer sur cet environnement.

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé un aperçu des différents critères d'analyse de stabilité et de mesure de performance qui peuvent être utilisés pour justifier le choix approprié des paramètres caractéristiques de chaque commande. Ensuite, nous avons résumé une vaste littérature concernant les architectures de commande des systèmes de téléopération, en mettant l'accent sur les structures les plus reconnues.

L'étude présentée dans ce chapitre, ainsi que les différentes approches de commande mentionnées précédemment, nous ont inspirés pour développer de nouvelles structures de commande bilatérales. Celles-ci seront exposées dans les chapitres trois et quatre afin de répondre aux exigences du cahier des charges et de résoudre les problématiques évoquées, supposant dans notre cas un retard de communication négligeable.

CHAPITRE 3

Structures de commande
bilatérales adaptatives et
intelligentes à quatre canaux

3.1 Introduction

Les progrès des réseaux de communication et des systèmes robotiques ont permis aux systèmes de téléopération de gagner en popularité dans le monde entier pour diverses applications telles que la chirurgie à distance, la rééducation robotique, la gestion des catastrophes, etc. Dans la majorité de ces applications, les manipulateurs sont conçus comme des robots maître et esclave dont les mouvements et les forces d'interaction doivent être synchronisés. Pour établir ce mouvement synchrone, des contrôleurs sont nécessaires à la fois dans le côté maître et dans le côté esclave. La conception d'un tel contrôleur est une tâche difficile car les manipulateurs robotiques sont des systèmes non linéaires qui interagissent avec des caractéristiques variables et inconnues de l'environnement, en outre, le retard du canal de communication ajoute à la complexité du problème.

Étant donné que les contrôleurs adaptatifs déployés pour traiter les incertitudes du modèle maître/esclave et du modèle opérateur/environnement sont très similaires, les algorithmes proposés dans la littérature pour réaliser une commande adaptative peuvent être regroupés en quatre axes principaux

- 1) *Des contrôleurs adaptatifs pour l'estimation du modèle de l'opérateur et de l'environnement* : L'un des principaux obstacles à la modélisation et à la commande des systèmes de téléopération est la dynamique souvent inconnue de l'environnement distant et de l'opérateur humain, qui font partie de la boucle fermée globale. Dans [22,102], le système global de téléopération est susceptible de fonctionner comme un système masse-ressort-amortisseur du deuxième ordre utilisant une commande adaptative de l'impédance, en particulier lorsqu'il entre en contact avec un objet rigide.
- 2) *Des contrôleurs adaptatifs pour le rejet des perturbations* : qui traitent les problèmes de la réjection des perturbations internes qui sont dues aux incertitudes des modèles du maître et de l'esclave, et des perturbations externes qui sont liées aux conditions de l'environnement, au bruit des mesures, etc [103,104].
- 3) *Des contrôleurs adaptatifs pour la compensation des retards de communication* : le contrôleur est en mesure de faire face au problème du délai de communication. Le maître et l'esclave sont souvent éloignés l'un de l'autre. Par conséquent, des retards importants se produisent lors de la transmission des signaux et des commandes. Par conséquent, la stabilité globale des systèmes de téléopération est affectée et compromise. Dans [105,96, 106], des contrôleurs basés sur une approche passive et adaptative sont proposés pour assurer la

robustesse face aux incertitudes des modèles maître et esclave et aux délais de communication.

4) *Des contrôleurs adaptatifs à fonctions multiples* : les contrôleurs agissent simultanément sur plusieurs de ces principaux axes de commande inhérents à la téléopération. Les contrôleurs adaptatifs qui compensent le retard de communication peuvent également être considérés comme des contrôleurs adaptatifs à fonctions multiples, car ils compensent les effets du retard de communication soit en estimant le modèle d'environnement précis et en l'actualisant en temps réel, soit en supprimant les incertitudes des modèles du maître et de l'esclave. Dans [107], les schémas robustes adaptatifs pour la réjection des perturbations internes et externes sont présentés pour améliorer la performance de la tâche et gérer les incertitudes du modèle et les perturbations externes. Le travail réalisé dans cette thèse et qui est présenté dans le chapitre 3 et chapitre 4 fait partie de ce groupe et cible l'objectif de traiter simultanément les problématiques liées aux deux premiers axes.

Ce chapitre a pour objectif de proposer deux nouvelles structures de commande bilatérales adaptatives et intelligentes d'un système de téléopération basées sur une structure à 4-canaux. La première structure est organisée autour de deux stratégies de commande, la première consiste en une approche de commande force/impédance appliquée au robot maître, tandis que la seconde consiste en une approche de commande parallèle force/position appliquée au robot esclave régi par un modèle dynamique non linéaire à N degrés de liberté. La deuxième structure est conçue aussi autour de deux stratégies de commande, la première, appliquée au robot maître, choisie la même que celle appliquée dans premier schéma, alors que la deuxième implique une structure de commande hiérarchique force/position appliquée au robot esclave.

Une identification en ligne de l'environnement basée sur la méthode des moindres carrés récursifs à facteur d'oubli (MCR-FO) est utilisée, pour estimer les caractéristiques de rigidité inconnues de l'environnement et extraire le bruit généré par les capteurs de force, supposés de mauvaise qualité, installés sur l'effecteur terminal, tandis qu'un compensateur neuronal (CN) est appliqué pour éliminer les effets des incertitudes dans le modèle dynamique du robot esclave.

3.2 Description des modèles mathématiques des robots maitre et esclave

3.2.1 Le robot esclave

Le PUMA 560 (Programmable Universal Machine for Assembly) est le bras robotique industriel développé par Victor Scheinman au sein de la société pionnière de robotique UNIMATION en 1978. C'est peut-être l'un des robots les plus réputés jamais fabriqués et il a fait l'objet de recherches à la fois dans les institutions universitaires et dans l'industrie. Le PUMA 560 est un bras robotique à six axes, connu pour sa polyvalence et sa précision. Sa conception lui permet de se déplacer dans différentes directions avec un degré de liberté élevé, ce qui le rend adapté à un large éventail d'applications, notamment l'assemblage, la manutention et divers processus de fabrication. La description de la géométrie du robot PUMA 560, ainsi que le placement des repères selon la notation de Denavit-Hartenberg (DH) sont indiqués sur la Figure 3.1.

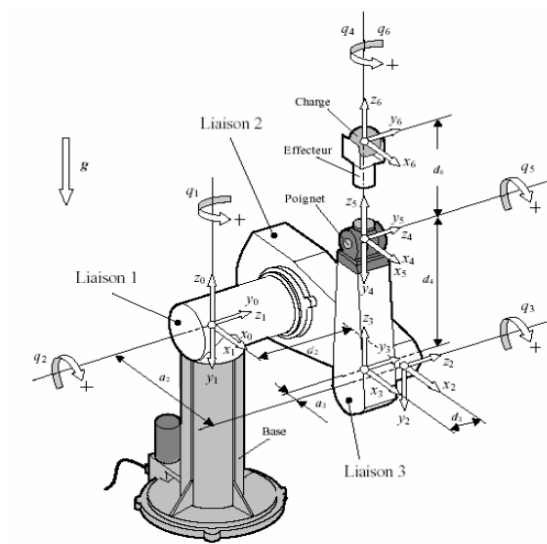


Figure 3.1 : Géométrie du robot PUMA560.

Les paramètres géométriques du robot PUMA 560 selon la notation de (DH) sont donnés dans le tableau 3.1.

$Link_i (q_i)$	d_i	a_{i-1}	α_{i-1}	Range of joint (deg)
1 (q_1)	0	0	0	-160 to +160
2 (q_2)	0.2435	0	$-\pi/2$	-225 to +45
3 (q_3)	-0.0934	0.4318	0	-45 to +255
4 (q_4)	0.4331	-0.0203	$\pi/2$	-110 to +170
5 (q_5)	0	0	$-\pi/2$	-100 to +100
6 (q_6)	0	0	$\pi/2$	-266 to +266

Tableau 3.1 : Paramètres géométriques du robot PUMA 560.

A. Modèle géométrique direct

Le modèle géométrique direct (MGD) d'un robot manipulateur exprime la situation de l'organe terminal en fonction des variables articulaires, c'est-à-dire, les coordonnées opérationnelles X du robot, en fonction de ses coordonnées articulaires q , par rapport à un repère de référence. Pour les trois premières articulations du robot PUMA560 que nous avons utilisées dans la partie esclave, les expressions sont les suivantes [108]:

$$\begin{cases} P_x = C1(a_3C23 + d_4S23 + a_2C2) - (d_2 + d_3)S1 \\ P_y = S1(a_3C23 + d_4S23 + a_2C2) + (d_2 + d_3)C1 \\ P_z = -a_3S23 + d_4C23 - a_2S2 \end{cases} \quad (3.1)$$

Avec : $Ci = \cos(q_i)$, $Si = \sin(q_i)$, $Cij = \cos(q_i + q_j)$, $Sij = \sin(q_i + q_j)$. $i, j = 1, 2$ et 3 .

B. Modèle géométrique inverse

Le modèle géométrique inverse (MGI) permet de calculer les coordonnées articulaires correspondant à une situation donnée de l'organe terminal. Ce modèle est calculé analytiquement par les expressions suivantes [108]:

$$\begin{cases} q_1 = \tan^{-1} \frac{P_x}{P_y} + \tan^{-1} \frac{\sqrt{P_x^2 + P_y^2 - (d_2 + d_3)^2}}{d_2 + d_3} \\ q_2 = \tan^{-1} \frac{d_4C3 - a_3S3}{d_4S3 + a_3C3 + a_2} - \tan^{-1} \frac{P_z}{C1P_x + S1P_y} \\ q_3 = -\tan^{-1} \frac{a_3}{d_4} + \tan^{-1} \frac{K}{\sqrt{a_3^2 + d_4^2 - K^2}} \end{cases} \quad (3.2)$$

Avec,

$$K = \frac{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2 - a_2^2 - a_3^2 - d_4^2 - (d_2 + d_3)^2}{2a_2}$$

C. Modèle cinématique direct du premier et du second ordre

Le modèle cinématique direct (MCD) du premier ordre a pour but d'exprimer les vitesses des coordonnées opérationnelles en fonction des vitesses articulaires, donné par la relation suivante :

$$\dot{X}_s = J(q_s)\dot{q}_s \quad (3.3)$$

$J(q_s)$ représente la matrice Jacobienne du robot et s'obtient par dérivation de son modèle géométrique direct à partir de la relation suivante :

$$J_{ij} = \frac{\partial f_i(q)}{\partial q_j} \quad i = 1,2 \text{ et } 3 ; j = 1,2 \text{ et } 3 \quad (3.4)$$

$f_i(q_s)$ sont les expressions des coordonnées opérationnelles en fonction des coordonnées articulaires représentant le modèle géométrique direct. J_{ij} représente l'élément (i,j) de la matrice Jacobienne donnée par :

$$J = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Avec,

$$J_{11} = -S1(a_2C2 + a_3C23) - (d_2 + d_3)C1 - d_4S1S23$$

$$J_{12} = -C1(a_2S2 + a_3S23) + d_4C1C23$$

$$J_{13} = -a_3C1S23 + d_4C1C23$$

$$J_{21} = C1(a_2C2 + a_3C23) - (d_2 + d_3)S1 - d_4C1S23$$

$$J_{22} = -S1(a_2S2 + a_3S23) + d_4S1C23$$

$$J_{23} = -a_3S1S23 + d_4S1C23$$

$$J_{31} = 0$$

$$J_{32} = -(a_2C2 + a_3C23) - d_4S23$$

$$J_{33} = -a_3C23 - d_4S23$$

Le (MCD) du second ordre permet de calculer les accélérations des coordonnées opérationnelles \ddot{X} en fonction des positions, vitesses et accélérations articulaires. Il s'obtient par dérivation du modèle cinématique par rapport au temps.

$$\ddot{X}_s = J(q_s)\ddot{q}_s + \dot{J}(q_s, \dot{q}_s)\dot{q}_s \quad (3.6)$$

Avec

$$\dot{J}(q_s, \dot{q}_s) = \frac{dJ(q_s)}{dt}$$

D. Modèle cinématique inverse du premier et du second ordre

Le modèle cinématique inverse (MCI) du premier ordre a pour but de calculer les vitesses articulaire \dot{q} qui assurent au repère terminal une vitesse opérationnelle X & désirée à partir d'une configuration q donnée. Il s'écrit

$$\dot{q}_s = J^{-1}(q_s)\dot{X}_s \quad (3.7)$$

Le (MCI) du second ordre, traite le problème inverse au précédent. Il permet de calculer le vecteur des accélérations articulaires \ddot{q} en fonction des accélérations opérationnelles \ddot{X} . Il est obtenu directement à partir de la relation (3.6) comme suit :

$$\ddot{q}_s = J^{-1}(q_s)(\ddot{X} - \dot{J}(q_s, \dot{q}_s)\dot{q}_s) \quad (3.8)$$

E. Modèle dynamique

Le modèle dynamique du manipulateur peut se mettre sous la forme compacte (matricielle) suivante :

$$M_s(q_s)\ddot{q}_s + V_s(q_s, \dot{q}_s)\dot{q}_s + G_s(q_s) = \tau_{sc} \quad (3.9)$$

$M_s(q_s) \in \mathfrak{R}^{n \times n}$ est la matrice d'inertie du robot.

$V_s(q_s, \dot{q}_s) \in \mathfrak{R}^{n \times n}$ est la matrice des couples centrifuges et de Coriolis.

$G_s(q_s) \in \mathfrak{R}^{n \times 1}$ est le vecteur des couples gravitationnelles.

$\tau_{sc} \in \mathfrak{R}^{n \times 1}$ est le vecteur des couples de commande externe.

Au vecteur de couples τ_{sc} , il correspond un vecteur d'efforts de commande F_{sc} dans l'espace opérationnel. Ce vecteur d'efforts de dimension $(n \times 1)$ est exprimé dans le repère de référence et il est relié au couple de commande τ_{sc} par la matrice Jacobienne J suivante :

$$\tau_{sc} = J^T F_{sc} \quad (3.10)$$

En introduisant les relations (3.3), (3.6), (3.8) et (3.10) dans (3.9) et en considérant le vecteur des efforts/moments extérieurs F_e que le robot esclave exerce sur son environnement et les frottements τ_f au niveau des articulations, le modèle dynamique du robot esclave est exprimé dans l'espace cartésien par :

$$M_x(q_s)\ddot{X}_s + V_x(q_s, \dot{q}_s)\dot{X}_s + G_x(q_s) + F_f = F_{sc} - F_e \quad (3.11)$$

où

$$M_x = J^{-T} M_s(q_s) J^{-1},$$

$$V_x = J^{-T} [V_s(q_s, \dot{q}_s) - M_s J^{-1} \dot{J}] J^{-1}$$

et

$$G_x = J^{-T} G_s(q_s).$$

Pour le cas du bras manipulateur PUMA560 à trois degrés de liberté, les matrices du modèle dynamique sont données dans l'annexe A.

3.2.2 Le robot maître

Ce robot possède un modèle géométrique identique et similaire au robot esclave sauf qu'il est caractérisé par sa structure légère et sa dynamique linéaire dont le modèle est représenté par l'équation suivante :

$$A_m \ddot{q}_m + B_m \dot{q}_m + g_m = \tau_{mc} \quad (3.12)$$

où A_m , B_m et g_m désignent l'impédance caractéristique de ce robot dans l'espace articulaire. Comme le couplage se fait dans l'espace cartésien, le modèle équivalent est donné par l'équation suivante :

$$A_x \ddot{X}_m + B_x \dot{X}_m + g_x = F_{mc} + F_h \quad (3.13)$$

Avec F_h est l'effort appliqué par l'opérateur sur l'interface maître. Les matrices A_x , B_x et g_x sont exprimées dans l'espace cartésien par :

$$A_x = J^{-T} A_m J^{-1},$$

$$B_x = J^{-T} [B_m - A_m J^{-1} \dot{J}] J^{-1},$$

et
$$g_x = J^{-T} g_m.$$

3.3 Architecture de la commande à 4-Canaux

Cette architecture de téléopération est représentée sur la Figure 3.2. Nous considérons que le retard de transmission entre les deux sites est négligeable par rapport à la période d'échantillonnage utilisée dans la commande des deux sites (maître et esclave). La ligne de transmission des données n'est donc pas représentée. Les données en échanges sont d'une part la position de l'opérateur et son effort appliqué et d'autre part la position du robot esclave et le retour d'effort, directement mesuré par les capteurs de force installés au niveau de l'organe terminal de l'esclave.

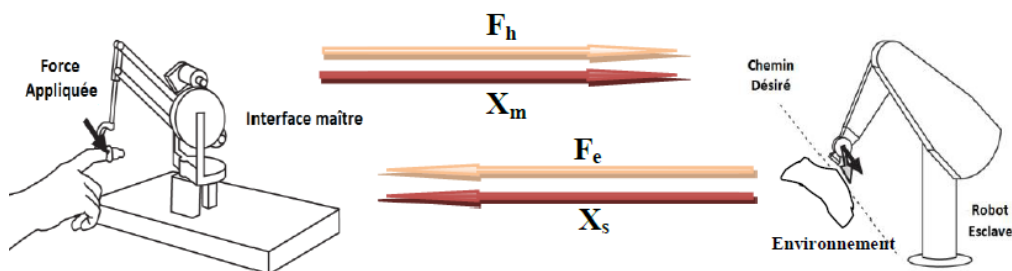


Figure 3.2 : Architecture à quatre canaux.

3.3.1 Approche de commande bilatérale adaptative et intelligente basée sur une structure parallèle force/position

A. Loi de commande force/impédance du robot maître

Le principe de l'asservissement bilatéral repose sur la réversibilité des mécanismes. Supposant que l'opérateur exerce une force F_h sur le robot maître. Grâce à la réversibilité des actionneurs, cet effort se traduira par un déplacement du robot maître, envoyé comme consigne au robot esclave. Si les mécanismes n'étaient pas réversibles, une force extérieure appliquée sur l'organe terminal (par l'opérateur pour le robot maître et par l'environnement pour le robot esclave) ne se traduira par aucun déplacement des robots. Dans le cas où les mécanismes ne sont pas naturellement réversibles, l'utilisation des capteurs d'efforts qui peuvent être placés tout près de l'organe terminal, permet de réaliser la réversibilité artificielle (assistée par ordinateur).

Dans notre cas, nous avons adopté une stratégie de commande en force / impédance (Figure 3.3) pour contrôler le robot maître, et cela se base sur deux lois de commandes alternatives, tel que la première est donnée par :

$$F_{mc} = \left(\hat{B}_x - \frac{\hat{A}_x}{A_d} B_d \right) \dot{X}_m + \left(\frac{\hat{A}_x}{A_d} - 1 \right) F_h - \frac{\hat{A}_x}{A_d} F_e + \hat{g}_x \quad (3.14)$$

Avec \hat{A}_x, \hat{B}_x et \hat{g}_x sont respectivement les valeurs estimées de A_x, B_x et g_x .

A_d, B_d sont respectivement les matrices d'inertie et d'amortissement de l'impédance désirée. F_h et F_e représentent respectivement le vecteur de force appliqué par l'opérateur et le vecteur de force de contact appliqué sur l'objet.

La dynamique en boucle fermée est réécrite dans l'espace opérationnel comme suite :

$$A_d \ddot{X}_m + B_d \dot{X}_m = F_h - F_e \quad (3.15)$$

Ce mode est opérationnel tant que le mouvement s'effectue en espace libre, une fois qu'il devient contraint, le système passe à la seconde loi de commande (3.16), qui vise à corriger l'erreur de positionnement du robot local lorsque le robot esclave est contraint par l'environnement.

$$F_{mc} = \left(\hat{B}_x - \frac{\hat{A}_x}{A_d} B_d \right) \dot{X}_m + \left(\frac{\hat{A}_x}{A_d} - 1 \right) F_h - \frac{\hat{A}_x}{A_d} (F_e - K_d (X_m - X_s)) + \hat{g}_x \quad (3.16)$$

La dynamique ainsi en boucle fermée est réécrite dans l'espace opérationnel comme suite :

$$A_d \ddot{X}_m + B_d \dot{X}_m + K_d (X_m - X_s) = F_h - F_e \quad (3.17)$$

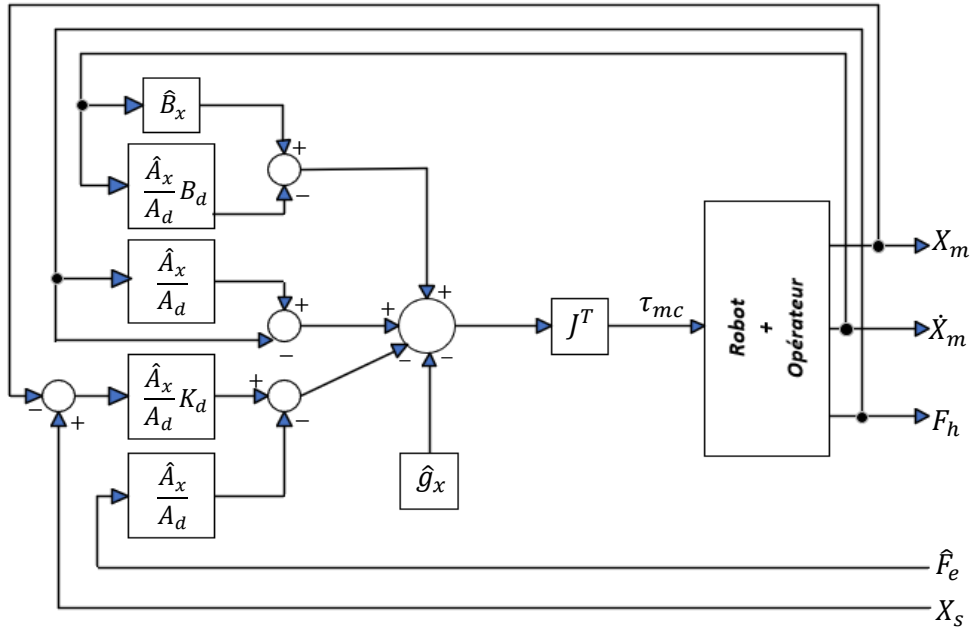


Figure 3.3 : Structure de la commande en force/impédance.

B. Loi de commande dynamique parallèle force/position du robot esclave

Notre stratégie de commande du robot esclave est basée sur une structure de commande dynamique parallèle force/position proposée dans littérature par CHIAVERINI [109] donnée par la figure suivante :

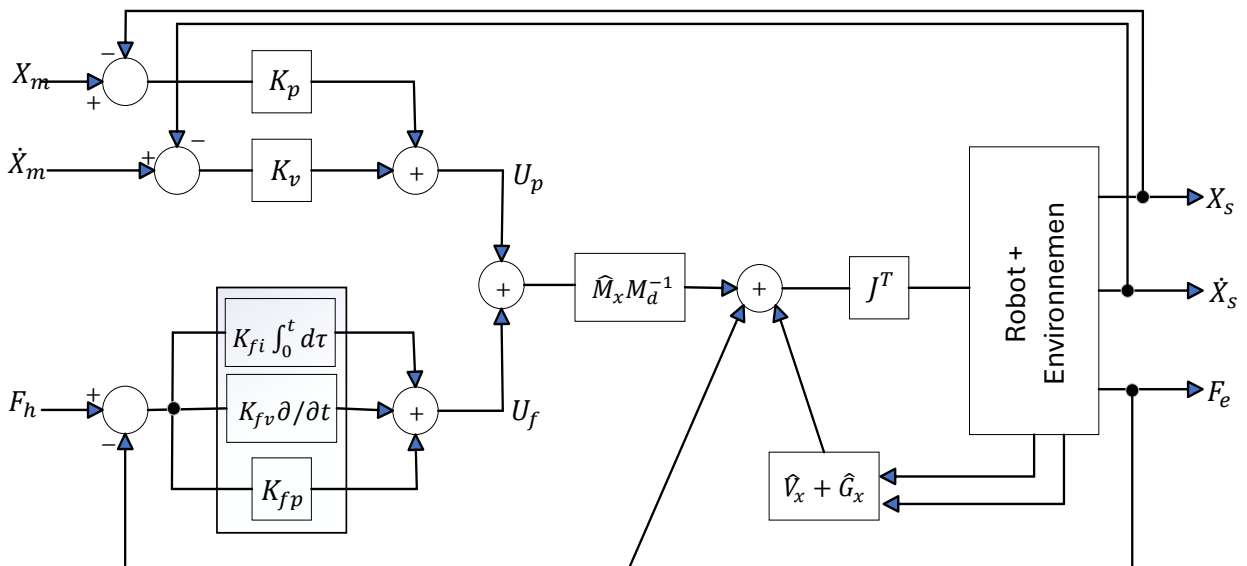


Figure 3.4 : Structure dynamique de la commande parallèle force/position.

Dans cette configuration, la loi de commande en effort est calculée de façon à prévaloir sur la commande en position. En cas de conflit, les écarts de la tâche planifiée donnent la priorité à la commande en effort grâce à une stratégie de dominance de la loi de commande en effort sur celle en position le long des directions contraintes. La stratégie de commande en position

appliquée dans notre système de téléopération est basée sur un découplage non linéaire du robot esclave, permettant la commande d'un ensemble de systèmes linéaires parfaitement découplés dans la mesure où les paramètres du modèle sont estimés avec précision. Dans ce cas, le schéma est composé d'une boucle de commande en position basée sur une action PD en parallèle avec une boucle en effort basée sur une action PID (voir la Figure 3.4). La loi de commande est donnée par :

$$F_{sc} = \widehat{M}_x M_d^{-1} U_s + \widehat{V}_x \dot{X}_s + \widehat{G}_x + F_e \quad (3.18)$$

Avec,

$$U_s = \Delta U_f + \Delta U_p$$

où

$$\Delta U_f = \widehat{K}_e^{-1} \left(K_{fi} \int (F_h - F_e) + K_{fv} (\dot{F}_h - \dot{F}_e) + K_{fp} (F_h - F_e) \right)$$

$$\Delta U_p = M_d \ddot{X}_m + K_v (\dot{X}_m - \dot{X}_s) + K_p (X_m - X_s)$$

Où \widehat{M}_x , \widehat{V}_x , \widehat{G}_x et \widehat{K}_e désignent les termes nominaux et disponibles du modèle dynamique de Puma 560 et la raideur de l'environnement. L'équation dynamique en boucle fermée, dans le cas idéal (modèle parfait), s'écrit comme suit :

$$M_d \ddot{E}_p + K_v \dot{E}_p + K_p E_p + \widehat{K}_e^{-1} (K_{fi} \int E_f + K_{fv} \dot{E}_f + K_{fp} E_f) = 0 \quad (3.19)$$

Avec : $E_p = X_m - X_s$, $E_f = F_h - F_e$.

C. Définition de la tâche

Pour évaluer l'efficacité du schéma de commande maître-esclave que nous avons développé, nous avons réalisé plusieurs simulations en utilisant le modèle du robot PUMA560. Ces simulations ont porté sur ses trois premiers degrés de liberté [110], tandis que les autres DDL ont été fixés (les détails de la structure de ce bras et de ses modèles sont fournis dans l'annexe A). La tâche choisie a pour objectif d'explorer d'une part l'environnement distant et faire manipuler un objet situé quelque part dans la zone de travail du robot et d'autre part, de solliciter toutes les trois articulations du robot PUMA560. Pour cela, l'opérateur doit appliquer un effort F_h sur le robot maître pour faire déplacer le robot esclave, en commençant à partir de deux points différents de l'espace cartésien : $P_m = (0.4115\text{m}; 0.150\text{m}; 0.4331\text{m})$ pour le maître et $P_s = (0.4163\text{m}; 0.6282\text{m}; -0.2846\text{m})$ pour l'esclave. Lorsque ce dernier atteindra l'objet, il devra appliquer un effort de forme sinusoïdale, tout en maintenant cet effort sur les directions X, Y et Z choisies pendant la phase de configuration sur l'interface de simulation développée sous LabVIEW. L'effort appliqué de la tâche à accomplir et le panneau de paramétrage de la tâche sont illustrés dans la figure 3.5.

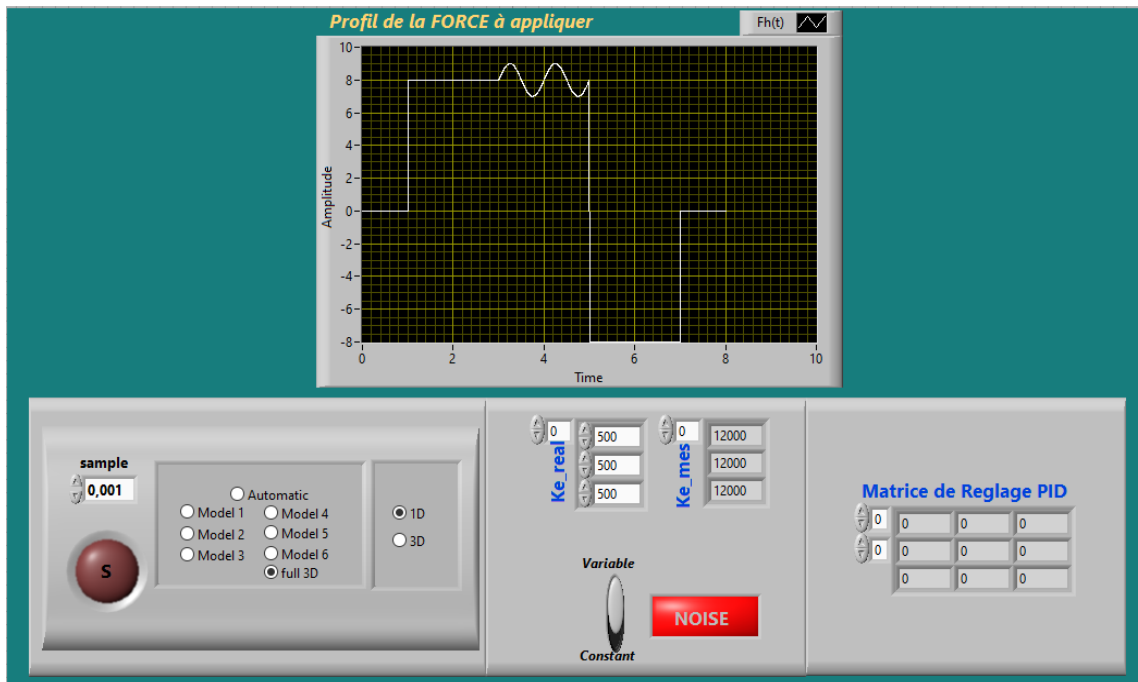


Figure 3.5 : Le profil de l'effort appliqué et le panneau de paramétrage de la tâche.

