



**Conception, réalisation et évaluation d'une commande robotique interactive et d'un guide haptique interfacé par la technologie réalité augmentée dédiés à l'interaction physique humain-robot**

**Par**

Mohamed Amir Sassi

**Mémoire présenté à l'Université du Québec à Chicoutimi en vue de l'obtention du grade de Maîtrise en ingénierie, profil recherche**

Québec, Canada

## Résumé

Depuis quelques décennies, nous témoignons une progression significative des systèmes interactifs tels que les robots agissant en coopération avec l'humain. Ces derniers ont fait leurs preuves dans l'amélioration de la compétitivité des industries. Ceci est rendu possible grâce à leur potentiel à augmenter les performances humaines et à favoriser une plus grande flexibilité tout en laissant le processus décisionnel à l'opérateur. Une telle amélioration est obtenue grâce à une synergie efficace entre l'intelligence des humains, leurs connaissances, leurs dextérités et la force des robots industriels, leurs endurance et leurs précisions.

En outre, l'interactivité robotique permet d'assister les humains dans des tâches dangereuses et difficiles. De plus, elle permet d'améliorer et d'éviter les postures inadéquates, pouvant provoquer des douleurs musculo-squelettiques, grâce à un ordonnancement optimal des activités de production et de fabrication. Ainsi, ces deux avantages pourraient réduire le développement des troubles musculo-squelettiques (TMS). D'ailleurs, l'utilisation d'un robot dans une cellule de travail hybride, dans le but de remplacer une tâche répétitive caractérisée par une posture contraignante, pourrait avoir l'avantage de réduire le développement des TMS grâce à un partage adapté des activités de production.

Par conséquent, les travaux de ce projet de recherche sont encadrés par une grande problématique qui est la réduction des TMS, dus à des postures contraignantes, grâce à un robot interactif. En effet, les symptômes dus aux TMS constituent, aujourd'hui, l'une des questions les plus préoccupantes en santé et en sécurité au travail du fait de leur forte prévalence et de leurs conséquences tant sur la santé des individus que sur le fonctionnement des entreprises. D'ailleurs, d'après les statistiques, près de 15 % de l'ensemble des travailleurs actifs, au Québec, ont un TMS de longue durée.

Toutefois, l'ajout d'un robot possède ses défis : une mauvaise *Interaction physique Humain-Robot* (IpHR), via un contact direct entre le robot et l'humain à travers un système de captation (par exemple une poignée instrumentée d'un capteur d'efforts à six degrés de

liberté), peut générer des vibrations qui demeurent une source d'inconfort pour les opérateurs. En effet, une augmentation de la rigidité structurelle du bras humain peut occasionner un mouvement vibratoire du robot expliqué par le déplacement des pôles (c.-à-d. de la dynamique dominante) près de l'axe imaginaire.

Ce projet de recherche comporte deux parties. La première traite de deux approches visant à satisfaire une interaction humain-robot plus intuitive et plus sécuritaire tout en détectant et en minimisant les vibrations mécaniques qui pourraient être générées lors d'une telle interaction. La première approche consiste à détecter et à minimiser les vibrations par un observateur de vibrations de type analyse statistique. Cette dernière a été réalisée avec un signal électrique prélevé par le biais de deux capteurs de force et de vitesse qui sont localisés sur un mécanisme robotique à un degré de liberté lors d'une IpHR dans un contexte réel. La deuxième approche, quant à elle, consiste à concevoir et à développer un second observateur de vibrations actif de type réseau de neurones artificiels dans le but de détecter et de minimiser, en temps réel, les vibrations lors d'une IpHR. Ces algorithmes seront optimisés et comparés pour des fins de mise en œuvre pratique. La deuxième partie de ce projet de recherche traite d'une mise en œuvre d'une commande d'un mécanisme robotique à quatre degrés de liberté avec un système haptique virtuel, composé de deux objets virtuels interfacés par la réalité augmentée (RA) grâce aux lunettes *Epson Moverio BT-200*. Ce système vise à assister et à faciliter les tâches d'assemblages en industrie, surtout dans le cas de la présence d'un obstacle situé dans le champ visuel entre l'opérateur et les pièces à assembler. L'interaction avec ce système virtuel a été introduite, dans un premier temps, par le biais d'un dispositif haptique (le *PHANToM Omni*) dans le but de tester la plateforme d'assemblage en réalité augmentée. Dans les travaux futurs, le *PHANToM Omni* sera remplacé par un mécanisme parallèle entraîné par des câbles afin de simuler différents types de robot industriel. Dans cette recherche, le *PHANToM* permettra de télé-opérer l'effecteur d'un robot industriel simulé dans *Robotic Operating System (ROS)*.

## Table des matières

Résumé.....	ii
Table des matières .....	iv
Liste des tableaux.....	vii
Liste des figures .....	viii
Liste des abréviations.....	xi
Remerciements.....	xii
<b>Chapitre 1 Introduction</b> .....	14
1.1 Généralités .....	14
1.2 L'ampleur de la problématique des TMS .....	15
1.3 Une approche vers la réduction des troubles musculo-squelettiques chez les manutentionnaires .....	17
1.4 Solution technologique pour assister les interactions physiques humain-robot .....	21
1.5 Problématique de l'interaction robotique .....	22
1.6 Objectifs de la recherche.....	23
1.7 Méthodologie de la recherche.....	24
<b>Chapitre 2 État de l'Art</b> .....	26
2.1 Introduction.....	27
2.2 Commande par impédance et par admittance .....	27
2.2.1 Commande par impédance .....	28
2.2.2 Applications de la commande par impédance .....	32
2.2.3 Commande par admittance .....	33
2.2.4 Applications de la commande par admittance.....	35
2.3 Observateurs et régulateurs de passivité.....	38
2.3.1 La passivité.....	39
2.3.2 Observateur de passivité (PO) .....	39
2.3.3 Régulateur de passivité (PC) .....	40
2.3.4 Applications du régulateur et de l'observateur de passivité.....	41
2.4 Stabilité via un observateur de type réseau de neurones artificiels .....	44
2.5 La réalité augmentée et le rendu haptique lors d'IpHR .....	45
2.5.1 La réalité augmentée (RA) .....	45
2.5.2 Interactions à retour haptique .....	47

2.6	Les systèmes de réalité augmentée utilisant le rendu haptique .....	50
2.6.1	Importance des guides haptiques dans le domaine des interactions 3D.....	51
2.6.2	Importance de la RA dans le domaine de l'IpHR .....	52
2.6.3	La RA en situation d'IpHR .....	54
2.7	Conclusion .....	58
	<b>Chapitre 3 Observateurs de vibrations.....</b>	<b>60</b>
3.1	Introduction.....	61
3.2	Système d'assistance intelligent .....	62
3.3	Modélisation du système d'assistance intelligent.....	63
3.4	Schéma de la commande en force.....	65
3.5	Modèle suggéré de la boucle de commande .....	66
3.5.1	Schéma de la boucle de commande.....	67
3.5.2	Analyse de stabilité de la boucle de commande .....	68
3.5.3	Comportement fréquentiel du système .....	70
3.6	Observateurs de vibrations.....	71
3.6.1	Observateur de vibrations à base d'une analyse statistique.....	72
a)	Analyse statistique.....	73
b)	Indices des observateurs à base d'une analyse statistique.....	76
3.6.2	Observateur de vibrations actif (AVO) à base d'intelligence artificielle .....	79
a)	Réseau de neurones artificiels .....	79
b)	Architecture proposée pour le réseau de neurones artificiels.....	80
c)	Entraînement du réseau de neurones artificiels .....	81
3.7	Résultats expérimentaux .....	82
3.7.1	Évaluation en temps réel de l'AVO avec un mécanisme robotique à 1-DDL....	83
3.7.2	Évaluation en temps réel des observateurs avec un mécanisme robotique à 4-DDL	84
a)	Performance de l'Observateur de Vibrations Actif (AVO).....	87
b)	Performance de l'observateur de type analyse statistique.....	91
3.7.3	Comparaison de l'AVO avec le TD-VOVC.....	93
3.7.4	Discussion.....	94
3.8	Conclusion .....	98
	<b>Chapitre 4 Guide haptique virtuel .....</b>	<b>100</b>
4.1	Introduction.....	101

4.2	Spécification logicielle et matérielle.....	102
4.2.1	Robot Operating System (ROS) .....	102
4.2.2	RVIZ.....	104
4.2.3	Epson Moverio BT-200.....	104
4.2.4	PHANToM Omni .....	106
4.3	Communication entre ROS, le <i>PHANToM</i> Omni et l'Epson Moverio.....	108
4.4	Conception et développement du guide haptique virtuel.....	109
4.5	Conclusion .....	117
	<b>Chapitre 5 Conclusion et travaux futurs .....</b>	<b>118</b>
5.1	Conclusion générale.....	118
5.2	Travaux futurs.....	120
	<b>Bibliographies.....</b>	<b>122</b>

## Liste des tableaux

TABLEAU 1 : TRAVAILLEURS VICTIMES D'UNE BLESSURE AU COURS D'UNE PERIODE DE 12 MOIS SELON LE SECTEUR D'ACTIVITE ECONOMIQUE DE L'ENTREPRISE (TRAVAILLEURS DE 15 ANS ET PLUS) [8].....	17
TABLEAU 2 : RESULTAT DE L'ANALYSE STATISTIQUE ET DU TEMPS D'EXECUTION. ....	98

## Liste des figures

FIGURE 1 : TRAVAILLEURS VICTIMES D'UNE BLESSURE SUR UNE PERIODE DE 12 MOIS SELON LE NIVEAU D'EXPOSITION A DES CONTRAINTES PHYSIQUES, LE TYPE DE PROFESSION ET LE SECTEUR D'ACTIVITE ECONOMIQUE (TRAVAILLEURS DE 15 ANS ET PLUS) [8]. ...	16
FIGURE 2 : MALADIES CHRONIQUES CAUSEES PAR LES TMS [16].....	19
FIGURE 3 : MAUX AU NIVEAU DE L'APPAREIL LOCOMOTEUR CAUSES PAR DES TMS [13]. ....	19
FIGURE 4 : COMMANDE PAR IMPEDANCE AVEC RETOUR DE FORCE OU $x_d$ EST LA POSITION DESIREE, $x$ EST LA VITESSE, $Z_d$ EST L'IMPEDANCE, $f_d$ EST LA FORCE DESIREE, $U$ EST LA COMMANDE ET $f_m$ ET $x$ SONT RESPECTIVEMENT LA FORCE ET LA POSITION MESUREES [32]. ....	29
FIGURE 5 : MODELE D'IMPEDANCE UTILISE PAR TSUMUGIWA ET AL. [30]. ....	33
FIGURE 6 : STRUCTURE DE REGULATION DU SYSTEME HUMAIN-ROBOT OU $rt$ EST LE SIGNAL DESIRE, $et$ EST L'ERREUR DE CONTROLE, $Hp$ EST LE MODELE HUMAIN, $ft$ EST LA FORCE DE LA MAIN, $Rp$ EST LE MODELE DE L'IMPEDANCE, $yt$ EST LA POSITION DESIREE, $Gp$ EST LE SUIVI DE LA REGULATION ET $yst$ EST LA POSITION DU ROBOT [35]. ....	33
FIGURE 7 : COMMANDE PAR ADMITTANCE AVEC UN RETOUR DE FORCE OU $f_d$ EST LA FORCE DESIREE, $x$ EST LA VITESSE, $x$ EST LA POSITION, $u$ EST LA COMMANDE ET $f_H$ ET $x_m$ SONT RESPECTIVEMENT LA FORCE ET LA POSITION MESUREES [32]. ....	34
FIGURE 8 : LE SYSTEME DE CONTROLE PAR ADMITTANCE DE CORTEVILLE ET AL. [38]. ....	36
FIGURE 9 : SCHEMA UTILISE POUR INFERER L'INTENTION HUMAINE [39]. ....	36
FIGURE 10 : SCHEMA DE CONTROLE PAR IMPEDANCE VARIABLE DE DUCHAINE ET AL. [40].	37
FIGURE 11 : REGULATEUR DE PASSIVITE EN SERIE (A) ET EN PARALLELE (B) OU $f_1, \dots, f_M$ SONT LES FORCES, $v_1, \dots, v_M$ SONT LES VITESSES, $A$ EST L'ELEMENT D'AMORTISSEMENT ET $NL$ EST LE NUMERO DE PORT. ....	41
FIGURE 12 : (A) UN TELEOPERATEUR BILATERAL A UN 1-DDL, (B) DIAGRAMME DE BLOC [42]. ....	41
FIGURE 13 : PERFORMANCE DES METHODES D'ESTIMATION DE L'ENERGIE OU $En$ REPRESENTE AUCUNE ESTIMATION, $Ec$ REPRESENTE UNE VITESSE CONSTANTE, $EI$ REPRESENTE UNE ESTIMATION LINEAIRE DE LA VITESSE, $Ep$ REPRESENTE UNE ESTIMATION POLYNOMIALE DE LA VITESSE ET $Eb$ REPRESENTE REPRESENTE LA MEILLEURE COURBE D'ESTIMATION (UTILISEE COMME UNE REFERENCE) [44]. ....	42
FIGURE 14 : DEUX MANIERES DIFFERENTES POUR RENDRE LE COMPORTEMENT ACTIF D'UN SYSTEME PASSIF ; LA LIGNE DISCONTINUE (SANS PC) REPRESENTE LE RESULTAT DE L'ENERGIE LORSQU'AUCUN REGULATEUR DE PASSIVITE N'EST UTILISE. LA LIGNE CONTINUE REPRESENTE LE RESULTAT DE L'ENERGIE LORSQU'UN REGULATEUR DE PASSIVITE AVEC UN SEUIL FIXE A ZERO EST UTILISE (AVEC UN PC) ET LA LIGNE EN POINTILLEE REPRESENTE LE RESULTAT DE L'ENERGIE LORSQU'UN REGULATEUR DE PASSIVITE AVEC UN SEUIL VARIANT DANS LE TEMPS EST UTILISE (PC AVEC UNE REFERENCE AU MODELE) [46]. ....	43
FIGURE 15 : SYSTEME ACTIF DE COMMANDE POUR LES VIBRATIONS BASE SUR UN REGULATEUR DE TYPE RESEAU DE NEURONES ARTIFICIELS [47]. ....	44
FIGURE 16 : LE CONTINUUM REEL-VIRTUEL [57]. ....	47
FIGURE 17 : UN SEUL DEGRE DE LIBERTE D'UNE INTERFACE HAPTIQUE RENDANT UNE RIGIDITE VIRTUELLE OU $m$ EST L'INERTIE DU DISPOSITIF HAPTIQUE, $b$ EST LA FRICTION (VISQUEUSE), $c$ EST LE COMPOSANT DYNAMIQUE DE COULOMB, $x$ EST LA POSITION, $\dot{x}$ EST LA VITESSE, $F_H$ EST LA FORCE APPLIQUEE PAR L'OPERATEUR, $F_A$ EST LA FORCE EXERCEE PAR L'AMPLIFICATEUR POUR SIMULER LA RIGIDITE VIRTUELLE $K$ [58]. ....	49
FIGURE 18 : RETOUR HAPTIQUE DANS TROIS BLOCS. L'ALGORITHME DE DETECTION DE COLLISION FOURNIT DES INFORMATIONS SUR LES CONTACTS ENTRE UN AVATAR ET DES OBJETS DANS L'ENVIRONNEMENT VIRTUEL A LA POSITION $x$ . L'ALGORITHME POUR LA REPONSE EN FORCE RETOURNE LA FORCE D'INTERACTION IDEALE $F_d$ ENTRE UN AVATAR ET LES OBJETS VIRTUELS. L'ALGORITHME DE COMMANDE RETOURNE A	



L'UTILISATEUR LA FORCE D'INTERACTION IDEALE POUR LES MEILLEURES CAPACITES DE L'APPAREIL [59].	50
FIGURE 19 : PLANIFICATION DE TRAJECTOIRE : (A) LA GENERATION D'UN VOLUME SANS COLLISION (CFV), (B) LA SELECTION DES POINTS INTERMEDIAIRES OU EE EST L'EXTREMITE DE L'EFFECTEUR [63].	53
FIGURE 20 : INTERFACE UTILISATEUR EN REALITE AUGMENTEE POUR LA MANIPULATION DES OBJETS [64].	53
FIGURE 21 : UNE INTERFACE EN REALITE AUGMENTEE POUR LA PLANIFICATION DES TRAJECTOIRES [65].	54
FIGURE 22 : LE SYSTEME DE LA RA POUR LA PLANIFICATION [67].	55
FIGURE 23: CONVOYEURS ET MURS VIRTUELS ASSURANT LE TRANSPORT RAPIDE DES OBJETS [5].	56
FIGURE 24: SUIVIE DES OBJETS GRACE A UN CONE ET UNE FORCE VIRTUELLE [5].	56
FIGURE 25 : GUIDE VIRTUEL POUR ATTEINDRE LA CIBLE [68].	56
FIGURE 26 : CONE HAPTIQUE PROPOSE PAR ULLAH ET AL [69].	57
FIGURE 27 : UNE INTERFACE BASEE SUR LA REALITE AUGMENTEE POUR GARANTIR UNE GENERATION DES TRAJECTOIRES [70].	57
FIGURE 28 : SYSTEME DE GUIDAGE BASE SUR LA RA POUR ASSURER UNE MEILLEURE VISIBILITE DANS LA CHIRURGIE ENDOSCOPIQUE [72].	58
FIGURE 29 : PROTOTYPE DU SYSTEME D'ASSISTANCE INTELLIGENT A 4 DDL [24].	62
FIGURE 30 : MODELISATION SCHEMATIQUE DU SYSTEME D'ASSISTANCE INTELLIGENT.	64
FIGURE 31: SCHEMA DE COMMANDE PAR ADMITTANCE.	65
FIGURE 32 : BOUCLE DE COMMANDE SANS OBSERVATEUR DE VIBRATIONS.	67
FIGURE 33 : LES POLES DE LA BOUCLE FERMEE AVEC UN OPERATEUR AYANT UNE RIGIDITE $KH$ QUI VARIE ENTRE 50 $N/m$ (CERCLE) ET 850 $N/m$ (CARRE), $c = 20 Ns/m$ , $T = 0.1 s$ , $Kp = 10000$ , $MR = 500 kg$ , $CR = 100 Ns/m$ , $mR = 50 kg$ , $KB = 40000 N/m$ , $CB = 40 Ns/m$ , $CH = 23.45 Ns/m$ .	69
FIGURE 34 : DIAGRAMME DE BODE REPRESENTANT LA DYNAMIQUE DE LA BOUCLE FERMEE (A), LA BOUCLE OUVERTE (B), LE MODELE HUMAIN (C) ET LE MODELE DU ROBOT (SANS COMMANDE) (D). COMME DECRIT ICI, LES VIBRATIONS SE PRODUISENT A 0.15 ET 30 RAD/S.	71
FIGURE 35 : UNE IPHR AVEC UN MECANISME ROBOTIQUE A 1-DDL DECRIVANT UN MOUVEMENT VIBRATOIRE CAUSE PAR UNE RIGIDITE ELEVEE DU BRAS HUMAIN.	72
FIGURE 36 : (A) REPRESENTE LE SIGNAL DE VITESSE CAPTURE LORS D'UNE INTERACTION REELLE AVEC UN ROBOT A UN DEGRE DE LIBERTE ET (B) REPRESENTE SA TRANSFORMATION APRES FILTRAGE (L'ELIMINATION DU MOUVEMENT NORMAL) OU LES ZONES 1 ET 3 CORRESPONDENT A UN MOUVEMENT SANS VIBRATIONS ET LA ZONE 2 CORRESPOND A UN MOUVEMENT VIBRATOIRE.	74
FIGURE 37 : IDENTIFICATION DES VIBRATIONS LORS D'UNE IPHR AVEC UN MECANISME ROBOTIQUE A 1-DDL TOUT EN UTILISANT UNE FENETRE D'ANALYSE.	74
FIGURE 38 : (A) ET (C) REPRESENTENT RESPECTIVEMENT LES REPONSES DE LA VARIANCE ET DE L'ECART TYPE DANS LE DOMAINE TEMPOREL ET (B) ET (D) REPRESENTENT RESPECTIVEMENT LES REPONSES DE LA VARIANCE ET DE L'ECART TYPE DANS LE DOMAINE FREQUENTIEL.	76
FIGURE 39 : (A) ET (C) REPRESENTENT RESPECTIVEMENT L'EVOLUTION DES INDICES DE LA VARIANCE ET DE L'ECART TYPE DANS LE DOMAINE TEMPOREL (EQUATIONS (25) ET (26)) ET (B) ET (D) REPRESENTENT RESPECTIVEMENT L'EVOLUTION DES INDICES DE LA VARIANCE ET DE L'ECART TYPE DANS LE DOMAINE FREQUENTIEL (EQUATIONS (24) ET (27)).	77
FIGURE 40 : (A) REPRESENTE L'EVOLUTION DE L'INDICE DE LA VARIANCE DANS LES DOMAINES TEMPOREL ET FREQUENTIEL ET (B) REPRESENTE L'EVOLUTION DE L'INDICE DE L'ECART TYPE DANS LES DOMAINES TEMPOREL ET FREQUENTIEL.	78
FIGURE 41 : NEURONE FORMEL.	80
FIGURE 42 : L'ARCHITECTURE ET L'ENTRAINEMENT DU RESEAU DE NEURONES.	81
FIGURE 43 : BOUCLE DE COMMANDE AVEC L'AVO.	83
FIGURE 44 : L'EVOLUTION DE L'INDICE DE L'AVO.	83

FIGURE 45 : REPRESENTE L'EVOLUTION DE LA RIGIDITE DU BRAS HUMAIN ALLANT DE 50 A 850 N/M (FORME D'ONDE CARREE) ET (B) REPRESENTE LA REPONSE DE LA COMMANDE EN BOUCLE FERMEE SANS L'AVO. ....	88
FIGURE 46 : (A) REPRESENTE LE SIGNAL DE VITESSE SIMULE (SS), UTILISE COMME UNE ENTREE POUR L'AVO, (B) REPRESENTE L'EVOLUTION DE L'INDICE DE L'AVO ( $I_{AVO} - SS$ ) ET (C) REPRESENTE LA REPONSE DE LA BOUCLE DE COMMANDE LORSQU'ELLE EST ASSOCIEE A L' $I_{AVO} - SS$ .....	88
FIGURE 47 : (A) REPRESENTE LE SIGNAL DE FORCE UTILISE COMME ENTREE POUR LE MODELE D'ADMITTANCE, (B) REPRESENTE LE SIGNAL DE VITESSE SIMULE UTILISE COMME UNE ENTREE POUR L'AVO ET (C) REPRESENTE L'EVOLUTION DE L'INDICE DE L'AVO ( $I_{AVO} - SSF$ ).....	90
FIGURE 48 : LA REPONSE DE LA BOUCLE DE COMMANDE LORSQU'ELLE EST ASSOCIEE A L' $I_{AVO} - SSF$ (LIGNE NOIRE SOLIDE) ET LA REPONSE DE LA BOUCLE DE COMMANDE SANS L'AVO (LIGNE BLEUE EN POINTILLEE). ....	91
FIGURE 49 : (A) REPRESENTE LE SIGNAL DE VITESSE SIMULE UTILISE COMME UNE ENTREE A L'OBSERVATEUR DE LA VARIANCE, (B) REPRESENTE L'EVOLUTION DE L'INDICE DE VARIANCE DANS LES DOMAINES TEMPOREL ET FREQUENTIEL ET (C) REPRESENTE LA REPONSE DE LA BOUCLE DE COMMANDE SUGGEREE LORSQU'ELLE EST ASSOCIEE A L' $ISS$ . ....	92
FIGURE 50 : (A) REPRESENTE LE SIGNAL DE VITESSE SIMULE UTILISE COMME UNE ENTREE A L'OBSERVATEUR DE TYPE ECART TYPE, (B) REPRESENTE L'EVOLUTION DE L'INDICE ECART TYPE DANS LE DOMAINE TEMPOREL ET FREQUENTIEL ET (C) REPRESENTE LA REPONSE DE LA BOUCLE DE COMMANDE LORSQU'ELLE EST ASSOCIEE A $IS - SS$ .....	93
FIGURE 51 : (A) REPRESENTE LE SIGNAL DE VITESSE SIMULE UTILISE COMME UNE ENTREE A L'OBSERVATEUR DE VIBRATIONS TD-VOVC, (B) REPRESENTE L'EVOLUTION DE L'INDICE GENERE PAR CET OBSERVATEUR ET (C) REPRESENTE LA REPONSE DE LA BOUCLE DE COMMANDE LORSQU'ELLE EST ASSOCIEE A L' $ITD - VOVC$ . ....	94
FIGURE 52 : L'EVOLUTION DE L'ERREUR LORSQUE LA BOUCLE DE COMMANDE EST ASSOCIEE A L'OBSERVATEUR AVO (A), A L'OBSERVATEUR DE LA VARIANCE (B), A L'OBSERVATEUR D'ECART TYPE (C) ET A L'OBSERVATEUR TD-VOVC (D). ....	96
FIGURE 53 : DISTRIBUTION DE L'ERREUR LORSQUE LA BOUCLE DE COMMANDE EST ASSOCIEE A L'OBSERVATEUR TD-VOVC, A L'OBSERVATEUR AVO, A L'OBSERVATEUR AVEC ECART TYPE ET A L'OBSERVATEUR AVEC VARIANCE. ....	97
FIGURE 54: COMMUNICATION ENTRE DEUX NŒUDS VIA LE <i>TOPIC COMMAND_VELOCITY</i> . ..	104
FIGURE 55 : LA LUNETTE EPSON MOVERIO BT-200. ....	105
FIGURE 56 : LE BRAS PHANTOM OMNI. ....	107
FIGURE 57 : ROBOT UR5 SIMULE DANS RVIZ. ....	107
FIGURE 58 : COMMUNICATION ENTRE LE <i>PHANTOM OMNI</i> , ROS ET L'EPSEON MOVERIO. ....	108
FIGURE 59 : ENTONNOIR DE GUIDAGE DEVELOPPE DANS SOLIDWORKS. ....	109
FIGURE 60 : L'ENTONNOIR DE GUIDAGE DANS RVIZ (VU DE FACE). ....	110
FIGURE 61 : L'ENTONNOIR DE GUIDAGE DANS RVIZ (VU DE DESSUS). ....	110
FIGURE 62 : LE MARQUEUR INTERACTIF DANS RVIZ. ....	110
FIGURE 63 : LE MARQUEUR INTERACTIF A L'INTERIEUR DU CONE DE GUIDAGE DANS RVIZ. ....	111
FIGURE 64 : MODELISATION DE L'ENTONNOIR DE GUIDAGE. ....	112
FIGURE 65 : DIRECTION DE LA SPHERE HORS DE L'ENTONNOIR. ....	113
FIGURE 66: MODELISATION DU SYSTEME DU RETOUR DE FORCE OU K EST LA RAIDEUR....	115
FIGURE 67 : SYSTEME FINAL INCLUANT LE GUIDE HAPTIQUE ET LE ROBOT UR5 INTERFACES PAR LA RA ET MANIPULES PAR LE PANTOM OMNI POUR LE RETOUR DE FORCES. ....	116

## Liste des abréviations

	<i>Anglais</i>	<i>Français</i>
<b>AVO</b>	<i>Active vibration observer</i>	Observateur de vibration actif
<b>TD-VOVC</b>	<i>Time Domain Vibration Observer Vibration Controller</i>	
<b>DDL</b>	<i>Degree of freedom</i>	Degré de liberté
<b>HIP</b>	<i>Interactive Haptic Point ou God Object</i>	Point d'interaction haptique
<b>IAD</b>	<i>Intelligent Assist Device</i>	Manipulateur d'assistance intelligent
<b>ROS</b>	<i>Robot Operating System</i>	Plateforme de développement logicielle pour robot
<b>IpHR</b>	<i>Physical human-robot interaction</i>	Interaction ou collaboration physique humain-robot
<b>IHR</b>	<i>Human-robot interaction</i>	Interaction (sociale) humain-robot
<b>RA</b>	<i>Augmented Reality</i>	Réalité Augmentée
<b>RV</b>	<i>Virtual Reality</i>	Réalité Virtuelle
<b>RM</b>	<i>Mixed Reality</i>	Réalité Mixte
<b>IHR</b>	<i>Human-Robot Interaction</i>	Interaction Humain-Robot
<b>IHM</b>	<i>Human-Machine Interaction</i>	Interaction Humain-Machine
<b>TMS</b>	<i>Musculo Skeletal Disorders</i>	Troubles musculo squelettiques
<b>3D</b>	<i>Three Dimensions</i>	Trois Dimensions
<b>MSE</b>	<i>Mean Square Error</i>	Erreur Quadratique Moyenne
<b>URDF</b>	<i>Unified Robot Description Format</i>	Format de la Description unifiée des Robots
<b>STL</b>	<i>STereoLithography</i>	Stéréolithographie

## Remerciements

J'ai eu de la chance dans ma vie d'avoir l'opportunité de faire partie du laboratoire LAIMI de l'UQAC. J'ai eu de la chance aussi d'avoir pu compter sur le support de l'équipe de recherche de ce laboratoire et plus particulièrement, sur l'incroyable support de mon directeur de recherche Martin Otis. Franchement, il était plus qu'un simple directeur, il était plutôt un magnifique ami avec qui je n'arrête pas d'avoir l'envie de jaser ! Il m'a trop aidé pour mettre à terme ce projet de recherche dans les délais impartis. Merci beaucoup Martin pour la confiance que vous m'avez octroyée, merci pour votre patience, pour votre disponibilité et pour votre écoute. Merci pour vos directives et vos précieux conseils. Je te suis reconnaissant de m'avoir appris le sens de la rigueur dans l'ouvrage.

Je tiens aussi à exprimer mes profondes gratitude à Alexandre Campeau-Lecours, professeur à l'Université Laval, pour sa disponibilité, pour ses aides précieuses et pour les éclaircissements apportés pour la première partie de mon projet. Sans lui, les résultats de ce projet auraient été beaucoup moins pertinents. Alexandre, merci pour tout !

Sans l'aide précieuse de Jeremy Cooperstock, directeur du laboratoire de recherche « Shared Reality Lab » à McGill, j'aurais été incapable de mettre à terme ce projet de recherche. Je vous remercie pour votre accueil chaleureux dans votre laboratoire et pour tous les moyens qui ont été mis à ma disposition pour permettre l'avancement de notre projet de recherche dans les meilleures conditions. Merci beaucoup Jeremy pour votre disponibilité, votre patience vos directives et vos précieux conseils. Merci de nous accorder la chance de travailler dans votre honorable laboratoire.

Mes remerciements les plus distingués s'adressent aux membres du jury qui ont eu l'amabilité d'accepter d'évaluer ce travail.

Bien sûr, je ne pourrai jamais, jamais oublier ce que mes parents ont fait pour moi. Je vous remercie pour votre amour, vos sacrifices, votre patience, votre générosité, votre soutien et votre tendresse que vous m'avez largement apportés. Vous êtes tout simplement mon idole, mon modèle de persévérance, mon soutien moral et ma source de joie et de bonheur. Je ferai

de mon mieux pour rester un sujet de fierté à vos yeux avec l'espoir de ne jamais vous décevoir. Je tiens aussi à remercier ma sœur pour ses conseils prodigieux, son soutien moral et pour l'amour qu'elle me donne. Je remercie aussi toute ma grande famille ainsi que tous mes amis pour leurs encouragements et pour leur continuel soutien.

# Chapitre 1

## Introduction

### 1.1 Généralités

Débutant dans le milieu des années quarante avec les romans du célèbre auteur et inventeur du mot robotique *Issac Asimov*, le domaine de l'*Interaction physique Humain-Robot* (IpHR) ne cesse pas de subir une progression technologique significative jusqu'à nos jours. En effet, nous apercevons, de plus en plus, la présence de la robotique collaborative dans les cellules de travail permettant aux manutentionnaires de repousser leurs capacités à exécuter des tâches industrielles ardues telles que la manutention et l'assemblage des composants lourds [1]. Une telle robotique collaborative permet d'assister l'humain dans des tâches dangereuses, de seconder les personnes fragilisées par des handicaps et de créer des emplois caractérisés par des environnements de travail ergonomique et performant. Ce type d'emploi est amélioré grâce à une réduction efficace des travaux difficiles qui sont occasionnés par des mouvements répétitifs, des postures contraignantes, des déplacements des charges lourdes et des activités se produisant dans des conditions environnementales désagréables et pénibles (comme la chaleur ou le froid et le bruit) [2-4].

À cet effet, la robotique interactive est devenue, dans l'industrie, une option intéressante et pertinente. En effet, elle possède un potentiel à produire un avancement économique grâce à l'amélioration des conditions de travail lors d'une assistance et d'un partage optimal des tâches selon l'ordonnement des activités de production et de fabrication, en toute fiabilité, flexibilité et précision. Malgré les coûts élevés d'achat

et de mise en œuvre d'un robot dans une cellule de travail hybride<sup>1</sup>, cette interaction pourrait se présenter comme un avantage significatif pour la réduction du développement des TMS [5, 6] et ainsi pour la réduction de la cotisation à la Commission de la Santé et la Sécurité au Travail (CSST). Les symptômes des TMS, leurs facteurs de risques sur la santé à long terme ainsi que les moyens utilisés pour les réduire seront expliqués en détail dans la prochaine section.

## 1.2 L'ampleur de la problématique des TMS

Les TMS constituent, aujourd'hui, l'une des problématiques les plus préoccupantes en santé et en sécurité au travail (SST). En effet, d'après les statistiques, au Québec, environ 15 % de l'ensemble des travailleurs actifs ont un TMS de longue durée [7]. De plus, la prévalence des TMS augmente avec l'âge allant de 7 % chez les 15-24 ans à 24 % chez les travailleurs québécois de 50 ans et plus [8]. Ce taux varie aussi en fonction de l'exposition à des contraintes physiques, du type de profession et du secteur d'activité économique de l'entreprise [8]. Ces facteurs de risques représentent les causes des blessures liées au travail. Cependant, il faut pouvoir distinguer les blessures accidentelles, qui sont plus ou moins graves, des blessures attribuables à des mouvements répétitifs qui sont la source des TMS. D'ailleurs, 3,3% des travailleurs québécois ont subi au moins une blessure accidentelle au travail et la majorité d'entre eux (79%) n'ont connu qu'une blessure dans les 12 derniers mois [8]. La figure 1 illustre la différence entre les blessures causées par des mouvements répétitifs et celles causées par des blessures accidentelles.

---

<sup>1</sup> **La cellule de travail hybride** représente l'espace de travail atteignable autant par le robot que l'humain.

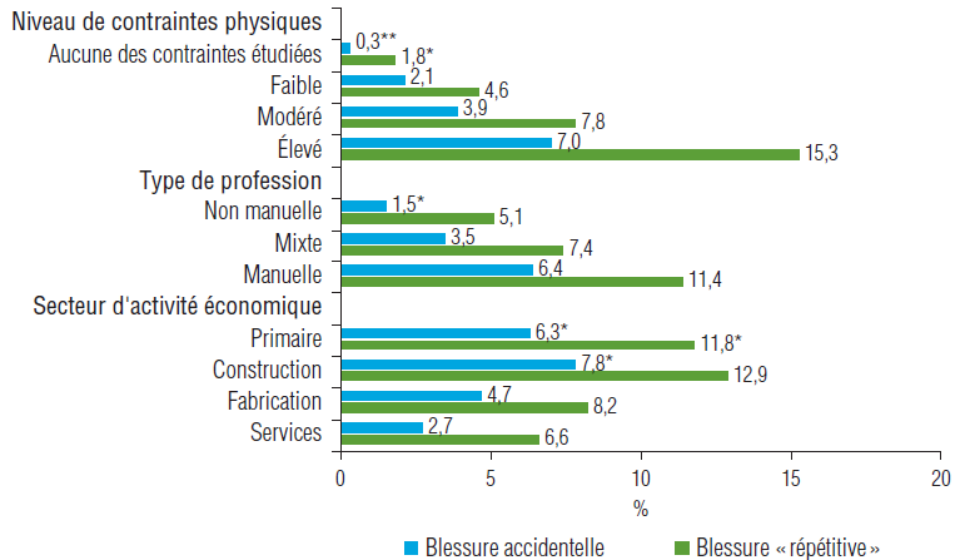


Figure 1 : Travailleurs victimes d'une blessure sur une période de 12 mois selon le niveau d'exposition à des contraintes physiques, le type de profession et le secteur d'activité économique (travailleurs de 15 ans et plus) [8].

D'après cette figure, nous pouvons constater qu'au cours des 12 derniers mois, environ 15% de l'ensemble des travailleurs québécois de 15 ans et plus sont des travailleurs exposés à une blessure grave (c.-à-d. atteinte d'un TMS) à cause du niveau élevé des contraintes physiques. De plus, il ressort qu'il y a que 7% de ces travailleurs qui sont victimes d'une blessure accidentelle. En ce qui concerne le type de profession, environ 11% des travailleurs manuels ont connu une blessure « répétitive » et sont aussi victimes d'une blessure accidentelle (6%). À l'égard du type d'activité économique des entreprises québécoises, nous constatons que les secteurs primaires et de la construction possèdent la proportion la plus élevée des travailleurs victimes des blessures accidentelles et répétitives. D'ailleurs, d'après le tableau 1, nous trouvons que les travailleurs les plus susceptibles d'être victimes des blessures accidentelles et répétitives sont ceux qui travaillent dans les industries primaires et dans le transport ou l'entreposage (de 5% à 7% pour les blessures accidentelles et de 9% à 12% pour les blessures attribuables à des mouvements répétitifs) [8].



	Blessure accidentelle	Blessure attribuable à des mouvements répétitifs
	%	
<b>Total</b>	<b>3,3</b>	<b>7,3</b>
Industries primaires	6,7	11,6
Industries manufacturières	5,0	8,0
Hébergement / restauration	2,2 *	8,7
Soutien à la production	1,4 **	5,5
Transport / entreposage	5,1 **	9,7 *
Commerce	3,6 *	7,3
Soins de santé	3,8 *	6,3
Enseignement	0,9 **	4,3 *
Services gouvernementaux	2,5 *	7,2

Tableau 1 : Travailleurs victimes d'une blessure au cours d'une période de 12 mois selon le secteur d'activité économique de l'entreprise (travailleurs de 15 ans et plus) [8].

Par surcroît, ces blessures entraînent des coûts élevés associés à l'indemnisation des victimes, d'une part, et à la réduction des capacités de production à cause des congés de maladie ou de l'absentéisme, d'autre part [9]. D'ailleurs, au Québec, les TMS touchent chaque année plus de 45 000 travailleurs de tous les secteurs d'activité. Ceci entraîne des coûts d'indemnisation de 500 millions de dollars par année [10]. Dans les deux prochains paragraphes, nous traiterons des moyens utilisés, autant dans le contrôle classique (dont l'ergonomie) que dans le domaine de l'IpHR, pour satisfaire une interaction ergonomique et assistée pouvant éventuellement minimiser les problèmes des TMS susmentionnés.

### 1.3 Une approche vers la réduction des troubles musculo-squelettiques chez les manutentionnaires

Les TMS sont définis comme les maladies affectant, d'une manière progressive, les tissus mous associés à l'appareil locomoteur tels que les membres supérieurs, les membres inférieurs et la colonne vertébrale (figure 3) [11]. Elles peuvent aussi toucher

l'intégralité des structures anatomiques et persister même en absence d'effort [12]. Ces maladies sont souvent liées au travail résultant de stress, d'effort excessif, de postures contraignantes, de mouvements répétitifs, mais aussi suite à une exposition à des vibrations et de chocs [9]. Ces facteurs pourraient provoquer plusieurs symptômes dont nous citons les souffrances physiques et mentales, les inconforts, les enflures et même les engourdissements ou les picotements. De plus, les symptômes des TMS englobent un éventail de conditions chroniques dont nous citons ici quelques-uns ; la migraine, la cervicalgie, l'entorse, la gonalgie et l'arthrose (figure 2) [10, 13, 14]. Ceci peut occasionner une mobilité difficile des différents membres, à cause d'une fatigue musculaire localisée et persistante, et par conséquent des risques sur l'avancement de la carrière professionnelle et de la qualité de vie [9].

La prévalence de ces troubles peut être contrôlée grâce à une intervention ergonomique sur les milieux de travail. Par exemple, plusieurs solutions largement connues et documentées chez les informaticiens existent dont nous citons la disposition des touches du clavier, nommée *bépo*, avec une posture assise droite et des supports aux bras permettant de diminuer les risques des TMS [15]. D'une manière générale, ce contrôle doit passer par une démarche qui s'articule en quatre points [10, 14] :

- l'identification des situations de travail comportant des risques de TMS ;
- l'identification des déterminants (c.-à-d. l'origine) des facteurs de risque identifiés dans la première étape ;
- la correction des situations à risque et
- le contrôle des mesures correctives appliquées.

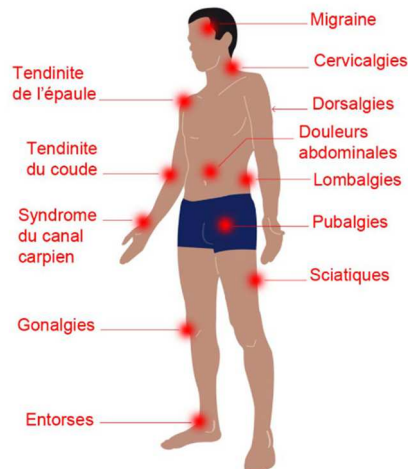


Figure 2 : Maladies chroniques causées par les TMS [16].



Figure 3 : Maux au niveau de l'appareil locomoteur causés par des TMS [13].

Plus spécifiquement, l'identification des principaux facteurs de risque constitue la première et la plus importante étape qu'il faut entreprendre pour identifier des pistes pour la prévention. Grâce à cette première étape, nous serons en mesure de prioriser et d'identifier les facteurs de risque qui, par leurs intensités, leurs fréquences ou par leurs durées d'exposition, contribuent le plus au développement des symptômes liés aux TMS [9]. Ensuite, pour pouvoir prévenir les TMS dans une situation particulière, il faut passer par une deuxième étape qui est l'identification des principaux déterminants ayant un impact sur la situation de travail. Parmi ces déterminants, nous retrouvons [15] :

- l'organisation de la production ;
- la conception des équipements ;
- la conception de produit ;
- les outils ;
- la gestuelle (en termes de consignes et de procédures) ;
- la gestion des compétences et

- les dépendances organisationnelles.

Une fois que les déterminants des principaux facteurs de risque sont identifiés, nous pouvons passer à la troisième étape qui consiste à entreprendre des mesures pour corriger ces situations (c.-à-d. les déterminants) pour que l'intensité, la fréquence ou la durée des facteurs de risque s'en trouve diminué [9]. En effet, il existe plusieurs mesures à entreprendre pour y arriver. Elles sont réparties essentiellement sur deux volets :

- des mesures techniques et
- des mesures organisationnelles.

Les mesures techniques sont les mesures qui apportent des solutions pour les facteurs de risque directs tels que les efforts excessifs, les postures contraignantes et les gestes répétitifs. Parmi ces mesures nous retrouvons l'adaptation du poste de travail après une analyse fine de l'activité des opérateurs, la réduction des masses manipulées et des tâches trop répétitives, l'utilisation de matériaux absorbant les vibrations et l'ajout des assistances physiques. Les mesures organisationnelles, quant à elles, se manifestent généralement par une alternance des opérateurs sur le poste de travail ce qui permettra de limiter les tâches répétitives et par conséquent l'apparition des TMS. Dans ce travail de recherche, nous proposons plutôt une aide intelligente et interactive via un robot collaboratif.

Enfin, après avoir effectué ces mesures préventives, la dernière étape du processus de contrôle consiste à compléter un suivi continu des différentes mesures correctives appliquées sur les lieux de travail. Dans ce sens, un apprentissage de gestes

et de mouvements justes pour le soulèvement et le transport des charges, tel que la fixation de la colonne vertébrale, pourrait être une solution potentielle pour éviter la prévalence des TMS.

#### 1.4 Solution technologique pour assister les interactions physiques humain-robot

Conscients de l'importance de la robotisation en industrie, plusieurs scientifiques cherchent à assurer une assistance intelligente, ergonomique et efficace des opérateurs à l'aide des notions retrouvées dans l'IpHR. D'une part, le mécanisme robotique pourrait remplacer ou partager avec l'opérateur une tâche répétitive possédant une posture contraignante. D'autre part, puisque le mécanisme entraîne aussi la possibilité d'une interférence avec le champ visuel de l'opérateur, ces travaux de recherche proposent l'ajout d'une augmentation de la réalité via la réalité augmentée incluant un retour visuel et haptique. Ainsi, il serait possible d'aider les opérateurs dans leurs tâches par l'ajout d'un guide virtuel visible dans l'environnement réel dont le contour du guide inclut un retour de force (c.-à-d. haptique).