D. Résultats de simulation

Les figures 3.6 - 3.9 présentent les tracés des courbes de position et de force, obtenus en mettant en œuvre le schéma proposé basé sur l'architecture à 4 canaux, en utilisant le logiciel LabVIEW. Les paramètres de réglages utilisés sont les suivants : $A_d = I(kg)$, $B_d = 40(Ns/m) \times I$, $K_d = 800(N/m) \times I$, $M_d = I(kg)$, $K_v = 40 \times I$, $K_p = 800 \times I$, $K_{fi} = 0.1 \times I$, $K_{fv} = 500 \times I$, $K_{fp} = 10^4 \times I$. Les courbes correspondantes sont présentées dans les figures ci-dessous, pour trois valeurs différentes de la raideur (2000/10000/20000 N/m).

Interprétation des résultats

Les tracés des courbes de position associées au maître et à l'esclave reflètent une cohérence remarquable dans la plupart des phases de la tâche, illustrant une synchronisation identique entre les mouvements. Ceci se manifeste à travers divers scénarios d'application de force, comme démontré dans la figure 3.6. Dans cette dernière, les résultats sont exposés pour la mise en œuvre du profil de force dans les directions contraintes de X et Z , tandis que la direction Y reste libre (non contrainte). Par ailleurs, les figures 3.7, 3.8 et 3.9 présentent les résultats obtenus lors de l'application de la force F_h sur les trois directions X , Y et Z . Ces observations s'appliquent également à trois niveaux de raideur différents (2000/10000/20000 N/m).

Les tracés des courbes de forces de l'esclave par rapport au maître montrent et confirment la qualité de suivi remarquable dans l'ensemble, démontrant la capacité de l'esclave à reproduire

fidèlement les forces exercées par le maître. Cependant, il est important de noter la présence de pics distincts au moment du premier contact entre l'objet situé à la position P_e et l'organe terminal du robot, ainsi qu'au moment de l'éloignement. Ces pics pourraient être attribués à des variations temporaires dans la réponse du système aux changements rapides dans la force exercée. D'autre part, à chaque fois qu'on augmente la rigidité de ce dernier, les valeurs des pics deviennent plus importantes et pouvant engendrer des oscillations qui risquent d'endommager l'environnement et/ou l'outil de travail. Cette situation découle de la limitation inhérente à l'ajustement des gains des contrôleurs pour s'adapter aux variations des niveaux de raideur de l'environnement.

Ce schéma de commande nous a mené à la réalisation de la transparence totale qui est l'objectif de la téléopération et qui signifie que l'opérateur ressent comme s'il manipule l'environnement par sa propre main et donc la réalisation de l'égalité suivante $F_e(t) = F_m(t)$, et $X_s(t) = X_m(t)$.

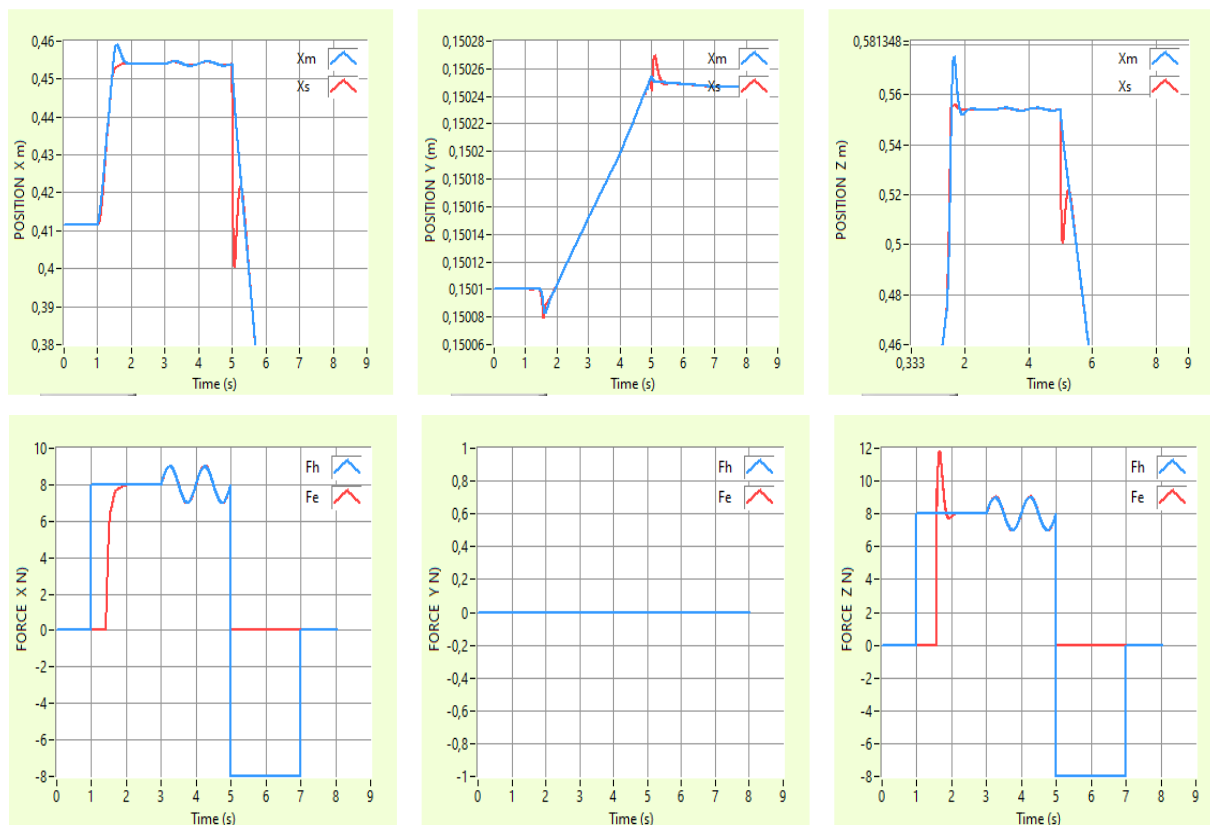


Figure 3.6 : Suivi de la position et de la force appliquée selon les directions X, Z pour $K_e = 2000 \text{ N/m}$.

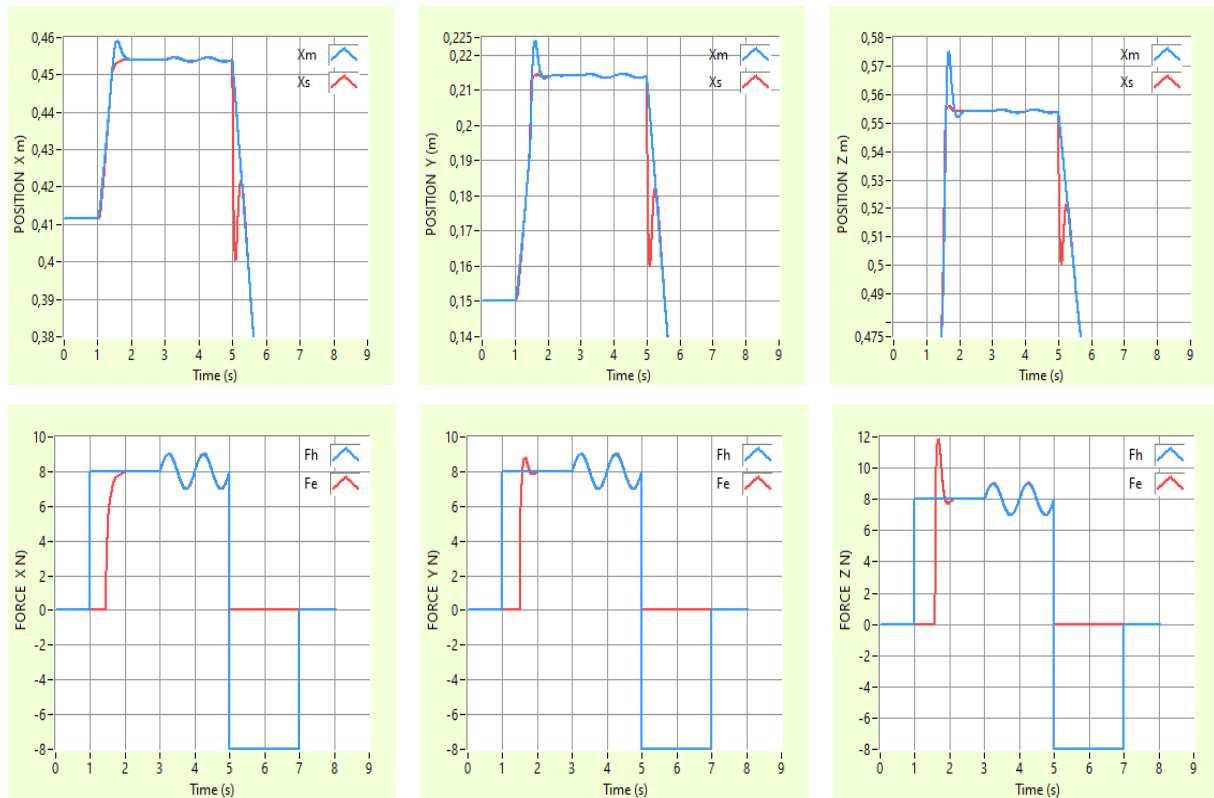


Figure 3.7 : Suivi de la position et de la force appliquée selon les directions X, Y et Z pour $K_e = 2000 \text{ N/m}$.

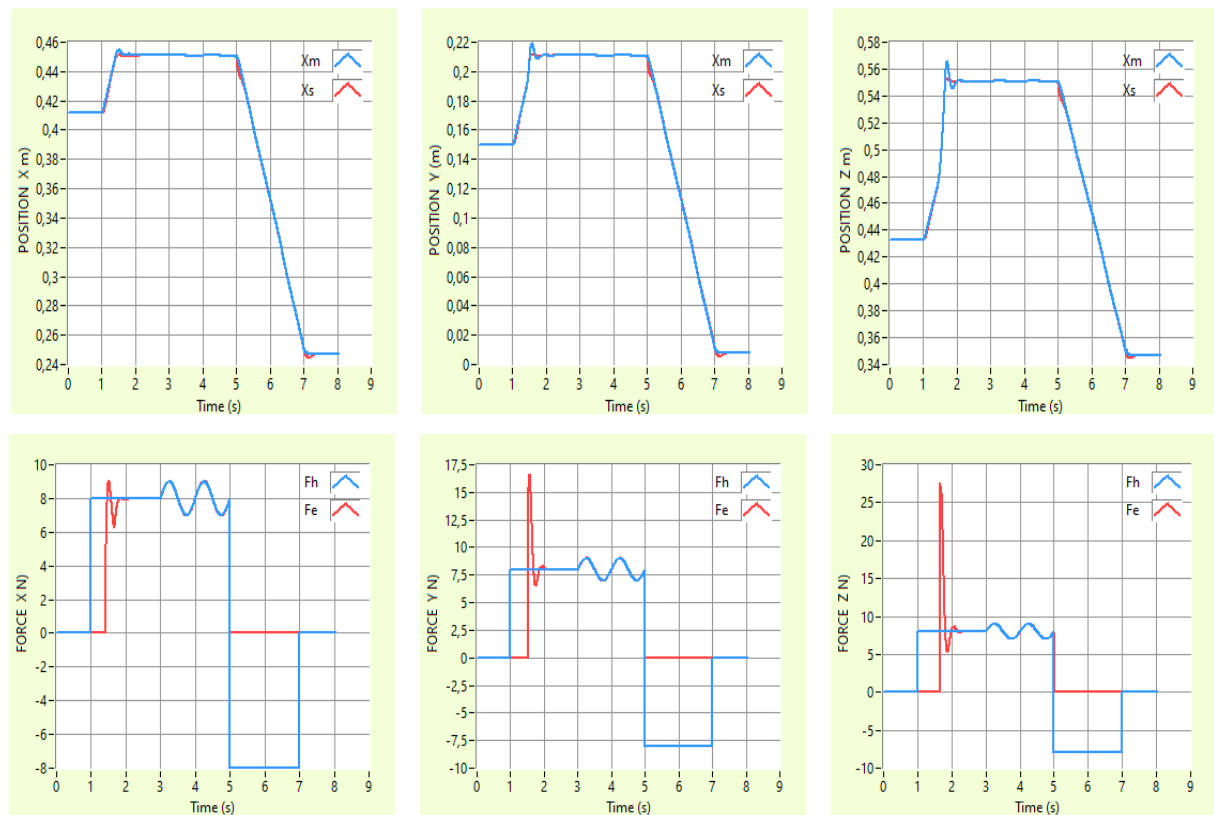


Figure 3.8 : Suivi de la position et de la force appliquée selon les directions X, Y et Z pour $K_e = 10000 \text{ N/m}$.

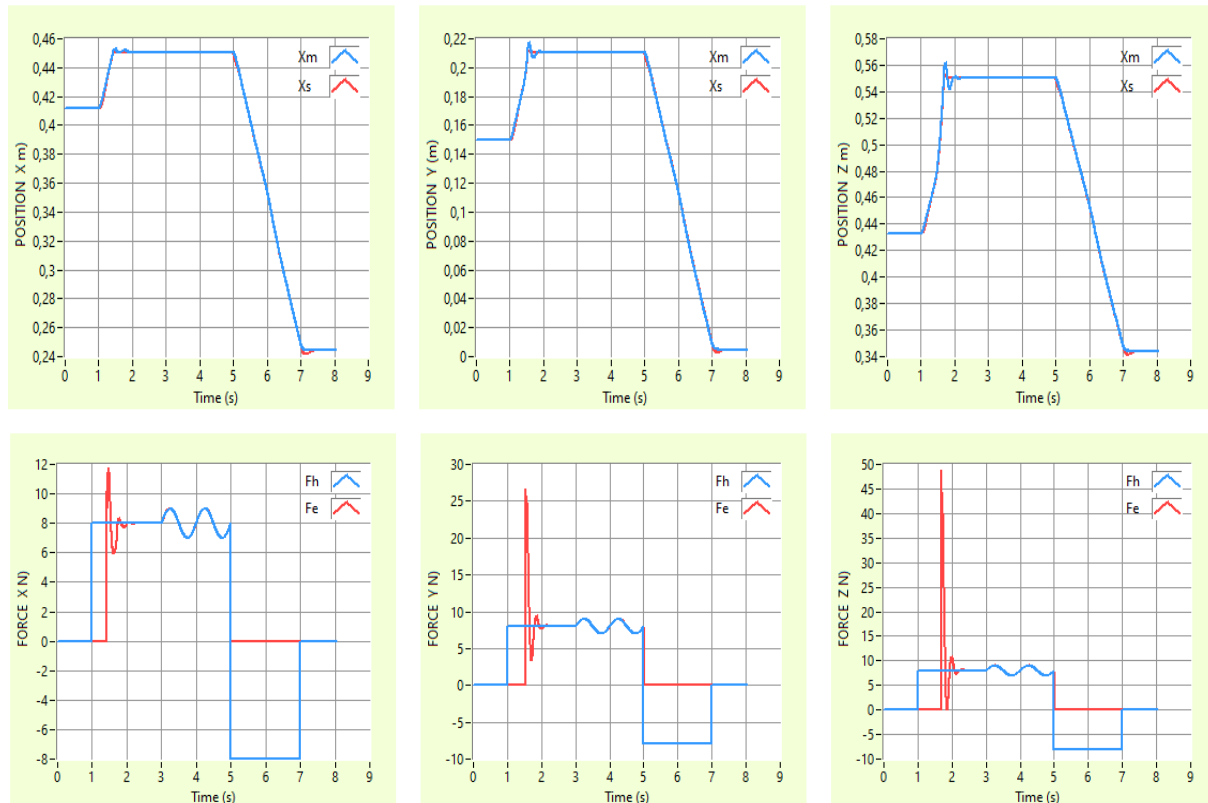


Figure 3.9 : Suivi de la position et de la force appliquée selon les directions X, Y et Z pour $K_e = 20000 \text{ N/m}$.

Cependant, les bonnes performances de cette structure ont été obtenues en considérant une bonne estimation de la dynamique du robot ainsi que la connaissance parfaite de la raideur de son environnement.

Considérons maintenant le cas où on est en présence de perturbations suivantes :

- Raideur de l'environnement inconnue et variable de forme :

$$K_e = (K_e + (0.25 * K_e * \sin(t)))$$

- Capteur de force fortement bruité (voir Figure 3.10).
- Frottements au niveau des articulations, modélisés par :

$$\tau_f = 0.8\dot{q} + 0.5\text{sign}(\dot{q}).$$

- Charge portée par le robot $m = 5\text{kg}$

Les résultats de simulation, illustrés à travers les tracés des courbes de positions maître-esclave et des courbes de forces maître-esclave, visibles respectivement dans les figures 3.11 et 3.12, mettent en évidence une dégradation totale des performances obtenues par rapport au cas idéal.

Les tracés de position montrent des écarts significatifs, atteignant jusqu'à 1.2 cm entre les

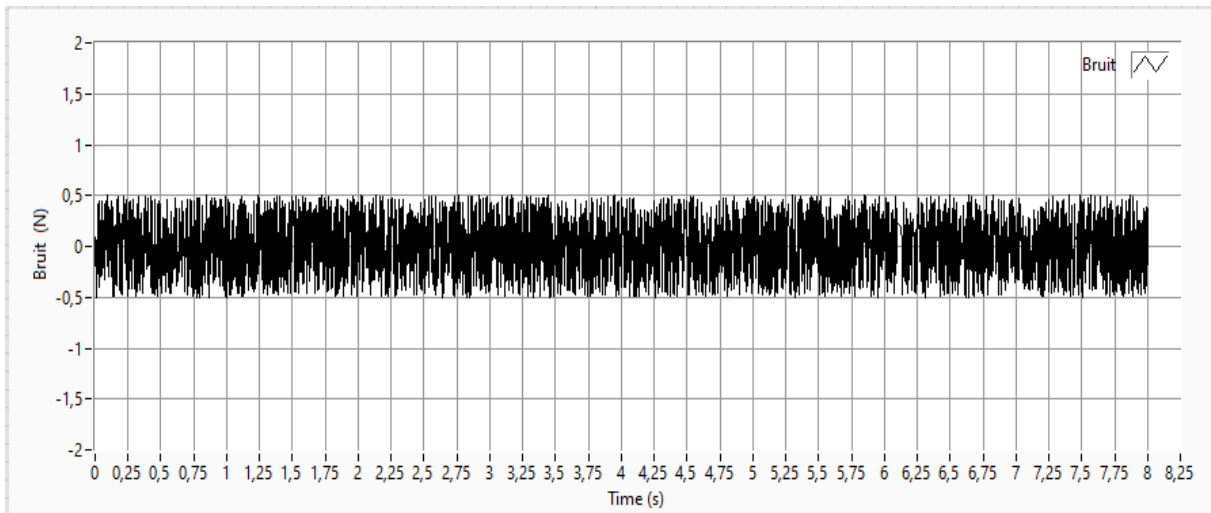
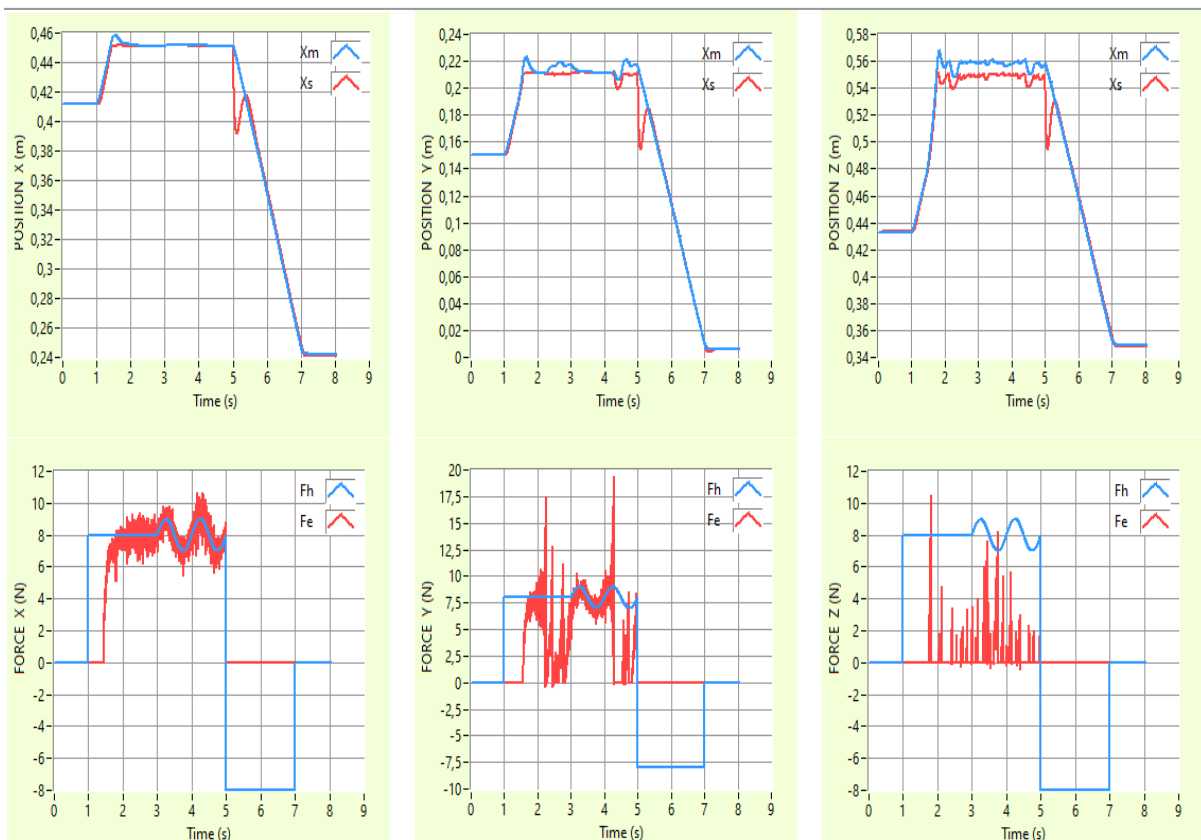


Figure 3.10 : Bruit de capteur de force.

positions souhaitées et les positions réelles de l'esclave., indiquant ainsi des difficultés de suivi précis des mouvements.

Les tracés de force illustrent également de forte oscillation et des fluctuations importantes entre les courbes de forces désirées et les forces réellement exercées, soulignant ainsi l'instabilité du système globale et la difficulté à réaliser une transmission fidèle des interactions physiques.

Figure 3.11 : Suivi de la position et de la force dans le cas d'un environnement variable $K_e = 6000 \text{ N/m}$.

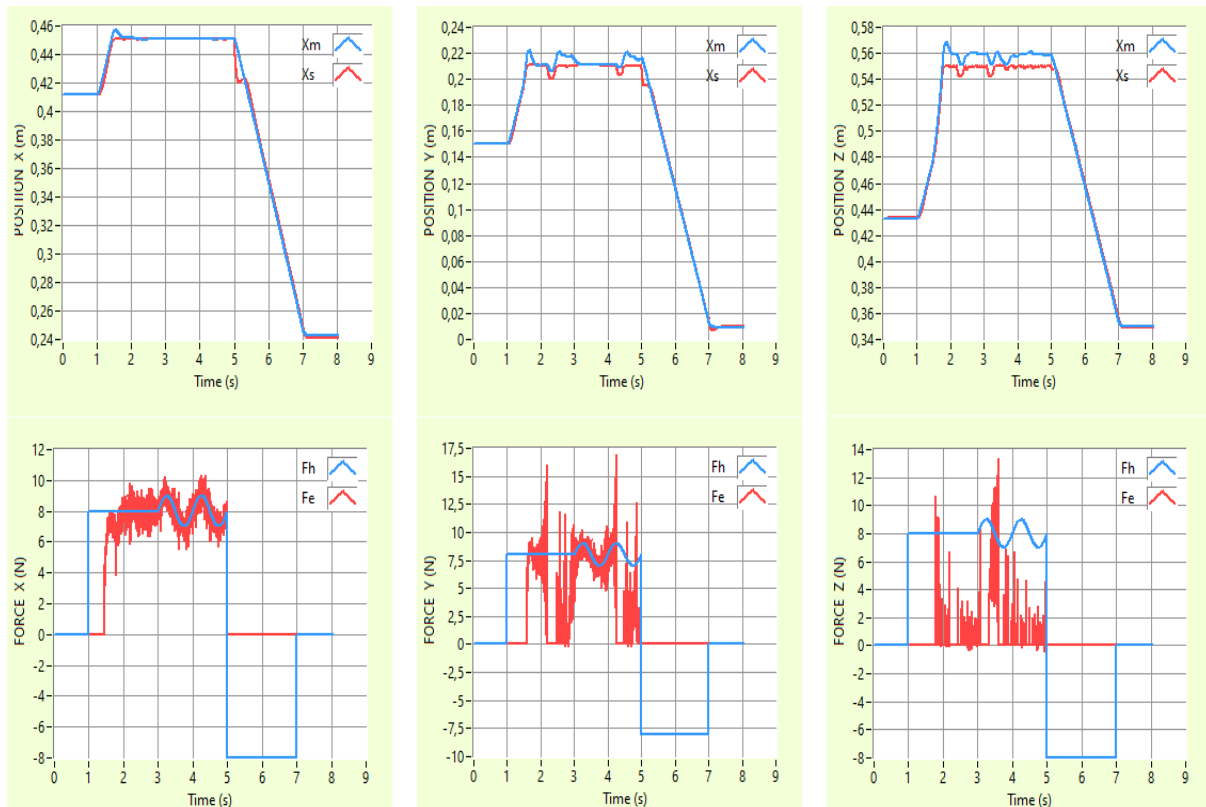


Figure 3.12 : Suivi de la position et de la force dans le cas d'un environnement variable $K_e = 12000 \text{ N/m}$.

Pour résoudre ces problèmes, nous envisageons deux solutions complémentaires basées sur des techniques avancées. La première solution implique l'identification précise de la raideur de l'environnement dans lequel le robot manipulateur opère. Cette information pourrait être utilisée pour adapter dynamiquement les paramètres de commande et ainsi améliorer la précision du suivi des mouvements et des interactions.

La seconde solution consiste à introduire un contrôleur neuronal issue de l'intelligence artificielle pour la compensation des effets des incertitudes dans le modèle dynamique. Ce contrôleur neuronal serait capable de réagir rapidement aux changements inattendus en adaptant les signaux de commande en conséquence, minimisant ainsi les écarts entre les courbes de position et de forces attendues et réelles.

E. Identification de l'impédance variable de l'environnement

Les systèmes de téléopération sont souvent déployés dans des situations où les conditions environnementales changent avec le temps. Cela se produit particulièrement lorsque des robots accomplissent des tâches dans des environnements dynamiques et imprévisibles. Ces changements peuvent être causés par différents facteurs, dont les altérations des objets qui peuvent être légères ou importantes. Par exemple, le robot esclave peut se déplacer dans

l'espace libre ou contraint, sur un environnement mou ou rigide, homogène ou non homogène. Les approches de commande traditionnelles peuvent avoir des difficultés à gérer efficacement ces variations. C'est là que la méthode des Moindres Carrés Récursifs (MCR) intervient. En adaptant en temps réel les paramètres du contrôleur esclave en fonction des paramètres estimés de l'environnement.

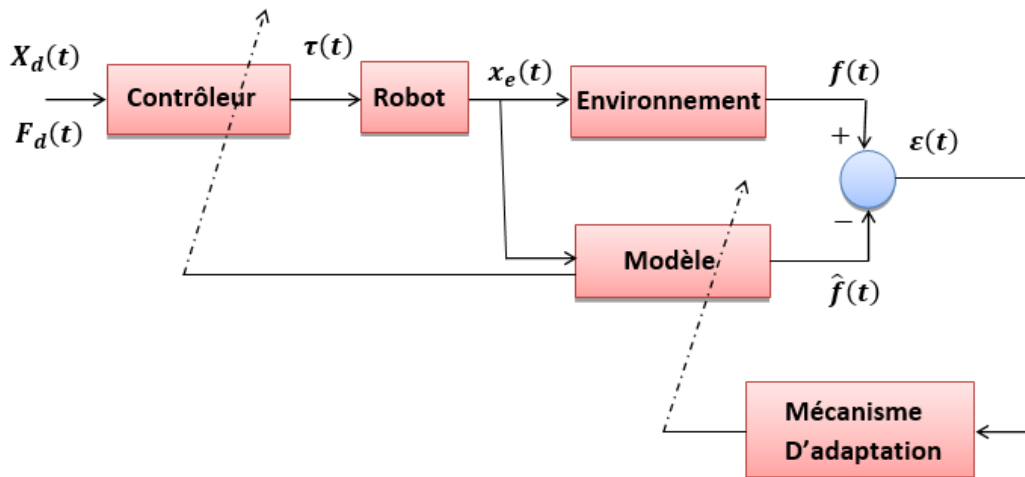


Figure 3.13 : Stratégie d'identification et l'ajustement du contrôleur.

Dans la présente section, nous aborderons en premier lieu la méthode MCR dans le contexte de l'identification paramétrique de l'impédance de l'environnement. Par la suite, nous appliquerons cette méthode afin d'effectuer l'adaptation des coefficients du contrôleur de force. Le schéma conceptuel est illustré dans la Figure 3.13.

A noter que pour la simplicité de l'analyse, seulement la raideur est incluse dans l'impédance d'environnement, En assumant que l'environnement est non homogène, dans le sens où il se manifeste par une rigidité variable dans le temps. Plus spécifiquement, cet environnement est supposé avoir la dynamique non linéaire suivante :

$$\begin{cases} F_e = (K_e + (0.25 * K_e * \sin(t))) * (x_e - x_{ec}) & \text{pour } x_e - x_{ec} > 0 \\ F_e = 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (3.20)$$

• Application de la méthode MCR

La raideur de l'environnement non homogène sera identifiée en ligne. De l'équation (3.20), l'équation de réaction de force peut être réécrite comme suit :

$$f(t) = \varphi^T(t)\theta + v(t) \quad (3.21)$$

Avec $f(t)$ est la sortie du système, $\theta = [\theta_1, \dots, \theta_n]^T$ est le vecteur des paramètres à identifier, $\varphi(t) = [\varphi_1(t), \dots, \varphi_n(t)]^T$ est un vecteur contenant les variables mesurables et $v(t)$ caractérise le bruit de mesure à l'instant t , supposé indépendant de la séquence, de moyenne nulle et de variance constante $v \sim N(0, V_s)$.