Dans ce sens, l'une des applications envisagées dans ce domaine est l'augmentation de l'environnement réel par une aide virtuelle des opérateurs via un retour haptique et visuel. Cette application introduit des interactions haptiques avec des environnements virtuels obtenues grâce à une exploitation simultanée des interactions à retour d'effort (dont l'utilisateur peut ressentir les forces provenant des objets virtuels) et des technologies de pointe d'animation graphique offerte en réalité augmentée (RA) [17]. Cette technologie se présente comme une discipline qui se situe à la croisée de plusieurs domaines tels que l'infographie, le jeu vidéo, le cinéma, la

télévision, la robotique et la médecine. Elle permet à l'humain de visualiser des objets virtuels 3D dans un environnement réel. En d'autres mots, elle assure une représentation simulée et partielle des objets dans un monde réel. Ainsi, l'intérêt de cette technologie est d'ajouter des informations sensorielles afin de mieux percevoir le monde réel et d'interagir avec des entités virtuelles ajoutées à l'environnement réel grâce à une interaction 3D augmentant ainsi le réalisme [18].

### 1.5 Problématique de l'interaction robotique

L'introduction des robots interactifs dans une cellule de travail hybride pourrait présenter plusieurs défis. En effet, la stabilité et la transparence<sup>2</sup> dynamique des robots ainsi que la possibilité de collisions introduites avec ces machines peuvent se présenter comme un risque pour la sécurité des opérateurs [19, 20]. En particulier, une interaction physique avec ces mécanismes, dotée par une rigidité structurelle élevée du bras humain, pourrait générer un mouvement vibratoire provenant d'une augmentation du gain de la boucle de commande (c.-à-d. expliquée par le déplacement des pôles près de l'axe imaginaire), réduisant ainsi la performance (c.-à-d. la réduction de la transparence) et affectant l'intuitivité d'opération du système [21]. Dans ce sens, le principal thème de ce projet de recherche consiste donc à trouver une solution pour réduire les vibrations mécaniques lors des IpHRs tout en considérant l'ajout d'un retour haptique virtuel (guide virtuel) pouvant aider les opérateurs lors des tâches d'assemblages.

---

<sup>2</sup> **La transparence** est définie par un mouvement de coopération avec le mécanisme sans la perception de la friction, de l'inertie, sans l'effet de la gravité et sans tout autre torseur parasite qui peut être ressenti par l'utilisateur [18].

## 1.6 Objectifs de la recherche

La transparence des systèmes mécatroniques peut se présenter comme une problématique dans plusieurs domaines tels que l'IpHR, l'haptique et la téléopération. Dans ce sens, ce projet de recherche favorisera l'étude et la conception d'une solution potentielle afin de favoriser l'interactivité et de remédier aux problèmes liés à l'IpHR, tels que les vibrations mécaniques. Ceci sera réalisé grâce à une nouvelle application utilisant la réalité augmentée. Plus spécifiquement, les objectifs de ce mémoire portent sur l'intégration de deux observateurs de vibrations actifs et d'un guide virtuel haptique visible dans l'environnement réel.

Les deux observateurs de vibrations susmentionnés sont différents. En effet, le premier est basé sur une analyse statistique, et le deuxième, quant à lui, est basé sur une approche par réseau de neurones artificiels de type perceptron multicouches. Ces deux observateurs ont été réalisés dans le but de détecter et de réduire les vibrations mécaniques, générées lors des IpHRs, au-dessous du seuil de la perception humaine [22] tout en déplaçant la dynamique (c.-à-d. les pôles) du système de manière à offrir plus d'amortissement. Le guide virtuel à retour d'efforts, quant à lui, a été conçu dans le but d'assister et de faciliter les opérations de manutention telles que le déplacement et l'insertion des pièces dans un assemblage, tout en retournant des efforts de force adaptés lorsqu'il se produit une collision entre la pièce réelle à déplacer et le guide virtuel. Ce dernier sera visualisé avec la technologie de la RA grâce aux lunettes «*Epson Moverio BT-200*». Ce type de guidage devient essentiel lorsque le robot ou les pièces, existants dans le champ de vision de l'opérateur, se présentent comme un obstacle visuel pour la performance des opérations en question. Cette technologie

permettrait aux opérateurs d'éviter des postures contraignantes ayant un effet sur l'apparition des TMS.

## 1.7 Méthodologie de la recherche

Cette section présente la méthodologie préconisée pour atteindre les objectifs fixés :

- Étape I : Revue de la littérature
  - une revue de la littérature sera menée sur les différentes technologies et méthodes utilisées pour analyser la stabilité des systèmes et pour réduire l'évolution des troubles musculo-squelettiques ;
  - une revue de la littérature sera amenée sur les différentes technologies et méthodes utilisées en IpHR avec des guides virtuels interfacés par une technologie de la RA ;
  - une revue de la littérature sera conduite sur le principe du rendu haptique dans le cadre d'un entraînement facilitant l'introduction des IpHR en industrie.
- Étape II : Analyse des mouvements humains lors d'une interaction physique humain-robot
  - une analyse statistique sera amenée sur un signal représentatif d'une interaction physique humain-robot capturé par le biais d'un capteur de force et de vitesse.
- Étape III : Conception et développement d'un observateur de vibrations de type réseau de neurones artificiels



- développement d'un observateur de vibration actif (AVO) de type réseau de neurones artificiels qui permettra de détecter et de minimiser, en temps réel, les vibrations mécaniques lors d'une IpHR.
- Étape IV : Conception, développement et test d'un guide virtuel pouvant reproduire des efforts à l'effecteur du robot
  - réalisation d'un guide virtuel sur ROS et RVIZ.
  - interfaçage de ce guide avec des lunettes *Epson Moverio BT-200* utilisant la RA.
  - intégration d'un dispositif haptique, *PHANToM Omni*, dans ROS afin de télé-opérer un manipulateur robotique simulé avec le guide virtuel.

Afin de présenter la démarche exacte adoptée pour mettre à terme ce projet de recherche, ce mémoire se divise en trois sections. Une première section (chapitre 2) est consacrée à l'étude et à la revue de la littérature des différentes technologies utilisées, d'une part, pour assurer l'intuitivité et la stabilité des mécanismes robotiques en situation d'IpHR et, d'autre part, pour assurer une assistance ergonomique de ces interactions. Une deuxième section (chapitre 3) propose et étudie deux types d'observateurs de vibrations afin de vérifier leurs faisabilités dans la détection et la minimisation des vibrations mécaniques sous le seuil de la perception humaine. Finalement, la dernière section (chapitre 4) traite d'un guide virtuel haptique interfacé avec la technologie de la RA visant à satisfaire une assistance ergonomique et effective des tâches d'assemblage et de manutention lors d'une IpHR. Les résultats expérimentaux des deux systèmes susmentionnés sont représentés dans les deux dernières sections.

## **Chapitre 2**

### **État de l'Art**

En premier lieu, ce chapitre présente une revue de la littérature des modèles de commandes et d'observateurs les plus utilisés dans le domaine de l'IpHR. De nombreuses applications sont présentées avec ces outils dans le but de démontrer leurs faisabilités dans la satisfaction des critères d'intuitivité, de performance et de stabilité des systèmes robotiques en toutes circonstances. En deuxième lieu, une attention particulière est portée aux guides haptiques interfacés par la technologie de RA qui se présentent comme des moyens efficaces pour assurer une assistance ergonomique et une facilitation des tâches d'assemblages en industrie lors d'une IpHR.

## 2.1 Introduction

Les critères les plus importants pour chaque IpHR sont l'intuitivité et la transparence de la commande. Cependant, ces critères sont subjectifs du fait qu'ils dépendent des préférences des opérateurs qui représentent, en soi, une partie intégrante de ces systèmes complexes.

Dans ce sens, l'objectif principal des travaux de recherche présentés dans ce mémoire est de concevoir des outils capables de satisfaire une interaction plus transparente, sécuritaire et ergonomique. Plus spécifiquement, les objectifs portent sur l'intégration d'un observateur de vibrations actif, de type réseau de neurones artificiel, pour la détection et la minimisation des vibrations mécaniques et d'un guide haptique, interfacé par la technologie RA, pour l'assurance d'une assistance ergonomique lors des IpHRs.

Ainsi, pour parvenir à atteindre les objectifs fixés, nous nous intéressons, tout d'abord, à introduire les modèles des commandes et des observateurs les plus utilisés dans un contexte d'IpHR. Ensuite, nous étudierons les concepts clés utilisés dans la RA. Par la suite, nous traiterons globalement de la notion de l'haptique. Enfin, nous apporterons une attention particulière sur les systèmes combinant le rendu haptique et la RA.

## 2.2 Commande par impédance et par admittance

Les commandes les plus utilisées dans le domaine de l'IpHR, sont les commandes par impédance et par admittance [23, 24]. Ces deux commandes ont

l'avantage de s'adapter au comportement humain et au monde réel et sont donc les plus aptes à rendre une coopération humain-robot plus intuitive et plus performante [24]. En effet, le concept de ces deux commandes est de rendre aux systèmes robotiques un comportement similaire à un système virtuel masse-ressort-amortisseur découplé [24-26]. Cependant, leurs définitions et leurs domaines d'application diffèrent [24]. En effet, la commande par impédance, dans le cas d'une trajectoire en consigne, est un modèle de commande en force qui prend en entrée un déplacement (c.-à-d. la trajectoire due à une collision avec une surface virtuelle) et réagit avec une force en sortie [27]. La commande par admittance, quant à elle, prend en entrée une force et réagit avec un déplacement en sortie [28, 29]. Une telle différence implique des comportements distincts en pratique. D'ailleurs, chaque commande aura des avantages et des inconvénients selon son contexte d'application [24].

Cette section présentera une revue de la littérature sur ces deux commandes. Nous commençons, tout d'abord, avec la commande par impédance.

### 2.2.1 Commande par impédance

Elle se présente comme la commande en force (figure 4) la plus courante et la plus utilisée dans la littérature pour diverses applications en haptique [30]. En effet, elle représente le modèle le plus facile à utiliser pour obtenir une interaction stable avec une surface rigide lorsque le mécanisme possède peu d'inertie et peu de friction. Dans ce cas, avec la commande en impédance, il est plus difficile de compenser des inerties et la friction considérant l'absence d'un capteur d'efforts [24] [31]. Cependant, avec

une telle commande, le capteur de force n'est pas nécessaire ce qui représente un avantage considérant son coût d'achat élevé.

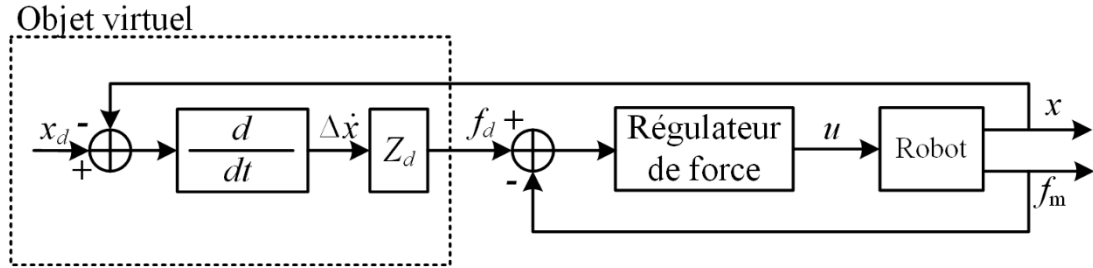


Figure 4 : Commande par impédance avec retour de force où  $x_d$  est la position désirée,  $\dot{x}$  est la vitesse,  $Z_d$  est l'impédance,  $f_d$  est la force désirée,  $u$  est la commande et  $f_m$  et  $x$  sont respectivement la force et la position mesurées [32].

Bien que cette commande puisse être mise en œuvre de différentes manières, une forme est présentée ici. Dans ce sens, la force à rendre (c.-à-d. force désirée), provenant d'un objet virtuel, pour un mécanisme à 1-DDL peut s'écrire suivant la deuxième loi de Newton comme suit [24]:

$$f_d = k_v(x_d - x) + c_v(\dot{x}_d - \dot{x}) + m_v(\ddot{x}_d - \ddot{x}). \quad (1)$$

où  $m_v$ ,  $c_v$  et  $k_v$  sont l'inertie, l'amortissement et la raideur **virtuels** simulés.  $x$ ,  $\dot{x}$ ,  $\ddot{x}$  sont, respectivement, les vecteurs de positions, de vitesses et d'accélération cartésiennes mesurées,  $x_d$ ,  $\dot{x}_d$ ,  $\ddot{x}_d$  sont, respectivement, les vecteurs de positions, de vitesses et d'accélération cartésiennes désirés.

Il serait possible de rendre cette force en boucle fermée en utilisant un capteur de force. De plus, un accéléromètre permettrait de compenser l'inertie du mécanisme. Cependant, en pratique, la récupération de l'accélération du système s'avère une procédure délicate et difficile à cause des erreurs de mesure et de la dérivée du signal bruité. Cette commande n'est donc généralement pas utilisée telle quelle.

Avant de présenter la commande à utiliser en pratique, nous allons nous intéresser tout d'abord à la compensation des termes dynamiques du mécanisme qui n'est pas représentée dans la figure 4. Ainsi, la compensation à appliquer pour les termes dynamiques dans le but d'améliorer le rendu est :

$$f_c = c(\dot{x})\dot{x} + m\ddot{x} + h_N(x), \quad (2)$$

où  $f_c$  est la force de compensation à ajouter avant la commande,  $m$  est la matrice d'inertie,  $h_N(x)$  est le vecteur du terme de gravité,  $c(\dot{x})$  est le terme de Coriolis et des forces centripètes du mécanisme. Habituellement, il n'y a pas de raideur à compenser sur le mécanisme haptique (c.-à-d.  $k = 0$ ).

Toutefois, il est difficile d'obtenir une bonne estimation du terme  $\ddot{x}$ . La compensation du terme inertiel n'est donc généralement pas utilisée sans l'utilisation d'un capteur de force ou d'un accéléromètre. La présence de deux capteurs supplémentaires peut rendre la compensation du terme inertiel et de friction possible en utilisant, respectivement, un accéléromètre (avec l'inertie réelle du mécanisme) et un capteur de force. Des algorithmes de compensation de la friction, comme LuGre, permettent d'estimer  $c(\dot{x})$ , mais cela demeure complexe en pratique et ne donne pas nécessairement de bons résultats. Ainsi, on pose  $c(\dot{x}) = 0$ .

Par la suite, on additionne les équations (1) et (2) pour trouver la consigne finale :

$$f_c + f_d = m\ddot{x} + h_N(x) + k_v\Delta x + c_v\Delta\dot{x} + m_v\Delta\ddot{x}. \quad (3)$$

Dans la figure 4, si un capteur de force est ajouté, on obtiendrait l'erreur de force :  $e = f_c + f_d - f_m$ . Habituellement, un moteur n'est pas commandé en force, mais en courant circulant dans l'armature ( $i_d$ ) du moteur en utilisant la relation linéaire :  $\tau_d =$

$k_t i_a$ , avec  $k_t$  la constante de torque du moteur. Pour retrouver la force, il suffit de connaître le bras de levier ( $d$ ) entre l'arbre du moteur et le point d'application de la force :  $\tau_d = (f_c + f_d) \times d$ . La commande par impédance, incluant le retour haptique de l'équation (1) et la compensation des termes dynamiques du mécanisme, devient donc :

$$f_c + f_d = m(\ddot{x}_d + m_v^{-1}[f_d - k\Delta x + c(\dot{x})\Delta\dot{x}]) + h_N(x) + f_d. \quad (4)$$

À partir de l'équation (4) et le principe du travail virtuel  $\tau_d = J^T F_d$ , il est possible de généraliser le système d'équation pour un système général à plusieurs degrés de liberté. Dans ce qui suit, la lettre majuscule représente une matrice, soit la version généralisée du scalaire en lettre minuscule. Ainsi, la commande par impédance serait [24, 33] :

$$\tau_d = MJ^{-1}[-j\dot{\theta} + \ddot{x}] + h_N(\theta, \dot{\theta}) + J^T(M_v\Delta\ddot{x} + C_v\Delta\dot{x} + K_v\Delta x). \quad (5)$$

où  $J$  est la matrice Jacobienne du mécanisme robotique et  $\tau$  est le vecteur de torques désiré à appliquer aux moteurs. Aussi,  $\Delta x = x_d - x$ ,  $\Delta\dot{x} = \dot{x}_d - \dot{x}$ ,  $\Delta\ddot{x} = \ddot{x}_d - \ddot{x}$ ,  $M$  est la matrice d'inertie réelle,  $M_v$  est la matrice d'inertie virtuelle (c.-à-d. la masse que nous désirons ressentir, lors d'une IpHR, au lieu de la masse réelle qui peut être lourde),  $K_v$  est la matrice de raideur virtuelle,  $C_v$  est la matrice d'amortissement virtuel,  $J$  est la matrice Jacobienne du mécanisme robotique,  $\theta$  est le vecteur de positions angulaires,  $\dot{\theta}$  est le vecteur de vitesses angulaires aux articulations du mécanisme robotique.

La force du système dynamique désirée s'écrit comme suit :

$$F_d = M_v\Delta\ddot{x} + C_v\Delta\dot{x} + K_v\Delta x. \quad (6)$$

L'accélération mesurée du système serait donc :

$$\ddot{x} = \ddot{x}_d + M_v^{-1}(C_v\Delta\dot{x} + K_v\Delta x - F_d). \quad (7)$$

Finalement, afin d'éviter la mesure de l'accélération, on peut remplacer (7) dans (5) et la loi de la commande, mise en œuvre, devient :

$$\tau_d = MJ^{-1}[-j\dot{\theta} + \ddot{x}_d + M_v^{-1}(C_v\Delta\dot{x} + K_v\Delta x - F_d)] + h_N(\theta) + J^T F_d, \quad (8)$$

Dans ce qui suit, nous allons présenter quelques applications réalisées avec cette commande afin de démontrer sa faisabilité.

### 2.2.2 Applications de la commande par impédance

L'objectif terminal de ce projet de recherche consiste à assister les opérateurs, grâce à des mécanismes robotiques, dans la réalisation de leurs tâches qui seraient difficiles et complexes en absence de ces machines. Une telle assistance suppose un certain niveau de transparence des imperfections des systèmes pour les humains. Ceci peut être réalisé grâce à une perception efficace des intentions de l'opérateur et des environnements de travail des opérateurs. Plusieurs chercheurs ont été intéressés à ce sujet. En effet, certains précurseurs, dont Tsumugiwa et al. [30], ont exploré une technique de commande par impédance, telle que représentée dans la figure 5, permettant de varier un coefficient de viscosité en fonction de la valeur estimée de la rigidité du bras humain.



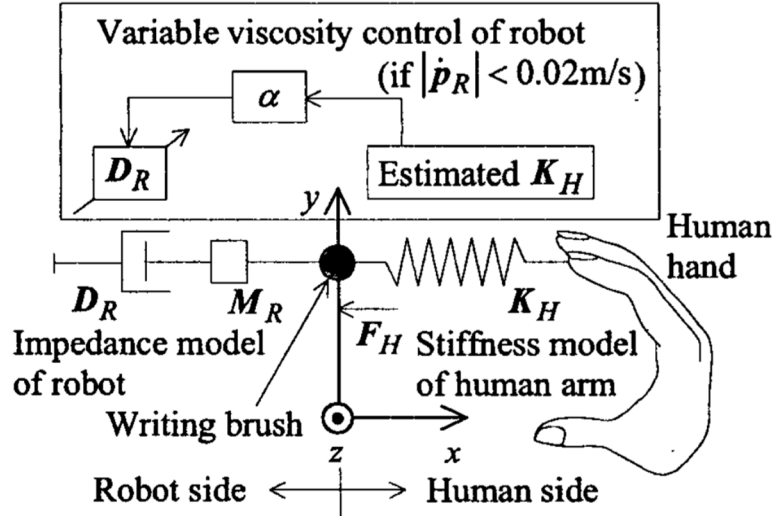


Figure 5 : Modèle d'impédance utilisé par Tsumugiwa et al. [30].

De plus, nous retrouvons le travail d'Ikeura et al. [34] dans lequel ils ont proposé d'utiliser une méthode de commande par impédance variable en fonction du seuil de la vitesse du mécanisme. Par surcroît, Tsuji et al. [35] ont utilisé un modèle de commande par impédance, représenté dans la figure 6, dans le but d'effectuer une investigation des caractéristiques de contrôle de l'opérateur tout en se basant sur les propriétés d'impédance du robot.

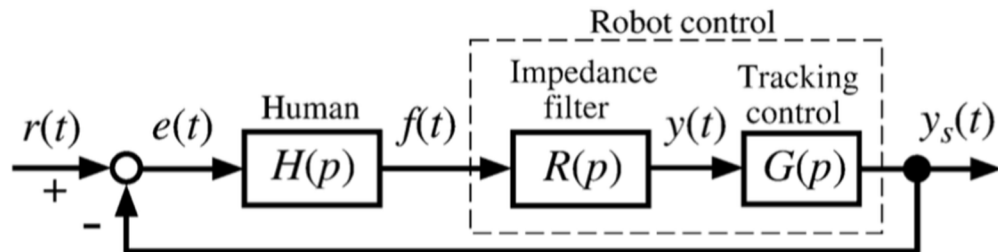


Figure 6 : Structure de régulation du système humain-robot où  $r(t)$  est le signal désiré,  $e(t)$  est l'erreur de contrôle,  $H(p)$  est le modèle humain,  $f(t)$  est la force de la main,  $R(p)$  est le modèle de l'impédance,  $y(t)$  est la position désirée,  $G(p)$  est le suivi de la régulation et  $y_s(t)$  est la position du robot [35].

### 2.2.3 Commande par admittance

La commande par admittance, représentée dans la figure 7, est un modèle de commande en force qui prend en entrée une force et réagit avec un déplacement en

sortie [28, 29]. La commande par admittance, contrairement à la commande par impédance, est moins courante dans la littérature. Cependant, des travaux très récents ont été proposés [36, 37] dans le contexte de l'assemblage de pièces automobile. Elle est souvent utilisée avec les systèmes mécatroniques caractérisés par du frottement et de l'inertie élevés. De plus, avec ce type de mécanisme, cette commande favorise le rendu de faibles inerties virtuelles, la réduction de l'impact du frottement et l'obtention des contacts stables avec des murs virtuels hautement rigide. Cet avantage rend cette commande la plus adaptée à notre situation du fait que nous traiterons des applications où les charges à déplacer sont lourdes et où l'assemblage est réalisé avec un guide haptique. Cependant, cette commande nécessite une attention particulière afin d'assurer des interactions stables avec des surfaces rigides [24] ou avec l'humain. Cet aspect sera traité dans le prochain chapitre et consistera en une des contributions de nos travaux de recherche.