L'idée fondamentale de cette méthode est d'ajuster les paramètres du modèle calculés dans l'équation (3.21), pour suivre dans le sens des moindres carrés aussi proche que possible la sortie mesurée de $f(t)$ [111]. Définissons l'erreur entre la force prévue et la force mesurée comme suit :

$$\varepsilon(t) = f(t) - \hat{f}(t) = f(t) - \varphi^T(t)\theta \quad (3.22)$$

En considérant que la fonction coût est donnée sous la forme quadratique suivante :

$$V = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^t [f(i) - \varphi(i)^T \theta]^2 = \frac{1}{2} E^T E \quad (3.23)$$

Avec, $E = [\varepsilon(1), \dots, \varepsilon(t)]^T$.

L'objectif ici est d'obtenir la solution optimale pour le paramètre minimisant la fonction coût qui peut donc être calculée en la différenciant comme suit :

$$\frac{\delta V}{\delta \theta} = 0 \quad (3.24)$$

La fonction coût est minimale si le vecteur de paramètres estimé θ est donné par :

$$(\phi^T \phi) \hat{\theta} = \phi^T F \quad (3.25)$$

Avec, $F = [f(1), \dots, f(t)]^T$.

Et $\phi = [\varphi(1)^T, \dots, \varphi(t)^T]^T$

Si la matrice $(\phi^T \phi)$ est non singulière, le minimum est unique et peut être écrit comme suit :

$$\hat{\theta} = (\phi^T \phi)^{-1} \phi^T F \quad (3.26)$$

Cette méthode est classique et présente deux inconvénients :

- La dimension $(t \times n)$ de la matrice ϕ croît avec le nombre de mesure t .
- L'ajout d'une $(t + 1)$ ème mesure nous impose de recommencer la totalité du calcul.

La solution réside dans la possibilité d'acquérir de manière récursive les coefficients du vecteur estimé $\hat{\theta}(t)$. Cette approche consiste à utiliser les résultats antérieurs au temps $t - 1$ pour calculer les coefficients du vecteur estimé au temps t .

On définit la matrice de covariance comme suit :

$$P(t) = [\phi^T \phi]^{-1} \quad (3.27)$$

De cette manière, l'expression de vecteur estimé $\hat{\theta}$ à l'instant t est écrite de la façon suivante :

$$\hat{\theta}(t) = P(t) \left[\sum_{i=1}^{t-1} \varphi(i)f(i) + \varphi(t)f(t) \right] \quad (3.28)$$

En appliquant la méthode détaillée de la dérivation [111], nous obtenons les équations récursives plutôt que les équations du mode batch calculées dans (3.26).

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + K(t) \left(f(t) - \varphi^T(t)\hat{\theta}(t-1) \right) \quad (3.29)$$

Avec,

$$K(t) = \frac{p(t-1)\varphi(t)}{1 + \varphi^T(t)p(t-1)\varphi(t)}$$

$$P(t) = p(t-1)(I - K(t)\varphi^T(t))$$

Pour améliorer les performances de l'algorithme en termes de suivi de l'évolution de la raideur et prendre en compte d'une manière efficace d'éventuels changements, il est utile d'introduire une fonction de pondération privilégiant les mesures récentes au détriment des mesures anciennes. La fonction de pondération doit être incorporée dans le critère quadratique dont la minimisation permet de passer des équations de récurrence des moindres carrés récursifs (MCR) aux celles des moindres carrés récursifs avec un facteur d'oubli (MCR-FO).

Pour limiter l'influence des observations passées, on introduit un facteur de pondération $\lambda(i)$ dans le critère quadratique (3.23) [112].

$$V = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^t \lambda^{t-i} [f(i) - \varphi(i)^T \theta]^2 \quad (3.30)$$

En cas de $\lambda < 1$, une préférence est accordée aux mesures les plus récentes, tandis que pour $\lambda = 1$, un poids identique est attribué à toutes les mesures. Cela conduit ainsi à l'expression des équations finales suivantes :

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + K(t) \left(f(t) - \varphi^T(t)\hat{\theta}(t-1) \right) \quad (3.31)$$

Avec,

$$K(t) = P(t)\varphi(t) = \frac{P(t-1)\varphi(t)}{\lambda + \varphi^T(t)P(t-1)\varphi(t)}$$

$$P(t) = \lambda^{-1}P(t-1)(I - K(t)\varphi^T(t))$$

Ainsi, le nouveau schéma de la commande du robot esclave est illustré dans la figure suivante :

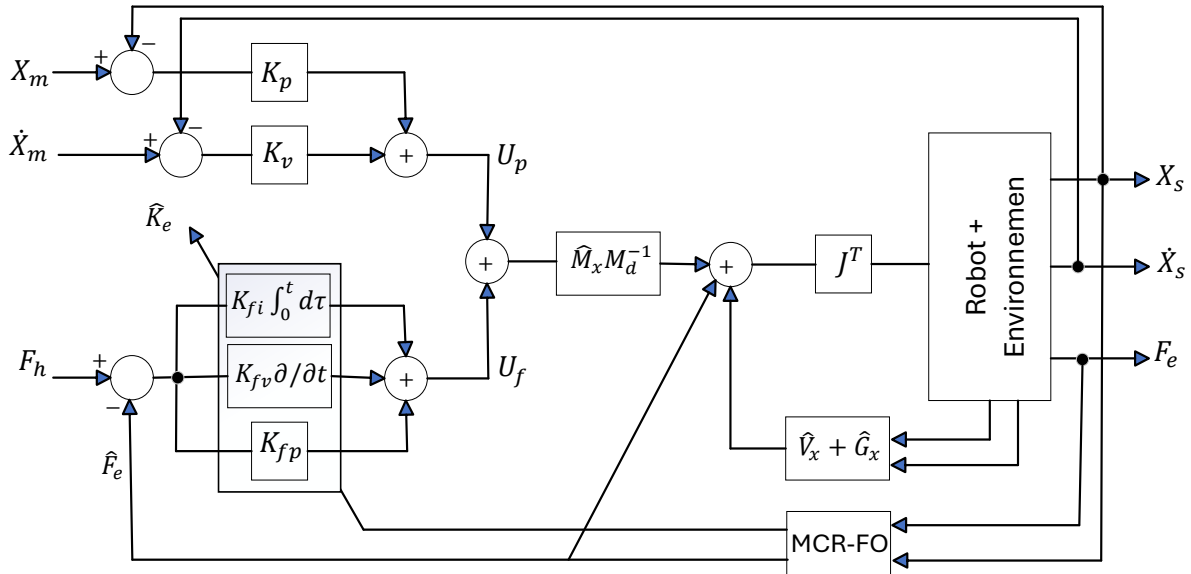


Figure 3.14 : Schéma de la commande adaptative parallèle force/position utilisant la méthode MCR-FO.

F. Résultats de simulation

Les figures ci-dessous présentent les tracés des courbes de position et de force, obtenus en mettant en œuvre le schéma proposé précédemment, en intégrant la technique d'identification MCR-FO de l'impédance appliquée sur deux cas différents qui sont :

$$K_{e_réelle} = (K_e + (0.25 * K_e * \sin(t))) ; \text{ Cas (A) : } K_e = 6000 ; \text{ Cas (B) : } K_e = 12000 .$$

et dont les paramètres de réglages sont choisis comme suit $A_d = I$, $B_d = 40 \times I$, $K_d = 800 \times I$, $M_d = I$ (kg), $K_v = 40(Ns/m) \times I$, $K_p = 800 (N/m) \times I$, $K_{fi} = 0.1 \times I$, $K_{fv} = 500 \times I$, $K_{fp} = 10^4 \times I$, $P(0) > 0$ et $\hat{\theta}(0) = 3000N/m$, $\lambda = 0.985$.

Interprétation des résultats

Suite à l'analyse approfondie des résultats obtenus, il est clair que l'intégration de la méthode MCR-FO à l'intérieur de la boucle de commande en force du robot esclave a abouti à une bonne estimation de la dynamique réelle de l'environnement sur les 3 directions et pour les situations

(A) et (B) (voir Figure 3.15). Cependant, il est important de noter qu'il existe un certain décalage, principalement attribuable au couplage de capteur bruité avec la variation de la raideur au fil du temps.

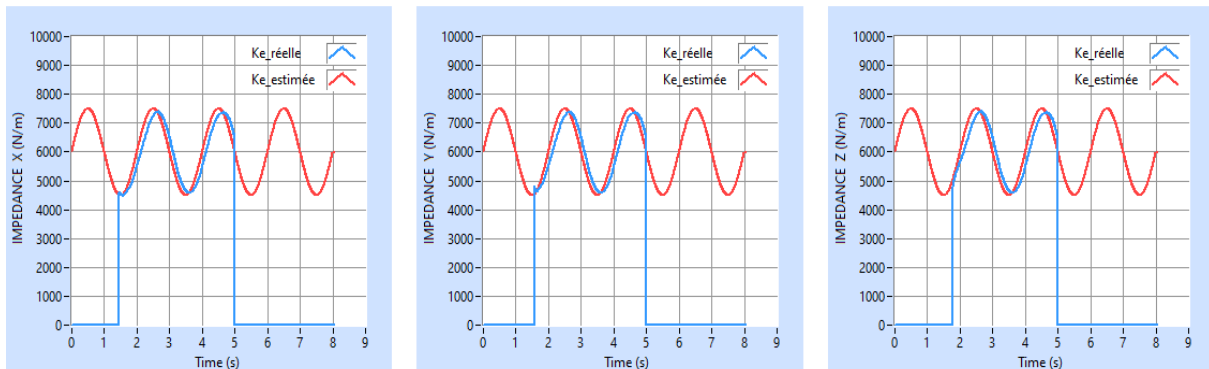


Figure 3.15 : Identification de la raideur réelle ; cas (A).

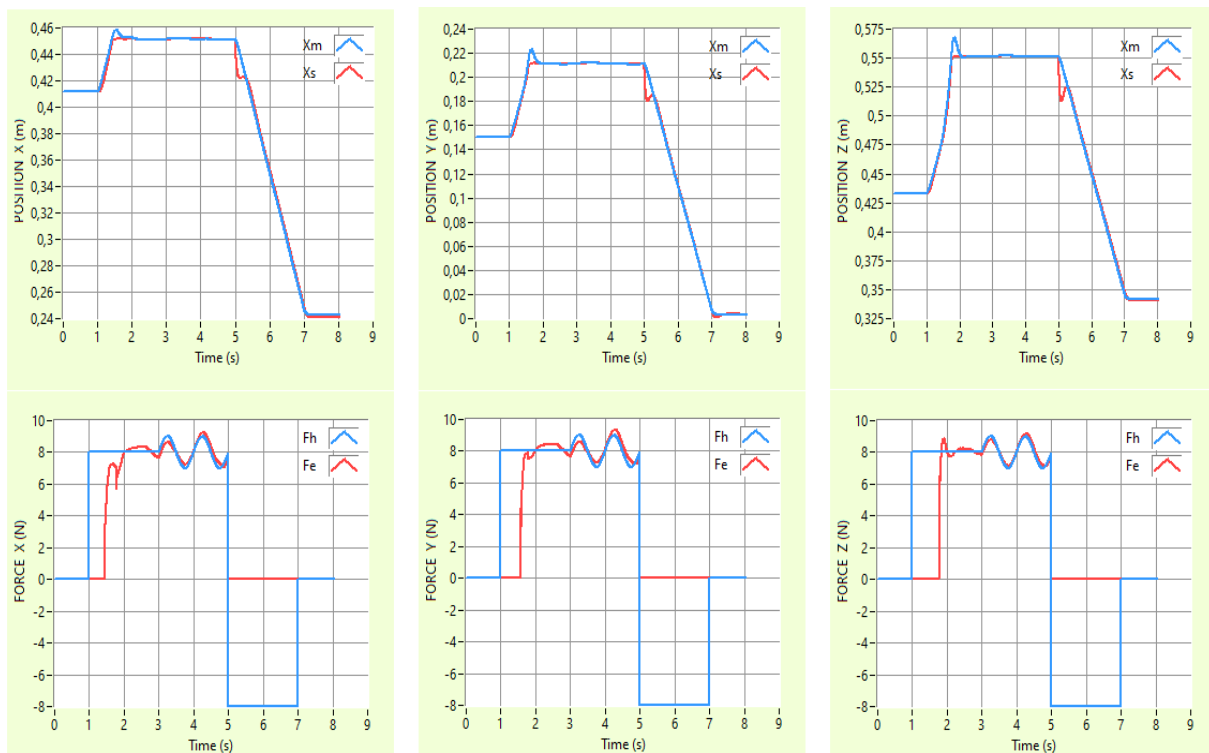


Figure 3.16 : Suivi de la position et de la force avec l'estimateur de MCR-FO ; cas (A).

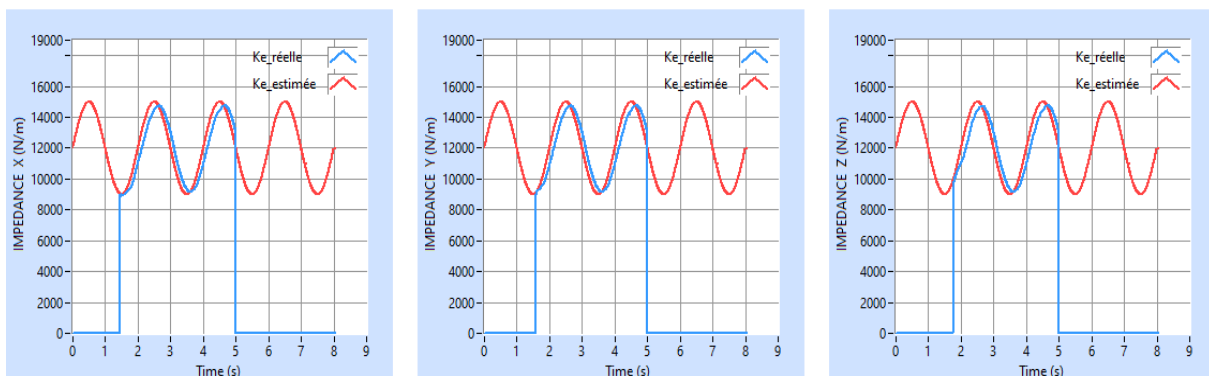


Figure 3.17 : Identification de la raideur réelle ; cas (B).

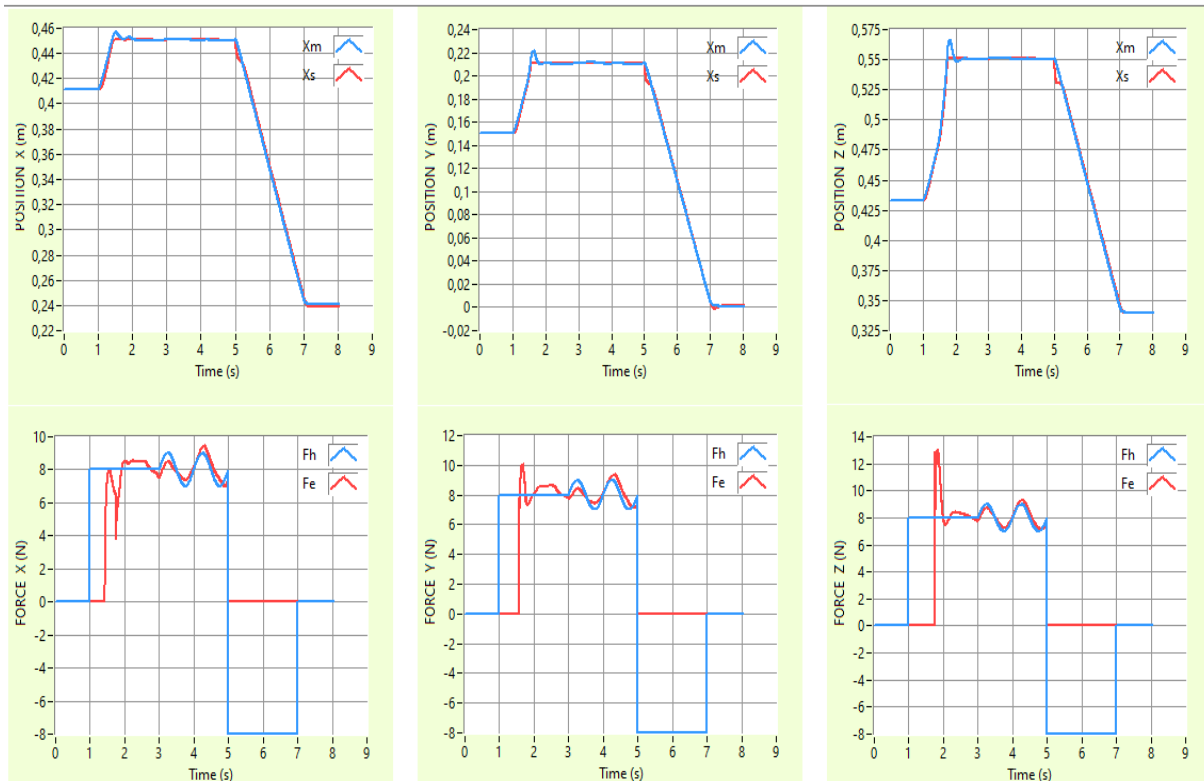


Figure 3.18 : Suivi de la position et de la force avec l'estimateur de MCR-FO ; cas (B).

Les tracés de suivi de trajectoire selon les axes X, Y et Z (Figures 3.16 et 3.18) démontrent une nette réduction de l'écart entre la trajectoire souhaitée et la trajectoire réelle. De même, les courbes illustrant les forces exercées par le robot esclave (Figures 3.16 et 3.18) affichent également des améliorations significatives tout en garantissant la stabilité du système. De plus, la qualité du signal récupéré à partir de capteurs de force bruités installés en utilisant l'algorithme MCR-FO est satisfaisante.

Cette augmentation de performance globale s'est avérée très significative, même en présence de perturbations engendrées par la méconnaissance de l'environnement variable et les fluctuations causées par le capteur de force. Néanmoins, on constate que cette correction présente des limitations :

- Survenance des erreurs sur la force perçue par l'opérateur dans son environnement et un décalage au niveau de positionnement dans l'espace libre et contraint, engendré par les incertitudes dans la modélisation du robot esclave et les frottements secs et visqueux au niveau des articulations.

Dans la suite de ce chapitre et dans le but d'améliorer les résultats précédents, nous proposons d'introduire un CN comme contrôleur auxiliaire à la commande dynamique parallèle force/position précédente.

G. Compensation des effets des incertitudes et de perturbations avec un contrôleur neuronal

G.1 Généralités sur les réseaux de neurones artificiels

Un RNA est un système informatique matériel et / ou logiciel dont le fonctionnement est calqué sur celui des neurones du cerveau humain. Ils ont la capacité d'acquérir et d'utiliser des connaissances grâce à des algorithmes d'apprentissage. Ces modèles sont composés de neurones artificiels connectés entre eux par des connexions pondérées, formant ainsi un système de traitement [113].

Les RNAs présentent plusieurs avantages notables, tels qu'une grande puissance de calcul et une capacité d'apprentissage itératif. Lors du processus d'apprentissage, les connexions sont ajustées pour reproduire les sorties attendues en fonction des entrées connues, ce qui permet aux performances de s'améliorer avec l'ajout de nouvelles entrées. Ces modèles peuvent être classifiés en fonction de leurs méthodes d'apprentissage (supervisé ou non supervisé), de leurs architectures (bouclées ou non bouclées) et de leurs types de sortie (binaire ou continue) [113].

G.1.1 Neurone biologique

Le neurone, qui est un élément essentiel du système nerveux central, a pour fonction de transmettre des impulsions électriques résultant de réactions physico-chimiques spécifiques. Il se compose de quatre composantes principales : les dendrites, le corps cellulaire, l'axone et les synapses (voir Figure 3.19). Les dendrites collectent en permanence les signaux provenant d'autres neurones, tandis que le corps cellulaire traite toutes les informations reçues. L'axone joue un rôle dans la transmission des signaux vers d'autres neurones connectés, et les synapses permettent le transfert des signaux électriques des axones d'un neurone particulier vers les dendrites d'autres neurones [114].

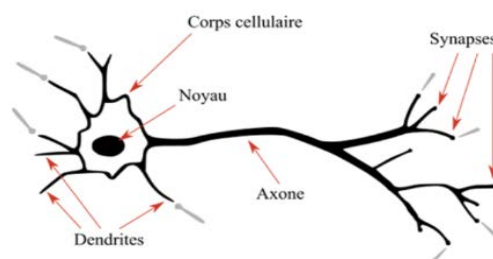


Figure 3.19 : Neurone biologique.

G.1.2 Neurone formel

Le neurone formel, conçu comme une abstraction du neurone biologique, inclut les principales caractéristiques du neurone biologique. Dans une représentation d'un neurone artificiel illustrée dans la Figure 3.20, les entrées $\{x_1, x_2, \dots, x_p\}$ correspondent aux impulsions électriques captées par les dendrites des poids du neurone biologique. Les poids synaptiques $\{w_1, w_2, \dots, w_p\}$ symbolisent les connexions synaptiques, tandis que la sortie (z) du corps cellulaire artificiel équivaut à la somme pondérée de ses entrées, formulée comme [114].

$$z = \sum_{i=1}^p w_i x_i + w_0 \quad (3.32)$$

Où w_0 représente le seuil d'activation et la sortie du neurone y est définie par

$$y = h \left(\sum_{i=1}^p w_i x_i + w_0 \right) \quad (3.33)$$

Où h est la fonction d'activation, qui peut prendre plusieurs formes à savoir : Fonction signe, tout ou rien, fonction affine, plus au moins à seuil, saturation, fonction gaussienne et fonction arc-tangente.

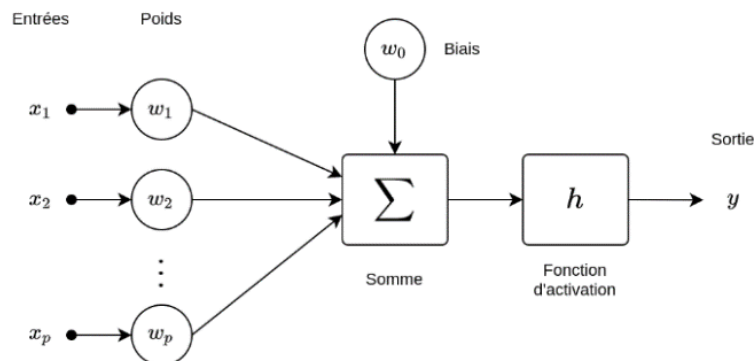


Figure 3.20 : Modèle d'un neurone formel.

G.2 Quelques types de RNAs

Un réseau neuronal artificiel (RNA) se constitue d'une multitude de neurones artificiels et d'un grand nombre d'interconnexions entre eux. Selon ces interconnexions, diverses architectures de RNAs sont définies [115].

G.2.1 Réseau de neurones non bouclés

Un réseau de neurone non bouclé (dit aussi statique) est donc représenté graphiquement par un ensemble de couches : une couche d'entrée, une couche de sortie, ainsi qu'une ou plusieurs

couches cachées (voir Figure 3.21). Dans ces architectures sans boucles, la sortie d'une couche n'influence pas la même couche [115]. Le nombre et la taille des couches cachées dépendent de la nature et de la complexité du problème à résoudre, ainsi que de la qualité et de la quantité des données disponibles [114].

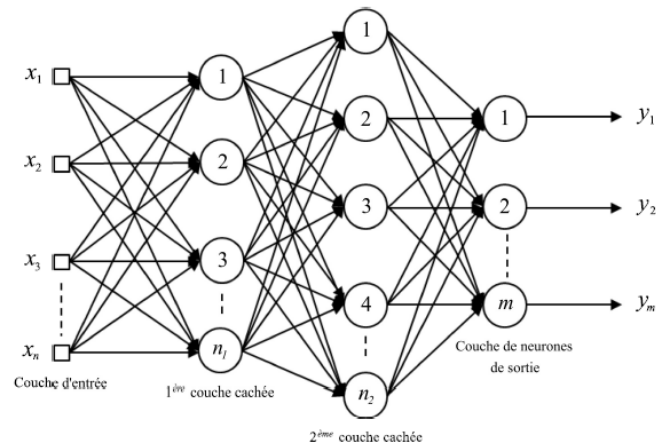


Figure 3.21 : Exemple d'un RNA non bouclé.

Ces RNAs sont employés pour résoudre divers problèmes, tels que la classification de formes, l'approximation de fonctions, l'optimisation, l'identification de systèmes, et la commande de processus. Parmi les principaux réseaux non-bouclés, on trouve le Perceptron multicouches et la fonction de base radiale [114].

G.2.2 Réseau de neurones bouclés (récurrente)

Un réseau de neurones bouclé est une architecture neuronale dans laquelle les sorties des neurones servent d'entrées de rétroaction pour d'autres neurones. Cette boucle de rétroaction permet aux signaux de se déplacer dans les deux sens, dotant le réseau d'une capacité dynamique à progresser vers un état d'équilibre. Les réseaux neuronaux bouclés sont utilisés dans des applications telles que la prédiction temporelle, l'identification, l'optimisation et la commande des processus. Parmi les principaux réseaux de neurones bouclés, on cite les réseaux de Hopfield et de Perceptron [114].

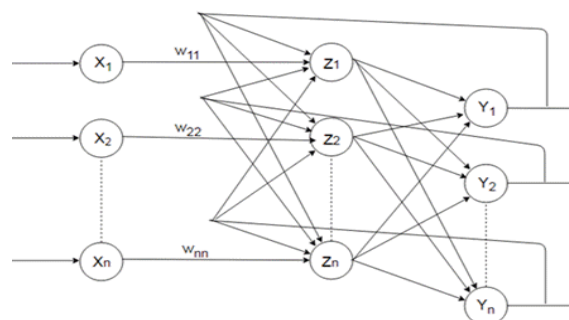


Figure 3.22: Exemple d'un RNA bouclé.

G.3 Algorithmes d'apprentissage

Pour un RNA, l'apprentissage peut être considéré comme le problème de la mise à jour des poids des connexions au sein du réseau [116], afin de réussir la tâche qui lui est demandée. L'apprentissage est la caractéristique principale des RNA et il peut se faire de différentes manières et selon différentes règles.

G.3.1 Apprentissage supervisé

Dans l'apprentissage supervisé, des couples de données (entrée, sortie attendue correspondante) sont fournis au réseau ; les différentes réponses possibles du réseau étant donc connues à priori. Les paramètres du réseau sont ajustés de façon à minimiser le signal d'erreur constitué par la différence entre la sortie obtenue et la valeur désirée correspondante. Un apprentissage est dit supervisé lorsqu'on force le réseau à converger vers un état final précis, en même temps qu'on lui présente un motif [117]. Parmi les algorithmes d'apprentissage supervisé les plus connus, on cite l'algorithme de rétropropagation du gradient.

G.3.2 Apprentissage non supervisé

Dans un modèle non supervisé, on n'a pas de connaissance à priori sur l'information que l'on voudrait extraire. Le réseau est laissé libre de converger vers n'importe quel état final. Dans ce cas, les exemples présentés à l'entrée provoquent une auto-adaptation du réseau afin de produire des valeurs de sortie qui soient proches en réponse à des valeurs d'entrées similaires [118].

G.3.3 Apprentissage par renforcement

L'idée de base de l'apprentissage par renforcement est inspirée des mécanismes d'apprentissage chez les animaux. Dans ce type d'apprentissage on suppose qu'il n'existe pas de maître (superviseur) qui peut fournir la réponse correcte, mais le système à entraîner est informé, d'une manière indirecte, sur l'effet de son action choisie. Les poids du réseau dans ce cas, sont altérés dans le sens de renforcer les bonnes actions et de sanctionner les mauvaises [119].

G.4 Compensateur neuronal à base de l'algorithme de rétropropagation du gradient

Ce contrôleur est élaboré en utilisant les RNAs non bouclé [120]. Il intervient comme contrôleur auxiliaire à la commande dynamique parallèle force/position précédente. Ce contrôleur a pour rôle de compenser les perturbations engendrées par des erreurs dans l'identification du modèle dynamique du robot esclave et les frottements secs et visqueux au niveau de ses articulations.

En substance, l'objectif est de générer un vecteur de force à la sortie du réseau de neurones qui s'additionne avec les vecteurs des sorties des deux contrôleurs en force et en position, comme illustré dans la figure 3.24 [121].

La dimension du vecteur de sortie de ce réseau est déterminée par le nombre de degrés de liberté du robot esclave (dans notre cas, ce vecteur est de dimension 3). Par conséquent, l'expression de la loi de commande énoncée dans l'équation (3.18) est ainsi modifiée :

$$F_{sc} = \widehat{M}_x M_d^{-1}(U_s + U_a) + \widehat{V}_x \dot{X}_s + \widehat{G}_x + \widehat{F}_e \quad (3.34)$$

En combinant les équations (3.34) et (3.11), nous obtenons l'expression de la dynamique de l'erreur en boucle fermée suivante :

$$\begin{aligned} M_d \ddot{E}_p + K_v \dot{E}_p + K_p E_p + \widehat{K}_e^{-1} \left(K_{fi} \int E_f + K_{fv} \dot{E}_f + K_{fp} E_f \right) \\ = \widehat{M}_x^{-1} (\Delta \widehat{M}_x \ddot{X}_s + \Delta \widehat{V}_x \dot{X}_s + \Delta \widehat{G}_x + F_f + \Delta \widehat{F}_e) - U_a \end{aligned} \quad (3.35)$$

Avec : $\Delta \widehat{M}_x = M_x - \widehat{M}_x$, $\Delta \widehat{V}_x = V_x - \widehat{V}_x$, $\Delta \widehat{G}_x = G_x - \widehat{G}_x$ et $\Delta \widehat{F}_e = F_e - \widehat{F}_e$.