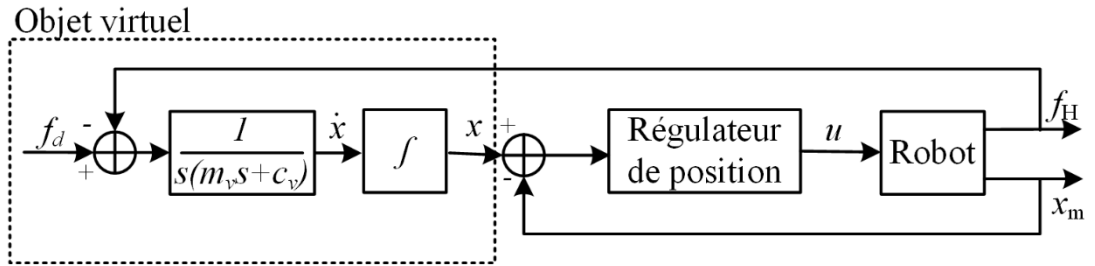


Figure 7 : Commande par admittance avec un retour de force où  $f_d$  est la force désirée,  $\dot{x}$  est la vitesse,  $x$  est la position,  $u$  est la commande et  $f_H$  et  $x_m$  sont respectivement la force et la position mesurées [32].

Pour un système à 1-DDL, le modèle impliqué dans la commande par admittance serait [24]:

$$f_H = m_v(\ddot{x}_d - \ddot{x}) + c_v(\dot{x}_d - \dot{x}) + k_v(x_d - x) \quad (9)$$

où  $f_H$  est la force d'interaction (c.-à-d. la force appliquée par l'humain),  $m_v$  est la masse virtuelle,  $c_v$  est l'amortissement virtuel,  $x_d$  est la position désirée et  $x, \dot{x}, \ddot{x}$  sont,

respectivement, la position, la vitesse et l'accélération cartésienne mesurée. On suppose aussi une consigne nulle à l'entrée ( $f_d = 0$ ).

Pour simuler un mouvement libre, la raideur  $k_v$ , la position désirée  $x_d$ , la vitesse désirée  $\dot{x}_0$  et l'accélération désirée  $\ddot{x}_0$  sont posées égales à zéro. À cet effet, l'équation d'admittance devient :

$$f_H = m_v \ddot{x} + c_v \dot{x} \quad (10)$$

Il est à noter que la trajectoire suivie par le robot peut être prescrite comme étant une position désirée ou une vitesse désirée. Ainsi, la commande en vitesse est :

$$\frac{V_d(s)}{F_H(s)} = \frac{1}{m_v s + c_v} \quad (11)$$

Et, le modèle de la commande en position serait :

$$\frac{X_d(s)}{F_H(s)} = \frac{1}{s(m_v s + c_v)} \quad (12)$$

où  $X_d(s)$  est la transformée de Laplace de  $x_d(t)$ ,  $F_H(s)$  est la transformée de Laplace de  $f_H(t)$  et  $s$  est la variable de Laplace. Évidemment, dans un système numérique, il resterait à appliquer la transformée en Z avec, par exemple, la méthode de Tustin (bilinéaire).

#### 2.2.4 Applications de la commande par admittance

Plusieurs travaux de recherches ont été intéressés à ce type de commande. En effet, Corteville et al. [38] détaillent une technique utilisant une commande par admittance, présentée dans la figure 8, pour la réalisation d'une interaction efficace des

mécanismes robotiques en considérant les forces générées par les opérateurs et en se basant sur une estimation de leurs mouvements prévus.

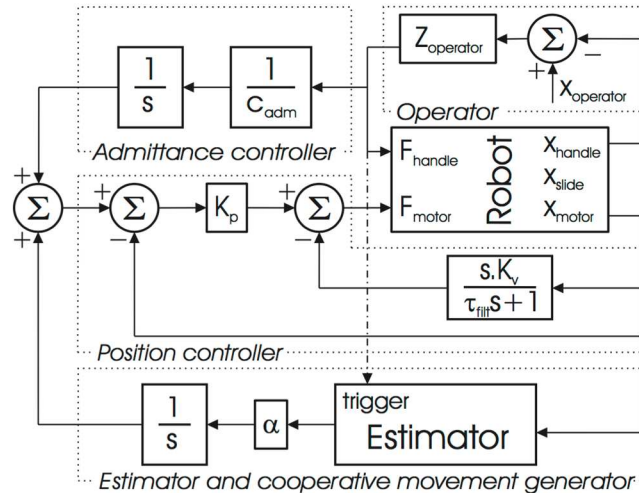


Figure 8 : Le système de contrôle par admittance de Corteville et al. [38].

Toutefois, la stabilité seule n'est pas capable d'assurer une interaction physique naturelle, intuitive et sans une entrave à la performance humaine. À cet effet, Lecours et al. [39] proposent une méthode de commande par admittance variable basée sur une inférence des intentions humaines tout en ayant recours à la vitesse et à l'accélération désirée, comme le montre la figure suivante.

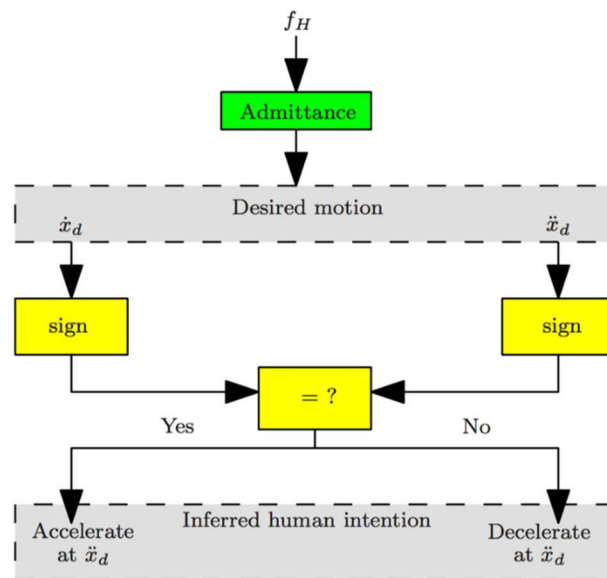


Figure 9 : Schéma utilisé pour inférer l'intention humaine [39].

De même, Duchaine et al. ont présenté dans [40] une nouvelle approche, représentée dans la figure 10, qui consiste à utiliser une commande en vitesse et un modèle de commande par admittance (bien qu'il soit écrit impédance variable dans la figure 10, cela demeure une commande par admittance) variable utilisant la différenciation de la force comme un capteur naturel de l'intention humaine.

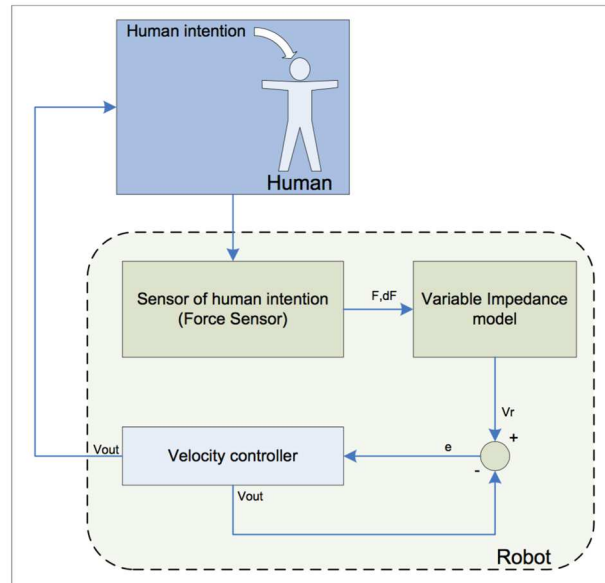


Figure 10 : Schéma de contrôle par impédance variable de Duchaine et al. [40].

De plus, Duchaine et al. [23] étalent et détaillent une nouvelle approche d'une commande robuste assurant une meilleure stabilité des mécanismes robotiques interactifs ainsi qu'une interaction intuitive. Cette approche se base sur une combinaison d'un observateur de stabilité et une commande par admittance variable en fonction de l'intention humaine. Cette dernière sera obtenue grâce à une mesure du taux de changement des caractéristiques de la force telles que l'amplitude et la direction. Ainsi, le coefficient d'amortissement, défini comme le coefficient d'impédance/admittance le plus dominant dans le contexte de l'*Interaction Humain-Robot* (IHR) [25], sera ajusté comme suit : une augmentation de l'amplitude de la force, interprétée comme une intention à accélérer, provoque automatiquement une réduction

du coefficient d'amortissement du fait qu'il se présente comme un moyen de freinage. De plus, l'observateur de stabilité, utilisé dans cette approche [23], a été conçu pour adapter l'admittance virtuelle, en temps réel, et ce dans le but de satisfaire une coopération stable en toutes circonstances grâce à un ajustement efficace de l'amortissement. Cependant, cette technique n'est pas toujours pertinente. En effet, l'ajustement de l'amortissement ne permet pas toujours de déplacer le lieu des racines (c.-à-d. la dynamique) dans une région adéquate. Pour cette raison, l'ajustement du gain de boucle pourrait être une solution potentiellement intéressante. Cette solution sera la préoccupation centrale de ce projet de recherche.

### 2.3 Observateurs et régulateurs de passivité

La commande par admittance pourrait présenter, dans des situations caractérisées par une rigidité élevée de l'opérateur, des mouvements vibratoires des mécanismes robotiques. Ce type de mouvements pourrait être interprété comme une instabilité des systèmes susmentionnés lorsque la vibration soit caractérisée par une croissance exponentielle jusqu'à la saturation des amplificateurs et du moteur. Pour cette raison, il est possible d'ajouter des algorithmes en mesure de modifier la dynamique des systèmes afin de conserver le lieu des racines proche de l'axe imaginaire, sans toutefois le déplacer dans la zone instable. Ainsi, dans cette section, une revue présente les différentes techniques utilisées dans le but de satisfaire une coopération plus intuitive exempte de vibrations. Pour ce faire, nous commençons, tout d'abord, par définir les notions de la passivité, de l'observateur de passivité et du régulateur de passivité. Ensuite, nous citerons les travaux antérieurs réalisés avec ces deux techniques pour l'assurance de l'intuitivité des interactions.

### 2.3.1 La passivité

Le théorème de la passivité est généralement utilisé pour la commande des dispositifs haptiques et des systèmes de téléopération avec des délais variables [24]. D'une manière générale, un système passif est stable, mais pas nécessairement exempt de vibrations qui pourraient être générées à cause des pôles complexes conjugués près de l'axe imaginaire. En outre, l'introduction de l'humain dans la boucle de commande peut rendre ce système potentiellement instable, car l'humain a la capacité d'augmenter le gain de boucle suffisamment pour déplacer les pôles près de l'axe imaginaire et même les déplacer vers la zone instable. Cette situation peut être corrigée grâce à un observateur et un régulateur de passivité qui auront comme objectifs : 1) la mesure de la passivité (c.-à-d. l'observateur de passivité) et la modification de l'amortissement de la boucle de commande (c.-à-d. le régulateur de passivité). Ces deux techniques seront détaillées dans les deux prochaines sections.

### 2.3.2 Observateur de passivité (PO)

Cet observateur permet de mesurer les flux d'énergie entrant et sortant des différents éléments constitutifs du système en utilisant l'équation suivante :

$$E_{obsrv}(n) = \Delta T \sum_{k=0}^n f(k)v(k) \quad (13)$$

où  $\Delta T$  est la période d'échantillonnage,  $f$  est la force admissible et  $v$  est la vitesse.

Cette mesure est l'indice auquel nous nous référons pour obtenir une information sur la stabilité. En effet, l'énergie peut être soit positive pour démontrer la stabilité du système, ou négative pour démontrer son instabilité [41]. Dans ce sens, si la valeur de

ce calcul est négative à un moment particulier, alors nous pouvons conclure que le système est devenu instable et que la valeur exacte de l'énergie générée, qui causait l'instabilité, est égale à une valeur de  $-E_{obsrv}(n)$  (équation 13). Cette équation de base peut être améliorée par l'ajout de seuils pouvant représenter des non-linéarités dans le système réel. Les applications qui sont présentées dans les prochaines sections donneront quelques détails sur des améliorations possibles de cette équation.

### 2.3.3 Régulateur de passivité (PC)

Pour régler l'instabilité des systèmes, nous pouvons utiliser un régulateur de passivité défini comme étant un élément dissipatif qui absorbe l'énergie mesurée par le PO. En effet, à partir de la valeur obtenue par (13), nous pouvons concevoir un élément variable dans le temps pour dissiper la quantité nécessaire d'énergie. Nous appellerons cet élément un régulateur de passivité (PC). Ce dernier prend la forme d'un élément dissipatif en série ou dans une configuration parallèle comme le montre la figure 11 [41]. Ces deux configurations obéissent à l'équation suivante :

$$f = \alpha v \quad (14)$$

où  $\alpha$  est un élément d'amortissement réglable comme suit :

$$\alpha(n) = \begin{cases} -\frac{E_{obsrv}(n)}{\Delta T v_2(n)^2}, & \text{si } E_{obsrv}(n) < 0 \\ 0, & E_{obsrv}(n) \geq 0. \end{cases} \quad (15)$$



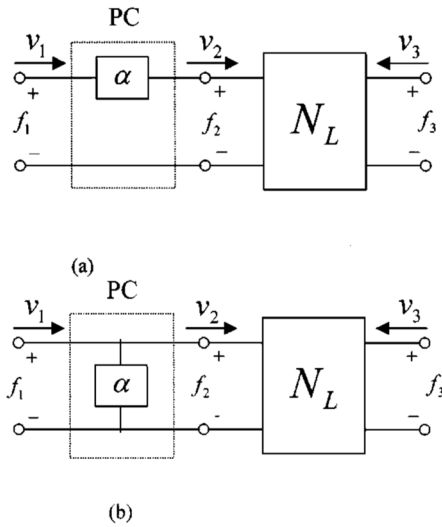


Figure 11 : Régulateur de passivité en série (a) et en parallèle (b) où  $f_1, \dots, f_M$  sont les forces,  $v_1, \dots, v_M$  sont les vitesses,  $\alpha$  est l'élément d'amortissement et  $N_L$  est le numéro de port.

### 2.3.4 Applications du régulateur et de l'observateur de passivité

La passivité est un outil intéressant pour l'analyse des problèmes de la stabilité découlant de l'IpHR. Cet outil a été utilisé par plusieurs chercheurs dans différentes applications. En effet, des études ont été réalisées avec la notion de la passivité pour garantir une téléopération à retour de force avec un retard comme le montre la figure suivante [42, 43] :

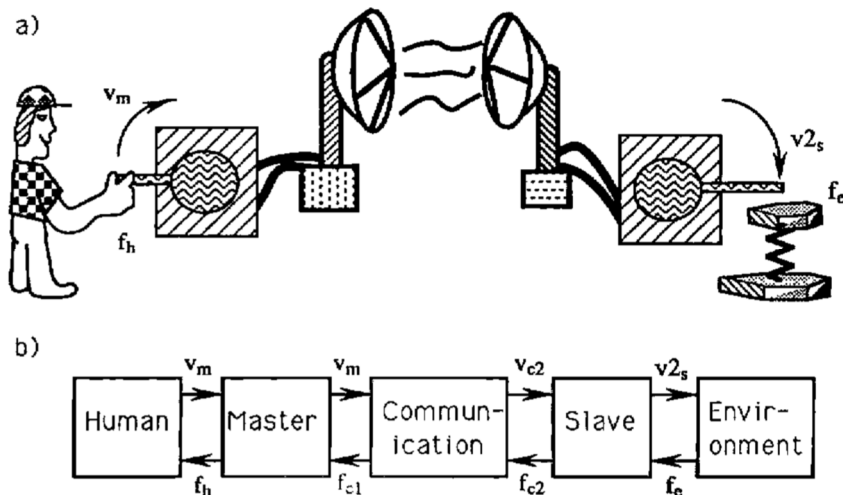


Figure 12 : (a) Un téléopérateur bilatéral à un 1-DDL, (b) diagramme de bloc [42].

Par ailleurs, Katharina et al. [44] ont utilisé le principe de la passivité pour assurer une estimation exacte et efficace de l'énergie physique d'un système haptique à plusieurs degrés de liberté. La figure 13 montre la performance des méthodes d'estimation de l'énergie du système à télé-opérer (un KUKA LWR). Ces méthodes sont évaluées en les comparant à une meilleure courbe d'estimation  $E_b$  qui est calculée en utilisant les vitesses mesurées et non pas les vitesses estimées.

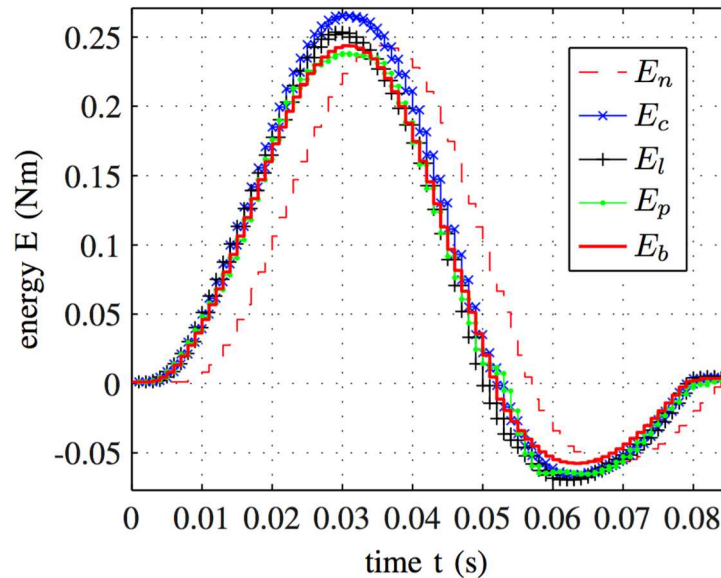


Figure 13 : Performance des méthodes d'estimation de l'énergie où  $E_n$  représente aucune estimation,  $E_c$  représente une vitesse constante,  $E_l$  représente une estimation linéaire de la vitesse,  $E_p$  représente une estimation polynomiale de la vitesse et  $E_b$  représente la meilleure courbe d'estimation (utilisée comme une référence) [44].

De plus, Hannaford et al. [41] ont testé la théorie de la passivité tout en faisant une simulation avec un dispositif haptique. Avec ce même dispositif, Ryu et al. [45] ont utilisé le même principe introduit par Hannaford et al., mais en tenant compte de la variation de la vitesse durant une période d'échantillonnage.

Dans certains cas, la théorie de la passivité peut engendrer un mode à haute fréquence dans les dispositifs haptiques. Dans ce sens, Ryu et al. [46] ont proposé d'utiliser un seuil d'énergie désiré variant dans le temps au lieu d'un seuil fixé à zéro,

et de rendre l'énergie actuelle entrante dépendante du comportement de ce seuil. Grâce à une telle variation, les auteurs ont pu rendre l'action de contrôle du PC plus lisse et sans comportement impulsif lors de la distribution de la dissipation. Ainsi, dans le but de vérifier la performance de leur approche, ils ont testé leurs résultats sur un dispositif haptique commercial intitulé « *PHANToM* » avec un environnement virtuel à très haute rigidité. Ensuite, ils ont eu recours à une référence au modèle afin d'ajuster la valeur de l'énergie comme le montre la figure 14 ; l'un avec un seuil d'énergie fixé à zéro, pour le PO, et l'autre avec un seuil d'énergie (utilisée comme une référence) variant dans le temps qui va être suivi par l'énergie actuelle du système. Pour le premier observateur, il a été constaté que le PC ne s'active que lorsque le PO atteint le seuil d'énergie (le zéro) à la fin du contact. Ceci rend la valeur du PC de plus en plus grande, chose qui est indésirable du fait qu'une telle valeur peut apporter un mode de vibration en haute fréquence aux dispositifs.

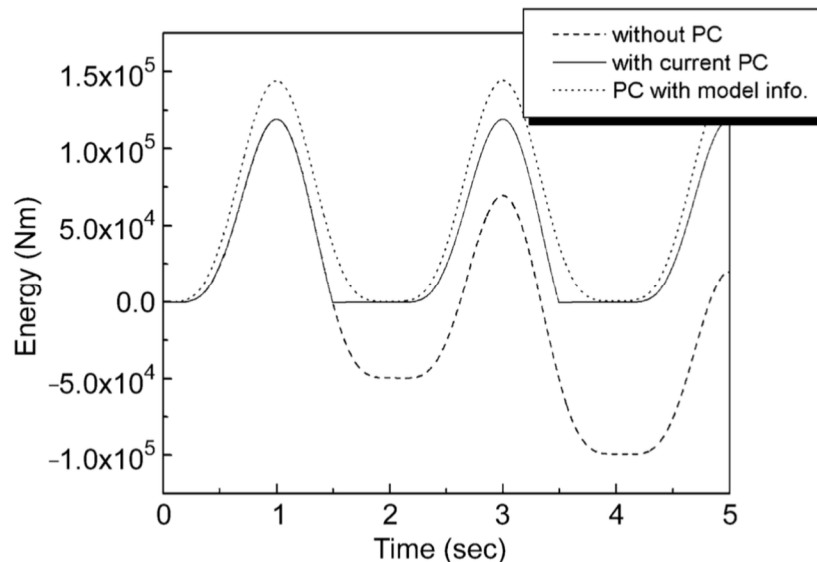


Figure 14 : Deux manières différentes pour rendre le comportement actif d'un système passif ; la ligne discontinue (sans PC) représente le résultat de l'énergie lorsqu'aucun régulateur de passivité n'est utilisé. La ligne continue représente le résultat de l'énergie lorsqu'un régulateur de passivité avec un seuil fixé à zéro est utilisé (avec un PC) et la ligne en pointillée représente le résultat de l'énergie lorsqu'un régulateur de passivité avec un seuil variant dans le temps est utilisé (PC avec une référence au modèle) [46].

Enfin, il revient à dire que les auteurs ont pu vérifier que leur approche était performante dans la stabilisation des dispositifs haptiques sans génération des excitations dans le mode interne du système. Cependant, cette approche est, en quelque sorte, trop conservatrice avec des répercussions négatives sur la transparence du mécanisme haptique. De plus, il a été démontré que cette méthode ne permet pas d'éliminer les vibrations qui ne sont pas liées à une instabilité [36].

#### 2.4 Stabilité via un observateur de type réseau de neurones artificiels

Une autre solution visant à analyser et à assurer la stabilité des mécanismes robotiques est l'utilisation d'un réseau de neurones artificiels. Ce dernier, représenté dans la figure 15, a été utilisé dans la plupart des travaux de recherche comme un observateur de vibrations visant à détecter et à minimiser les vibrations mécaniques affectant la durée de vie normale des machines industrielles et provoquant ainsi des coûts de maintenance très élevés [47].