Si on pose :

$$v = M_d \ddot{E}_p + K_v \dot{E}_p + K_p E_p + \widehat{K}_e^{-1} (K_{fi} \int E_f + K_{fv} \dot{E}_f + K_{fp} E_f) \quad (3.36)$$

Notre objectif est de générer U_a de manière que l'équation (3.36) soit proche de zéro. Ceci est basé sur l'apprentissage supervisé d'un RNA qui fait appel à l'algorithme de rétropropagation du gradient. Cet algorithme permet d'ajuster les poids et les biais du RNA afin de minimiser l'erreur quadratique entre la sortie calculée du réseau et sa sortie désirée, qui dépend du signal d'entraînement v donné par :

$$J = \frac{1}{2} E^T E \quad (3.37)$$

$$\text{Avec,} \quad E = v - U_a \quad (3.38)$$

Pour chaque paire entrée/sortie, une erreur est calculée. Si la réponse du réseau est différente de la réponse désirée, les poids et les biais sont modifiés en ligne dans le réseau de manière à faire tendre l'erreur vers zéro. Dans le cas idéal, si $E = 0$ alors

$$U_a = \widehat{M}_x^{-1} (\Delta \widehat{M}_x \ddot{X}_s + \Delta \widehat{V}_x \dot{X}_s + \Delta \widehat{G}_x + F_f + \Delta \widehat{F}_e) \quad (3.39)$$

Le RNA choisi est constitué de trois couches (Figure (3.23)), la couche d'entrée notée 'i' contenant N_e neurones artificiels reliés directement au vecteur d'entrée I , suivit par la couche cachée 'j' de N_c neurones et enfin la couche de sortie 'k' qui possède N_s neurones.

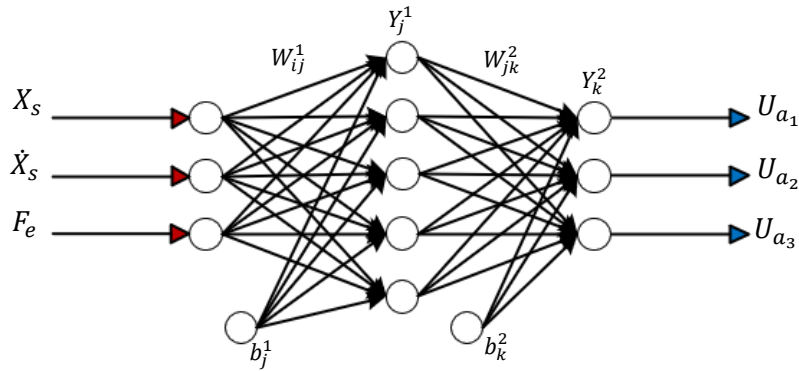


Figure 3.23 : Architecture du RNA.

L'entrée du réseau est le vecteur $I = [X_s^T(t) \ \dot{X}_s^T(t) \ F_e^T(t)]$. La couche d'entrée et la couche de sortie sont linéaires. La couche cachée est non linéaire. Elle est de type sigmoïde donnée par l'équation suivante :

$$f(u_j) = \frac{1 - \exp^{-u_j}}{1 + \exp^{-u_j}} \quad (3.40)$$

Avec u est l'entrée de cette couche. La sortie U_a peut s'écrire en fonction des entrées sous la forme :

$$U_a = \sum_{j=1}^{Nc} W_{jk}^2 \left(\frac{2}{\left(1 + \exp^{-\left(\sum_{i=1}^{Ne} x_i W_{ij}^1 + b_j^1\right)}\right)} - 1 \right) + b_k^2 \quad (3.41)$$

où x_i est le $i^{\text{ème}}$ élément du vecteur d'entrées I . W_{ij}^1 sont les poids entre le $i^{\text{ème}}$ neurone de la couche d'entrée et le $j^{\text{ème}}$ neurone de la couche cachée. W_{jk}^2 sont les poids entre le $j^{\text{ème}}$ neurone de la couche cachée et le $k^{\text{ème}}$ neurone de la couche de sortie. b_j^1 est le biais du $j^{\text{ème}}$ neurone cachée et b_k^2 est le biais du $k^{\text{ème}}$ neurone de la couche de sortie.

Ce procédé implique de modifier la sortie du réseau de neurones U_a en sens inverse de la fonction dérivée de l'erreur, ce qui produit un gradient de J comme suit :

$$\frac{\delta J}{\delta W} = \frac{\delta E^T}{\delta W} E = -\frac{\delta U_a^T}{\delta W} E \quad (3.42)$$

Par conséquent, la loi d'adaptation du poids est actualisée par l'équation suivante à chaque période d'échantillonnage.

$$W(t) = -\eta \frac{\delta J}{\delta w} + \mu W(t-1) = \eta \frac{\delta U_a^T}{\delta w} E + \mu W(t-1) \quad (3.43)$$

Où η est le taux d'adaptation et μ est le momentum ou facteur d'oubli. Ce facteur permet de limiter les oscillations lors de l'adaptation. En prenant en compte les évolutions des étapes

précédentes dans l'étape courante, les coefficients d'adaptation des poids résultants peuvent être dérivés comme suit en utilisant (3.42) :

$$W_{ij}^1(t) = \eta 0.5(1 - Y_j^1)^2 u_i \left[\sum_{k=1}^n E_k W_{jk}^2 \right] + \mu W_{ij}^1(t-1) \quad (3.44)$$

$$W_{jk}^2(t) = \eta E_k Y_j^1 + \mu W_{jk}^2(t-1) \quad (3.45)$$

$$b_j^1(t) = \eta 0.5(1 - Y_j^1)^2 \left[\sum_{k=1}^n E_k W_{jk}^2 \right] + \mu b_j^1(t-1) \quad (3.46)$$

$$b_k^2(t) = \eta E_k + \mu b_k^2(t-1) \quad (3.47)$$

Le nouveau schéma de commande qui introduit le contrôleur neuronal auxiliaire est donné par la figure suivante :

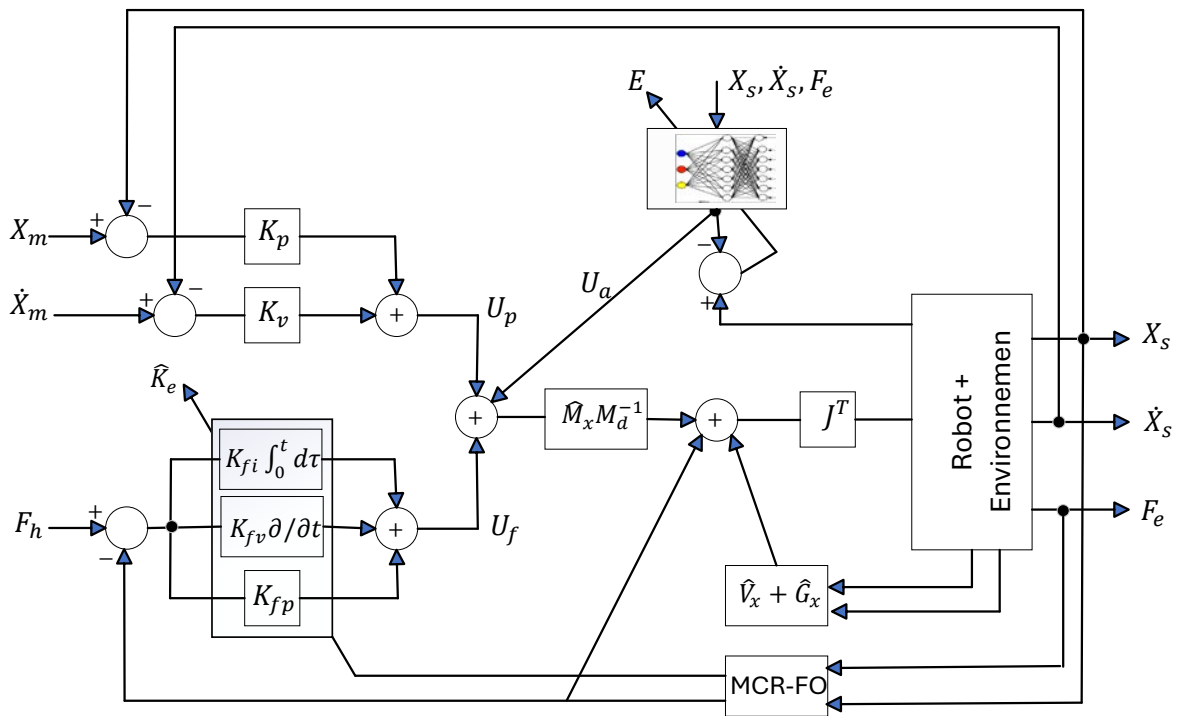


Figure 3.24 : Schéma de la commande adaptative et intelligente parallèle force/position du robot esclave utilisant la méthode MCR-FO et le compensateur neuronal.

H. Résultats de simulation

Les figures (3.25 - 3.28) ci-dessous présentent les tracés des courbes de position et de force, obtenus avec le schéma de la figure 3.24 ci-dessus. Les nombre de neurones de la couche d'entrée et la couche cachée sont ajustés comme suit : $N_e=9$ et $N_c=7$. Les paramètres de l'algorithme de rétropropagation sont choisis comme suit : $\eta=0,001$, $\mu=0,9$. Les poids sont initialement choisis au hasard et ajustés en ligne à chaque période d'échantillonnage. Le reste

des paramètres sont choisis comme suit : $A_d = I$, $B_d = 40 \times I$, $K_d = 800 \times I$, $M_d = I$ (kg), $K_v = 40(Ns/m) \times I$, $K_{fi} = 0.1 \times I$, $K_{fv} = 500 \times I$, $K_{fp} = 10^4 \times I$, $P(0) > 0$ et $\hat{\theta}(0) = 3000N/m$, $\lambda = 0.985$.

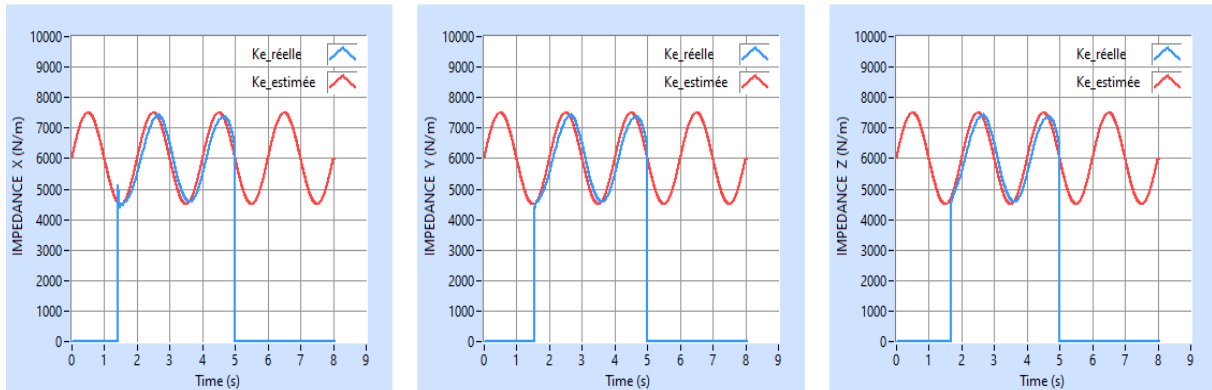


Figure 3.25 : Identification de la raideur réelle ; cas (A).

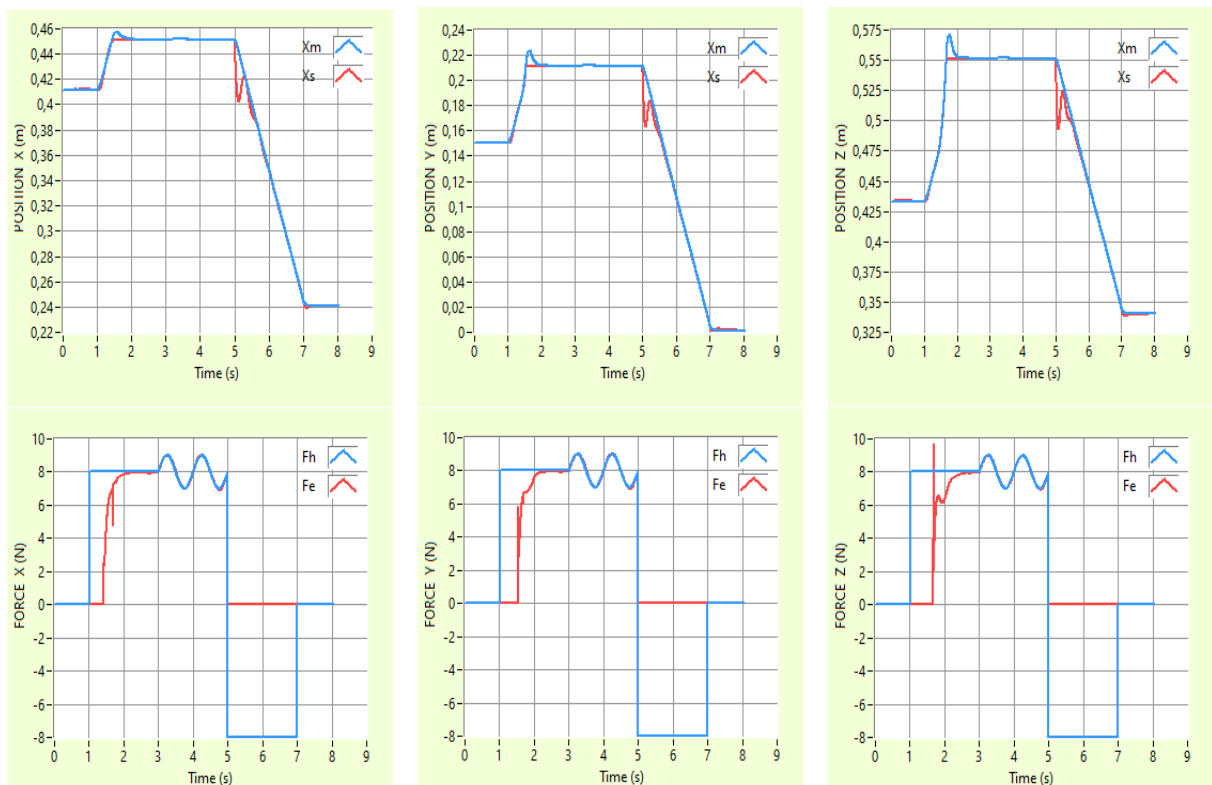


Figure 3.26 : Suivi de la position et de la force avec l'estimateur de MCR-FO et le compensateur neuronal ; cas (A).

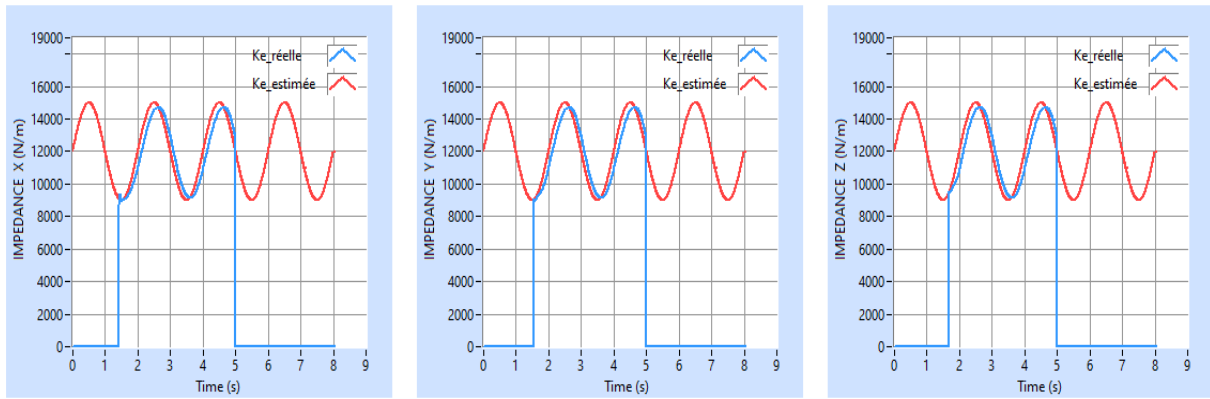


Figure 3.27 : Identification de la raideur réelle ; cas (B).

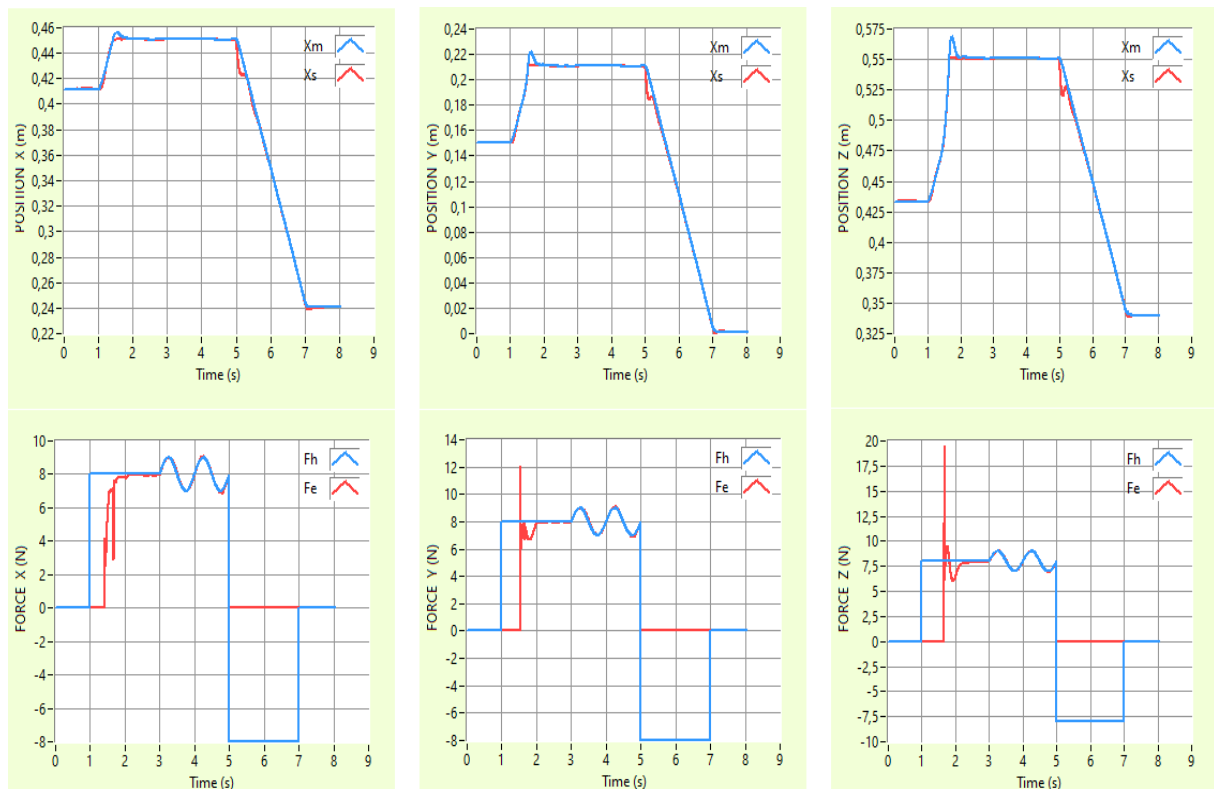


Figure 3.28 : Suivi de la position et de la force avec l'estimateur de MCR-FO et le compensateur neuronal ; cas (B).

Interprétation des résultats

Les résultats de simulation, illustrés à travers les tracés des courbes d'estimation de la dynamique de l'environnement, des courbes de positions maître-esclave et des courbes de forces maître-esclave, visibles respectivement dans les figures (3.25) jusqu'à (3.28), mettent en évidence une bonne restitution des performances obtenues par rapport au cas précédent.

L'analyse approfondie des résultats de simulation présentés dans les figures (3.26) et (3.28), après l'intégration du CN, démontrent que le système global est stable et que la force appliquée par l'opérateur est égale à celle appliquée à l'environnement. Les résultats montrent également

que le suivi des trajectoires du maître et de l'esclave est précis, aussi bien dans l'espace libre que dans l'espace contraint. Cependant, ces résultats illustrent certains pics lors du contact avec les propriétés d'un objet inconnu (position et rigidité) ou lors du retour à l'espace libre. De plus, il existe des fluctuations qui ne dépassent pas $0.1N$ lors de l'interaction avec l'environnement.

En conséquence, l'estimation en ligne de l'environnement par la méthode de MCR-FO, combinée avec le CN, permet de garantir la stabilité et renforcer considérablement la fidélité des performances du système.

3.3.2 Approche de commande bilatérale adaptative et intelligente basée sur une structure de commande en effort externe

Cette section traite une nouvelle approche de commande adaptative et intelligente en force externe, basée sur l'architecture à 4-canaux précédente [122]. Les lois de commande ici, sont obtenues à partir de deux stratégies de commande, la première est la même que précédemment, basée sur une approche de commande en force/impédance appliquée au robot maître donnée par l'équation (3.16), tandis que la seconde consiste en un concept de commande en force externe proposé dans la littérature [123] appliquée au même robot esclave. Cette approche intègre également le CN et l'estimateur MCR-FO, afin d'éliminer les effets des incertitudes dans le modèle dynamique du robot esclave, ainsi que d'estimer les caractéristiques inconnues de l'environnement qui varient dans le temps, notamment en cas de mesure bruitée des capteurs de force.

Le concept de la commande en force externe est composé de deux boucles intégrées [120], la boucle externe contrôle la force et la boucle interne contrôle la position. La sortie de la boucle externe est ajoutée à la consigne de position X_d qui se trouve ainsi modifier et devenant la nouvelle consigne de la boucle de commande en position. Le déplacement de l'effecteur du robot qui en résulte permet d'exercer la force de contact souhaitée sur l'environnement. Le schéma de commande hybride externe est relativement facile à mettre en œuvre et nécessite un nombre réduit de calculs [124].

La nouvelle loi de commande du robot esclave est exprimée par (voir figure 3.29) :

$$F_{sc} = \hat{M}_x M_d^{-1}(U + U_a) + \hat{V}_x \dot{X}_s + \hat{G}_x + \hat{F}_e \quad (3.38)$$

Où les chapeaux désignent les estimations incertaines disponibles des termes dynamiques M_x , V_x , G_x et \hat{F}_e est le signal de force récupéré à partir d'un capteur de force bruité après l'intégration de l'estimateur MCR-FO.

En adoptant le concept de la commande en effort externe, la loi de commande en force est conçue pour assurer un mouvement compliant en introduisant l'erreur entre la force désirée F_h et la force réelle \hat{F}_e dans la boucle de commande en force, qui la transforme en un déplacement agissant comme une correction qui modifiera la trajectoire désirée appliquée à la boucle de commande en position. Donc on aura :

$$U = M_d \ddot{X}_p + K_v \dot{E}_p + K_p E \quad (3.39)$$

$$\text{Avec} \quad E = X_m + \Delta X_c - X_s = E_p + \Delta X_c \quad (3.40)$$

où ΔX_c représente la correction de la position souhaitée qui correspond à l'expression suivante :

$$\Delta X_c = K_p \hat{K}_e^{-1} \left(K_{fi} \int (F_h - \hat{F}_e) + K_{fv} (\dot{F}_h - \dot{\hat{F}}_e) + K_{fp} (F_h - \hat{F}_e) \right) \quad (3.41)$$

En effet, selon (3.11), le modèle dynamique du robot esclave est un système hautement non linéaire et fortement couplé pour lequel l'approche de découplage dynamique non linéaire a été adoptée. L'équation dynamique en boucle fermée peut être réécrite comme suit :

$$M_d \ddot{E}_p + K_v \dot{E}_p + K_p E = \hat{M}_x^{-1} (\Delta \hat{M}_x \ddot{X}_s + \Delta \hat{V}_x \dot{X}_s + \Delta \hat{G}_x + F_f + \Delta \hat{F}_e) - U_a \quad (3.42)$$

où Δ désigne les termes d'incertitude. Si on pose :

$$v = M_d \ddot{E}_p + K_v \dot{E}_p + K_p E \quad (3.43)$$

L'objectif du CN cette fois-ci est de générer U_a de manière à ce que l'équation (3.43) soit proche de zéro. Donc, l'équation de l'erreur quadratique entre la sortie calculée du réseau et sa sortie désirée, dépendante du signal v , est donnée par :

$$J = \frac{1}{2} E^T E \quad (3.44)$$

$$\text{Avec,} \quad E = v - U_a \quad (3.45)$$

Ce signal d'erreur E sera utilisé pour l'entraînement du réseau de neurones. Dans le cas idéal ($E = 0$), la sortie du compensateur neuronal doit être :

$$U_a = \hat{M}_d^{-1} (\Delta \hat{M}_x \ddot{X}_s + \Delta \hat{V}_x \dot{X}_s + \Delta \hat{G}_x + F_f + \Delta \hat{F}_e) \quad (3.46)$$

Ainsi le schéma final de la commande adaptative et intelligente du robot esclave basée sur une structure de commande en effort externe est illustré par le diagramme suivant :

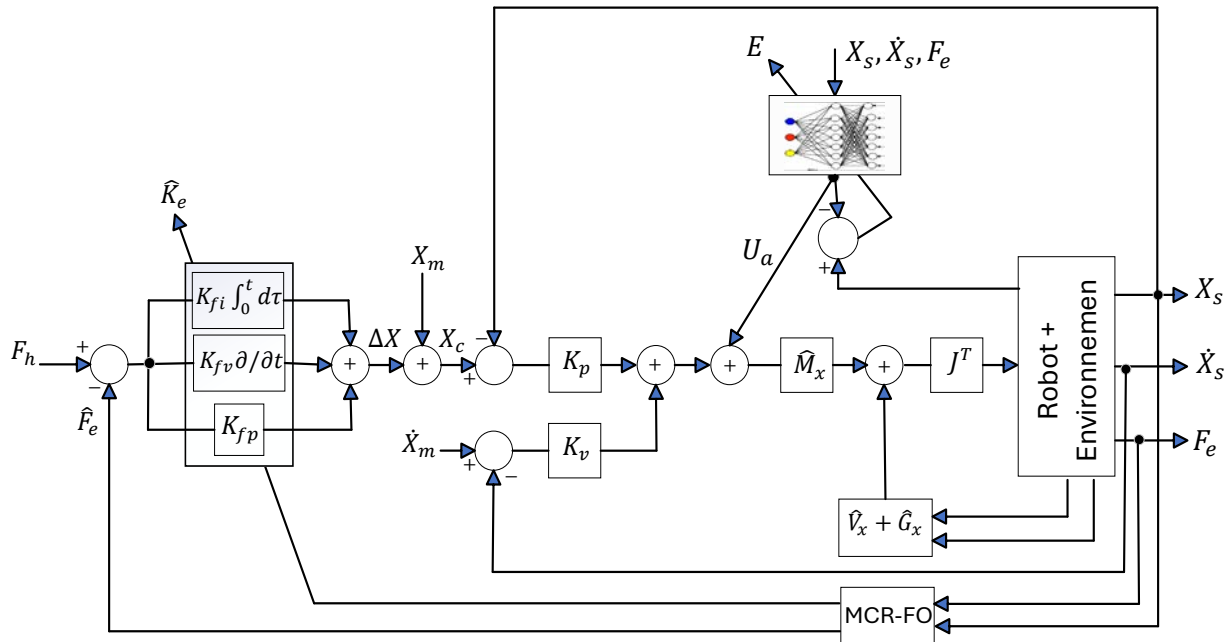


Figure 3.29 : Schéma de la commande adaptative et intelligente du robot esclave basé sur la structure de commande en effort externe combinée à l'estimateur MCR-FO et le CN.

A. Résultats de simulation

Les figures ci-dessous présentent les tracés des courbes de position et de force ainsi que l'identification de l'environnement, obtenus en mettant en œuvre le schéma proposé précédemment sur deux cas différents qui sont :

$$K_{e_réelle} = (K_e + (0.25 * K_e * \sin(t))) ; \text{ Cas (A) : } K_e = 6000 ; \text{ Cas (B) : } K_e = 12000$$

Pour le compensateur neuronal, nous avons choisi $N_e = 9$ et $N_c = 10$. Les paramètres de l'algorithme de rétropropagation sont les suivants : $\eta=0,005$, $\mu=0,85$. Les poids sont initialement choisis au hasard et ajustés en ligne à chaque pas d'échantillonnage. En supposant que les propriétés géométriques de l'objet à manipuler sont inconnues et afin de faire une estimation en ligne de sa raideur à partir de mesures de capteur de force bruité, nous appliquons la méthode de MCR-FO avec $P(0) > 0$, $\hat{\theta}(0) = 3000N/m$, $\lambda = 0.985$. Le reste des gains de la loi de commande en force externe et de l'impédance désirée sont fixés comme suit : $A_d = I(kg)$, $B_d = 40 (Ns/m) \times I$, $K_d = 800 (N/m) \times I$, $M_d = I$, $K_v = 40 \times I$, $K_p = 800 \times I$, $K_{fi} = 0.15 \times I$, $K_{fv} = 400 \times I$, $K_{fp} = 8000 \times I$.

Interprétation des résultats

Les résultats de simulation obtenues et illustrés à travers les tracés dans les figures 3.30 jusqu'à 3.33, révèlent clairement la qualité du signaux récupérés à partir de mesure de capteur de force

bruité effectuée dans les trois directions, et lors de l'interaction avec un environnement caractérisé par une raideur variable en fonction du temps. De l'autre côté les résultats prouvent que l'ensemble du système est stable et garantit l'égalité entre la force appliquée par l'opérateur et celle appliquée à l'environnement. Toutefois, il convient de noter que ces résultats illustrent certains pics lors du contact avec les propriétés d'un objet inconnu (position et rigidité) ou lors du retour à l'espace libre. De plus, il existe des fluctuations qui ne dépassent pas $0.1N$ lors de l'interaction avec l'environnement. En outre, le système présente un suivi précis des trajectoires du maître et de l'esclave, que ce soit dans un environnement libre ou contraint.

Les résultats obtenus sont jugés équitables par rapport à ceux obtenus dans l'approche précédemment développés et ont mené à la réalisation de la transparence parfaite.

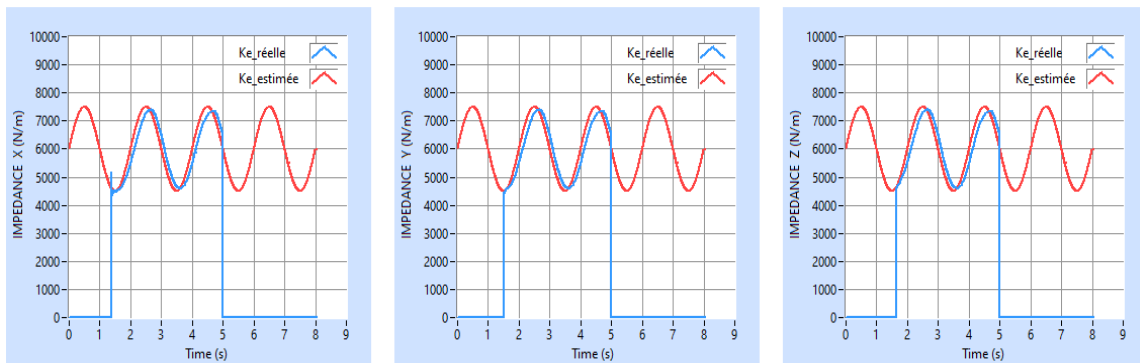


Figure 3.30 : Identification de la raideur réelle ; cas (A).

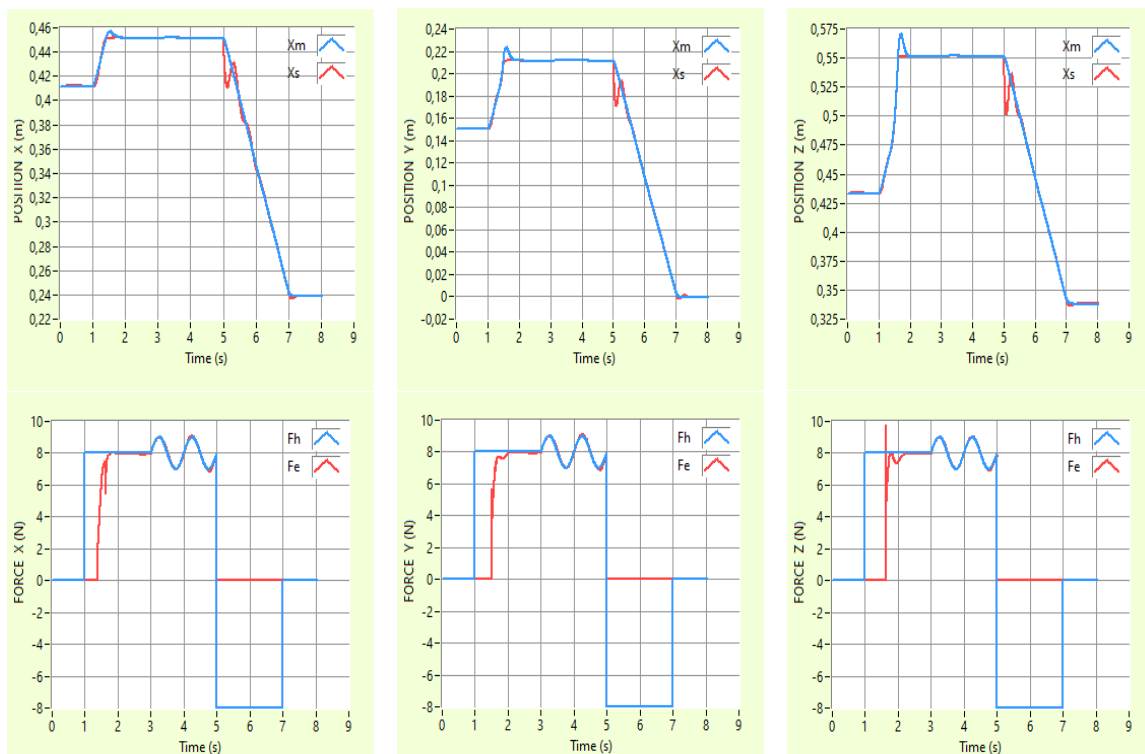


Figure 3.31 : Suivi de la position et de la force avec l'estimateur de MCR-FO et le compensateur neuronal ; cas (A).

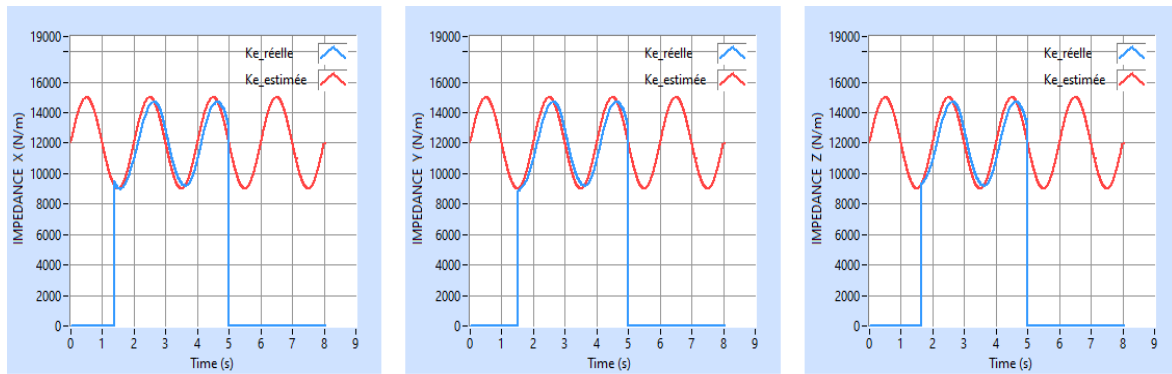


Figure 3.32 : Identification de la raideur réelle ; cas (B).

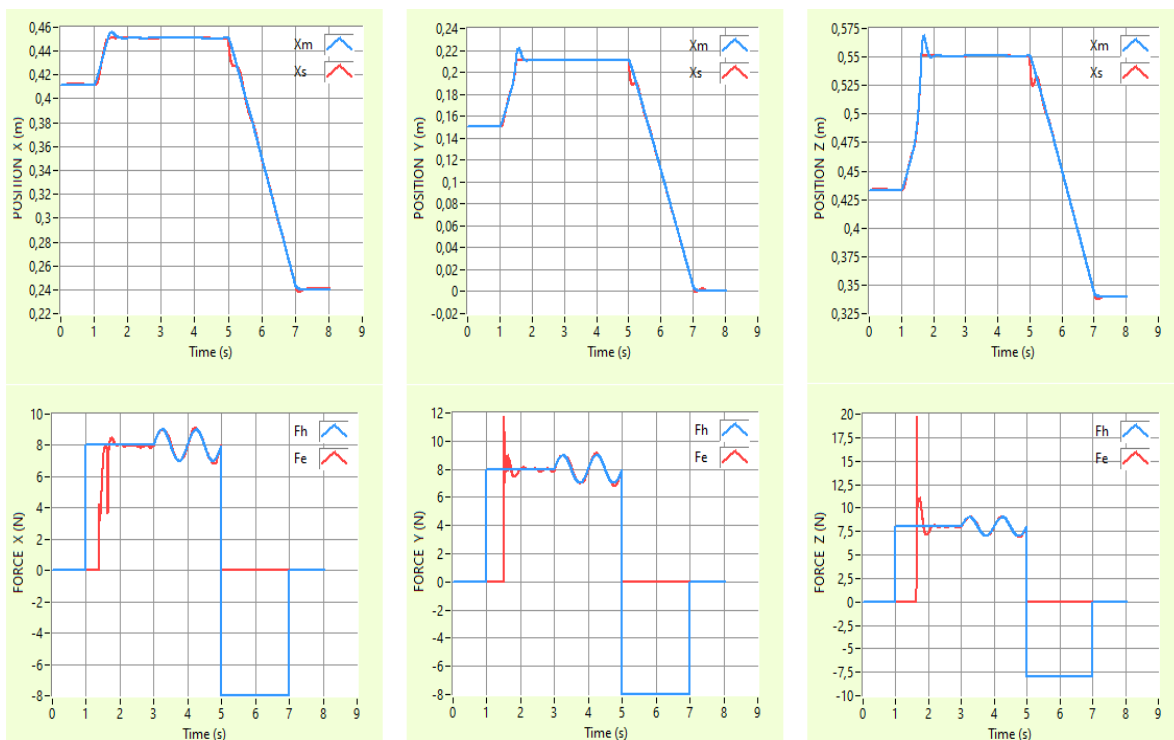


Figure 3.33 : Suivi de la position et de la force avec l'estimateur de MCR-FO et le compensateur neuronal ; cas (B).

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé au départ une description générale des modèles mathématiques des robots maître et esclave, supposés, dans notre cas, géométriquement identiques. Par la suite, nous avons présenté deux nouvelles structures de commande bilatérales adaptatives et intelligentes pour un système de téléopération, reposant sur une architecture à 4 canaux, en utilisant une stratégie de commande en force/impédance pour la partie maître, et une stratégie de commande force/position pour le robot esclave qui exploite une approche parallèle dans un cas et une approche hiérarchique dans un autre cas.

Les deux approches proposées, validées par simulation sous l'environnement LabVIEW, ont donné des résultats très satisfaisants en termes de performance et de stabilité du système de téléopération, cela même en présence, d'incertitudes sur la dynamique du manipulateur esclave, d'une raideur de l'environnement inconnue et variable, et d'une qualité médiocre des mesures des capteurs de force.

CHAPITRE 4

Structure de commande
bilatérale adaptative et
intelligente à trois canaux

4.1 Introduction

Dans de nombreuses tâches de télérobotique, les robots manipulateurs interagissent avec des environnements dont les caractéristiques dynamiques sont souvent inconnues. Cette incertitude environnementale, combinée à la présence d'incertitudes internes telles que les erreurs de modélisation, peut compromettre la sécurité et les performances des systèmes télérobotiques. Que ce soit dans un espace libre ou contraint, maintenir une performance de suivi et une stabilité appropriée devient une priorité cruciale.

Pour répondre à ces défis, deux approches de commande se distinguent : la commande en impédance et la commande en admittance. La commande en impédance, introduite par Hogan [125], vise à réguler le comportement des robots aux points d'interaction physique en modulant l'impédance mécanique, qui représente la correspondance entre les forces appliquées aux articulations et les vitesses des articulations. D'autre part, la commande en admittance, initiée par Mason [126], cherche à générer et à suivre la trajectoire de référence correspondant à un modèle d'admittance souhaité et aux mesures de la force de l'environnement.

Ces deux approches offrent des avantages distincts, notamment en termes d'adaptabilité au comportement humain et au monde réel, rendant ainsi la collaboration homme-robot plus intuitive et efficace.

Au cours de ce chapitre, nous présenterons une nouvelle approche de commande adaptative et intelligente en admittance basée sur une architecture à trois canaux (voir Figure 4.1), où la force appliquée par l'opérateur, la position du robot maître après traitement par mappage de l'espace de travail sont transmises au côté esclave, et la position du robot esclave après traitement par mappage inverse de l'espace de travail est renvoyée au côté maître [127].

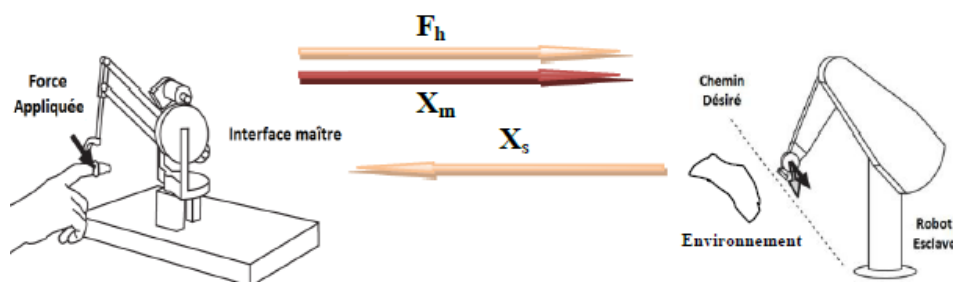


Figure 4.1 : Architecture à trois canaux.

4.2 Description et modélisation du système télérobotisé

Dans cette section, une présentation du système téléopéré maître/esclave est donnée à la fois au niveau conceptuel et au niveau mathématique. Le système est composé d'une véritable interface haptique (PHANTOM Omni) manipulée par un opérateur et d'un robot virtuel (PUMA560) qui interagit avec un environnement virtuel, comme illustré dans la figure 4.2.

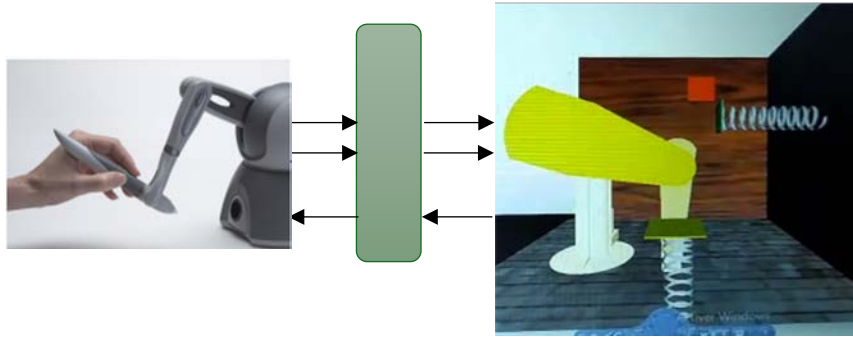


Figure 4.2 : Système maître-esclave.

A. Modélisation de l'être humain

Le bras humain est un mécanisme biomécanique complexe qui se comporte comme un système dont le mouvement partiellement contraint permet de contrôler la force de contact.

En général, les caractéristiques dynamiques du bras humain en interaction avec une interface haptique peuvent être modélisées comme un système de second ordre [128]. Toutefois, dans ce travail, l'impédance du bras humain est approximativement simplifiée comme un système ressort-amortisseur, décrit par l'équation suivante :

$$B_h \cdot \dot{X}_m + K_h \cdot (X_m - X_h) = F_h \quad (4.1)$$

où F_h est la force exercée par le bras humain sur l'interface haptique, X_h fait référence à la position souhaitée émise par le système nerveux central, tandis que X_m , \dot{X}_m représentent la position et la vitesse de l'interface haptique.

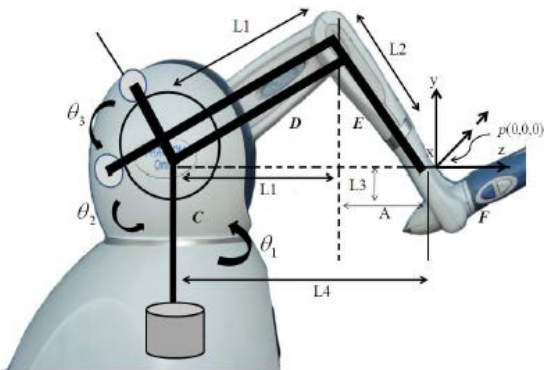
En outre, nous introduisons le paramètre n_h qui permet d'augmenter ou de diminuer la force humaine dans la direction de l'interaction. Sa valeur est choisie en continu en appuyant sur les deux boutons situés sur l'Omni, et l'équation est la suivante :

$$F_{hs} = n_h F_h \quad (4.2)$$

où $n_h = 1$ est la valeur par défaut.

B. Le robot maître

Le robot maître employé ici est le PHANTOM Omni, un dispositif haptique de positionnement et de perception mis au point par SensAble Technologies. Il est considéré comme un robot à sous action, composé d'articulations rotatives à 6-DDL, dont l'espace de travail accessible est de 12cm×16cm. Pour la suite de notre travail, nous considérons que 3-DDL de l'OMNI. La condition initiale correspondant à la posture présentée dans la figure 4.3 et les angles limites des articulations sont indiqués dans le tableau 4.1.



Articulation(q_i)	Plage articulaire (deg)
1 (q_1)	-56 to +56
2 (q_2)	0 to +100
3 (q_3)	-47 to +69
4 (q_4)	-141 to +148
5 (q_5)	-87 to +57
6 (q_6)	-150 to +150

Figure 4.3 : La posture initiale d'Omni [126]. Tableau 4.1 : les angles limites des articulations

Le modèle géométrique direct se réfère à la relation entre les coordonnées des articulations et les coordonnées opérationnelles (position/orientation de l'effecteur). Pour notre dispositif maître, le modèle est décrit par [129] :

$$X_m = f(q_m) \quad (4.3)$$

Avec,

$$X_m = \begin{pmatrix} -s_1(L1c_2 + L2s_3) \\ L3 - L2c_3 + L1s_2 \\ -L4 + c_1(L1c_2 + L2s_3) \end{pmatrix}$$

où l'indice "m" est utilisé pour indiquer le maître. Les longueurs de liaison du dispositif Omni sont données par $L1 = L2 = 0.135\text{m}$, $L3 = 0.025\text{m}$, $L4 = 0.165\text{m}$, $s_x = \sin(q_x)$ and $c_x = \cos(q_x)$

Le modèle géométrique inverse établit la fonction inverse de la cinématique directe. Il prend une position cible comme entrée et calcule la pose requise pour que l'effecteur atteigne la position cible, le modèle est exprimé par [129] :

$$q_m = f^{-1}(X_m) \quad (4.4)$$

Avec,

$$q_m = \begin{pmatrix} -atan2(x, z + L4) \\ \cos^{-1}\left(\frac{L1^2+r^2-L2^2}{2L1r}\right) + atan2(y - L3, R) \\ q_2 + \cos^{-1}\left(\frac{L1^2+L2^2-r^2}{2L1L2}\right) - \frac{\pi}{2} \end{pmatrix}$$

L'ensemble des paramètres r et R sont calculés comme suit :

$$r = \sqrt{x^2 + (z + L4)^2 + (y - L3)^2} \quad (4.5)$$

$$R = \sqrt{x^2 + (z + L4)^2} \quad (4.6)$$

En dérivant (4.3) par rapport au temps, on obtient l'expression de la cinématique directe qui relie les vitesses des articulations aux vitesses cartésiennes dans une configuration donnée du robot.

$$\dot{X}_m = J(q_m)\dot{q}_m \quad (4.7)$$

où $J(q_m) \in R^{3 \times 3}$ est la matrice jacobienne du manipulateur qui est supposée être non singulière dans un espace de travail fini [130], avec :

$$\begin{aligned} J_{11} &= -(L1c_1c_2 + L2s_3c_1), & J_{12} &= L1s_1s_2, & J_{13} &= -L2c_3s_1 \\ J_{21} &= 0, & J_{22} &= L1c_2, & J_{23} &= L2s_3 \\ J_{31} &= -L1c_2s_1 - L2s_3s_1, & J_{32} &= -L1s_2c_1 \text{ et } & J_{33} &= L2c_3c_1 \end{aligned}$$

Pour obtenir la fonction inverse, on utilise l'expression suivante :

$$\dot{q}_m = J^{-1}(q_m)\dot{X}_m \quad (4.8)$$

La dérivée seconde par rapport au temps de l'équation (4.3) donne une relation qui exprime les accélérations des coordonnées opérationnelles en fonction des positions, des vitesses et des accélérations des articulations. Par conséquent, le modèle cinématique direct du second ordre du manipulateur est formulé comme suit :

$$\ddot{X}_m = J\ddot{q}_m + \dot{J}\dot{q}_m \quad (4.9)$$

La fonction inverse peut être exprimée comme suit

$$\ddot{q}_m = J^{-1}(\ddot{X}_m - \dot{J}\dot{q}_m) \quad (4.10)$$

Le modèle dynamique d'un robot maître dans l'espace articulaire établit une relation entre les couples moteurs et le mouvement des articulations donnée par l'équation suivante :

$$M_m(q_m)\ddot{q}_m + C_m(q_m, \dot{q}_m)\dot{q}_m + G_m(q_m) = \tau_m + J_m^T F_h \quad (4.11)$$

où $M_m = M_m^T \in R^{3 \times 3}$ est la matrice d'inertie, $C_m \in R^{3 \times 3}$ est la matrice des couples de Coriolis et centrifuge, et $G_m \in R^3$ représente le vecteur des couples des termes de gravité agissant sur les articulations, tandis que q_m , \dot{q}_m et $\ddot{q}_m \in R^3$ sont respectivement la position, la vitesse et l'accélération de l'articulation. J_m^T est la transposée de la matrice jacobienne. τ_m est le signal de couple de commande généralisé agissant sur les articulations. Les matrices du modèle dynamique sont données dans l'annexe B.

C. Le robot esclave

Le robot virtuel téléopéré utilisé ici est le robot PUMA 560. Dans notre cas, nous considérons que la commande est établie dans l'espace articulaire, plus de détails sur la modélisation sont rapportés dans la section 3.2.1. La scène virtuelle de ce robot est créée à l'aide de l'éditeur V-realm sous l'environnement Matlab/Simulink et décrite dans la section 4.5.

D. Le modèle de l'environnement

Différents modèles ont été proposés dans la littérature, afin de fournir une représentation continue du niveau de contact avec le robot esclave. Dans ce chapitre, nous utilisons le modèle le plus simple et le plus courant, régissant la dynamique d'un système linéaire amortisseur-ressort.

$$F_e = B_e \dot{x}_s + K_e (x_s - x_e) \quad (4.12)$$

Où $(x_s - x_e)$ représente la pénétration dans l'environnement, K_e et B_e sont respectivement les matrices diagonales constantes (3×3) de raideur et d'amortissement.

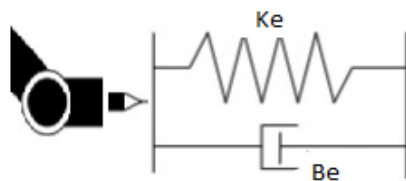


Figure 4.4 : Environnement ressort-amortisseur.

E. Canal de communication

Dans ce travail, le retard dans le canal de communication a été négligé et considéré comme très faible, ce qui est le cas dans de nombreuses applications de téléopération médicale, dans lesquelles la distance entre le médecin et le patient n'est pas trop grande.

4.3 Mappage de l'espace de travail

L'espace de travail d'un manipulateur robotique est défini comme l'ensemble des points sur lesquels l'effecteur peut être placé. Il dépend d'un certain nombre de paramètres, comme la dimension du robot, les caractéristiques géométriques et les limites de l'articulation. L'analyse et le mappage de l'espace de travail sont extrêmement importantes pour améliorer la fiabilité et la contrôlabilité du robot esclave, car elles permettent aux espaces de travail du maître et de l'esclave de se chevaucher autant que possible.

En fonction de la complexité du calcul de l'espace de travail d'un robot à chaîne ouverte et à degrés de liberté multiples, plusieurs méthodes ont été développées et classées en trois types principaux : les méthodes analytiques, les méthodes graphiques et les méthodes numériques [131,132,133].

Avant d'appliquer le mappage de l'espace de travail, et afin d'ajuster la direction de repère de référence du dispositif Phantom Omni qui est différente de la direction de repère de référence du PUMA 560, et afin de corriger la position de décalage des coordonnées de base de l'Omni, comme illustrée à la figure 4.5(a), la matrice de transformation modifiée peut être calculée à l'aide de la relation ci-dessous :

$$A' = R_z\left(\frac{\pi}{2}\right) * R_x\left(\frac{\pi}{2}\right) * (Tr_z(L4) * Tr_x(L3) * A) * R_y\left(\frac{\pi}{2}\right) * R_z\left(\frac{\pi}{2}\right) * \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (4.13)$$

où A est la matrice de transformation du dispositif Omni, A' est la matrice modifiée correspondante. En outre, la position liée aux coordonnées de l'axe cartésien modifié est donnée par :

$$X_0' = A' * X_6 \quad (4.14)$$

où $X_0' = [x_m, y_m, z_m]^T$ représente les coordonnées cartésiennes modifiées des effecteurs finaux, et l'ensemble du monde unifié est schématisé à la figure 4.5(b).

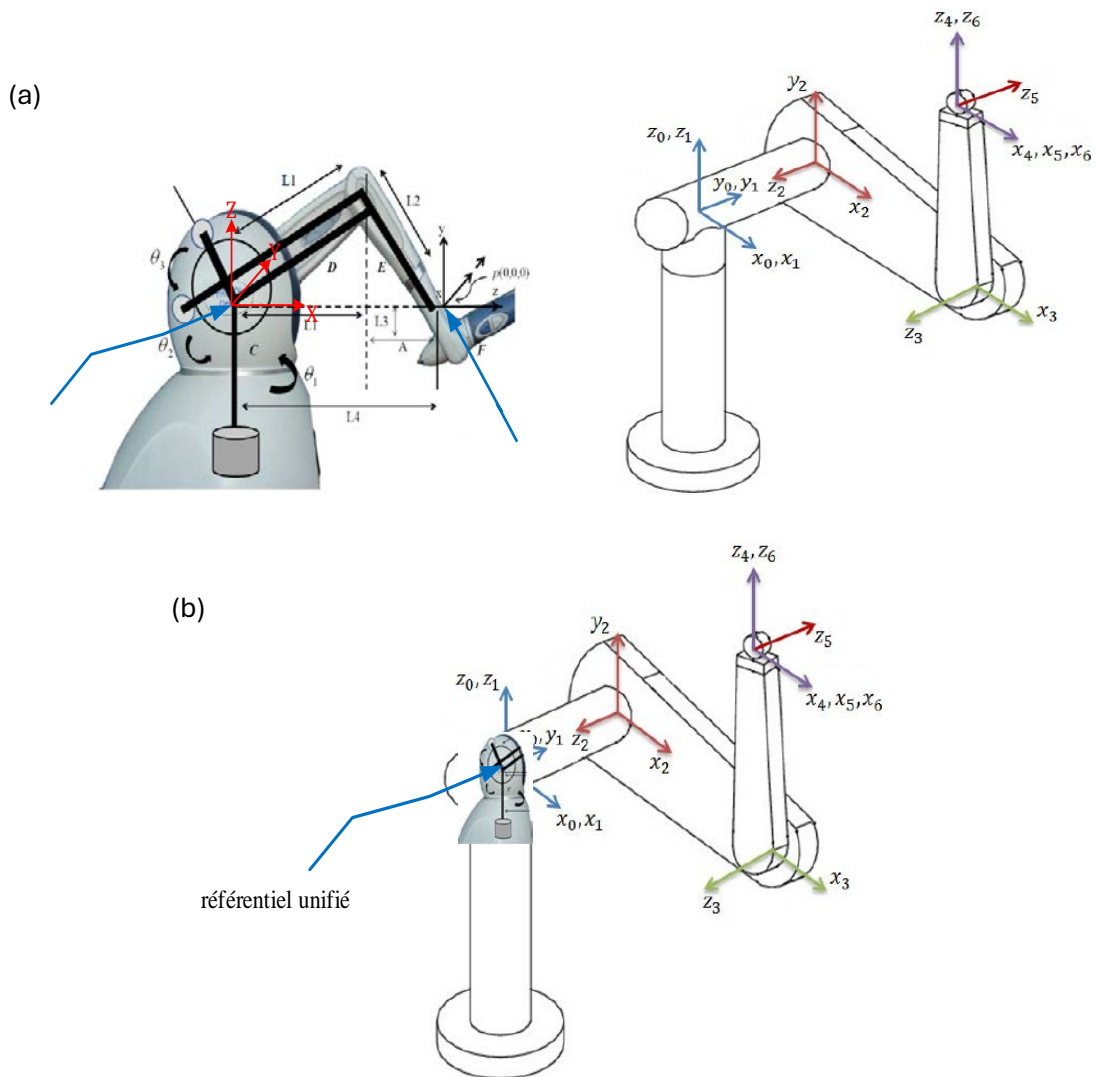


Figure 4.5 : (a) le référentiel de base de l'OMNI et PUMA 560, (b) le référentiel unifié.

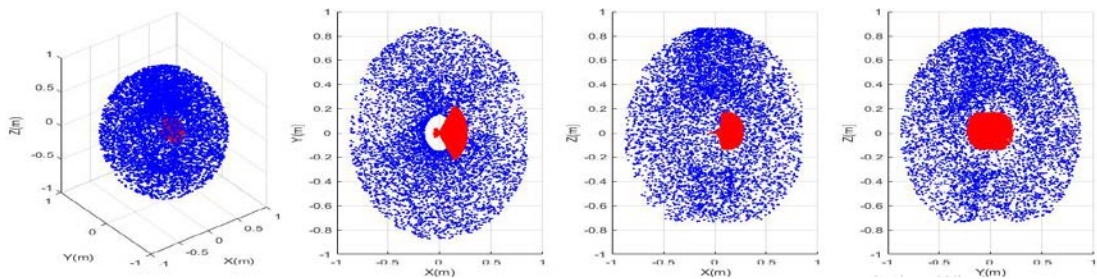
Génération de l'espace de travail approximatif

La méthode Monte Carlo d'échantillonnage aléatoire est une méthode largement utilisée pour sa simplicité, puisqu'elle n'implique pas de calcul du Jacobien inverse. Elle est particulièrement bien adaptée aux robots complexes ou même en présence de redondance cinématique [134]. Dans [135], Cao a adopté la distribution Beta pour générer des variables aléatoires des articulations du robot, en augmentant la probabilité du vecteur d'articulation à la frontière. Bart Milne et al ont utilisé une boucle de distance dans tous les espaces articulaires pour générer le contour, mais cette méthode prend beaucoup de temps [136]. Par conséquent, dans ce travail, la stratégie considérée est inspirée de [136], dans laquelle nous utilisons une distribution radiale homogène pour générer 7000 points afin d'approximer séparément les espaces de travail des robots maître et esclave. Les points du nuage qui donnent le rapport de volume entre les espaces

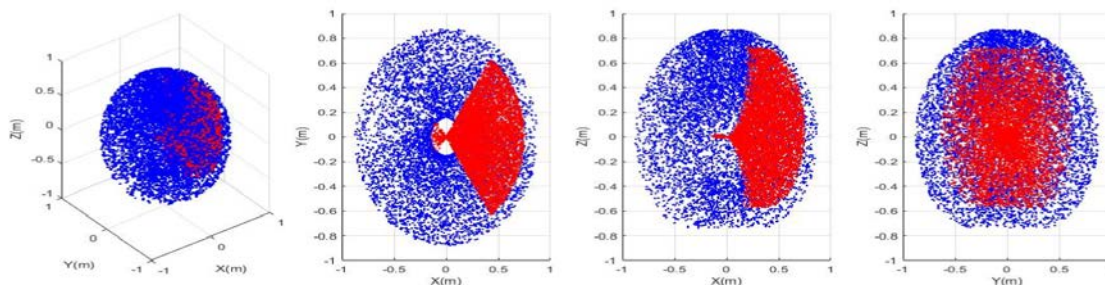
de travail du maître et de l'esclave est ensuite dessiné dans la figure 4.6(a). Le résultat indique que l'espace de travail de PUMA560 est dix fois plus grand que l'espace de travail de l'Omni. Comme souligné plus haut, l'objectif est de faire en sorte que les espaces de travail des uns et des autres se chevauchent autant que possible, sans être proches des limites, car cela pourrait entraîner des configurations singulières. Pour ce faire, une méthode simple est employée pour le processus de mappage de l'interface haptique, qui comprend un facteur d'échelle, un facteur de rotation et des termes de translation donnée par l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\delta & -\sin\delta & 0 \\ \sin\delta & \cos\delta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} x \left(\begin{bmatrix} S_x & 0 & 0 \\ 0 & S_y & 0 \\ 0 & 0 & S_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} \right) \quad (4.15)$$

où $[x_m, y_m, z_m]^T$, $[x_s, y_s, z_s]^T$ représentent les coordonnées cartésiennes de l'effecteur d'Omni et de PUMA560 respectivement. $[S_x, S_y, S_z]^T$, $[T_x, T_y, T_z]^T$ représentent les facteurs d'échelle et les termes de translation autour des axes X, Y et Z , tandis que δ est l'angle de rotation de l'axe Z pour la base de l'interface haptique. Ainsi, nous obtenons les paramètres d'adaptation pour le robot PUMA560 comme suit : $[S_x, S_y, S_z]^T = [2.8, 2.9, 4.3]^T$, $[T_x, T_y, T_z]^T = [0, 0, 0]^T$ et $\delta = 0$. Les résultats sont illustrés à la figure 6(b) et indiquent la zone de chevauchement après le processus de mappage qui a été obtenu sans être proche des limites qui peuvent causer une configuration de singularités.