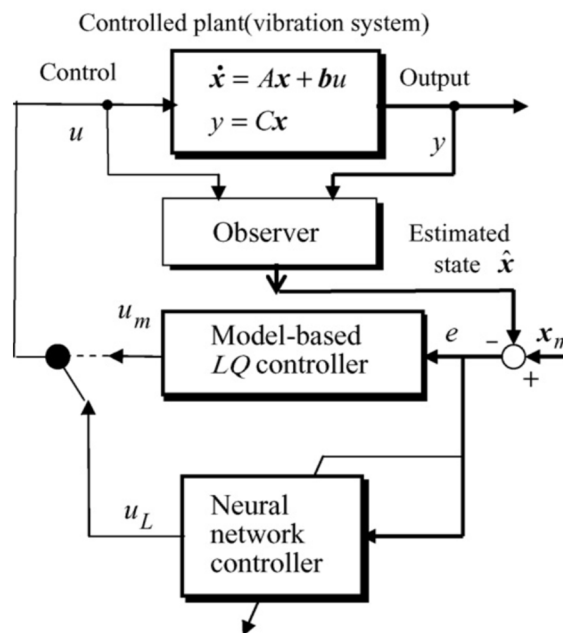


Figure 15 : Système actif de commande pour les vibrations basé sur un régulateur de type réseau de neurones artificiels [47].

Dans ce sens, plusieurs travaux de recherche ont été intéressés à utiliser un réseau de neurones artificiels comme un observateur dans le but d'assurer une analyse et un diagnostic des pannes, causées par des vibrations mécaniques, dans plusieurs machines électriques [48] [49] [50] [51]. D'autres travaux de recherche ont été intéressés à utiliser ce type d'observateur dans le but d'effectuer une classification des signaux des vibrations des roulements dans les engrenages des éoliennes [52]. En se basant sur cette revue, nous pouvons conclure que ce type d'observateur pourrait posséder une performance et une fiabilité suffisante dans une application d'identification des vibrations mécaniques. Ainsi, un observateur de type réseau de neurones artificiel sera utilisé ultérieurement dans ces travaux de recherche (chapitre 3) pour atteindre nos objectifs dans la détection et la minimisation des vibrations lors des IpHRs.

## 2.5 La réalité augmentée et le rendu haptique lors d'IpHR

Cette revue se veut une introduction brève et générale sur la RA et sur les interactions utilisant un rendu haptique. Elle s'avère importante pour la compréhension du reste du mémoire. Cette section présente, en premier lieu, la mise en œuvre de cette technologie et, en second lieu, ses applications en IpHR.

### 2.5.1 La réalité augmentée (RA)

L'une des applications envisagées pour assurer une IpHR ergonomique a été l'introduction des interactions haptiques avec des guides virtuels. Ces interactions sont dotées d'une exploitation simultanée des interactions à retour d'effort que l'utilisateur peut ressentir et des technologies de pointe d'animation graphique en RA. Récemment, cette technologie a révolutionné la façon dont nous observons le monde réel par une

addition d'informations et d'entités virtuelles dans une séquence du monde réel [53]. Les domaines d'applications de cette technologie sont variés : commençant par le domaine militaire jusqu'au domaine de la médecine, passant par le jeu vidéo, l'infographie et la télévision.

La RA a vu le jour grâce aux travaux de Sutherland [54], au milieu des années 60, même avant que les termes «réalité virtuelle (RV)» et «RA» aient été envisagés. En effet, en 1968, Sutherland inventa le premier casque à vision transparente qui combinait la vue de la réalité et une image de synthèse [55]. Évidemment limitée par les technologies de l'époque, elle permettait, cependant, à l'utilisateur de changer sa perception du monde réel grâce à une addition d'éléments virtuels dans notre espace réel [56]. Cette technologie en soi n'est qu'une représentation des graphiques, du texte et des modèles à trois dimensions (3D) dans un environnement réel. En effet, elle permet une augmentation de la scène réelle avec des informations supplémentaires permettant aux utilisateurs d'accéder au monde augmenté et de manipuler les objets 3D directement comme s'ils étaient des objets réels.

Cette technologie constitue une évolution chronologique de la technologie RV (c.-à-d. la RV consistait à immerger entièrement l'utilisateur dans un univers virtuel sans pouvoir interagir avec le monde réel). Ainsi, pour distinguer et clarifier ces deux concepts complémentaires, Paul Milgram, a proposé une unification de ces concepts sous le nom de la «réalité mixte» qui sous-entend un continuum passant du monde réel vers un environnement virtuel, comme le montre la figure suivante [55] :

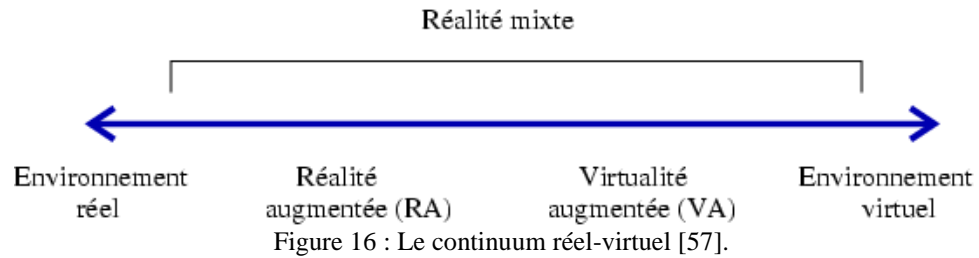


Figure 16 : Le continuum réel-virtuel [57].

### 2.5.2 Interactions à retour haptique

Le sens visuel seul n’est pas capable d’assurer une immersion et une interaction efficaces des humains dans des environnements virtuels. D’ailleurs, retirer le retour d’effort du volant lors de la conduite automobile ou la vibration combinée à la pression des touches du clavier lors de l’écriture pourrait réduire l’efficacité de la tâche. En effet, le sens du toucher constitue le second sens d’importance pour toutes les interactions physiques [53]. Dans ce sens, une exploitation simultanée de la modalité haptique incluant le retour d’effort que l’utilisateur peut ressentir et des technologies de virtualisation du monde réel avec la RA peut améliorer une interaction dans un environnement mixte. Cette exploitation simultanée, ou multi-modalité, sera l’une des préoccupations centrales de ce travail de recherche. Plus spécifiquement, les objectifs portent sur l’intégration d’un système virtuel interfacé par la technologie RA afin d’assurer une assistance robotique efficace lors d’une IpHR. Dans ce sens, une partie du travail de ce projet de recherche s’inscrit dans le cadre des systèmes à base d’environnements virtuels et augmentés (mixtes) interactifs qui mettent en jeu les modalités haptique et visuelle de l’humain. Dans ce qui suit, nous allons essayer de définir, plus en détails, les systèmes susmentionnés ainsi que la modalité haptique.

Tout d'abord, le mot « haptique » en général signifie sentir par le toucher. Il met en cause principalement deux modalités sensorielles (mais ne se limite pas à ces deux cas) [17]:

- La kinesthésie : s'occupe du sens du mouvement et qui, indépendamment de la vue et du toucher, nous renseigne sur les déplacements des différentes parties de notre corps et des forces appliquées par les muscles.
  - La proprioception<sup>3</sup> : fournit l'information sur l'endroit où les différentes parties du corps sont situées par rapport aux autres.
- Le sens tactile : nous renseigne sur des informations précises du contact de la peau avec des objets (textures, vibrations et douleur).

Ainsi, un système à retour haptique, assurant une reproduction des propriétés physiques d'un environnement virtuel, est une interface d'affichage homme-environnement virtuel combinant les interactions physiques humain-robot (IpHR) et humain-machine (IHM). Cette interface permet de donner aux utilisateurs l'opportunité de percevoir et d'interagir en temps réel avec les objets virtuels ajoutés dans l'environnement virtuel (RV) ou réel (RA) ou les deux (RM). Les domaines d'applications de ces systèmes sont variés ; commençant par le domaine médical jusqu'au domaine de l'ingénierie concurrente et le prototypage industriel multiutilisateur, passant par le jeu vidéo, le domaine d'apprentissage du pilotage et de la conduite d'engins complexes ainsi que la télé-opération pour le contrôle des systèmes à distance [17]. Ces systèmes haptiques visent à fournir aux utilisateurs une

---

<sup>3</sup> **La proprioception** souvent utilisé comme synonyme de kinesthésie (1880) qui tend à mettre davantage l'accent sur le mouvement.



perception kinesthésique réaliste du contact avec les objets virtuels simulés dans l'environnement virtuel ou réel (dans le cas de la télé-opération). Ceci est réalisé, comme le montre la figure 17, par le biais d'un dispositif mécatronique (c.-à-d. *Haptic Device*) et une interface ordinateur (c.-à-d. *Computer Interface*) associée permettant la connexion de l'utilisateur (c.-à-d. *Human Operator*) au monde virtuel [58].

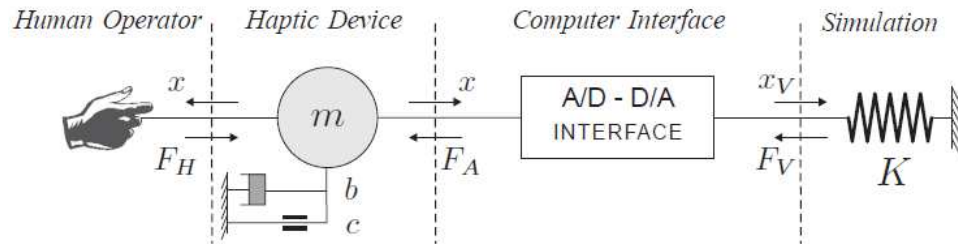


Figure 17 : Un seul degré de liberté d'une interface haptique rendant une rigidité virtuelle où  $m$  est l'inertie du dispositif haptique,  $b$  est la friction (visqueuse),  $c$  est le composant dynamique de Coulomb,  $x$  est la position,  $\dot{x}$  est la vitesse,  $F_H$  est la force appliquée par l'opérateur,  $F_A$  est la force exercée par l'amplificateur pour simuler la rigidité virtuelle  $K$  [58].

D'une manière générale, un algorithme typique pour un système à retour haptique se compose de plusieurs éléments comme le montre la figure 18. Nous identifions les trois composants les plus importants comme suit :

- le rendu haptique (loi de commande par impédance/admittance, détection des collisions) ;
- le rendu visuel et ;
- un moteur physique (calcul des vibrations et des propriétés physiques des objets virtuels).

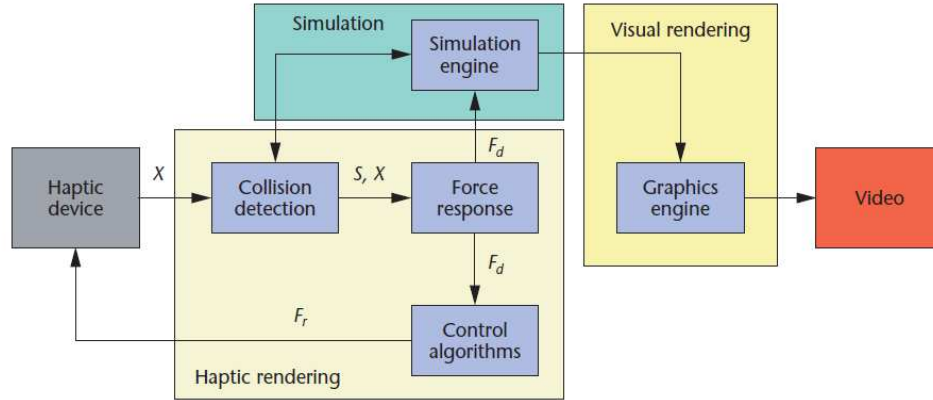


Figure 18 : Retour haptique dans trois blocs. L’algorithme de détection de collision fournit des informations sur les contacts entre un avatar et des objets dans l’environnement virtuel à la position  $\mathbf{X}$ . L’algorithme pour la réponse en force retourne la force d’interaction idéale  $\mathbf{F}_d$  entre un avatar et les objets virtuels. L’algorithme de commande retourne à l’utilisateur la force d’interaction idéale pour les meilleures capacités de l’appareil [59].

Plus spécifiquement, l’algorithme de détection de collision (c.-à-d. *Collision detection*) permet d’identifier et de détecter les collisions entre les objets virtuels et/ou un avatar<sup>4</sup> dans l’environnement virtuel et de fournir des informations sur où, quand et dans quelle mesure les collisions ont eu lieu. L’algorithme pour la réponse en force (c.-à-d. *Force response*), quant à lui, permet de calculer la force d’interaction entre les avatars et les objets virtuels en cas de collision. Cette force procurera une approximation, le plus fidèlement possible, des forces de contact qui devraient survenir lors d’un contact entre les objets réels. Finalement, l’algorithme de commande (c.-à-d. *Control algorithms*) assure la commande du dispositif haptique de manière à reproduire les efforts synthétisés par le moteur physique [59].

## 2.6 Les systèmes de réalité augmentée utilisant le rendu haptique

Cette section se veut une présentation des différents systèmes d’assistance des robots industriels basés sur la réalité augmentée dont le rendu haptique est utilisé, en

<sup>4</sup> Un **avatar** est une représentation virtuelle de l’utilisateur qui interagit physiquement avec l’environnement virtuel.

situation d'IpHR, visant à satisfaire une coopération plus intuitive et assistée lors des tâches de manipulation. Tout d'abord, nous commençons par une revue sur les guides haptiques dans le domaine des interactions 3D. Ensuite, nous traiterons de l'importance de ces guides et de la RA en situation d'IpHR.

### 2.6.1 Importance des guides haptiques dans le domaine des interactions 3D

La RV est une discipline qui se situe à la croisée de plusieurs domaines tels que l'infographie, la conception assistée par ordinateur, la simulation, la téléopération, l'audiovisuel et le travail collaboratif [56].

Cette technologie, capable de nous donner une autre manière de percevoir le monde réel, permet à l'humain d'interagir avec les entités virtuelles de l'environnement virtuel grâce à ce qu'on appelle une interaction multimodale 3D (ouïe, haptique, vision) définie comme étant la composante motrice de la RV. Dans ce sens, Sehat Ullah et al. [60] ont mis en cause l'importance de cette composante tant sur le niveau de l'enrichissement de l'environnement virtuel qu'au niveau des effets sur les performances des utilisateurs de cette technique. En effet, ils ont proposé deux guides haptiques dans un environnement virtuel à large échelle, le premier est sphérique et le deuxième est conique, permettant ainsi une interaction et une sélection 3D des objets dans trois zones d'interaction différentes ; soient la zone des manipulations libres, la zone du guide visuel et la zone du guide haptique. Cette dernière, assure une augmentation de la performance de l'utilisateur ainsi qu'une facilitation de la sélection des objets. En effet, nous trouvons dans [61] que l'utilisation des guides haptiques avec retour de force dans une tâche coopérative permet non seulement d'augmenter la

performance des utilisateurs de la technologie interactive 3D, mais aussi de renforcer le sentiment de coprésence<sup>5</sup> et de sensibilisation<sup>6</sup>. Ainsi, pour améliorer et augmenter l'immersion des utilisateurs dans les environnements virtuels et pour doter cette expérience d'un aspect réaliste, plusieurs modalités sensorielles doivent être ajoutées telles que l'haptique.

### 2.6.2 Importance de la RA dans le domaine de l'IpHR

De nos jours, les coûts très élevés de la programmation et de l'intégration de la robotique industrielle se présentent comme un obstacle pour la satisfaction des intérêts économiques des petites et moyennes entreprises. Comme solution à cette situation, Batu Akan et al. [62] ont proposé un langage multimodal incrémental utilisant la RA. Cette approche facilitera la reprogrammation des robots par les techniciens qui travaillent dans les chaînes de production et par conséquent diminuera les coûts liés à la programmation de ces mécanismes. De plus, il a été démontré avec plusieurs recherches que la RA fournit d'excellentes opportunités à l'IpHR, en occurrence dans le domaine de la télémanipulation et la télérobotique. Cette dernière, grâce à la RA, permet à l'opérateur de travailler comme s'il est présent dans l'espace de travail distant. Parmi les travaux de recherches qui ont étudié la RA dans le domaine de l'IpHR, nous citons le travail de Fang, H.C. et al. [63] qui réside dans la proposition d'un système de programmation des robots basés sur la RA (RPAR-II). Ce système assistera les

---

<sup>5</sup> **Coprésence** présence simultanée au même endroit.

<sup>6</sup> **Sensibilisation** processus par lequel un organisme ou une de ses parties sont rendus plus sensibles à toute stimulation (physique, chimique ou biologique), à laquelle ils étaient moins sensibles antérieurement.

utilisateurs dans le processus de la programmation des robots allant de la planification des tâches jusqu'à l'exécution de ces dernières comme le montre la figure suivante.

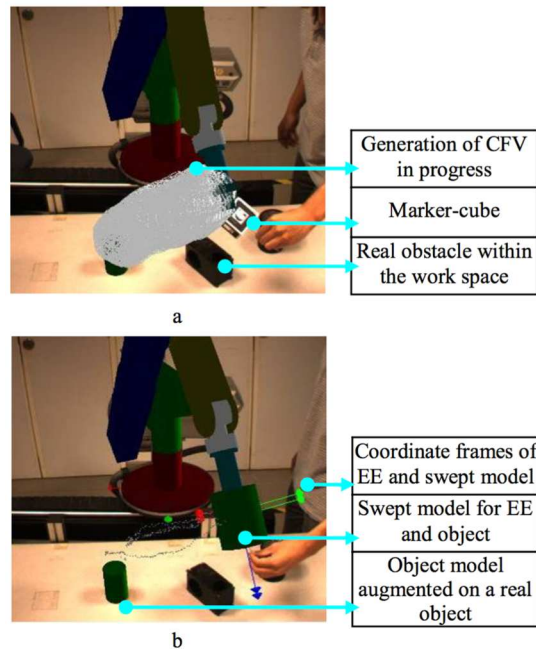


Figure 19 : Planification de trajectoire : (a) la génération d'un volume sans collision (CFV), (b) la sélection des points intermédiaires où EE est l'extrémité de l'effecteur [63].

De plus, Marin, R. et al. [64] ont proposé une interface utilisateur, représentée dans la figure 20, permettant la spécification des tâches avec un modèle 3D et l'envoi des commandes au robot réel une fois l'utilisateur effectue le choix de la tâche nécessaire.

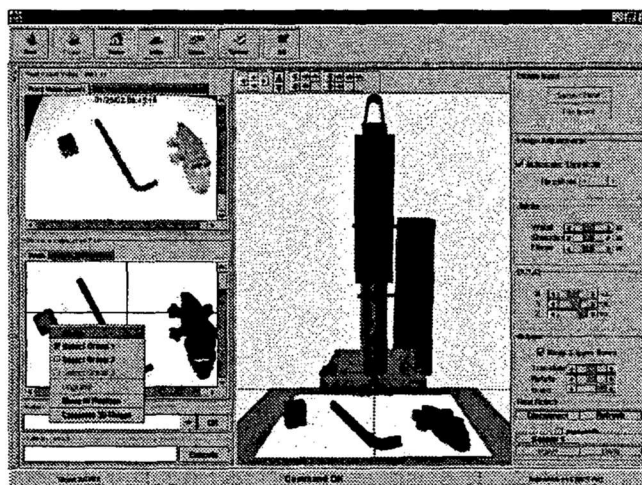


Figure 20 : Interface utilisateur en réalité augmentée pour la manipulation des objets [64].

Par surcroît, Carlos A. et al. [65] ont proposé une application qui permettra aux utilisateurs de faire des simulations et des télé-opérations d'un bras robotique grâce à une interface basée sur la RA comme le montre la figure suivante.

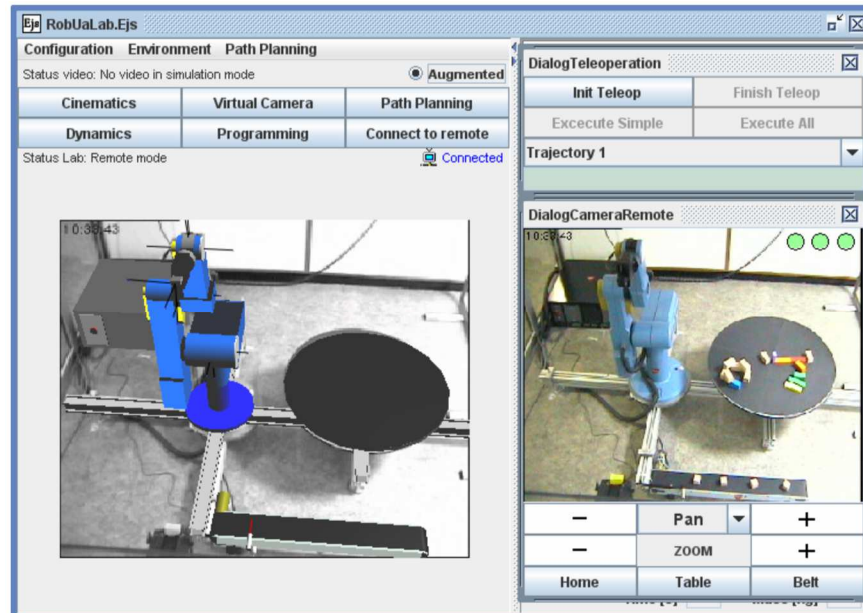


Figure 21 : Une interface en réalité augmentée pour la planification des trajectoires [65].

### 2.6.3 La RA en situation d'IpHR

Parmi les défis majeurs que le domaine de la robotique est en train de faire face est le design des systèmes pour l'IHR [66]. Un tel défi peut se complexifier lorsque l'interaction est réalisée avec un robot mobile situé à distance de l'utilisateur et lorsque la vue, assurée par la caméra, soit égocentrique. Pour remédier à ce type de problème, Scott A. Green et al. [67] ont proposé, comme le montre la figure 22, un système multimodal qui permet aux opérateurs d'interagir avec le robot tout en visualisant son environnement de travail avec une interface basée sur la RA.

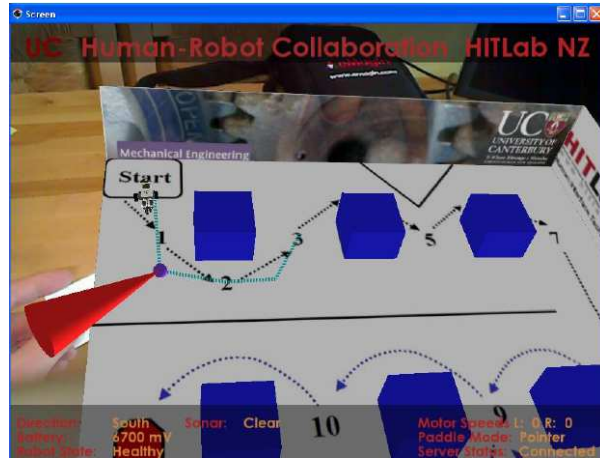


Figure 22 : Le système de la RA pour la planification [67].