(a) Tracé des points du nuage avant le mappage de l'espace de travail



(b) Tracé des points du nuage après le mappage de l'espace de travail

Figure 4.6 : Mappage de l'espace de travail, la couleur rouge indique l'OMNI, tandis que la couleur bleue indique le PUMA560.

4.4 Approche de commande adaptative et intelligente en admittance

Notre approche de commande adaptative et intelligente en admittance développée repose sur l'intégration de plusieurs techniques avancées, notamment la méthode MCR-FO, le filtre Butterworth et une fonction de limitation. Cette combinaison permet de générer des trajectoires modifiées qui sont transmises à la loi de commande de position PID. De plus, nous combinons les lois de commande en position du maître et de l'esclave avec une approche de découplage dynamique non linéaire et le CN pour faire face aux incertitudes résultant des erreurs de modélisation et des effets de la charge utile de l'effecteur esclave. Le diagramme global de cette structure est illustré dans la figure ci-dessous.

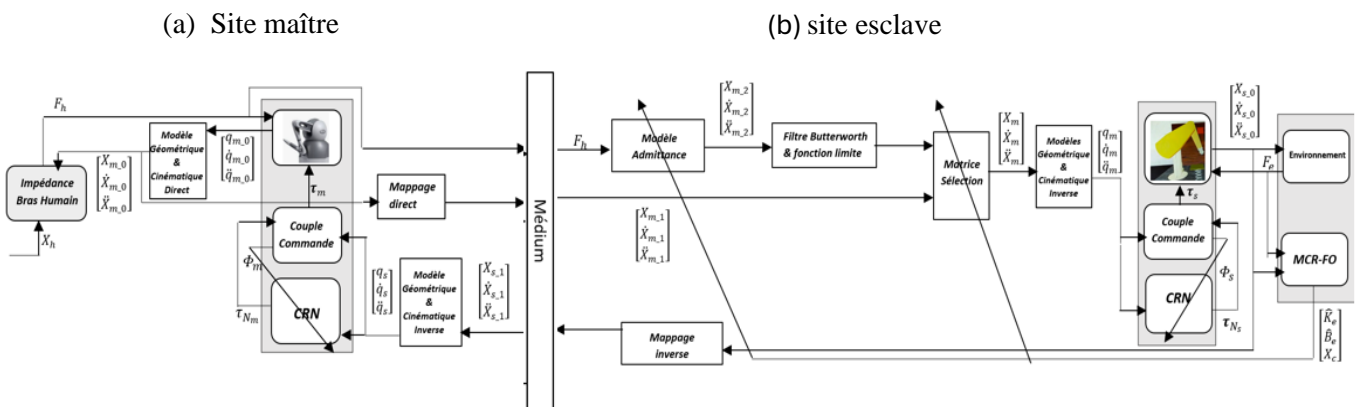


Figure 4.7 : Structure de commande de l'ensemble du système téléopéré.

4.4.1 Le contrôleur maître

L'opérateur humain manipule l'interface haptique en appliquant une force donnée qui dépend du mouvement volontaire souhaité. La trajectoire de sortie du maître est convertie en trajectoire souhaitée grâce au mappage de l'espace de travail. Ensuite, tous les signaux, la force et la trajectoire générée sont mesurés et envoyés au robot esclave. D'autre part, la trajectoire renvoyée par le robot esclave après avoir été traitée par la fonction inverse du mappage de l'espace de travail est utilisée comme entrée dans le contrôleur subséquent. Ce signal est utile pour produire une sensation haptique lors de l'interaction avec un environnement et pour corriger les erreurs de positionnement entre les robots maître et esclave. Le système de commande adopté est basé sur un contrôleur PID classique [137] combiné avec l'approche de découplage dynamique non linéaire, et un contrôleur neuronal (CN) basé sur l'algorithme de rétropropagation du gradient.

En définissant le modèle d'erreur de position comme suit :

$$e_{p_m} = q_s - q_m \quad (4.16)$$

En considérant la loi de commande PID comme

$$\tau_{PID_m} = \ddot{q}_s + K_{p_m} e_{p_m} + K_{i_m} \int e_{p_m} dt + K_{v_m} \dot{e}_{p_m} \quad (4.17)$$

où \ddot{q}_s est l'accélération désirée des articulations de l'effecteur, K_{p_m} , K_{v_m} et K_{i_m} sont des matrices diagonales avec des paramètres positifs constants choisis pour approcher une erreur e_{p_m} asymptotiquement nulle entre la position désirée et la position réelle de l'effecteur. La loi de commande régissant le système est exprimée comme suit :

$$\begin{aligned} \tau_m = & \widehat{M}_m(q_m) \tau_{PID_m} + \widehat{C}_m(q_m, \dot{q}_m) \dot{q}_m + \widehat{G}_m(q_m) - J_m^T \widehat{F}_h + K_{Nm_p} \tau_{N_m} \\ & + K_{Nm_i} \int \tau_{N_m} dt \end{aligned} \quad (4.18)$$

où \widehat{M}_m , \widehat{C}_m , \widehat{G}_m désignent les termes nominaux et disponibles du modèle dynamique d'Omni, \widehat{F}_h est la force appliquée par l'opérateur, J_m^T est la matrice jacobienne transposée, K_{Nm_p} et K_{Nm_i} sont des matrices diagonales avec des paramètres positifs et τ_{N_m} est la sortie de CN. Par conséquent, la loi de commande en boucle fermée est donnée comme suit :

$$\begin{aligned} \ddot{e}_{p_m} + K_{v_m} \dot{e}_{p_m} + K_{p_m} e_{p_m} + K_{i_m} \int e_{p_m} dt = & \widehat{M}_m^{-1} (\Delta \widehat{M}_m \ddot{q}_m + \Delta \widehat{C}_m(q_m, \dot{q}_m) \dot{q}_m + \\ & \Delta \widehat{G}_m(q_m) + J_m^T \Delta \widehat{F}_h) - K_{Nm_p} \tau_{N_m} - K_{Nm_i} \int \tau_{N_m} dt \end{aligned} \quad (4.19)$$

où $\Delta(\cdot)$ désigne les termes d'incertitude.

L'objectif de la sortie du CN (τ_{N_m}) est de compenser l'effet des incertitudes dans (4.19), ce qui est réalisé en prenant la trajectoire souhaitée comme signal d'entrée et le couple de feedback Φ_m comme signal d'entraînement pour le réseau neuronal.

$$\Phi_m = \ddot{e}_{p_m} + K_{v_m} \dot{e}_{p_m} + K_{p_m} e_{p_m} + K_{i_m} \int e_{p_m} dt \quad (4.20)$$

Dans le cas idéal, le terme de droite de (4.19) devient nul, et dans ce cas la sortie du compensateur neuronal doit vérifier la relation suivante :

$$\begin{aligned} K_{Nm_p} \tau_{N_m} + K_{Nm_i} \int \tau_{N_m} dt \\ = \widehat{M}_m^{-1} (\Delta \widehat{M}_m \ddot{q}_m + \Delta \widehat{C}_m(q_m, \dot{q}_m) \dot{q}_m + \Delta \widehat{G}_m(q_m) + J_m^T \Delta \widehat{F}_h) \end{aligned} \quad (4.21)$$

Par conséquent, le compensateur neuronal réalise une correspondance non linéaire entre q_m , \dot{q}_m , \ddot{q}_m et F_h à τ_{N_m} .

La structure du réseau neuronal est constituée de trois couches, une couche d'entrée, une couche de sortie d'unité de traitement linéaire et d'une couche cachée non linéaire de type sigmoïde exprimée par l'équation suivante :

$$f(u_j) = \frac{1 - \exp^{-u_j}}{1 + \exp^{-u_j}} \quad (4.22)$$

Les entrées de chaque couche sont reliées par des poids et la sortie de chaque couche est obtenue par l'équation suivante :

$$y = f\left(\sum_{i=1}^n u_i w_i + w_0\right) \quad (4.23)$$

Où, w_i sont les poids des connexions de la couche précédente à cette sortie, w_0 est le paramètre de biais, La fonction $f(\cdot)$ est appelée fonction d'activation dans le type dépend du problème. Par conséquent, la relation entrée-sortie du réseau est exprimée comme suit

$$\tau_{N_m} = \sum_{j=1}^{N_c} W_{jk}^2 \left(\frac{1 - \exp^{-\left(\sum_{i=1}^{N_e} u_i W_{ij}^1 + b_j^1\right)}}{1 + \exp^{-\left(\sum_{i=1}^{N_e} u_i W_{ij}^1 + b_j^1\right)}} \right) + b_k^2 \quad (4.24)$$

où N_e , N_c représentent le nombre de neurones dans les couches d'entrée et cachée respectivement. W_{ij}^1 , W_{jk}^2 représentent les poids des connexions de la couche d'entrée à la couche cachée et des connexions de la couche cachée à la couche de sortie. b_j^1 est le biais du $j^{\text{ème}}$ neurone de la couche cachée et b_k^2 est le biais du $k^{\text{ème}}$ neurone de la couche de sortie.

L'apprentissage se fait par l'algorithme de rétropropagation du gradient [120], qui est basé sur la minimisation d'une fonction candidate de forme quadratique calculée comme suit :

$$J = \frac{1}{2} E^T E \quad (4.25)$$

avec $E = \Phi_m - \tau_{N_m}$

Cet algorithme consiste à ajuster la sortie du réseau neuronal τ_{N_m} dans la direction opposée à la fonction dérivée de l'erreur, ce qui donne le gradient de J comme suit :

$$\frac{\delta J}{\delta w} = \frac{\delta E^T}{\delta w} E = -\frac{\delta \tau_{N_l}^T}{\delta w} E \quad (4.26)$$

Par conséquent, la loi d'adaptation des poids est régie par l'équation suivante à chaque période d'échantillonnage.

$$W(t) = \eta \frac{\delta \tau_{N_m}^T}{\delta w} E + \mu W(t-1) \quad (4.27)$$

Où η est le taux d'adaptation et μ est le momentum ou facteur d'oubli. Enfin, les coefficients d'adaptation des poids résultants peuvent être dérivés en utilisant (4.26).

4.4.2 Le contrôleur esclave

Le système de commande consiste en un contrôleur PID monté à la sortie de la matrice de sélection, qui décide de la nature des signaux d'entrée des trajectoires souhaitées à suivre, conformément à chacune des directions X, Y et Z . L'entrée de la matrice de sélection est composée de deux vecteurs, l'un indiquant la position, la vitesse et l'accélération des trajectoires souhaitées issues du modèle d'admittance en ligne, et l'autre les trajectoires souhaitées de la position, de la vitesse et de l'accélération issues de l'interaction de l'opérateur humain avec l'interface Omni après avoir été transformées par le processus de mappage. Le modèle d'admittance adaptatif proposé et la méthode d'estimation en ligne des paramètres d'un environnement inconnu sont présentés ci-après.

A. Le modèle d'admittance adaptatif

Comme indiqué ci-dessus, la commande en admittance est développée pour permettre à un robot d'agir comme un modèle d'admittance spécifié. Dans notre cas, le modèle d'admittance est sélectionné de manière adaptative sous la forme suivante :

$$F_h = \hat{B}_e \dot{x}_r + \hat{K}_e x_r \quad (4.28)$$

où \hat{B}_e, \hat{K}_e sont les matrices d'amortissement et de raideur estimées, respectivement issues d'une estimation en ligne de l'environnement. La fonction du modèle d'admittance est de générer les trajectoires souhaitées du robot dans l'espace contraint, qui seront passées par un filtre de Butterworth et une fonction de limitation, pour être ensuite passées par les modèles géométriques et cinématiques inverses afin d'obtenir des trajectoires équivalentes dans l'espace des articulations, selon les besoins de l'unité de commande subséquente.

B. Le filtre de Butterworth et fonction de limites

Afin de supprimer les irrégularités à la sortie du modèle d'admittance, un filtre passe-bas de butterworth du troisième ordre est utilisé pour ajuster la génération des trajectoires souhaitées lors de la phase transitoire de l'estimation en ligne des paramètres de l'environnement. La fonction de transfert peut donc être exprimée comme suit :

$$H(s) = \frac{1}{\left(\frac{s}{w_c}\right)^3 + 3\left(\frac{s}{w_c}\right)^2 + 3\left(\frac{s}{w_c}\right)^1 + 1} \quad (4.29)$$

où $w_c = 8\text{Hz}$ est la fréquence de coupure.

Ce choix est fondé sur l'information générale selon laquelle le système téléopéré est principalement distribué dans la largeur de bande des basses fréquences, tandis que les bruits se situent dans les hautes fréquences, ainsi que sur les travaux de [138], qui concluent qu'un bon suivi de la position est localisé entre les fréquences de 2Hz et 8Hz . Par conséquent, les fréquences supérieures à cette limite doivent être supprimées. Les propriétés du filtre passe-bas sont illustrées à la figure ci-dessous.

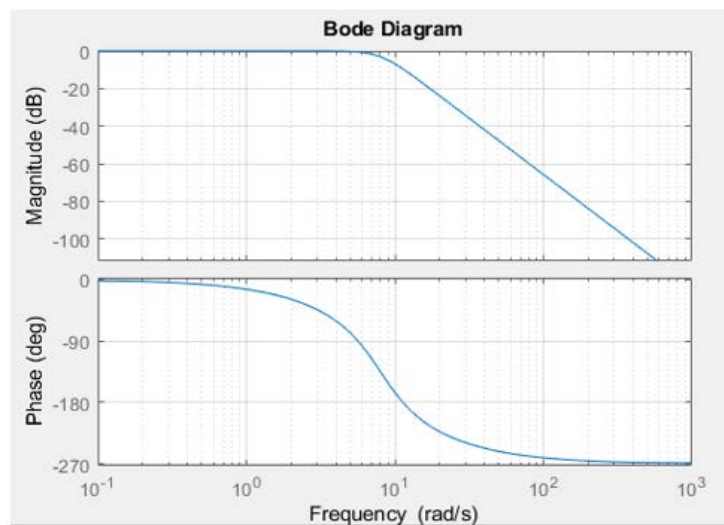


Figure 4.8: Diagramme de Bode du filtre de butterworth implémenté.

La fonction de limite a pour but de limiter les extrémités supérieure et inférieure des trajectoires transitoires générées par le modèle d'admittance adaptatif dans l'espace contraint. Elles sont choisies pour éviter un contact excessif lors de l'interaction avec un environnement rigide. Ces limites sont données sous la forme de conditions logiques :

- Si la position transitoire dans la direction X dépasse une limite constante donnée, la pénétration au-delà de cette valeur n'est pas prise en compte et est fixée dans la limite supérieure. En outre, si la position transitoire dans la direction X est négative, la limite inférieure de la position est fixée à zéro. De la même manière, nous considérons les limites des axes Y et Z des signaux transitoires de position et de vitesse.

Pour concevoir un couple de commande qui permet à la dynamique de l'esclave (3.9) de se comporter comme le modèle d'admittance adaptatif proposé (4.28), l'approche de découplage dynamique non linéaire peut être adoptée, sur la base d'un contrôleur PID conventionnel pour réaliser un suivi de position complexe.

En définissant le modèle d'erreur de position comme suit :

$$e_{p_s} = q_m - q_s \quad (4.30)$$

En considérant la loi de commande PID comme :

$$\tau_{PID_s} = \ddot{q}_m + K_{p_s} e_{p_s} + K_{v_s} \dot{e}_{p_s} + K_{i_s} \int e_{p_s} dt \quad (4.31)$$

où \ddot{q}_m est l'accélération désirée de l'articulation, K_{p_s} , K_{v_s} et K_{i_s} sont des paramètres constants pour le suiveur, la loi de commande régissant le système est exprimée comme suit :

$$\tau_s = \widehat{M}_s(q_s) \tau_{PID_s} + \widehat{C}_s(q_s, \dot{q}_s) \dot{q}_s + \widehat{G}_s(\dot{q}_s, q_s) + J_s^T \widehat{F}_e + K_{N_s p} \tau_{N_s} + K_{N_s i} \int \tau_{N_f} dt \quad (4.32)$$

où \widehat{M}_s , \widehat{C}_s , \widehat{G}_s désignent les termes nominaux et disponibles du modèle dynamique de PUMA560, \widehat{F}_e est la mesure du capteur de force, J_s^T est la matrice Jacobienne transposée, et τ_{N_s} est la sortie du compensateur neuronal. Par conséquent, la loi de commande en boucle fermée est donnée par :

$$\ddot{e}_{p_s} + K_{v_s} \dot{e}_{p_s} + K_{p_s} e_{p_s} + K_{i_s} \int e_{p_s} dt = \widehat{M}_f^{-1} * \quad (4.33)$$

$$(\Delta \widehat{M}_s \ddot{q}_s + \Delta \widehat{C}_s(q_s, \dot{q}_s) \dot{q}_s + \Delta \widehat{G}_s(\dot{q}_s, q_s) + J_s^T \Delta \widehat{F}_e) - K_{N_s p} \tau_{N_s} - K_{N_s i} \int \tau_{N_s} dt$$

En appliquant la même stratégie que précédemment, le CN minimise les effets des incertitudes dans (4.33). Pour ce faire, on prend la trajectoire souhaitée comme signal d'entrée et le couple de feedback Φ_s comme signal d'entraînement pour le réseau neuronal.

$$\Phi_s = \ddot{e}_{p_s} + K_{v_s} \dot{e}_{p_s} + K_{p_s} e_{p_s} + K_{i_s} \int e_{p_s} dt \quad (4.34)$$

Dans le cas idéal, le terme de droite de (4.33) devient nul, et dans ce cas la sortie de CN doit être :

$$K_{N_s p} \tau_{N_s} + K_{N_s i} \int \tau_{N_s} dt = \widehat{M}_s^{-1} * \quad (4.35)$$

$$(\Delta \widehat{M}_s \ddot{q}_s + \Delta \widehat{C}_s(q_s, \dot{q}_s) \dot{q}_s + \Delta \widehat{G}_s(\dot{q}_s, q_s) + J_s^T \Delta \widehat{F}_e)$$

Également dans la partie esclave, le CN réalise une correspondance non linéaire entre q_s , \dot{q}_s , \ddot{q}_s et F_e à τ_{N_s} .

C. Estimation en ligne de l'environnement

Dans le schéma de commande de la figure 4.7, nous avons utilisé aussi la méthode d'estimation en ligne basée sur l'approche MCR-FO pour identifier les paramètres inconnus d'amortissement et de raideur du modèle d'environnement, décrit dans l'équation (4.12).

Définissons un vecteur de régression $\varphi(t) = [X_s(t), \dot{X}_s(t)]^T$, et un vecteur de paramètres $\theta = [K, B]^T$, l'équation linéaire avec des paramètres réels (4.12) s'écrit comme suit :

$$f(t) = \varphi(t)^T \theta + v(t) \quad (4.36)$$

Avec,

$$\varphi(t) = \begin{bmatrix} X_{s_1}(t), X_{s_2}(t), \dots, X_{s_n}(t) \\ \dot{X}_{s_1}(t), \dot{X}_{s_2}(t), \dots, \dot{X}_{s_n}(t) \end{bmatrix}$$

$$\theta(t) = \begin{bmatrix} K_1, K_2, \dots, K_n \\ B_1, B_2, \dots, B_n \end{bmatrix}^T$$

L'indice n représente le nombre des paramètres à estimer, $v(t)$ est le bruit de mesure à l'instant t , supposé indépendant dans la séquence, de moyenne nulle et de variance constante $v \sim N(0, V_s)$, et l'équation de l'erreur dans l'estimation des paramètres peut être exprimée comme suit :

$$\varepsilon(t) = f(t) - \hat{f}(t) = f(t) - \varphi^T(t)\theta \quad (4.37)$$

En appliquant le même développement que celui de la section 3.3.1.E, nous obtenons les mêmes équations finales à mettre en place comme (3.31).

4.5 Experience de “HUMAN IN THE LOOP”

Pour évaluer l'efficacité de la méthode proposée, deux robots dissimilaires sont considérés dans le sens où ils sont géométriquement asymétriques avec des échelles différentes. Le maître est un robot réel (Omni) tandis que l'esclave est un robot virtuel dont les paramètres sont tirés d'un bras PUMA560 réel [111], qui interagit virtuellement avec un environnement inconnu. Les deux modèles virtuels sont illustrés à la figure 4.9. Ils sont construits à l'aide de l'éditeur V-realm dans l'environnement Simulink/Matlab. Dans cette partie, nous supposons également que seules les trois premières articulations de l'Omni et du PUMA560 sont prises en compte. L'environnement virtuel est constitué de trois objets suspendus séparément dans les trois directions X, Y et Z . Par conséquent, le couple de l'environnement est exercé sur l'effecteur dans

une seule direction pour chaque objet. Dans l'hypothèse d'une dynamique inconnue des objets de l'environnement, qui peut être définie comme suit :

$$\text{Object (1): } F_e = 10\dot{x}_s + 500(x_s - 0.55) \quad (4.38)$$

$$\text{Object (2): } F_e = 900(y_s - 0.23) \quad (4.39)$$

$$\text{Object (3): } F_e = 20\dot{z}_s + 2000(z_s - (-0.284)) \quad (4.40)$$

Afin de calculer une estimation en ligne de leurs paramètres (raideur et amortissement), nous appliquons la méthode de MCR-FO avec $P(0) = 10000 \times I$, $\hat{\theta}(0) = 2000$, et $\lambda = 0,90$. Les matrices $\hat{M}_m(q_m)$, $\hat{C}_m(q_m, \dot{q}_m)$ et $\hat{G}_m(q_m)$ pour le robot maître et $\hat{M}_s(q_s)$, $\hat{C}_s(q_s, \dot{q}_s)$, $\hat{G}_s(q_s, \dot{q}_s)$ pour le robot esclave, sont les paramètres dynamiques connus qui forment les modèles nominaux des robots.

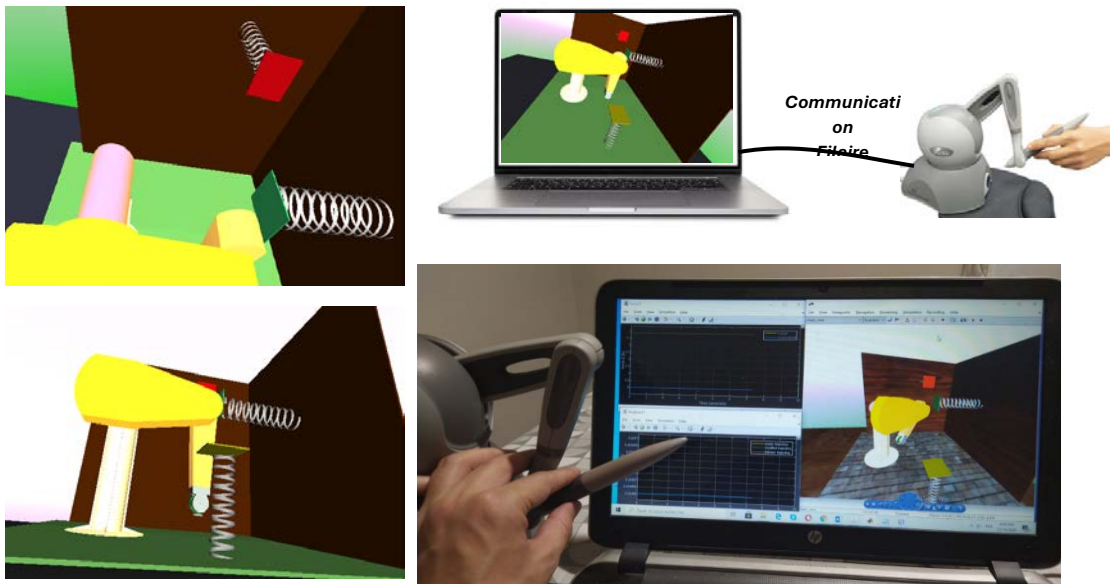


Figure 4.9 : Scène virtuelle du côté esclave.

Les incertitudes sur le modèle du robot incluent un outil mécanique de $5kg$ fixé à l'effecteur du robot esclave, et un couple des frottements de Coulomb et visqueux $\tau_f(\dot{q})$ ajouté à chaque articulation modélisé par : $\tau_f = 0.8\dot{q} + 0.5sign(\dot{q})$.

Le CN utilisé dans le contrôleur du côté maître est composé de 12 neurones dans la couche d'entrée et de 9 neurones dans la couche cachée. Les paramètres de l'algorithme de rétropropagation pour le côté maître sont les suivants : $\eta = 0,008$, $\mu = 1$, $K_{Nm_p} = 5 \times I$, $K_{Nm_i} = 0.07 \times I$. Le CN du côté esclave conserve le même nombre de neurones dans chaque couche et les paramètres de l'algorithme de rétropropagation sont les suivants : $\eta = 0,008$, $\mu = 1$, $K_{Ns_p} = 1.5 \times I$, $K_{Ns_i} = 0.01 \times I$. Au départ, les poids sont choisis au hasard, puis sont

ajustés à chaque temps d'échantillonnage. Les gains de l'impédance humaine est les paramètres des lois de commande de chaque côté sont fixés expérimentalement et respectivement comme suit :

$$\begin{aligned} K_h &= 160 \times I, & B_h &= 5 \times I \\ K_{p_m} &= 400 \times I, & K_{v_m} &= 0.1 \times I, & K_{i_m} &= 0 \times I \\ K_{p_s} &= 800 \times I, & K_{v_s} &= 40 \times I, & K_{i_s} &= 0 \times I \end{aligned}$$

Initialement, les robots sont placés à différentes positions, en fonction du dernier scénario de configuration. Ensuite, l'opérateur commence à déplacer le robot virtuel PUMA560 dans l'espace libre en appliquant une force variable F_h sur l'interface haptique jusqu'à ce qu'il atteigne l'objet avec lequel il doit interagir. À ce stade, l'opérateur maintient le même niveau d'intensité de force ou décide d'augmenter ou de diminuer la force appliquée en appuyant sur les boutons intégrés à l'Omni, en fonction de la tâche à effectuer et de la direction de l'interaction. Dans notre cas, un profil de force arbitraire a été considéré pour chaque expérience reproduite. Enfin, une fois l'interaction avec l'objet terminée, l'opérateur retire le robot de celui-ci et revient dans l'espace libre. De plus, nous avons répété l'expérience dans différentes conditions en utilisant le CN intégré séparément et conjointement dans les deux contrôleurs du maître et esclave, avec ou sans perturbations (cas idéal) sur le robot esclave.

Interprétation des résultats

Les résultats obtenus relatifs à l'interaction avec l'objet (1) sont classés en deux ensembles. Le premier ensemble, illustré à la figure 4.10, correspond au cas idéal. Il présente le suivi de la trajectoire sur les trois axes (a), la performance de la force appliquée dans la direction de l'interaction (b), les erreurs de trajectoire survenues pendant l'interaction sur les directions X , Y et Z (c), les erreurs de force pendant l'interaction (d) et, enfin, la qualité de l'estimation de l'impédance de l'environnement inconnu (e). Le deuxième ensemble, comme illustré dans la figure 4.11, tient compte de la présence de perturbations. Les résultats sont subdivisés en trois sous-ensembles (A), (B) et (C), dans le but de mettre en évidence de manière distincte les effets de l'intégration du CN, que ce soit séparément ou conjointement, dans les contrôleurs du maître et de l'esclave.