Ce système accorde également la possibilité de discuter et de réviser les actions et les plans prévus par le robot avant toutes exécutions. Ainsi, de tels systèmes pourraient se présenter comme un moyen habile capable de seconder les employés fragilisés par des handicaps grâce à son assistance effective lors des IpHRs. Dans ce sens, plusieurs chercheurs ont été intéressés à ce sujet. En effet, Gunther Reinhart et al. [5] ont proposé plusieurs approches pour assurer une multitude de fonctions d'assistances ergonomiques et efficaces. Parmi ces approches, nous nous attarderons sur celle qui semble être la plus importante pour notre projet de recherche à savoir l'utilisation des murs, des convoyeurs ainsi qu'un guide virtuel. Les murs virtuels, représentés dans la figure 23, permettront d'éviter les collisions et de guider l'effecteur du robot tout au long d'un chemin prédéfini afin de réaliser des assemblages complexes. Les convoyeurs virtuels, représentés dans la même figure, assureront une augmentation de la vitesse de manipulation. En effet, pour accélérer le mouvement latéral, l'opérateur n'a qu'à conduire l'effecteur vers le mur virtuel assurant ainsi un mouvement latéral automatique jusqu'à ce qu'il atteigne la fin du convoyeur. De même, à l'intérieur du cône virtuel se retrouve une zone d'attraction, représentée dans la figure

24 par un modèle ressort-amortisseur virtuel, qui ajoutera une force virtuelle appliquée à la main de l'utilisateur permettant ainsi une orientation automatique de l'objet à assembler vers le centre du cône qui le conduira à son tour à la position souhaitée pour l'assemblage, malgré les occlusions visuelles ou les problèmes de dextérités humaines.

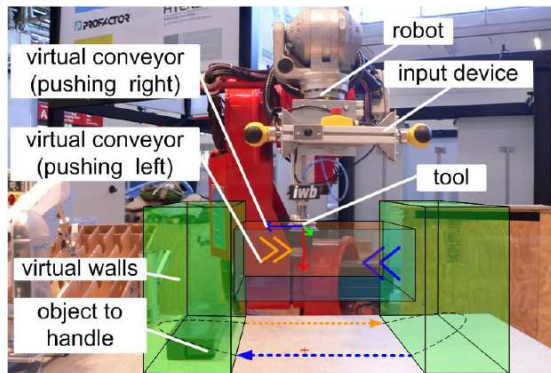


Figure 23: Convoyeurs et murs virtuels assurant le transport rapide des objets [5].

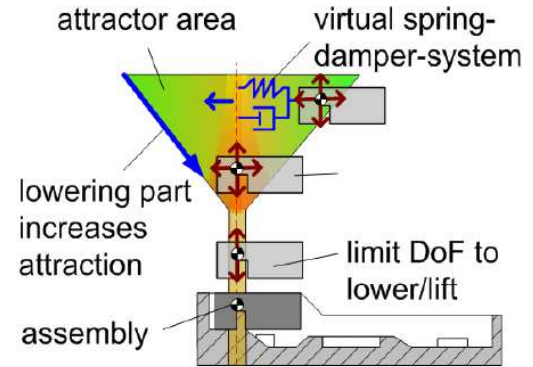


Figure 24: Suivre des objets grâce à un cône et une force virtuelle [5].

Otmane et al. [68] ont, quant à eux, proposé une interface de RA, pour des tâches de télé-opération des robots, utilisant un cône virtuel, comme le représente la figure 25. Ce système a été conçu dans le but d'assurer la sécurité des opérateurs et de réduire le besoin de concentration causé par la difficulté liée à la visualisation des tâches d'assemblages avec des caméras.

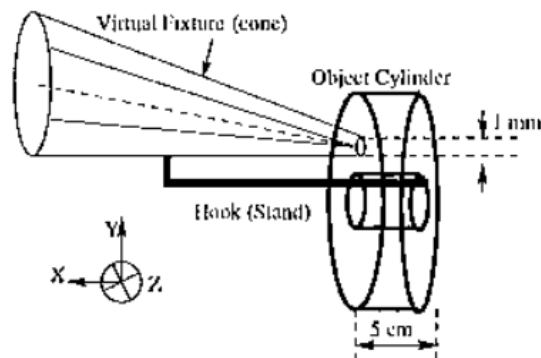


Figure 25 : Guide virtuel pour atteindre la cible [68].

Nous trouvons, aussi, le travail d'Ullah et al. [69] dans lequel ils ont proposé l'utilisation des guides haptiques attractifs et répulsifs avec la forme d'un cône, comme



le représente la figure 26. Ces guides assisteront les opérateurs pendant des tâches de manipulation ou d'évitement des objets virtuels afin d'augmenter leurs performances.

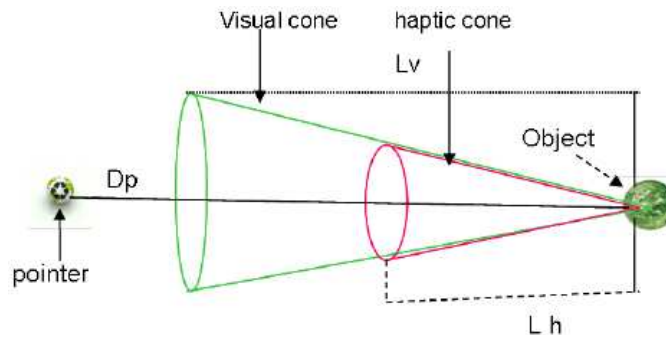


Figure 26 : Cône haptique proposé par Ullah et al [69].

En outre, la RA se présente aussi comme un remède aux problèmes rencontrés dans le domaine de la télé-opération. En effet, les champs de vision limités, les désalignements de l'écran de contrôle et les mauvaises perceptions peuvent se présenter comme une entrave aux opérateurs lors de leurs télé-opérations. Dans ce sens, Keshav Chintamani et al. [70] ont proposé une interface de RA, comme le montre la figure 27, pour garantir une génération des trajectoires dans de multiples vues de caméra exocentrique du robot à distance sous la forme d'aides visuelles.

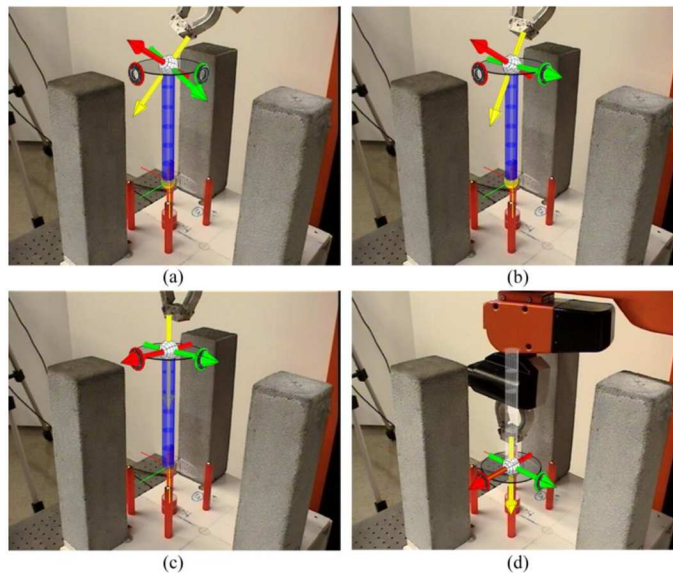


Figure 27 : Une interface basée sur la réalité augmentée pour garantir une génération des trajectoires [70].

De plus, la RA témoigne de plus en plus une importance notoire dans le domaine de la médecine qui ne cesse d'évoluer grâce au développement de la technologie. En effet, cette technologie a amélioré le quotidien des chirurgiens et a révolutionné leurs façons dont ils opèrent leurs patients malades. D'ailleurs, plusieurs recherches ont été intéressées à ce sujet, dont nous citons le travail de Michael Figl et al. [71] qui ont proposé un système de RA (grâce à un mélangeur de vidéo) pour un guidage par imagerie endoscopique des pontages aorto-coronaire. Nous trouvons aussi le travail de Volkmar Falk et al. [72] qui ont proposé un système de guidage basé sur la RA pour les angiographies par rayons X comme le montre la figure suivante.

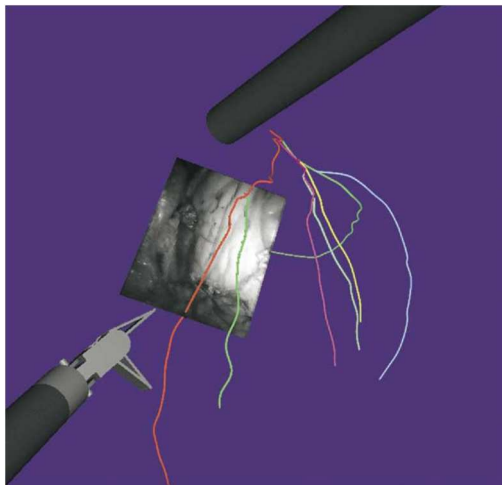


Figure 28 : Système de guidage basé sur la RA pour assurer une meilleure visibilité dans la chirurgie endoscopique [72].

## 2.7 Conclusion

Ce chapitre a introduit et présenté, en premier lieu, les modèles des commandes et des observateurs les plus utilisés dans le contexte d'IpHR visant à satisfaire les critères d'intuitivité, de performance et de stabilité des systèmes robotiques. De même, à travers ce chapitre, nous avons présenté les recherches antérieures de la RA et des interactions à retour haptique, en situation d'IpHR, qui ont été utilisées dans le but de

satisfaire une assistance ergonomique et efficace des opérateurs lors de leurs tâches d'assemblage et de manutention. Tout d'abord, les notions importantes comme la commande par impédance, la commande par admittance et les observateurs de stabilité comme le PO, le PC et le réseau de neurones artificiels sont abordés. Ensuite, les notions de la RA, la RV et le rendu haptique ont été définis pour assimiler l'utilité de la RA et du rendu haptique dans les IpHRs.

Suite à cette étude, il est possible de conclure qu'une commande transparente peut éventuellement assurer les critères d'intuitivité, de performance, de stabilités des systèmes robotiques lors d'une IpHR. De même, il est possible de déduire que la RA et le rendu haptique en situation d'IpHR s'avèrent des moyens habiles pour assurer des interactions plus sécuritaires, immersives et effectives. Ces deux technologies constituent de plus en plus des moyens incontournables dans le domaine de la robotique qui est, à son tour, utilisée dans plusieurs autres domaines comme la médecine, l'industrie, l'astronomie et le militaire. Cette technologie a donc un très grand potentiel dans la réduction des TMS.

Le prochain chapitre détaillera la méthodologie préconisée pour réaliser les objectifs fixés dans ce projet de recherche à savoir la conception des observateurs de vibrations (c.-à-d. l'analyse statistique et le réseau de neurones artificiels) pour la détection et la minimisation des vibrations mécaniques qui pourraient être générées à cause des comportements des opérateurs lors d'une IpHR.

## **Chapitre 3**

### **Observateurs de vibrations**

Ce chapitre traite des démarches et des résultats de conception et de développement de deux outils visant à satisfaire une IpHR plus transparente, intuitive et sécuritaire. Le premier s'agit d'un observateur de vibrations à base d'une analyse statistique d'un signal de vitesse d'une réelle IpHR avec un mécanisme robotique à 1-DDL. Le deuxième réside en un observateur de vibrations actif (AVO) à base d'intelligence artificielle capable de remplacer le premier observateur afin d'assurer une quantification et une minimisation, en temps réel, des vibrations mécaniques lors des IpHRs. En premier lieu, il est fondamental d'exposer le mécanisme robotique utilisé dans ce projet de recherche ainsi que sa commande en force. Ensuite, nous présenterons les démarches préconisées pour le développement et la mise en place des deux observateurs de vibrations susmentionnés (c.-à-d. l'analyse statistique et le réseau de neurones artificiels). Finalement, les simulations et les résultats expérimentaux sont menés afin d'évaluer la validité des approches et des hypothèses proposées.

### 3.1 Introduction

La revue de la littérature du chapitre précédent a présenté les modèles des commandes et des observateurs les plus utilisés en situation d'IpHR visant à satisfaire les critères d'intuitivité, de performance (c.-à-d. transparence) et de stabilité des systèmes robotiques en toutes circonstances. D'une part, cette revue nous a permis de comprendre les notions d'observateur et d'instabilité. D'autre part, elle constitue une aide et une source d'informations utiles pour le développement et la mise en place des observateurs de vibrations.

Le présent chapitre se veut une recherche approfondie des moyens utilisés pour réduire les vibrations mécaniques lors d'une IpHR dans le but de la rendre plus transparente et plus intuitive. En effet, ce chapitre traitera de la détection et de la minimisation des vibrations mécaniques, qui pourraient être générées à cause d'une augmentation de la rigidité structurelle du bras humain, grâce à un observateur de vibrations et à une commande adaptative.

La première partie de ce chapitre est consacrée à la modélisation dynamique du mécanisme robotique utilisé dans ce projet de recherche ainsi qu'à sa commande en admittance proposée. Ensuite, une description détaillée de la conception et du développement des deux observateurs de vibrations (c.-à-d. par analyse statistique et par réseau de neurones artificiels) sera abordée. Finalement, des simulations et des résultats expérimentaux seront présentés. Ces deux algorithmes seront traités en profondeur et leurs performances seront comparées ultérieurement à un autre algorithme.

### 3.2 Système d'assistance intelligent

Le robot utilisé pour une partie des expérimentations de ce chapitre est un système d'assistance intelligent (IAD) à 4-DDL, tel que décrit dans [24, 73] et montré dans la figure 29.



Figure 29 : Prototype du système d'assistance intelligent à 4 DDL [24].

Celui-ci permet une translation dans toutes les directions (XYZ), ainsi qu'une rotation autour de l'axe vertical. Ce type de robot permet aux manutentionnaires de soulever, bouger et positionner des charges rapidement, précisément et d'une manière sécuritaire [24, 74] afin de réaliser des assemblages. Comme décrit dans [24], ce prototype a une masse mobile d'environ 500 kg dans la direction de l'axe X et de 325 kg dans la direction de l'axe Y. De plus, la charge à déplacer avec ce mécanisme peut varier entre 0 et 113 kg. L'espace de travail plan est de 3.3 m  $\times$  2.15 m, la plage de

mouvement verticale est de 0.52 m et la plage de mouvement en rotation autour de l'axe vertical est de 120°.

Afin d'actionner ce mécanisme robotique et afin de réduire la masse mobile perçue par l'opérateur ainsi que les couples requis, un mécanisme parallèle est utilisé. Ce dernier permettra aux actionneurs d'être fixés à la base. La transmission entre les actionneurs et l'effecteur consiste en une courroie de transmission ce qui pourrait éventuellement réduire la raideur et augmente la sécurité [24, 75]. Dans ce qui suit, une modélisation schématique et mathématique de l'IAD ainsi que sa commande en force seront exposées.

### 3.3 Modélisation du système d'assistance intelligent

La modélisation schématique du mécanisme robotique utilisé dans ce projet de recherche est illustrée dans la figure 30 où  $m_R$  est l'inertie du moteur et  $x_1$  est sa position,  $C_B$  est la transmission mécanique d'amortissement,  $K_B$  est la raideur (c.-à-d.  $C_B$  et  $K_B$  représentent la courroie de transmission),  $C_R$  est le frottement visqueux généré lors du déplacement de la masse  $M_R$  avec la poignée de détection,  $x_2$  est sa position,  $v_2$  est la vitesse mesurée de l'IAD dans la boucle de commande tel que représenté dans la figure 32.  $F_H$  et  $F$  sont respectivement la force d'interaction (c.-à-d. la force appliquée par l'opérateur) et la force d'actionnement envoyée aux actionneurs du robot et  $X_0$  est la cible visuelle pour l'assemblage des pièces.

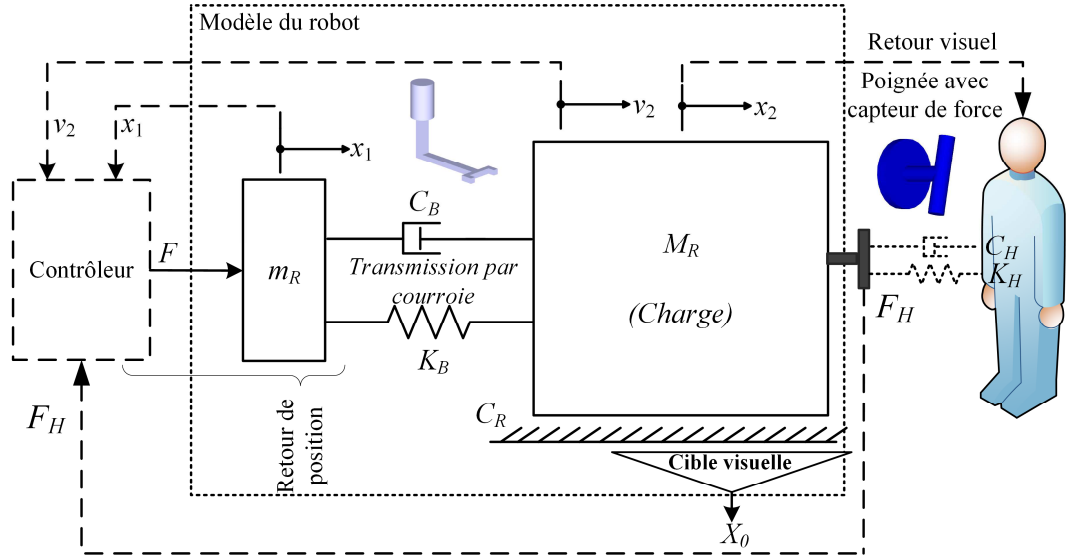


Figure 30 : Modélisation schématique du système d'assistance intelligent.

Les équations différentielles de la dynamique de ce modèle sont écrites comme suit :

$$m_R \ddot{x}_1(t) + C_B \dot{x}_1(t) + K_B x_1(t) - C_B \dot{x}_2(t) - K_B x_2(t) = f(t) \quad (16)$$

$$M_R \ddot{x}_2(t) + K_B x_2(t) + (C_R + C_B) \dot{x}_2(t) - C_B \dot{x}_1(t) - K_B x_1(t) = 0 \quad (17)$$

Ainsi, (16) et (17) conduisent à la représentation d'état suivante :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{-K_B}{m_R} & \frac{K_B}{m_R} & \frac{-C_B}{m_R} & \frac{C_B}{m_R} \\ \frac{K_B}{M_R} & \frac{-K_B}{M_R} & \frac{C_B}{M_R} & \frac{-(C_R + C_B)}{M_R} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \times f \quad (18)$$

À partir de (18), nous déduisons les fonctions de transfert du robot dans (19) et (20) où  $V_1$  représente la vitesse angulaire du moteur du robot et  $V_2$  représente la vitesse de déplacement de la charge :

$$V_1(s) = \frac{M_R s^2 + (C_B + C_R)s + K_B}{a_1 s^3 + a_2 s^2 + a_3 s + a_4} \quad (19)$$

$$V_2(s) = \frac{K_B + C_B s}{a_1 s^3 + a_2 s^2 + a_3 s + a_4} \quad (20)$$



où :

$$\begin{aligned} a_1 &= M_R m_R & (21) \\ a_2 &= M_R C_B + C_B m_R + C_R m_R \\ a_3 &= M_R K_B + C_B C_R + K_B m_R \\ a_4 &= C_R K_B \end{aligned}$$

### 3.4 Schéma de la commande en force

La commande en force utilisée dans ce projet de recherche est la commande par admittance, tel que représentée dans la figure 31 [24]. Elle permet un déploiement d'une force (c.-à-d. en utilisant une masse et un amortissement virtuels) que les opérateurs doivent ressentir en situation d'IpHR au lieu de la masse réelle combinée de la charge à déplacer et du mécanisme (c.-à-d. qui peut être une masse lourde) ainsi que l'amortissement réel du mécanisme.

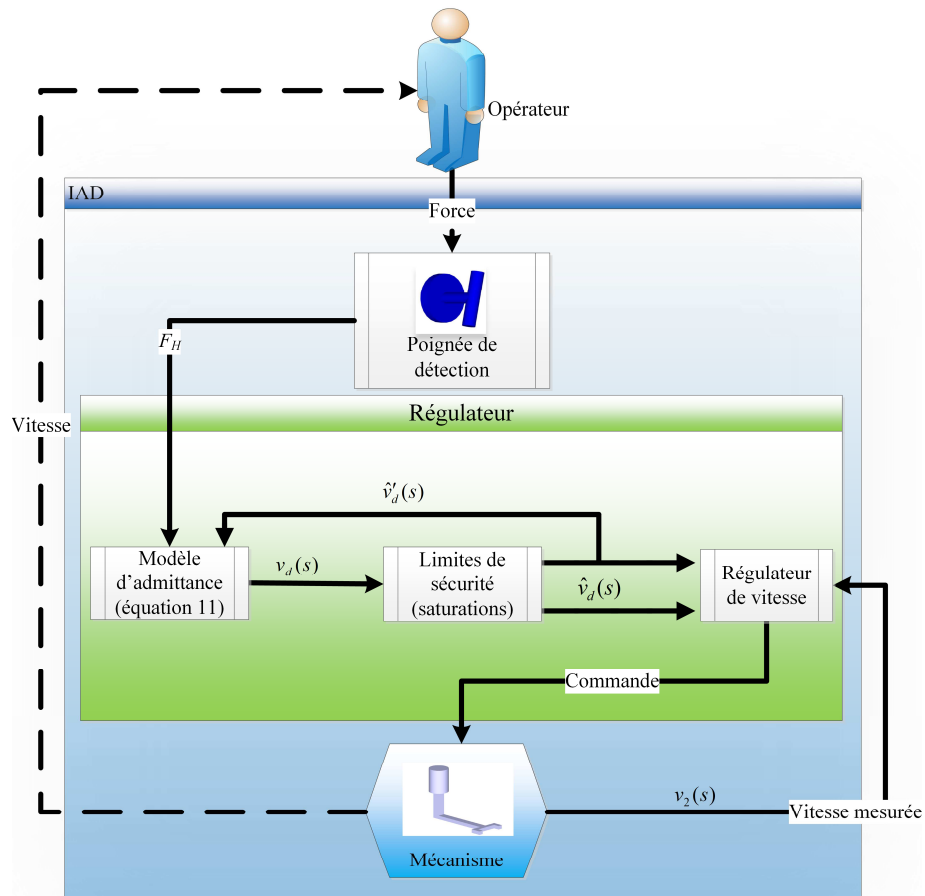


Figure 31: Schéma de commande par admittance.

L'opérateur, souhaitant effectuer un déplacement par l'intermédiaire d'un mécanisme robotique, génère une force mesurée au moyen d'un capteur de force situé sur la poignée du robot (voir «poignée de détection» dans la figure 32). Cette mesure, ainsi que la vitesse limitée  $\hat{v}'_d$  au pas du temps précédent, seront envoyées à un modèle d'admittance qui réagira avec une vitesse désirée  $v_d$  à contrôler selon (11). Pour des raisons de sécurité, cette vitesse désirée sera saturée en utilisant les valeurs minimales et maximales. La vitesse limitée  $\hat{v}_d$  sera ensuite envoyée à un régulateur de vitesse pour assurer un minimum d'erreur de l'état d'équilibre.