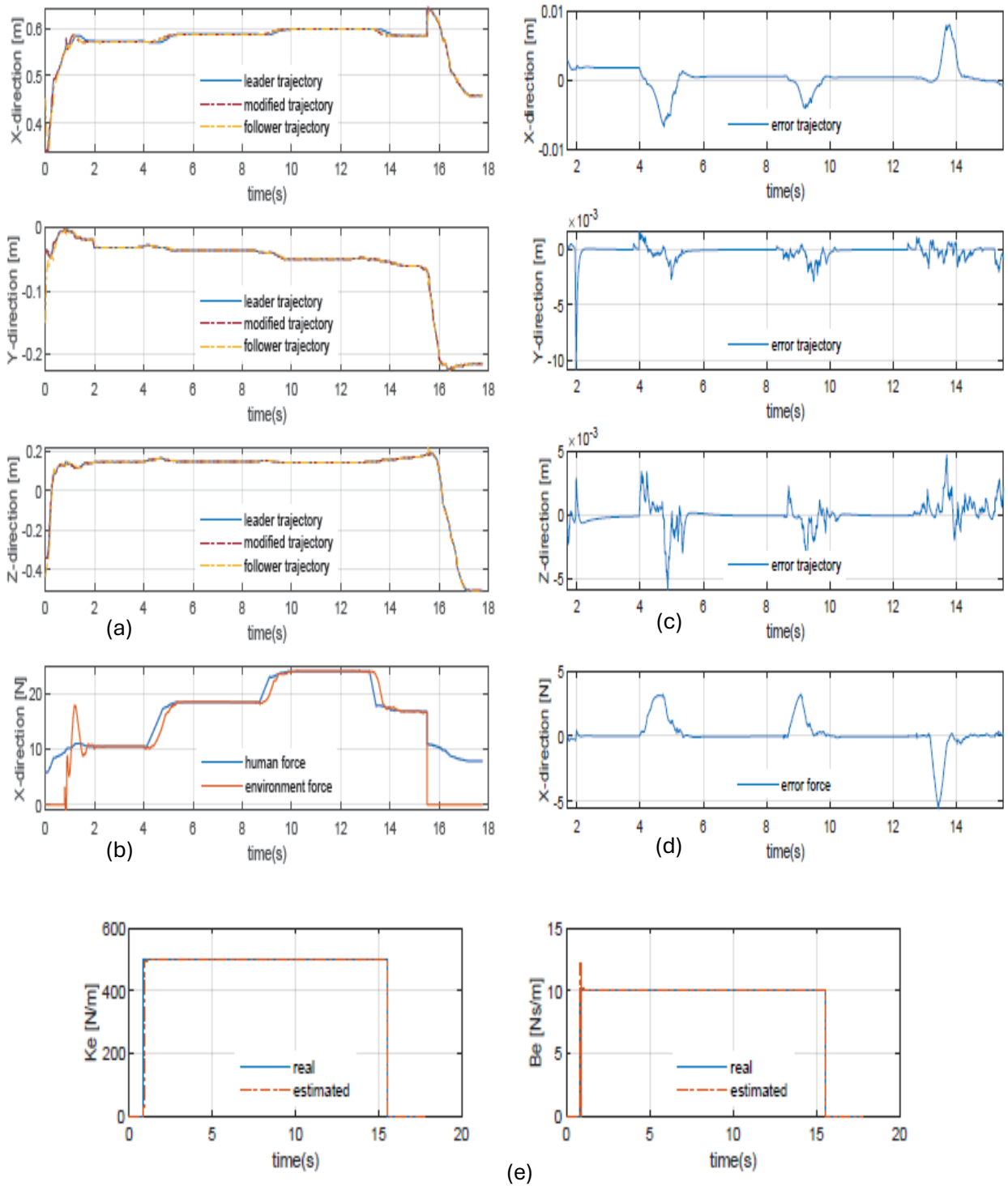
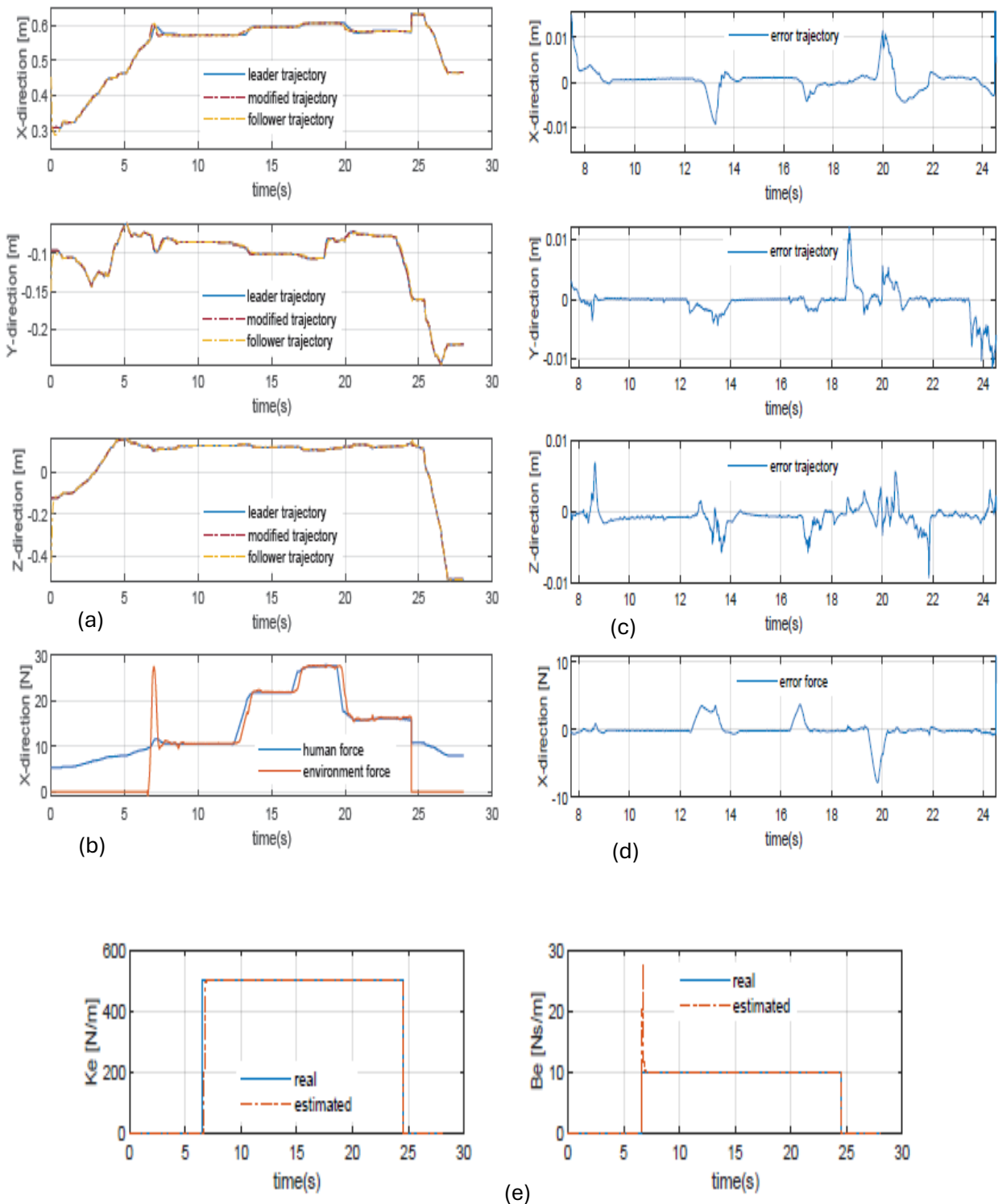
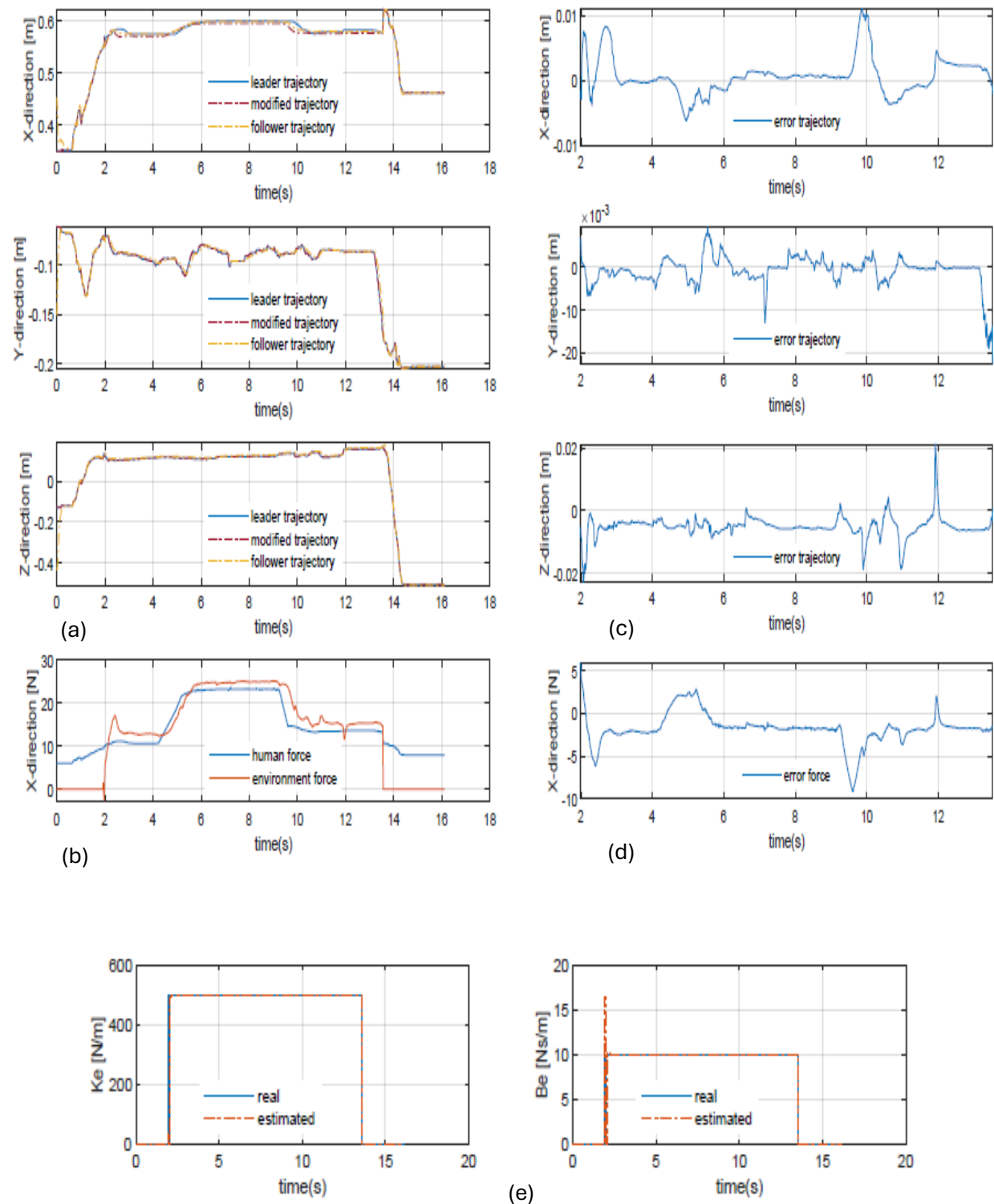


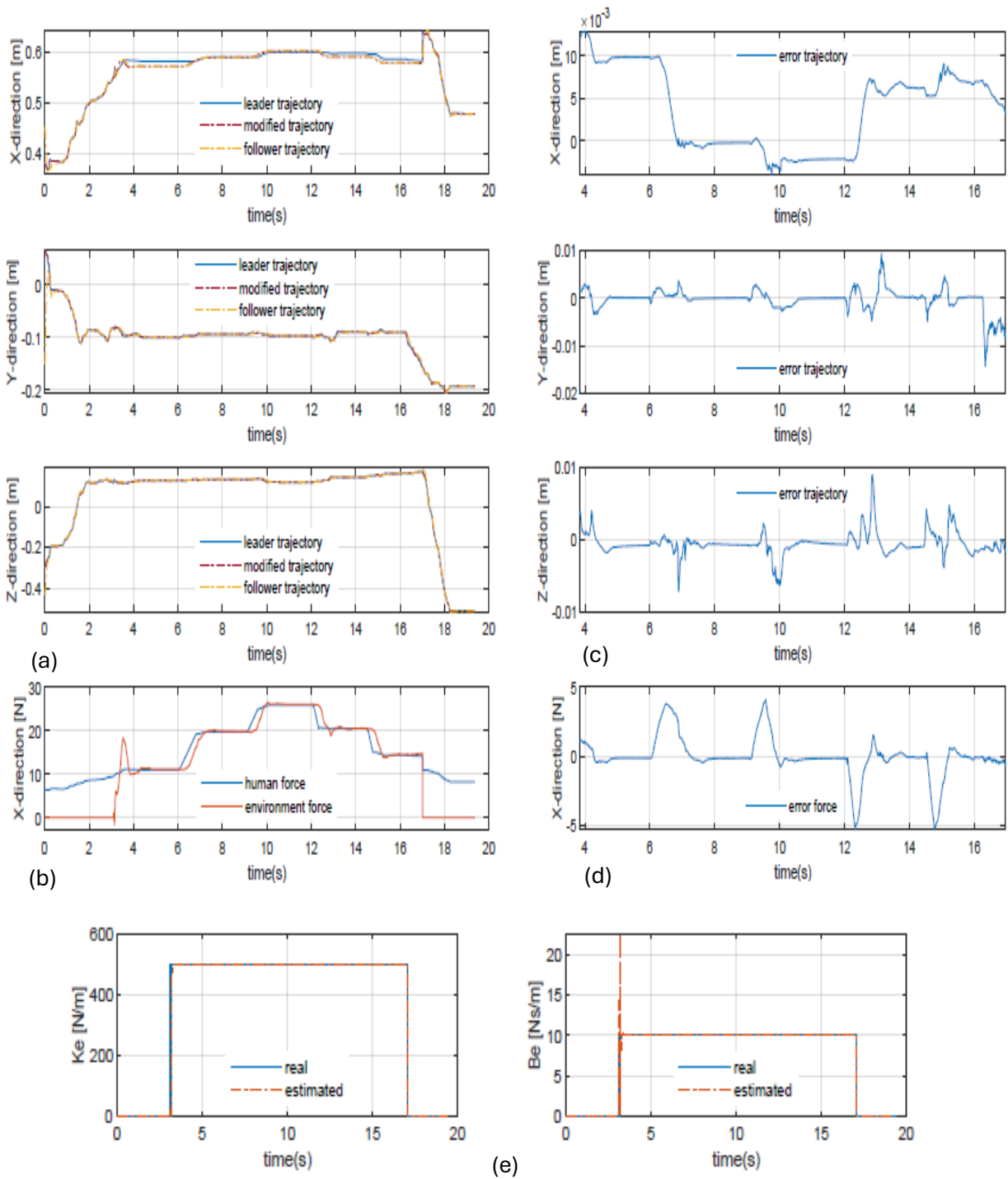
Figure 4.10 : Résultats sans perturbations. (a) : trajectoire de suivi selon les directions X, Y, Z (b) : performance de la force appliquée selon la direction X (c) : erreurs de trajectoire pendant la phase d'interaction et selon les directions X, Y, Z (d) : erreurs de force pendant l'interaction (e) : Réel par rapport à l'impédance estimée d'un environnement inconnu.



Sous-ensemble (A)



Sous-ensemble (B)



Sous-ensemble (C)

Figure 4.11 : Résultats avec perturbations : **Sous-ensemble (A)** : CN implémenté dans les contrôleurs maître et esclave. **Sous-ensemble (B)** : CN implémenté dans le contrôleur maître. **Sous-ensemble (C)** : CN implémenté dans le contrôleur esclave.

Les résultats mettent en évidence que la commande adaptative, appliquée dans des conditions idéales, engendre moins d'erreurs comparativement aux situations où des perturbations sont présentes, que ce soit en termes de suivi de trajectoire ou de force appliquée (voir Figure 4.10 (c), (d)). Ainsi, les courbes d'erreur convergent vers le voisinage de zéro, même en présence de retard dans la force appliquée. Ces erreurs surviennent lorsque l'utilisateur applique une intensité de force plus ou moins élevée (voir Figure 4.10(b)), et se traduisent par des écarts dans le suivi de la trajectoire qui ne dépassent pas 0,01 mètre. De plus, il convient de souligner que l'approche proposée assure une stabilité globale dans tous les cas de système téléopéré, que ce soit avec ou sans l'utilisation du CN, ainsi qu'en présence ou en absence de perturbations.

En ce qui concerne l'analyse des résultats du suivi de trajectoire, la figure 4.10(a) montre que les trajectoires de l'Omni et de la trajectoire modifiée sont parfaitement superposées en espace libre, contrairement à ce qui est observé en espace contraint. Cette disparité découle du rôle distinct du modèle d'admittance et de la matrice de sélection, qui priorisent la force appliquée sur l'Omni plutôt que le suivi de sa trajectoire. Cela influence la profondeur de pénétration appropriée dans l'objet. De plus, il convient de noter que ces trajectoires demeurent très proches et que les erreurs restent dans des limites acceptables, comme illustré sur la figure 4.10(c). Par ailleurs, la figure 4.10(e) indique la qualité de l'impédance estimée par rapport à l'impédance réelle, tant en espace libre qu'en espace contraint, dans l'hypothèse de caractéristiques inconnues de l'objet.

Dans le cas où les perturbations sont incluses, la figure 4.11(A) illustre la possibilité d'incorporer le CN dans les deux côtés pour améliorer les performances du contrôleur PID et obtenir des résultats beaucoup plus proches du cas idéal.

Afin de mettre en évidence l'utilité potentielle de ce concept et de tirer des conclusions sur l'impact de son absence, nous avons intégré séparément le CN dans les contrôleurs des côtés maître et esclave, obtenant ainsi les résultats présentés dans les figures 4.11(B) et (C). Dans le sous-ensemble (B), les réponses démontrent l'efficacité du CN intégré dans la correction des erreurs de suivi entre les trajectoires du maître et de l'esclave lors de l'interaction avec un objet (a). En revanche, l'absence de CN du côté esclave se traduit par une incapacité à reproduire la force humaine sur l'objet et entraîne une erreur permanente sur celui-ci (b). Le sous-ensemble (C), représentant le cas inverse, met en évidence l'efficacité de l'intégration du CN dans le contrôleur esclave pour reproduire précisément la force humaine sur l'objet, comme illustré en (b). D'autre part, l'absence de CN dans le contrôleur maître entraîne un décalage significatif entre les trajectoires des deux côtés, en particulier lors de l'interaction avec l'objet (a) et (c).

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé une nouvelle structure de commande adaptative et intelligente basée sur l'approche de commande en admittance pour un système de téléopération asymétrique. La structure de commande proposée s'inscrit dans le cadre de la commande des systèmes de téléopération à trois canaux. Le système proposé est soumis à des incertitudes dynamiques dans leurs robots et interagit avec un environnement distant inconnu de type ressort-amortisseur. Le modèle d'admittance souhaité est obtenu par une estimation en ligne des paramètres d'impédance de l'environnement inconnu basée sur la méthode MCR-FO. En outre, un contrôleur neuronal (CN) est développé pour compenser les incertitudes soulevées par les erreurs de modélisation et les effets de la charge utile de l'effecteur. Pour vérifier l'efficacité de l'approche proposée, une comparaison d'expériences "Human-in-the-loop" a été réalisée. Les résultats illustrent la stabilité garantie de l'ensemble du système de téléopération et les performances satisfaisantes du suivi de la position et des forces appliquées entre les robots maître et esclave.

Conclusion générale

Conclusion générale

La téléopération représente un champ d'application essentiel dans divers domaines, tels que l'exploration spatiale, la chirurgie et la réalité virtuelle, offrant des solutions innovantes pour des opérations à distance. Le travail présenté dans le cadre de cette thèse vise à apporter une contribution à la commande des systèmes télérobotisés, permettant d'augmenter la qualité du geste de l'opérateur, en améliorant sa perception à travers un retour des efforts appliqués à l'environnement distant.

Pour ce faire, nous avons développé trois structures de commande adaptatives et intelligentes innovantes, chacune ayant pour objectif d'améliorer le suivi de la trajectoire et la performance de la force appliquée dans des environnements complexes. Ces structures ont été conçues en prenant en considération les multiples incertitudes et défis inhérents à la téléopération, notamment les incertitudes concernant les robots maître et esclave, la dynamique variable et inconnue de l'environnement, la qualité médiocre des signaux provenant des capteurs de force, ainsi que l'asymétrie entre les robots maître et esclave, posant ainsi des problèmes d'échelle et de mappage de l'espace de travail.

Le présent travail a été réparti sur quatre parties.

Dans une première partie, nous avons parcouru un bref historique des origines de la téléopération et passé en revue la terminologie couramment utilisée pour décrire ces systèmes. Nous avons également examiné en détail les différentes composantes des systèmes de téléopération, ainsi que les aspects fondamentaux à prendre en compte lors de la mise en œuvre d'un contrôleur de système de téléopération. En particulier, nous avons discuté du compromis entre stabilité et transparence inhérent aux systèmes de téléopération bilatérales. Enfin, nous avons illustré quelques-unes des applications pratiques de ces systèmes, démontrant ainsi leur importance et leur pertinence dans divers domaines d'application.

Dans une deuxième partie, nous avons réalisé un examen non exhaustif de l'état de l'art sur la commande bilatérale pour les systèmes de téléopération. Notre objectif principal était de fournir les bases théoriques et pratiques nécessaires à la compréhension des travaux présentés dans la littérature ainsi que dans ce manuscrit. Dans cette exploration, nous avons commencé par définir le modèle du système de téléopération bilatérale, qui a été un élément central tout au long du chapitre. Ensuite, nous avons examiné les méthodes d'analyse de stabilité et de mesure des performances de ces systèmes. Enfin, nous avons exploré une variété de schémas de

commande existants pour la téléopération bilatérale, en mettant en œuvre différentes techniques et approches de commande.

Dans une troisième partie, nous avons présenté la proposition de deux nouvelles structures de commande bilatérales adaptatives et intelligentes pour un système de téléopération, reposant sur une architecture à 4-canaux. Après avoir formulé les modèles dynamiques des robots utilisés sur les sites local et distant, spécifiés dans l'espace opérationnel, nous avons détaillé la conception de la première structure. Celle-ci était articulée autour de deux stratégies de commande : une approche de commande en force/impédance pour le robot maître et une approche de commande parallèle en force/position pour le robot esclave. Pour estimer les caractéristiques de rigidité inconnues de l'environnement et extraire le bruit des capteurs de force, nous avons utilisé une estimation en ligne basée sur la méthode de MCR-FO. De plus, nous avons appliqué un CN basé sur l'algorithme de rétropropagation du gradient pour éliminer les effets des incertitudes dans le modèle dynamique du robot esclave. La deuxième structure proposée utilise aussi deux stratégies de commande. La première consiste en une approche de commande en force/impédance appliquée pour le robot maître similaire à celle appliquée dans le premier schéma de commande, tandis que la deuxième consiste en une approche de commande hiérarchique force/position (structure de commande en effort externe) appliquée au robot esclave. Les deux structures proposées ont été validées à l'aide de l'environnement LabVIEW, en considérant un robot esclave non linéaire à 3-DDL dont les paramètres sont tirés d'un bras PUMA560 réel, et un robot maître de structure légère et d'une géométrie identique à celle de PUMA560. La simulation a donné des résultats convaincants concernant la stabilité et la transparence du système global de téléopération, même en présence des incertitudes sur la dynamique du manipulateur esclave, de la rigidité inconnue et variable de l'environnement et de la qualité médiocre des capteurs de force.

Dans la dernière partie de ce travail de recherche, nous avons élaboré une troisième structure de commande adaptative et intelligente en admittance basée sur une architecture à trois canaux. Cette structure se distingue par son évitement de l'utilisation d'une boucle de commande en force et qui s'appuie sur l'intégration de plusieurs techniques avancées. Nous avons initialement établi une formulation mathématique du système de téléopération non linéaire et N-DDL utilisé, défini dans l'espace articulaire. Ensuite, nous avons exposé en détail la méthodologie de mappage de l'espace de travail, effectuée pour aligner l'interface maître Omni PHANTOM avec le robot PUMA560, facilitant ainsi un chevauchement optimal des espaces de travail. Par la suite, nous avons présenté en détail les lois de commande pour l'interface maître et le robot

esclave. Du côté maître, la loi de commande adoptée repose sur une boucle de commande en position PID classique, combinée avec une approche de découplage dynamique non linéaire, et un contrôleur neuronal basé sur l'algorithme de rétropropagation du gradient. Pour le côté esclave, nous avons intégré plusieurs techniques, notamment la méthode MCR-FO pour estimer les caractéristiques inconnues de type ressort et amortisseur de l'environnement. Le filtre de Butterworth et une fonction de limitation permettant de supprimer les irrégularités du modèle d'admittance. Cette combinaison permet de générer des trajectoires modifiées qui sont transmises à la matrice de sélection, qui décide de la nature des signaux d'entrée des trajectoires souhaitées à suivre, et qui seront transmises par la suite à la boucle de commande en position PID combinée avec une approche de découplage dynamique non linéaire et un contrôleur neuronal basé sur l'algorithme de rétropropagation du gradient pour éliminer les effets des incertitudes dans le modèle dynamique du robot esclave. Enfin, pour valider l'efficacité de cette structure de commande, nous avons présenté les résultats d'une expérience "HUMAIN IN THE LOOP" réalisée dans l'environnement MATLAB, mettant en œuvre une interface Omni réelle et un robot PUMA560 virtuel qui interagit avec un environnement virtuel. Ces résultats démontrent une stabilité remarquable du système global et une performance souhaitée de suivi de trajectoire et de la force appliquée, selon les trois directions et selon des conditions réalistes de téléopération.

Les résultats de cette étude ouvrent des perspectives significatives pour l'avenir et pour le développement et de l'application des techniques de téléopération dans divers domaines. Parmi ces perspectives, nous pouvons mentionner :

- Validation des méthodes proposées en les appliquant à un robot esclave réel et en comparant leurs performances avec celles d'autres approches de commande.
- Proposition des méthodes d'analyse de stabilité pour développer des systèmes plus robustes et mieux adaptés aux changements.
- Prise en compte des retards de communication constants et variables dans la boucle de commande pour assurer la validité et la flexibilité de cette approche dans diverses applications à longue distance.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] K. A. Manocha, N. Pernalet, and R. V. Dubey, "Variable position mapping based assistance in teleoperation for nuclear cleanup," in *Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 01CH37164)*, 2001, pp. 374-379.
- [2] G. Guthart and J. Salisbury, "The intuitive telesurgery system: overview and application. W: Proceedings of 2000 IEEE International Conference; 2000, on Robots and Automation. San Francisco, 22-28 april 2000," ed: IEEE, 2000.
- [3] P. B. Persson, M. D. Cooper, L. A. Tibell, S. Ainsworth, A. Ynnerman, and B.-H. Jonsson, "Designing and evaluating a haptic system for biomolecular education," in *2007 IEEE Virtual Reality Conference, 2007*, pp. 171-178.
- [4] L.-Y. Hu, X. P. Liu, and G.-P. Liu, "The wave-variable teleoperator with improved trajectory tracking," in *IEEE ICCA 2010*, 2010, pp. 322-327.
- [5] D. A. Lawrence, "Stability and transparency in bilateral teleoperation," *IEEE transactions on robotics and automation*, vol. 9, pp. 624-637, 1993.
- [6] K. Hashtrudi-Zaad and S. E. Salcudean, "Transparency in time-delayed systems and the effect of local force feedback for transparent teleoperation," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 18, pp. 108-114, 2002.
- [7] E. Naerum and B. Hannaford, "Global transparency analysis of the lawrence teleoperator architecture," in *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2009, pp. 4344-4349.
- [8] H. Sakai, D. Tomizuka, and K. Ohnishi, "Compliance control for stabilization of bilateral teleoperation system in the presence of time delay," in *2017 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM)*, 2017, pp. 62-67.
- [9] K. Hashtrudi-Zaad and S. E. Salcudean, "Analysis of control architectures for teleoperation systems with impedance/admittance master and slave manipulators," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 20, pp. 419-445, 2001.
- [10] R. J. Anderson and M. W. Spong, "Bilateral control of teleoperators with time delay," *IEEE Transactions on Automatic control*, vol. 34, pp. 494-501, 1989.
- [11] G. Niemeyer and J.-J. Slotine, "Stable adaptive teleoperation," *IEEE Journal of oceanic engineering*, vol. 16, pp. 152-162, 1991.
- [12] N. A. Tanner and G. Niemeyer, "Improving perception in time delayed teleoperation," in *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2005, pp. 354-359.
- [13] C. Yang, X. Wang, Z. Li, Y. Li, and C.-Y. Su, "Teleoperation control based on combination of wave variable and neural networks," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 47, pp. 2125-2136, 2016.
- [14] P. Huang, P. Dai, Z. Lu, and Z. Liu, "Asymmetric wave variable compensation method in dual-master-dual slave multilateral teleoperation system," *Mechatronics*, vol. 49, pp. 1-10, 2018.
- [15] J. Yan and S. E. Salcudean, "Teleoperation controller design using H_{∞} -optimization with application to motion-scaling," *IEEE Transactions on control systems technology*, vol. 4, pp. 244-258, 1996.
- [16] G. Leung, A. Francis, and J. Apkarian, "Bilateral Controller for with Time Delay via Teleoperators μ -Synthesis," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1995.
- [17] K. Hashtrudi-Zaad and S. E. Salcudean, "Adaptive transparent impedance reflecting teleoperation," in *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1996, pp. 1369-1374.
- [18] J. H. Ryu and D. S. Kwon, "A novel adaptive bilateral control scheme using similar closed-loop dynamic characteristics of master/slave manipulators," *Journal of Robotic Systems*, vol. 18, pp. 533-543, 2001.

- [19] N. Chopra, M. W. Spong, and R. Lozano, "Synchronization of bilateral teleoperators with time delay," *Automatica*, vol. 44, pp. 2142-2148, 2008.
- [20] W.-H. Zhu and S. E. Salcudean, "Stability guaranteed teleoperation: an adaptive motion/force control approach," *IEEE transactions on automatic control*, vol. 45, pp. 1951-1969, 2000.
- [21] P. Malysz and S. Sirouspour, "Nonlinear and filtered force/position mappings in bilateral teleoperation with application to enhanced stiffness discrimination," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 25, pp. 1134-1149, 2009.
- [22] L. J. Love and W. J. Book, "Force reflecting teleoperation with adaptive impedance control," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, vol. 34, pp. 159-165, 2004.
- [23] X. Liu and M. Tavakoli, "Adaptive inverse dynamics four-channel control of uncertain nonlinear teleoperation systems," *Advanced Robotics*, vol. 25, pp. 1729-1750, 2011.
- [24] D.-H. Zhai and Y. Xia, "Adaptive control for teleoperation system with varying time delays and input saturation constraints," *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol. 63, pp. 6921-6929, 2016.
- [25] H. Wang, P. X. Liu, and S. Liu, "Adaptive neural synchronization control for bilateral teleoperation systems with time delay and backlash-like hysteresis," *IEEE transactions on cybernetics*, vol. 47, pp. 3018-3026, 2017.
- [26] T. M. Park, S. R. Lee, and H. Yi, "Workspace mapping with adaptive fuzzy control for robotic manipulator in teleoperation," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 34, pp. 2171-2178, 2020.
- [27] R. Mellah, S. Guermah, and R. Toumi, "Adaptive control of bilateral teleoperation system with compensatory neural - fuzzy controllers," *International Journal of Control, Automation and system*, vol. 15, pp. 1-11, 2017.
- [28] R. C. Goertz, "Mechanical master-slave manipulator", *Nucleonics (US) Ceased publication*, vol. 12, 1954.
- [29] R. C. Goertz, "A force-reflecting positional servomechanism", *Nucleonics*, vol. 10, no. 11, pp. 43-45, 1952.
- [30] W.R. Ferrell, "Remote manipulation with Transmission Delay", *IEEE Trans. on Human Factors in Electronics*, vol. 6, pp. 24-32, September 1965.
- [31] J. Vertut, A. Micaelli, P. Marchall et J. Guittet, "Short Transmission Delay in a Force Reective Bilateral Manipulator ", *Proc. of 4th Rom-An-Sy*, Warsaw, 1981, pp. 269-285.
- [32] G. Niemeyer, C. Preusche, S. Stramigioli, and D. Lee, "Telerobotics", in *Springer handbook of robotics*. Springer, 2016, pp. 1085-1108.
- [33] T. H. Massie, J. K. Salisbury, "The phantom haptic interface: A device for probing virtual objects", in *Proceedings of the ASME winter annual meeting, symposium on haptic interfaces for virtual environment and teleoperator systems*, vol. 55, no. 1. Chicago, IL, 1994, pp. 295-300.
- [34] J. Marescaux, J. Leroy, F. Rubino, M. Smith, M. Vix, M. Simone, and D. Mutter, "Transcontinental robot-assisted remote telesurgery: feasibility and potential applications", *Annals of surgery*, vol. 235, no. 4, p. 487, 2002.
- [35] Y. Yang, H. Changchun, G. Xinping, "Coordination control for bilateral teleoperation with kinematics and dynamics uncertainties", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 30.2 : 180-188, 2014.
- [36] J. Luo, C. Liu, N. Wang, and C. Yang, "A wave variable approach with multiple channel architecture for teleoperated system," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 143912-143920, 2019.
- [37] T.B. Sheridan, "Telerobotics, Automation and Human Supervisory Control", *The MIT Press*, Cambridge, USA, 1992.
- [38] P. FUCHS , G. MOREAU, "Le traité de la réalité virtuelle" v.1, *Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris*, 2003 (2ème édition).
- [39] B. Hannaford, A. M. Okamura, "Haptics," in *Springer Handbook of Robotics*. Springer, 2016, pp. 1063-1084.

- [40] Z.H. Khan, "Wireless network architecture for long range teleoperation of an autonomous system", *PhD thesis*, Université de Grenoble, 2010.
- [41] D. Hopper, C. Boddy, D. Reilly, "Advanced teleoperation testbed: a system you can see through", *Robotica*, vol. 14, pages 457-461, 1996.
- [42] B. Hannaford, L. Wood, D. A. McAfee, H. Zak, "Performance evaluation of a six-axis generalized force reflecting teleoperator", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 21(3):620-633, May 1991.
- [43] M. J. Massimino, T. B. Sheridan, "Teleoperator performance with varying force and visual feedback", *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 36(1):145-157, 1994.
- [44] K. Salisbury, "Issues in human/computer control of dexterous remote hands", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Volume 24, Issue 5, pages 591-596, 1988.
- [45] W. Zerrad, "Téléopération avec Retour d'Effort pour la Chirurgie Mini-Invasive", *Thèse de Doctorat en Génie Informatique*, Automatique et Traitement du Signal à l'université de Montpellier II, Décembre 2007.
- [46] Y. Strassberg, A.A. Goldenberg, J.K. Mills, "Stability analysis of a bilateral teleoperating system" *Transactions of the ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 115(3):419-426, September 1993.
- [47] R.W. Daniel, P.R. McAree. "Fundamental limits of performance for force reflecting teleoperation", *International Journal of Robotics Research*, 17(8):811-830, August 1998.
- [48] W.S. Kim, B. Hannaford, A.K. Bejczy, "Force-reflection and shared compliant control in operating telemanipulators with time delay", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 8(2): 176-185, April 1992.
- [49] P. Arcara, C. Melchiorri, "Control schemes for teleoperation with time delay: A comparative study", *Robotics and Autonomous Systems*, 38(1): 49-64, 2002.
- [50] Y. Yokokohji, T. Yoshikawa, "Bilateral control of master-slave manipulators for ideal kinesthetic coupling-formulation and experiment", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 10(5):605-620, October 1994.
- [51] M. Zhu, S.E. Salcudean, "Achieving transparency for teleoperator systems under position and rate control", In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 7-12, 1995.
- [52] W.R. Ferrell, "Delayed force feedback", *IEEE Trans. Human Factors in Electronics.*, HFE-8:449-455, October 1966.
- [53] M. GHODOUSSI, S. E. BURTNER, Y. WANG, "Robotic surgery- the transatlantic case", *IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA'02*, p. 1882-1888, 2002.
- [54] Y. P. Rybarczyk, O. Ait-Aider, P. Hoppenot, E. Colle, "Remote control of a biometrics robot assistance system for disabled persons", *AMSE Modelling Measurement and Control*, vol. 63, p.47-56, 2002.
- [55] T.B. Sheridan, "Teleoperation, Telerobotics and Telepresence: A Progress Report", *Control Engineering Practice*, Vol. 3, No.2, pp. 205-214.1995.
- [56] K. Schilling, H. Roth, R. Lieb, "Teleoperations of rovers - from Mars to education", *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics*,Guimaraes, 1997.
- [57] D. Maddalena, "Supervisory Control Telerobotics Reaches the Underwater Work Site", *International Advanced Robotics Program Conference*, IARP, Toulone, France, 1996
- [58] W. Wang, K. Yuan, "Teleoperated manipulator for leak detection of sealed radioactive sources", In: *Proceedings of the IEEE international conference on robotics and automation*, vol 2, pp 1682-1687,2004.
- [59] L. Cragg, H. Hu, "Application of mobile agents to robust teleoperation of internet robots in nuclear decommissioning", In: *2003 IEEE International conference on industrial technology*, vol 2, pp 1214-1219, 2003.

- [60] P. Desbats, F. Geffard, G. Piolain, A. Coudray, "Force-feedback teleoperation of an industrial robot in a nuclear spent fuel reprocessing plant", *Ind Robot Int J* 33(3):178–186, 2006.
- [61] D. T. McRuer, H. R. Jex, "A Review of Quasi-Linear Pilot Models," in *IEEE Transactions on Human Factors in Electronics*, vol. HFE-8, no. 3, pp. 231-249, Sept. 1967, doi: 10.1109/THFE.1967.234304.
- [62] K. Hashtrudi-Zaad, "Design, implementation and evaluation of stable bilateral teleoperation control architectures for enhanced telepresence", *PhD Thesis*, University of British Columbia, 2000.
- [63] R. J. Adams and B. Hannaford, "Stable haptic interaction with virtual environments", in *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 15, no. 3, pp. 465-474, June 1999, doi: 10.1109/70.768179.
- [64] B. Hannaford, "A design framework for teleoperators with kinesthetic feedback", *IEEE Trans. Rob. & Auto*, 5(4): 426-434, August 1989.
- [65] S.S. Haykin, "Active Network Theory", *Addison-Wesley Publishing Co*, 1970.
- [66] D. T. Pawluk, R. E. Ellis, "Dynamics identification and control of a teleoperational system", *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1901–1906, 1991.
- [67] P. Fischer, R. Daniel, K. V. Siva, "Specification and design of input devices for teleoperation", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1990, 1, 540–545, 1990.
- [68] G. A. V. Christiansson, "Introduction to Analysis and Control in Haptic Teleoperation", *Delft University of Technology*, p.56, 2007.
- [69] Y. Strassberg, A. Goldenberg, J. Mills, "A new control scheme for bilateral teleoperating systems: Performance evaluation and comparison", *In Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Raleigh, NC, pp. 865–872, July 1992.
- [70] D. A. Lawrence, "Optimizing dynamic transparency in teleoperator architectures", *Guidance and control*, 353–365, 1992.
- [71] J.E. Colgate and J.M. Brown. "Factors affecting the z-width of a haptic display", *In Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robot. and Auto.*, pages 3205–3210, San Diego, CA, May 1994.
- [72] K. Hashtrudi-Zaad, S. Salcudean, "On the use of local force feedback for transparent teleoperation", *In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Detroit, MI, pp. 1863–1869, 1999.
- [73] M. C. Çavusoğlu, A. Sherman, F. Tendick, "Design of bilateral teleoperation controllers for haptic exploration and telemanipulation of soft environments", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 18(4):641–647, 2002.
- [74] B. Hannaford, "Stability and performance tradeoffs in bilateral telemanipulation", *In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Scottsdale, AZ, pp. 1764–1767, 1989b May.
- [75] K.B. Fite, J.E. Speich, M. Goldfarb, "Transparency and stability robustness in two-channel bilateral telemanipulation", *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 123(3) : 400–407. 2001.
- [76] K. Hashtrudi-Zaad, S.E. Salcudean, "Analysis and evaluation of stability and performance robustness for teleoperation control architectures", *In Proc. IEEE Int. Conf. Rob. & Auto*, pages 3107-3113, San Francisco, CA, April 2000.
- [77] M. Tavakoli, A. Aziminejad, R. V. Patel, M. Moallem, "High-fidelity bilateral teleoperation systems and the effect of multimodal haptics", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B*, 37, 1512–1528, 2007.

- [78] S.E. Salcudean, N. Wong, R. Hollis, "Design and control of a force-reflecting teleoperation system with magnetically levitated master and wrist", 1995.
- [79] H. Kazerooni, T. I. Tsay, K. Hollerbach, "A controller design framework for telerobotic systems", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1993, 1, 50–62.
- [80] B. Hannaford, R. Anderson, "Experimental and simulation studies of hard contact in force reflecting teleoperation", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1, 584–589, 1988.
- [81] N. Chopra, M. W. Spong, R. Ortega, N. E. Barabanov, "Position and Force Tracking in Bilateral Teleoperation", *Advances in Communication Control Networks*, 305, 410–413, 2005.
- [82] F. M. Klomp, "Haptic feedback control designs in teleoperation systems for minimal invasive surgery" DCT Report No. 2004.117.
- [83] H. Kobayashi, "A scaled teleoperation - time scaling problem". *Journal on Advanced Robotics* 8 (2), 173–183. 1994.
- [84] A. Aziminejad, M. Tavakoli, R. V. Patel, M. Moallem, "Transparent time-delayed bilateral teleoperation using wave variables", *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, 16(3), 548-555, 2008.
- [85] Z. Boroujeni, M. Mohammadi, A. Jalali, "Stable adaptive time-variable delayed bilateral teleoperation for a surgery robot", In *Robotics and Mechatronics (ICRoM), 2013 First RSI/ISM International Conference on*(pp. 301-306). IEEE, 2013.
- [86] Y. Ye, P. X. Liu, "Improving haptic feedback fidelity in wave-variable based teleoperation orientated to telemedical applications", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 58, no. 8, pp. 2847-2855, 2009.
- [87] M. Shahbazi, H.A. Talebi, M.J. Yazdanpanah, "A control architecture for dual user teleoperation with unknown time delays: a sliding mode approach", In *Proceedings of 2010 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pages 1221-1226, Montreal, Canada, 2010.
- [88] L.G. Garcia-Valdovinos, V. Parra-Vega and M.A. Arteaga, "Observer-based sliding mode impedance control of bilateral teleoperation under constant unknown time delay", *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 55, no. 8, pages 609-617, 2007.
- [89] S. Khan, A. Sabanovic, A. Nergiz, "Scaled bilateral teleoperation using discrete-time sliding-mode controller", *IEEE Trans Ind Electron* 56(9):3609–3618, 2009.
- [90] Y. Yang, C. Hua, X. Hua, "Adaptive fuzzy finite-time coordination control for networked nonlinear bilateral teleoperation system", *IEEE Trans Fuzzy Syst* 22(3): 631–641, 2014.
- [91] A. Levant, "Chattering analysis", *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol.55, no.6, pp.1380-1389, 2010.
- [92] S. Munir, W.J. Book, "Internet-based teleoperation using wave variables with prediction", *IEEE Transactions on Mechatronics*, 7(2): 124-133, June 2002.
- [93] J.Q. Huang, F.L. Lewis, "Neural-network predictive control for nonlinear dynamic systems with time-delay", *IEEE Transactions on Neural Networks*, 14(2):377-389, March 2003.
- [94] L. Karafyllis, and M. Krstic, (2013). Robust predictor feedback for discrete-time systems with input delays. *Int. J. Control* 86, 1652–1663, 2013.
- [95] K. Hashtrudi-Zaad and S.E. Salcudean. Analysis of control architectures for teleoperation systems with impedance/admittance master and slave manipulators. *International Journal of Robotics Research*, 20(6):419-445, June 2001.
- [96] N. Chopra, M. W. Spong, R. Lozano, "Adaptive coordination control of bilateral teleoperators with time delay", In *Proceedings of the IEEE conference on decision and control* (pp. 4540–4547), 2004.
- [97] M. W. Spong, S. Hutchinson, M. Vidyasagar, "*Robot modeling and control*. New York", Wiley, 2005.
- [98] Q. Wu, N. Sepethri, "Neural inverse modeling and control of a base-excited inverted pendulum", In *Proceedings of the IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation*, pages 402-407, Banff, Alberta, July 2001.

- [99] S.T. Venkataraman, S. Gulati, J. Barhen, N. Toomarian, "A neural network based identification of environments models for compliant control of space robots", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 9(5):685-697, 1993.
- [100] H. Yang, L. Liu, Y. Wang, "Observer-based sliding mode control for bilateral teleoperation with time-varying delays", *Control Eng, Pract.* **91**, 2019.
- [101] Y. Wang, J. Tian, et al, "Adaptive neural network control of time delay teleoperation system based on model approximation", *Sensors* 21:7443, 2021.
- [102] H. Cho, J. Park, "Impedance control with variable damping for bilateral teleoperation under time delay", *JSME Int J Ser C Mech Syst Mach Elem Manufact* 48:695-703, 2005.
- [103] J. Craig, P. Hsu, S. Sastry, "Adaptive control of mechanical manipulators", *In: Proceedings of the IEEE international conference on robotics and automation*, pp 190-195, 1986.
- [104] R. H. Middleton, G. C. Goodwin, "Adaptive computed torque control for rigid link manipulators", *Procedure IEEE*, 25:68-73, 1986.
- [105] E. Nuno, R. Ortega, L. Basanez, "An adaptive controller for nonlinear bilateral teleoperators", *Automatica* 46(1):155-159, 2010.
- [106] N. V. Q. Hung, T. Narikiyo, H. D. Tuan "Nonlinear adaptive control of master-slave system in teleoperation", *Control Eng Pract* 11:1-10, 2003.
- [107] J. Reed, P. Ioannou, "Instability analysis and robust adaptive control of robot manipulators", *In: Proceedings of the IEEE conference decision control*, pp 1607-1612, 1988
- [108] R. Liamini, "Commande hybride force-position d'un bras manipulateur par une approche prédictive : Application à la coopération de deux bras", *Mémoire de PFE*, USTHB, Algérie 2004.
- [109] S. Chiaverini, L. Sciavescio, "The parallel approach to force/position control of robotic manipulators", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 9, n°. 4, pp. 361-373, August 1993.
- [110] B. Armstrong, O. Khatib, "The explicit dynamic model and inertial parameters of the PUMA 560 arm", *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, San Francisco -U.S.A, pp. 510-518, 1986.
- [111] L. Ljung, "System identification (2nd ed.): theory for the user", *Prentice Hall PTR*. 1999.
- [112] L. Ljung, "System identification : Theory for the user", *PTR prentice Hall*, Linkoping University, Sweden, 1987.
- [113] M. B. Gorzalczany, "Computational Intelligence Systems and Applications", *Neuro-Fuzzy and Fuzzy Neural Synergisms*, Physica-Verlag Heidelberg, 2002.
- [114] I. N. Da Silva, D. H. Spatti, R. A. Flauzino, L. H. B. Liboni, S. F. D. R. Alves, "Artificial Neural Networks", *A Practical Course*, Springer, 2017.
- [115] S. Chakravertys, S. Mall, "Artificial Neural Networks for Engineers and Scientists, Solving Ordinary Differential Equations", *CRC Press*, 2017.
- [116] Shih-chi huang , yih-fang huang, "Learning algorithms for perceptrons using backpropagation with selective update" pp, 1990.
- [117] F. TRAH, "Prédiction de l'irradiation solaire globale pour la région de Tizi-Ouzou par les réseaux de neurones artificiels", *Application pour le dimensionnement d'une installation photovoltaïque pour l'alimentation du laboratoire de recherche LAMPA*, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2011.

- [118] O. Benzaim, "Techniques multi-port pour la conception et la réalisation de systèmes microondes dédiés à l'évaluation non destructive de matériaux", *thèse de Doctorat en micro et nano technologies, acoustique et télécommunications*, Université Lille 1 sciences & technologies, soutenue le 7 Juillet 2009.
- [119] Z. Asradj, "Identification des systèmes non linéaires par les réseaux de neurones", *Mémoire de magister*, Université de Bejaia-Abderrahmane Mira. 2009.
- [120] F. Ferguene, R. Toumi, "A Neural Approach to Force/Position Parallel Control of Robotic Manipulators Application to the Follow-up of Trajectory in Unknown Stiffness Environment", in *Proc. International computer systems and information technology conference*, Vol. N°1, pp. 247-251, July 19-21 2005, Algiers, Algeria.
- [121] A. Outayeb, F. Ferguene, R. Toumi, "Bilateral control of nonlinear teleoperation system using parallel force/position control approach and online environment estimation". IEEE Int. Conf. On Methods and Models in automation and robotics, pages 1110–1115, Poland, 2016.
- [122] A. Outayeb, F. Ferguene, R. Toumi, "Adaptive Neural Control for Bilateral Teleoperation System using External Force Approach". In Proceedings of the 14th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics – Vol. 2, pages 309-315, Spain, 2017.
- [123] J. Schutter, H. Van Berussel, "Compliant robot motion II. A control approach based on external control loop", *Int. Journal of Robotics Research*, Vol. n°4, pp. 18-33, August 88.
- [124] W. Khalil, A. Vijayalingam, B. Khomutenko, I. Mukhanov, P. Lemoine, G. Ecorchard, "OpenSYMORO: An open-source software package for Symbolic Modelling of Robots", *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, 2014, France.
- [125] N. Hogan, "Impedance control: An approach to manipulation", in *American control conference*, pp. 304-313, 1984.
- [126] M. T. Mason, "Compliance and force control for computer controlled manipulators", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 11, pp. 418-432, 1981.
- [127] A. M. Outayeb, F. Ferguene, R. Mellah, R. Toumi, "An Online Admittance Control for Asymmetric Teleoperated Arm Robot Interacting with Unknown Environment", *CEAI*, Vol.24, No.3, pp. 96-107, 2022, Romania.
- [128] C. Tzafestas, S. Velanas, G. Fakiridis, "Adaptive impedance control in haptic teleoperation to improve transparency under time-delay", in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 212-219, 2008.
- [129] A. J. Silva, O. A. D. Ramirez, V. P. Vega, J. P. O. Oliver, "Phantom omni haptic device: Kinematic and manipulability", in *Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference (CERMA)*, pp. 193-198, 2009.
- [130] J. J. Craig, "Introduction to robotics: mechanics and control", *3/E: Pearson Education India*, 2009.
- [131] A. Kumar, M. S. Patel, "Mapping the manipulator workspace using interactive computer graphics", *The International journal of robotics research*, vol. 5, pp. 122-130, 1986.
- [132] Y. Cao, S. Qi, K. Lu, Y. Zang, G. Yang, "Shape and size computation of planar robot workspace", in *2009 WRI World Congress on Computer Science and Information Engineering*, pp. 126-130, 2009.
- [133] Z. Zhao, S. He, Y. Zhao, C. Xu, Q. Wu, and Z. Xu, "Workspace Analysis for a 9-DOF Hyper-redundant Manipulator Based on An Improved Monte Carlo Method and Voxel Algorithm", in *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, 2018, pp. 637-642, 2018.
- [134] Y. Cao, K. Lu, X. Li, and Y. Zang, "Accurate numerical methods for computing 2d and 3d robot workspace", *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 8, p. 76, 2011.
- [135] G. C. Burdea and F. P. Brooks, "Force and touch feedback for virtual reality", 1996.

- [136] Z. Ju, C. Yang, Z. Li, L. Cheng, and H. Ma, "Teleoperation of humanoid baxter robot using haptic feedback", *International Conference on Multisensor Fusion and Information Integration for Intelligent Systems (MFI)*, 2014, pp. 1-6, 2014.
- [137] A.K. Oudjida, N. Chaillet, A. Liacha, M. L. Berrandjia, M. Hamerlain, "Design of High-Speed and Low-Power Finite-Word-Length PID Controllers", *Journal of Control Theory and Applications (JCTA)*, vol. 12, N° 1, pp. 68-83, 2004.
- [138] C. Geng, Q. Xie, L. Chen, A. Li, and B. Qin, "Study and Analysis of a Remote Robot-assisted Ultrasound Imaging System", *IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC)*, 2020, pp. 389-393, 2020.

Annexes

Annexes

Annexe A : Les modèles du robot PUMA560

La figure A.1 suivante représente la structure du robot PUMA560.

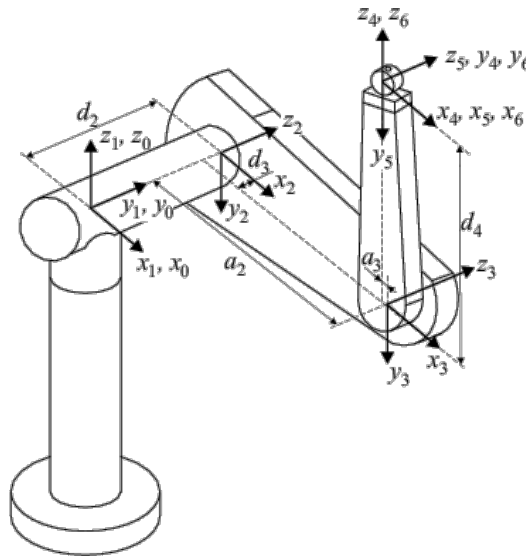


Figure A.1 : Structure du robot PUMA 560

Les modèles du robot sont présentés en supposant que les trois dernières articulations sont à l'arrêt.

Pour faciliter les notations, les abréviations suivantes sont utilisées pour les fonctions géométriques : C_i , S_i , C_{ij} , S_{ij} et C_{ijk} désignent respectivement $\cos(q_i)$, $\sin(q_i)$, $\cos(q_i + q_j)$, $\sin(q_i + q_j)$ et $\cos(q_i + q_j + q_k)$

A.1 Le modèle dynamique

Le modèle dynamique des trois premières articulations du robot PUMA 560 est donné par :

$$M_s(q)\ddot{q}_s + V_s(q, \dot{q})\dot{q}_s + G_s(q) = \tau_{sc} - mJ^T(q)[J(q)\ddot{q}_s + \dot{J}(q, \dot{q})\dot{q}_s + g] \quad (A.1)$$

Avec, $q = [q_1, q_2, q_3]$ est le vecteur des coordonnées généralisées, m la charge (outil), $J(q)$ la matrice Jacobienne et $g^T = [0 \quad 0 \quad 9.81]$

Les expressions des matrices A , B et G sont [110] :

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$$

Avec,

$$a_{11} = 2,57 + 1,38 C_2^2 + 0,30 S_2 S_3 + 7,44 \times 10^{-1} C_2 S_2 S_3 ;$$

$$a_{12} = a_{21} = 6,90 \times 10^{-1} S_2 - 1,34 \times 10^{-1} C_2 S_3 + 2,38 \times 10^{-2} C_2 ;$$

$$a_{13} = a_{31} = -1,34 \times 10^{-1} C_2 S_3 - 3,97 \times 10^{-3} S_2 S_3 ;$$

$$a_{22} = 6,79 + 7,44 \times 10^{-1} S_3 ;$$

$$a_{23} = a_{32} = 0,333 + 3,72 \times 10^{-1} S_3 - 1,10 \times 10^{-2} C_3 ;$$

$$a_{33} = 1,16 ;$$

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix}$$

Avec,

$$b_{11} = (-2,76 S_2 C_2 + 7,44 \times 10^{-1} C_2 S_2 S_3 + 0,60 S_2 C_3 - 2,13 \times 10^{-2} (1 - 2 S_2 S_3)) \dot{q}_2 ;$$

$$b_{12} = (6,90 \times 10^{-1} C_2 + 1,34 \times 10^{-1} S_2 S_3 - 2,38 \times 10^{-2} S_2) \dot{q}_2 + (2,67 \times 10^{-1} S_2 S_3 - 7,58 \times 10^{-3} C_2 S_3) \dot{q}_3 ;$$

$$b_{13} = (7,44 \times 10^{-1} C_2 C_2 S_3 + 0,60 S_2 C_3 + 2,20 \times 10^{-2} C_2 S_2 S_3 - 2,13 \times 10^{-2} (1 - 2 S_2 S_3)) \dot{q}_1 + 0,5 \times (2,67 \times 10^{-1} S_2 S_3 - 7,58 \times 10^{-3} C_2 S_3) \dot{q}_3 ;$$

$$b_{21} = -0,5(-2,76 S_2 C_2 + 7,44 \times 10^{-1} C_2 S_2 S_3 + 0,60 S_2 C_3 - 2,13 \times 10^{-2} (1 - 2 S_2 S_3)) \dot{q}_1 ;$$

$$b_{22} = (2,20 \times 10^{-2} S_3 + 7,44 \times 10^{-1} C_3) \dot{q}_3 ;$$

$$b_{23} = 0,5 (2,20 \times 10^{-2} S_3 + 7,44 \times 10^{-1} C_3) \dot{q}_3 ;$$

$$b_{31} = -0,5 (7,44 \times 10^{-1} C_2 C_2 S_3 + 0,60 S_2 C_3 + 2,20 \times 10^{-2} C_2 S_2 S_3 - 2,13 \times 10^{-2} (1 - 2 S_2 S_3)) \dot{q}_1 ;$$

$$b_{32} = -0,5 (2,20 \times 10^{-2} S_3 + 7,44 \times 10^{-1} C_3) \dot{q}_2 ;$$

$$b_{33} = 0 ;$$

$$G = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \end{bmatrix}$$

Avec,

$$g_1 = 0 ;$$

$$g_2 = -37,2 C_2 - 8,4 S_2 S_3 + 1,02 S_2 ;$$

$$g_3 = -8,4 S_2 S_3 + 0,25 C_2 S_3 ;$$

Annexe B : Les modèles de PHANTOM Omni

La figure B.1 suivante représente la structure du robot PHANTOM Omni.

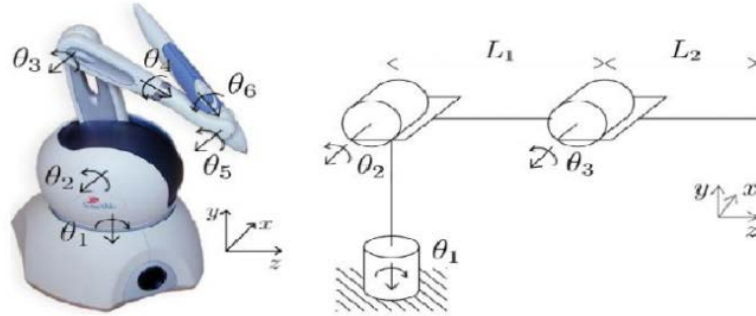


Figure B.1 : Structure de PHANTOM Omni

Pour faciliter les notations, les abréviations suivantes sont utilisées pour les fonctions géométriques : c_i , s_i , c_{ij} , s_{ij} et c_{ijk} désignent respectivement $\cos(q_i)$, $\sin(q_i)$, $\cos(q_i + q_j)$, $\sin(q_i + q_j)$ et $\cos(q_i + q_j + q_k)$

B.1 Le modèle dynamique

Le modèle dynamique de l'interface PHANTOM Omni est donné par :

$$M_m(q_m)\ddot{q}_m + C_m(q_m, \dot{q}_m)\dot{q}_m + G_m(q_m) = \tau_m + J_m^T F_h \quad (\text{B.1})$$

Les expressions des matrices M_m , C_m et G_m sont [126] :

$$M_m = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & m_{23} \\ 0 & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix}$$

Avec,

$$m_{11} = \theta_1 + \theta_2 c_2^2 + \theta_3 c_{23}^2 + 2\theta_4 c_2 c_{23}$$

$$m_{22} = \theta_2 + \theta_3 + 2\theta_4 c_3$$

$$m_{23} = \theta_3 + \theta_4 c_3$$

$$m_{32} = m_{23}$$

$$m_{33} = \theta_3$$

$$C_m = \begin{bmatrix} -(a_1\dot{q}_2 + a_2\dot{q}_3) & -a_1\dot{q}_1 & -a_2\dot{q}_1 \\ a_1\dot{q}_1 & -a_3\dot{q}_3 & -a_3(\dot{q}_2 + \dot{q}_3) \\ a_2\dot{q}_1 & a_3\dot{q}_2 & 0 \end{bmatrix}$$

avec,

$$a1 = \theta_2 c_2 s_2 + \theta_3 c_{23} s_{23} + \theta_4 c_{223}$$

$$a2 = \theta_3 c_{23} s_{23} + \theta_4 c_2 s_{23}$$

$$a3 = \theta_4 s_3$$

$$G_m = \begin{bmatrix} 0 \\ \theta_5 g c_2 + \theta_6 g c_{23} \\ \theta_6 g c_{23} \end{bmatrix}$$

Les paramètres sélectionnés sont indiqués dans le tableau B.1

Paramètres	valeurs
l_2 (m)	0.135
l_3 (m)	0.130
θ_1 (kg. m ²)	3.7×10^{-3}
θ_2 (kg. m ²)	7.0×10^{-3}
θ_3 (kg. m ²)	8.0×10^{-3}
θ_4 (kg. m ²)	0.4×10^{-3}
θ_5 (kg.m)	9.1×10^{-3}
θ_6 (kg.m)	5.2×10^{-3}
θ_7 (N.m.s/rad)	0.096
θ_8 (N.m.s/rad)	0.145
θ_9 (N.m.s/rad)	0.055