Le régulateur de vitesse utilisé dans cette étude est de type proportionnel. Ce choix a été fait pour éviter les inconvénients de l'augmentation du bruit d'accélération en raison de la dérivation du gain et de la diminution de la bande passante due à l'effet du terme intégral (c.-à-d. le terme intégral est une somme qui peut provoquer une sommation de l'historique des erreurs de l'entrée humaine) lorsque nous utilisons un PID (c.-à-d. un régulateur d'une loi de commande classique). Finalement, la commande résultante sera envoyée aux actionneurs de l'IAD délivrant, ainsi, une vitesse mesurée  $v_2$ . Dans ce qui suit, nous exposerons le modèle de la boucle de commande utilisé pour les expérimentations de ce chapitre.

### 3.5 Modèle suggéré de la boucle de commande

Cette section se veut une présentation détaillée de la boucle de commande, utilisée dans ce projet de recherche. Tout d'abord, nous commençons avec une exposition du schéma de la boucle de commande ainsi que sa fonction de transfert.

Ensuite, nous entamons une analyse de stabilité et une analyse du comportement fréquentiel du système (c.-à-d. de la boucle de contre-réaction).

### 3.5.1 Schéma de la boucle de commande

Le modèle de la boucle de commande utilisé dans ce projet de recherche est représenté dans la figure 32 [39].

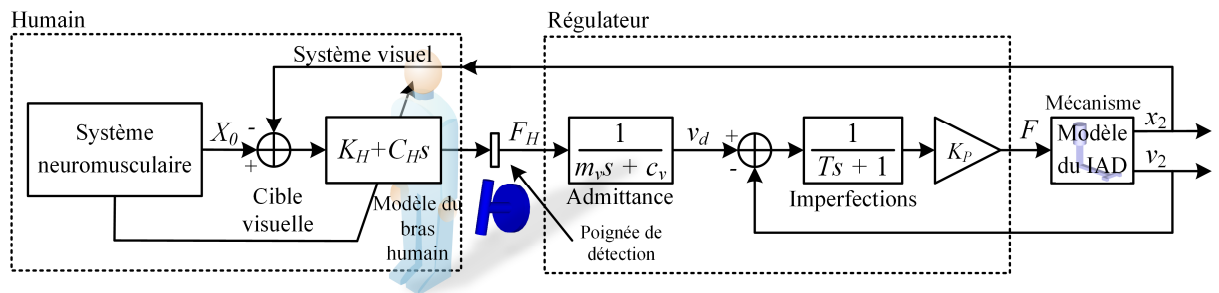


Figure 32 : Boucle de commande sans observateur de vibrations.

Comme proposé dans [76], ce modèle suppose que l'opérateur (c.-à-d. modèle du bras humain dans la figure 32) agit comme un système ressort-amortisseur où  $K_H$  est la raideur de l'opérateur et  $C_H$  est son coefficient d'amortissement. Ce dernier génère une force  $F_H$  en fonction de sa cible visuelle. Ensuite, cette force sera transformée en une vitesse désirée  $v_d$  par le biais du modèle d'*admittance* expliqué ci-dessus. De plus, une fonction de transfert appelée *Imperfections* est également ajoutée où  $T$  représente une phase. Cette fonction de transfert représente l'effet de filtrage du signal, des erreurs de modélisation de la dynamique du robot et des petits délais [39]. Le résultat du modèle de l'*Imperfections* sera ensuite envoyé à un régulateur de vitesse  $K_p$  (c.-à-d. le gain de la boucle de commande) qui sera réglé ultérieurement par nos algorithmes suggérés. Finalement, la commande résultante  $F$  sera envoyée aux actionneurs de notre IAD.

Le régulateur classique « le proportionnel intégrateur, dérivateur » (PID) n'est pas utilisé ici puisque l'analyse de la stabilité est effectuée uniquement sur le gain de la boucle de commande (par exemple avec le critère de Routh-Hurwitz). Dans ce qui suit, nous présenterons la fonction de transfert de la boucle fermée. Cette dernière peut être écrite comme suit :

$$\frac{V(s)}{F_H(s)} = \frac{sK_p(C_B s + K_B)(C_H s + K_H)}{a_6 s^6 + a_5 s^5 + a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \quad (22)$$

où :

$$\begin{aligned} a_6 &= M_R T m_R m_v & (23) \\ a_5 &= M_R m_R m_v + M_R T C_B m_v + M_R T c_v m_R + T C_B m_R m_v \\ &\quad + T C_R m_R m_v \\ a_4 &= K_p M_R m_v + M_R C_B m_v + M_R c_v m_R + C_B m_R m_v \\ &\quad + C_R m_R m_v + M_R T C_B c_v + M_R T K_B m_v \\ &\quad + T C_B C_R m_v + T C_B c_v m_R + T C_R c_v m_R \\ &\quad + T K_B m_R m_v \\ a_3 &= K_p M_R c_v + M_R C_B c_v + K_p C_B m_v + K_p C_R m_v + M_R K_B m_v \\ &\quad + C_B C_R m_v + C_B c_v m_R + C_R c_v m_R + K_B m_R m_v \\ &\quad + M_R T c_v K_B + T C_B C_R c_v + T C_R K_B m_v \\ &\quad + T c_v K_B m_R \\ a_2 &= K_p C_B C_H + K_p C_B c_v + K_p C_R c_v + M_R c_v K_B + K_p K_B m_v \\ &\quad + C_B C_R c_v + C_R K_B m_v + c_v K_B m_R + T C_R c_v K_B \\ a_1 &= K_p C_B K_H + K_p C_H K_B + K_p c_v K_B + C_R c_v K_B \\ a_0 &= K_p K_B K_H \end{aligned}$$

### 3.5.2 Analyse de stabilité de la boucle de commande

Dans ce qui suit, nous allons analyser la stabilité de la fonction de transfert en boucle fermée (l'équation (22)) en utilisant la position de ses pôles dans le plan complexe (c.-à-d. plan complexe dans lequel les transformées de Laplace sont représentées) avec le critère de stabilité du lieu de Evan (ou lieu des racines) (c.-à-d. méthode graphique utilisée pour examiner la façon dont les racines d'un système

changent en fonction de la variation d'un certain paramètre de ce système). Dans notre cas, les paramètres qui changent sont la rigidité de l'opérateur  $K_H$  et le gain de la boucle de commande  $K_p$  ; qui représentent deux gains sur la boucle directe entre l'entrée et la sortie. Cette étude est représentée dans la figure 33 où les points de départ du paramètre variable sont représentés par un cercle, et la variation de ce paramètre est représentée par un carré.

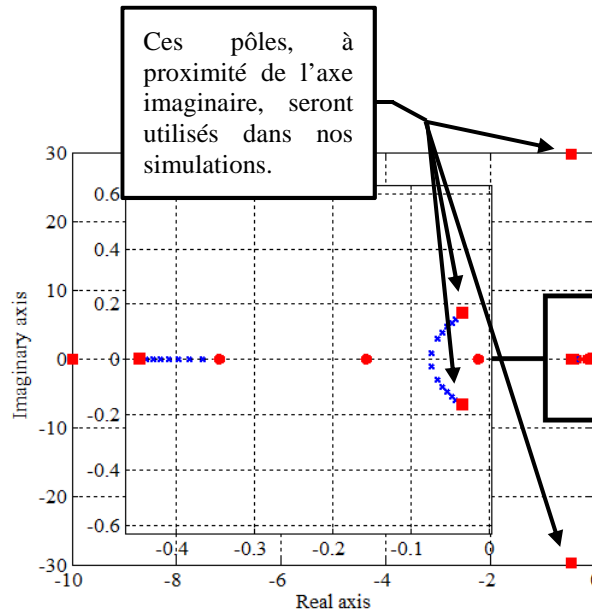


Figure 33 : Les pôles de la boucle fermée avec un opérateur ayant une rigidité  $K_H$  qui varie entre  $50 \text{ N/m}$  (cercle) et  $850 \text{ N/m}$  (carré),  $c = 20 \text{ Ns/m}$ ,  $T = 0.1 \text{ s}$ ,  $K_p = 10000$ ,  $M_R = 500 \text{ kg}$ ,  $C_R = 100 \text{ Ns/m}$ ,  $m_R = 50 \text{ kg}$ ,  $K_B = 40000 \text{ N/m}$ ,  $C_B = 40 \text{ Ns/m}$ ,  $C_H = 23.45 \text{ Ns/m}$ .

En se basant sur la figure précédente, nous pouvons conclure qu'une plus grande rigidité de l'opérateur conduit à un système plus sous-amorti. Ceci dit, une plus grande rigidité peut conduire à une instabilité du système. Cependant, dans les situations les plus courantes, une telle rigidité conduit à un comportement vibratoire des systèmes causé par le positionnement des pôles à proximité de l'axe imaginaire.

La stabilité du système, ici, est justifiée par le fait que les pôles sont situés du côté gauche (c.-à-d. la partie négative) du plan de Laplace. Toutefois, il convient de souligner que certains pôles, représentés dans la figure 33, correspondent à des

fréquences élevées (30 rad/s) et sont très sous-amorti. Ainsi, l'opérateur percevra les vibrations et l'interaction sera contre-intuitive et inconfortable. De ce fait, nous pouvons affirmer qu'une augmentation du gain de la boucle de commande, causée, dans notre cas, par une augmentation de la rigidité du bras humain  $K_H$ , pourrait déplacer les pôles à une position suffisamment proche de l'axe imaginaire pour que les vibrations soient non seulement perceptibles, mais aussi dérangeantes pour l'opérateur.

### 3.5.3 Comportement fréquentiel du système

Maintenant, après avoir étudié la stabilité de notre système, nous allons analyser la dynamique et les comportements fréquentiels de ce dernier. Pour ce faire, nous avons utilisé le *diagramme de Bode*. Ce dernier, représenté dans la figure 34, montre la dynamique de la boucle ouverte, de la boucle fermée, du modèle du bras humain ainsi que la dynamique du modèle du robot. En se basant sur cette figure, nous pouvons constater la présence des pics de résonances sur les courbes de gain de la boucle fermée, de la boucle ouverte et du robot. Ces pics reflètent le comportement vibratoire créé par le robot. En effet, un tel comportement est amplifié à cause de la présence de la rigidité structurelle  $K_H$  du bras humain dans la boucle de commande. En fait, l'opérateur souhaitant contrôler le manipulateur du robot, tend à augmenter la rigidité structurelle de son bras provoquant, ainsi, une diminution de la marge de gain de la boucle de commande, ce qui rend les pôles plus proches de l'axe imaginaire. Ainsi, en passant près de 0 dB à 180 degrés, le mécanisme robotique commence à vibrer à sa fréquence de résonance. Dans ce qui suit, nous allons détailler la partie conception et développement des observateurs de vibrations qui seront utilisés ultérieurement pour

la détection et la minimisation des comportements vibratoires des mécanismes robotiques en situation d'IpHR.

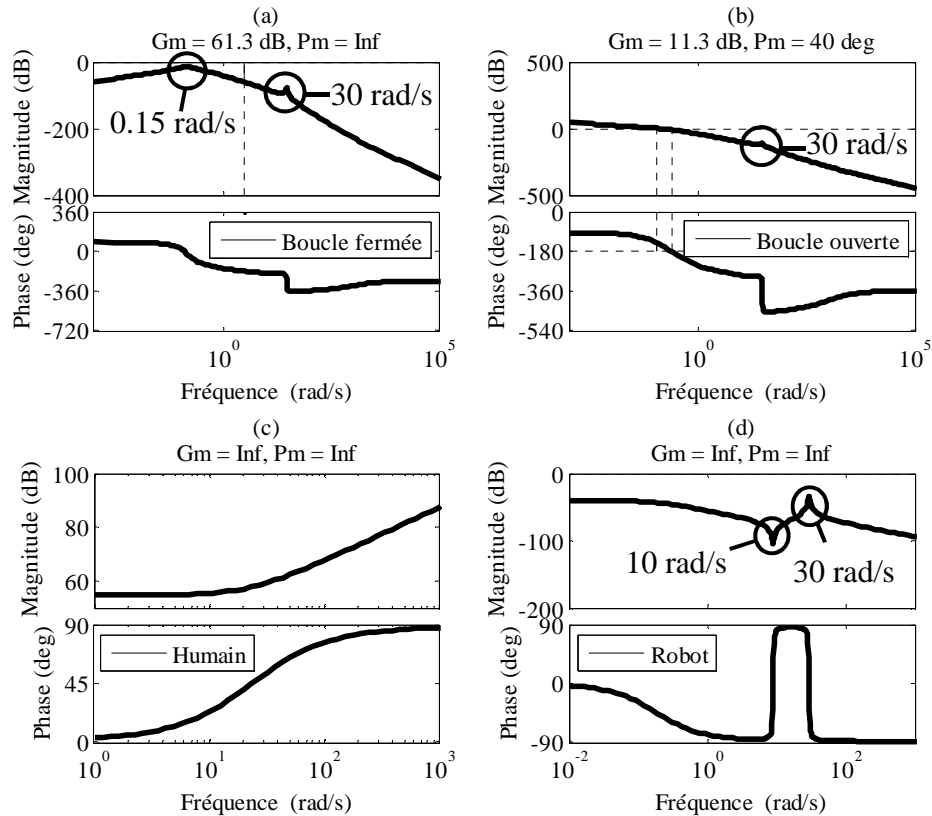


Figure 34 : Diagramme de Bode représentant la dynamique de la boucle fermée (a), la boucle ouverte (b), le modèle humain (c) et le modèle du robot (sans commande) (d). Comme décrit ici, les vibrations se produisent à 0.15 et 30 rad/s.

### 3.6 Observateurs de vibrations

Cette section traite de la démarche préconisée pour faire la conception et le développement de deux observateurs de vibrations dans le but de détecter et de réduire les vibrations mécaniques lors d'une IpHR. Le premier observateur consiste en une analyse statistique, tandis que, le deuxième réside en un réseau de neurones artificiels de type perceptron multicouche. Tout d'abord, nous commençons avec l'observateur à base d'une analyse statistique. Ensuite, nous entamons la présentation du deuxième observateur de type réseau de neurones artificiels.

### 3.6.1 Observateur de vibrations à base d'une analyse statistique

Tout au long de cette section, nous allons présenter la procédure suivie pour le développement d'un observateur de vibrations à base d'une analyse statistique. Tout d'abord, il convient de souligner que le signal de vitesse utilisé dans cette étude est capturé à partir d'une réelle IpHR avec un mécanisme robotique à 1-DDL permettant une translation suivant l'axe X comme le montre la figure suivante.

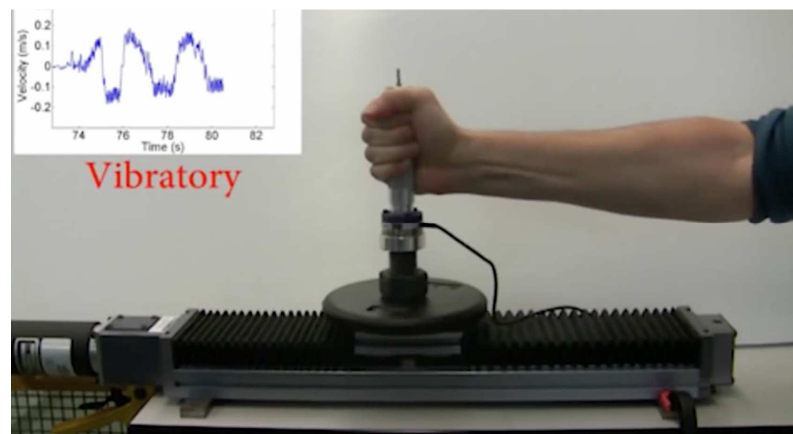


Figure 35 : Une IpHR avec un mécanisme robotique à 1-DDL décrivant un mouvement vibratoire causé par une rigidité élevée du bras humain.

La charge mobile à déplacer avec ce mécanisme est beaucoup plus faible que celle à déplacer avec le mécanisme robotique à 4-DDL, présenté dans les figures 29 et 30, ce qui pourrait générer des fréquences de vibrations beaucoup plus élevées. Cependant, cette étude importante, permet de situer le contexte d'analyse du signal. En effet, cette analyse a été faite, en premier lieu, pour nous aider à vérifier la validité de nos algorithmes. Une telle analyse consiste à évaluer le signal électrique représentant la vitesse du mouvement de la charge à déplacer par le mécanisme robotique dans les domaines temporel et fréquentiel grâce à ce qu'on appelle une analyse statistique. Cette dernière est décrite dans la prochaine section.



a) Analyse statistique

Dans le but d'assurer une représentation fréquentielle, la transformée de Fourier discrète (*DFT*) pourrait être appliquée en utilisant l'algorithme de la transformée de Fourier rapide (*FFT*). Ce dernier est connu par ses opérations de calcul limitées [77] et son incapacité à faire face aux problèmes que posent les signaux non stationnaires et non périodiques [78]. Dans ce sens, une transformée de Fourier rapide à courte période (*ST-FFT*) est donc préférable pour analyser une fenêtre du signal grâce à une fenêtre glissante de type *Hamming*. Cette transformée a été réalisée sous *Simulink* avec une numérisation préalable du signal. Sa longueur a été fixée à 256 échantillons. La longueur de la fenêtre glissante, quant à elle, a été fixée à 128 échantillons grâce à une référence à la dynamique du système à mesurer.

Avant une telle procédure, l'utilisation d'un filtre était clairement indispensable pour isoler le bruit et les fréquences des vibrations du mouvement humain normal. En effet, ce filtre nous permettra, dans un premier temps, de clarifier le signal en réduisant le bruit inhérent au système global qui pourrait fausser l'analyse et, dans un deuxième temps, d'isoler les parties intéressantes contenant les vibrations. Ce filtre a été développé en utilisant l'outil *fdatool* de *MatLab*. Sa nature était un filtre passe-bande de quatrième ordre de type *IIR Butterworth*. Après plusieurs ajustements, un filtre avec une bande de [25,1 rad/s - 189 rad/s] a été choisi comme un bon filtre pour isoler les vibrations du mécanisme du mouvement du bras. Ce dernier ainsi que sa transformation après filtrage, sont présentés dans la figure 36, où la zone 1 et la zone 3 correspondent à un mouvement normal (c.-à-d. sans vibrations) et la zone 2 correspond à un mouvement anormal (c.-à-d. avec des vibrations).

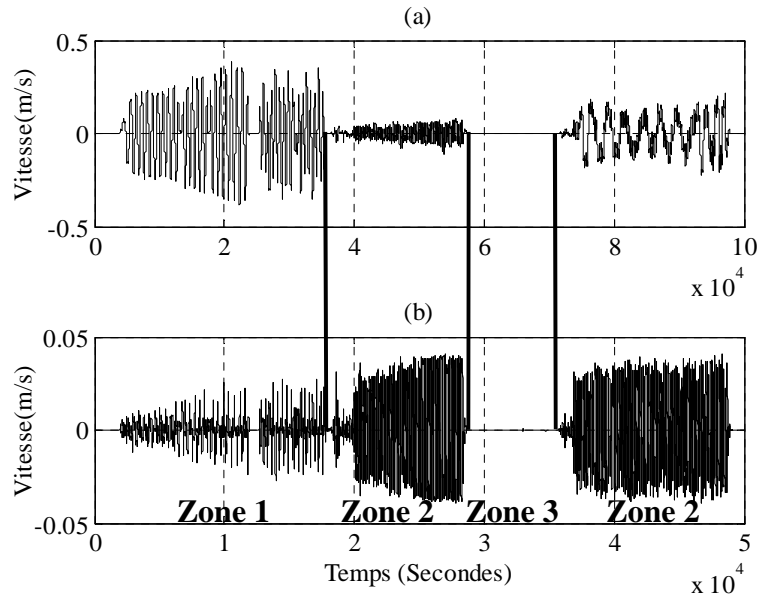


Figure 36 : (a) représente le signal de vitesse capturé lors d'une interaction réelle avec un robot à un degré de liberté et (b) représente sa transformation après filtrage (l'élimination du mouvement normal) où les zones 1 et 3 correspondent à un mouvement sans vibrations et la zone 2 correspond à un mouvement vibratoire.

L'application de la *ST-FFT* sur le signal filtré nous a permis d'identifier clairement les comportements fréquentiels des parties du signal liées à des mouvements normaux et celles liées à des mouvements anormaux. Ces résultats sont représentés dans la figure 37, où la ligne continue correspond aux mouvements anormaux et la ligne en pointillés correspond aux mouvements normaux.

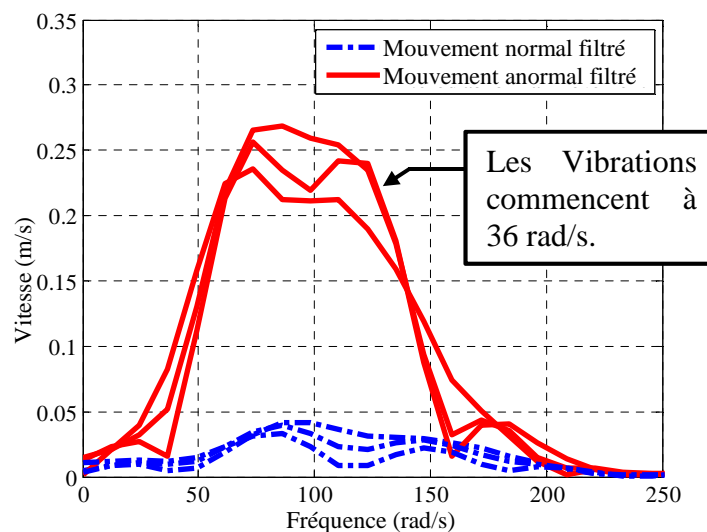


Figure 37 : Identification des vibrations lors d'une IpHR avec un mécanisme robotique à 1-DDL tout en utilisant une fenêtre d'analyse.

À partir de cette figure, nous pouvons remarquer une différence entre la fréquence des vibrations illustrée dans cette figure (36 rad/s) et la fréquence de résonance représentée dans la figure 34 (30 rad/s). Cette différence provient du fait que le mécanisme robotique à 1-DDL, utilisé dans cette investigation possède une masse et un amortissement plus faibles que le modèle du robot à 4-DDL. Notre modèle mathématique proposé pourrait être adéquat afin d'identifier les vibrations en temps réel, cependant, l'identification représente un autre projet de recherche complexe qui n'est pas couvert dans ce projet de recherche. En effet, le but était d'ajuster le gain de la boucle (c.-à-d. le réduire) en fonction d'une augmentation de la rigidité structurelle du bras afin de pouvoir réduire le comportement vibratoire du système. Toutefois, la réduction du gain de la boucle de commande pourrait diminuer la performance des opérations. Par conséquent, le réglage du gain doit être appliqué que lorsque les vibrations sont perçues. Ces vibrations, caractérisées par une fréquence élevée (plus de 31 rad/s), ne sont pas contrôlables par les humains en raison des limitations physiques ou cognitives [79]. Ces limitations favorisent plutôt une augmentation de la rigidité du bras, ce qui favorise l'augmentation des vibrations et qui apparaît, par conséquent, comme une entrave à la performance des mécanismes et à la sécurité des opérateurs. Par conséquent, un compromis entre cette limite naturelle et la performance des mécanismes peut être obtenu en réduisant le gain de la boucle de commande en fonction des vibrations identifiées. Pour parvenir à une telle identification, la variance et l'écart type sont utilisés dans cette étude comme des variables statistiques appliquées dans les domaines temporel et fréquentiel. Les réponses de ces variables statistiques sont représentées dans la figure 38.

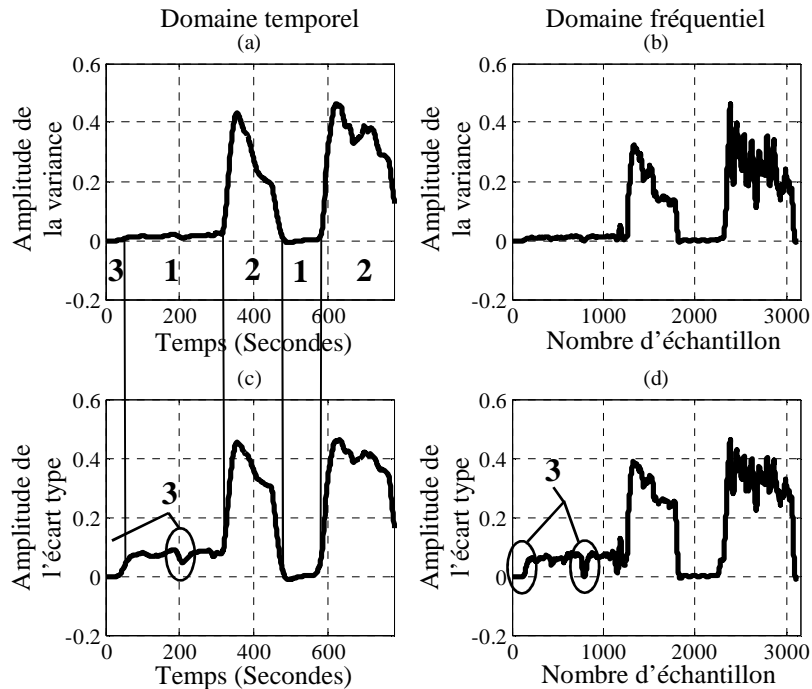


Figure 38 : (a) et (c) représentent respectivement les réponses de la variance et de l'écart type dans le domaine temporel et (b) et (d) représentent respectivement les réponses de la variance et de l'écart type dans le domaine fréquentiel.

Dans cette figure, on peut distinguer très clairement trois zones dans les signaux. En effet, nous pouvons voir les premières parties de chaque signal comme étant des parties représentantes des fréquences contrôlables par les humains (c.-à-d. zone 1 dans la figure 36), suivies par celles qui représentent des fréquences considérées pour eux comme hors de contrôle (c.-à-d. zone 2 dans la figure 36) et enfin, celles qui représentent les bruits parasites entrecoupées par des zones inactives (zone 3 dans la figure 36).

#### b) Indices des observateurs à base d'une analyse statistique

Comme il a été mentionné précédemment, l'objectif de cette étude est d'identifier précisément les parties du signal liées à des vibrations afin de les atténuer et de les réduire sous le seuil de la perception humaine. Ceci peut être réalisé grâce à des indices

judicieux capables de mettre à jour, en temps réel, le gain de la boucle de commande  $K_p$ . On propose plusieurs indices afin de comparer leurs performances. D'autres indices pourraient être trouvés, mais ce sont les plus intéressants après plusieurs essais. Les équations correspondantes de ces indices, utilisées dans cette étude, sont présentées comme suit :

$$I_1(t) = 1 - \alpha_1 \times var(STFFT(\hat{X})) \quad (24)$$

$$I_2(t) = 1 - \alpha_2 \times var(\hat{X}) \quad (25)$$

$$I_3(t) = 1 - \beta_1 \times std(\hat{X}) \quad (26)$$

$$I_4(t) = 1 - \beta_2 \times std(STFFT(\hat{X})) \quad (27)$$

où  $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1$  et  $\beta_2 \in \mathbb{N}$ ,  $I_1$  est l'indice de la variance dans le domaine fréquentiel,  $I_2$  représente l'indice de la variance dans le domaine temporel,  $I_3$  représente l'indice de l'écart type dans le domaine temporel,  $I_4$  représente l'indice de l'écart type dans le domaine fréquentiel et  $\hat{X}$  représente le signal filtré illustré dans la figure 36(b). L'évolution des indices  $I_1, I_2, I_3$  et  $I_4$  est représentée dans la figure 39.

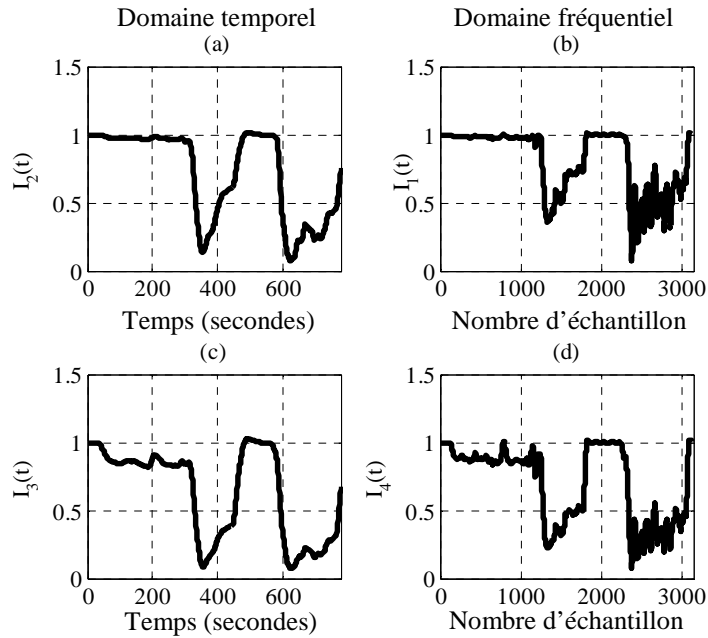


Figure 39 : (a) et (c) représentent respectivement l'évolution des indices de la variance et de l'écart type dans le domaine temporel (équations (25) et (26)) et (b) et (d) représentent respectivement l'évolution des indices de la variance et de l'écart type dans le domaine fréquentiel (équations (24) et (27)).

En outre, nous proposons deux autres indices utilisant, simultanément, les caractéristiques statistiques dans les domaines temporel et fréquentiel. Ces deux indices sont obtenus par les équations suivantes où  $I_v$  représente l'indice de la variance et  $I_S$  représente l'indice de l'écart type:

$$I_v(t) = 1 - \delta_1 \times (var(\hat{X}) + var(STFFT(\hat{X}))) \quad (28)$$

$$I_S(t) = 1 - \delta_2 \times (std(\hat{X}) + std(STFFT(\hat{X}))) \quad (29)$$

où  $\delta_1$  et  $\delta_2 \in \mathbb{R}$ .

L'évolution des indices  $I_v$  et  $I_S$  est représentée dans la figure 40(a) et la figure 40(b).

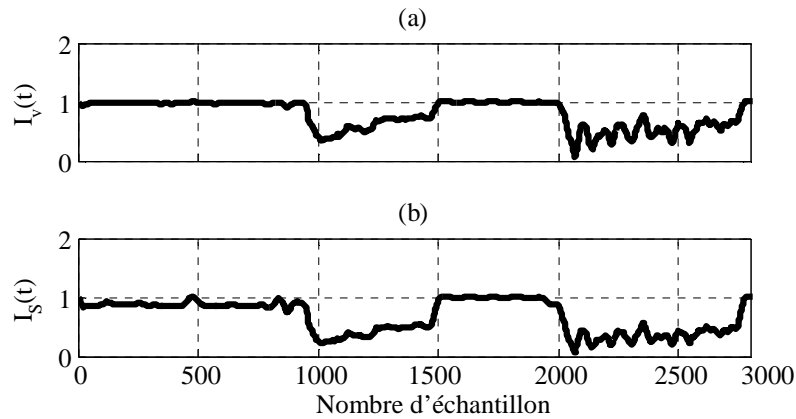


Figure 40 : (a) représente l'évolution de l'indice de la variance dans les domaines temporel et fréquentiel et (b) représente l'évolution de l'indice de l'écart type dans les domaines temporel et fréquentiel.

En se basant sur les résultats de la figure précédente, nous constatons que plus les vibrations augmentent, plus les indices  $I_v$  et  $I_S$  tendent vers zéro. En revanche, plus les vibrations diminuent, plus les indices tendent vers un. En vertu de ces résultats, nous allons utiliser ces indices pour ajuster le gain de la boucle de commande afin d'assurer une réduction des vibrations. Une telle amélioration est assurée grâce à une réduction de la valeur du gain de la boucle de commande permettant ainsi un éloignement des pôles, représentés dans la figure 33, de l'axe imaginaire (c.-à-d. la

source de vibrations). Ainsi, la valeur de ce gain sera mise à jour conformément à la loi suivante pour obtenir les meilleures performances du robot :

$$K(n) = I \times K_p(n - 1) \quad (30)$$

où  $I$  pourrait être l'indice  $I_v$ ,  $I_S$  ou  $I_{AVO}$  (l'indice  $I_{AVO}$  sera expliqué dans la prochaine section) et  $n$  représente le temps actuel de l'horloge discrète.

### 3.6.2 Observateur de vibrations actif (AVO) à base d'intelligence artificielle

Afin d'aborder cette partie, à savoir le développement d'un observateur de vibrations actif de type réseau de neurones artificiels, il est primordial de comprendre, en premier lieu, la notion des réseaux de neurones artificiels. Ensuite, nous présenterons une description détaillée de l'architecture et de la procédure d'entraînement de notre observateur de type réseau de neurones artificiels. Finalement, nous exposerons une étude expérimentale dans le but de vérifier la validité de cet outil dans la réalisation des IpHRs intuitives et transparentes.

#### a) Réseau de neurones artificiels

Les réseaux de neurones artificiels sont largement inspirés des neurones biologiques. Tout d'abord, un neurone artificiel est une unité de traitement qui reçoit des données en entrée et produit une sortie en utilisant une fonction de combinaison, comme illustré dans la figure 41.

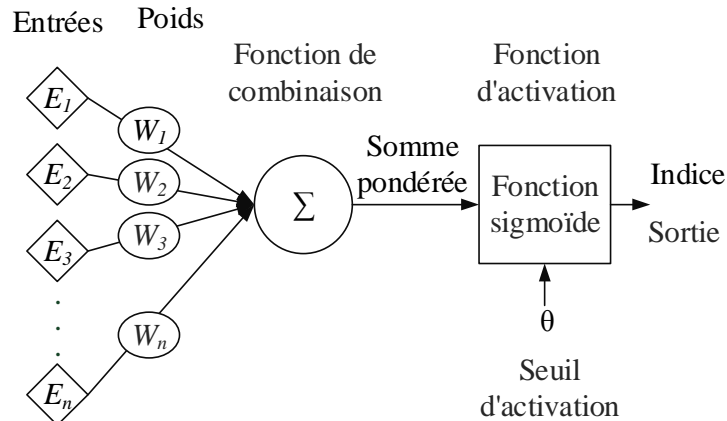


Figure 41 : Neurone formel.

Ainsi, un réseau de neurones est un graphe pondéré dont les nœuds symbolisent les neurones. Chacun de ces neurones a une fonction d'activation qui influence les autres neurones du réseau et a une connexion, dite connexion synaptique, qui le relie à d'autres neurones afin d'étendre ses activités en fonction d'une pondération caractéristique de cette connexion [80, 81].

#### b) Architecture proposée pour le réseau de neurones artificiels

L'architecture la plus courante et la plus utilisée des réseaux de neurones artificiels est le perceptron multicouche. Il est connu comme le premier système artificiel ayant un algorithme d'apprentissage. En ce sens, un perceptron à deux couches, avec des neurones sigmoïdes dans la couche cachée et des neurones linéaires dans la couche de sortie, a été conçu comme le montre la figure 42.

Ce réseau de neurones artificiels est créé comme suit :

- La couche cachée contient 12 neurones ;
- La couche de sortie contient un neurone qui retourne un vecteur de dimension  $1 \times 38$ .



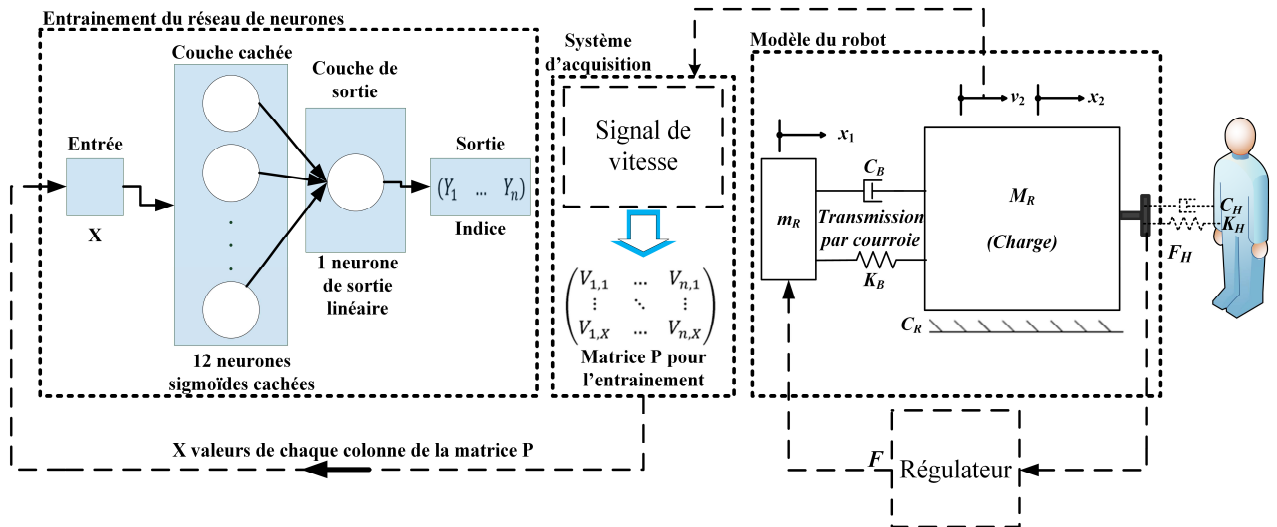


Figure 42 : L'architecture et l'entraînement du réseau de neurones.

Notre choix de l'architecture finale a été basé sur la minimisation de l'*Erreur Quadratique Moyenne* (MSE). Celui-ci reflète la performance du réseau de neurones. En effet, plus cette valeur est faible, plus la performance du réseau sera optimisée pour l'ensemble de données. Dans notre cas, la plus petite valeur de la MSE a été trouvée avec un perceptron ayant 12 neurones dans la couche cachée, évaluée à  $4.94013 \times 10^{-23}$  comparé à  $3.00628 \times 10^{-2}$  dans une configuration de 8 neurones.

### c) Entraînement du réseau de neurones artificiels

Un perceptron a été entraîné et testé avec un signal de vitesse provenant d'une réelle IpHR avec une commande en admittance utilisant un capteur de force pour déplacer une masse. Les mesures ont été prises avec un manipulateur à 1-DDL. Cette interaction, comme le montre la figure 36, est dotée de deux types de mouvements définis comme suit :

- un mouvement normal dans lequel aucune vibration n'est observée (zones 1 et 3) et

- un mouvement anormal dans lequel des vibrations sont clairement présentes (zone 2).

Pour chaque type de mouvement, nous avons construit 19 vecteurs correspondant à 19 segments du signal, et chaque vecteur contient 128 valeurs. Ensuite, nous avons combiné tous les vecteurs correspondant, respectivement, au premier type de mouvement et au second type de mouvement (c.-à-d. 38 vecteurs) dans une matrice P de dimension  $128 \times 38$ . Cette matrice sera ensuite utilisée comme une entrée pour l'apprentissage du réseau de neurones artificiels. Cette procédure est définie comme étant une phase de développement d'un réseau de neurones dans laquelle le comportement de celui-ci est modifié de manière à obtenir le comportement désiré. Ainsi, l'entraînement de notre réseau de neurones artificiels est réalisé avec l'algorithme de rétro propagation « *Levenberg-Marquardt* ». Il est connu comme l'algorithme de rétro propagation le plus rapide, mais le plus gourmand en termes de mémoire. Cet entraînement a été effectué avec différents nombres de neurones dans la couche cachée. En effet, nous avons commencé avec 6, puis 8 et 10, pour finir enfin avec un nombre de 12. Cependant, tout au long des essais, nous avons gardé le même nombre d'itérations et le même taux d'apprentissage. Dans ce qui suit l'étude expérimentale sera détaillée.

### 3.7 Résultats expérimentaux

Le but étant toujours d'améliorer la stabilité et la transparence du robot dans le contexte des IpHRs, une détection et une réduction efficaces des vibrations par le biais de l'AVO sont ainsi recommandées. Dans ce sens, nous allons évaluer, dans ce qui suit, la capacité et l'efficacité de nos observateurs de vibrations dans la réalisation des tâches

susmentionnées. Tout d'abord, nous allons évaluer les indices de chaque observateur, présentés dans ce travail. Ensuite, nous allons évaluer leurs effets dans la boucle de commande lorsqu'ils sont associés à un mécanisme robotique à 1-DDL, dans un premier temps, puis à un mécanisme robotique à 4-DDL, dans un deuxième temps. Pour ce faire, pour chaque simulation, nous allons ajouter chaque observateur dans la boucle de commande, comme le montre la figure 43 (c'est le cas où l'observateur de vibrations est l'AVO). Cette étude expérimentale a été réalisée avec un ordinateur équipé d'un processeur Intel (R) Core™ i5-2430 M à 2,40 GHz et une mémoire RAM de type *DDR3 SDRAM* d'une capacité de 4 Go à 609 MHz.

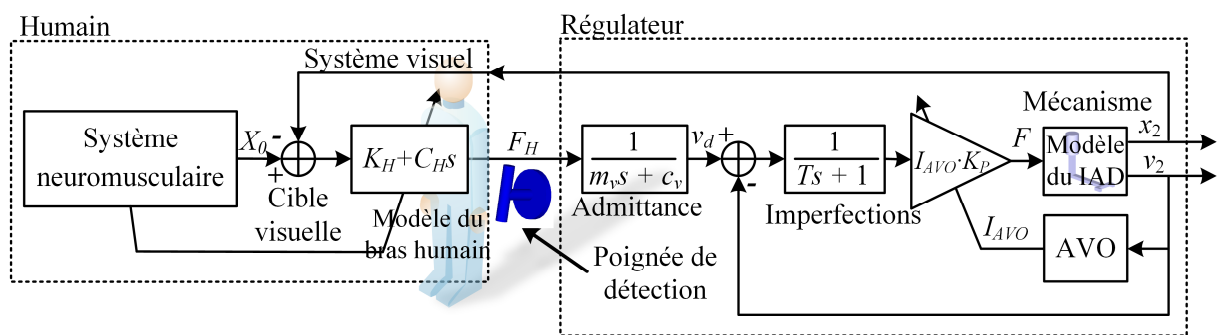


Figure 43 : Boucle de commande avec l'AVO.

### 3.7.1 Évaluation en temps réel de l'AVO avec un mécanisme robotique à 1-DDL

Après avoir entraîné notre réseau de neurones artificiels, nous l'avons testé dans *Simulink* avec le même signal de vitesse utilisé dans l'analyse statistique. Le résultat de ce test est illustré dans la figure 44.

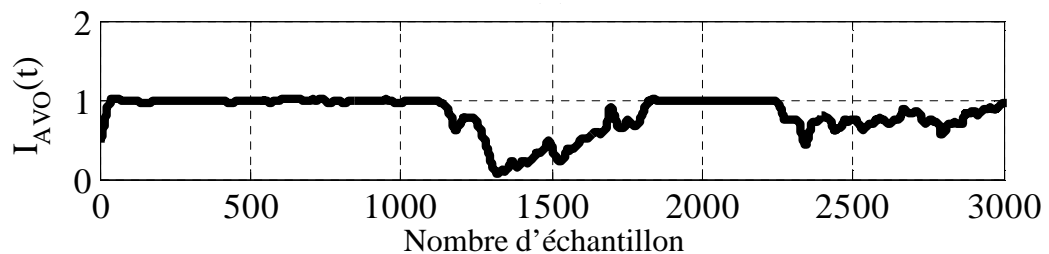


Figure 44 : L'évolution de l'indice de l'AVO.

En analysant la figure 44, nous constatons que le mouvement sans vibrations est exprimé par une valeur égale à 1 et le mouvement vibratoire est exprimé par une variation de cette valeur (c.-à-d. entre 0 et 1 exclusivement). En effet, l'indice suggéré doit être proportionnel à l'amplitude des vibrations. Ceci signifie que plus les vibrations augmentent, plus l'indice tend vers zéro et plus les vibrations diminuent, plus l'indice retourne vers 1. Par conséquent, nous allons utiliser cet indice pour régler le gain de la boucle de commande afin d'assurer une réduction des vibrations. Une telle amélioration est assurée grâce à une réduction de la valeur du gain de la boucle de commande permettant d'éloigner les pôles dominants de l'axe imaginaire, qui autrement auraient tendance à générer des vibrations à leur fréquence de résonance.

### 3.7.2 Évaluation en temps réel des observateurs avec un mécanisme robotique à 4-DDL

Dans ce qui suit une analyse plus approfondie sera menée afin de valider la meilleure approche à adopter. Pour ce faire, une investigation expérimentale, réalisée à l'aide des simulations sur *Simulink*, a été conduite pour détecter et réduire les vibrations mécaniques en utilisant trois approches. La première approche consiste en une détection et une réduction des vibrations via l'AVO en utilisant deux signaux de vitesse différents (figure 46(a) et figure 47(b)). La seconde approche consiste en une détection et une réduction des vibrations via un observateur à base d'une analyse statistique. Finalement, la troisième approche consiste en une détection et une réduction des vibrations par le biais d'un autre observateur, intitulé *Time Domain Vibration Observer Vibration Controller* (TD-VOVC) [36]. Ce dernier génère un indice en observant les maximums et les minimums locaux des vibrations mécaniques

éparpillées dans le signal de vitesse [39]. Tout au long de ces simulations, nous avons fait varier la raideur  $K_H$  avec un signal carré, comme le montre la figure 45(a). Cette variation a été effectuée entre 50 et 850 N/m. De même, nous avons représenté la cible visuelle  $X_0$ , obtenue à partir du système neuromusculaire de l'opérateur, comme elle l'est présentée dans la figure 43, par un signal sinusoïdal.

Tout d'abord, il convient de souligner que les simulations qui suivent sont réalisées avec un manipulateur à 4-DDL (équation (22)). Par conséquent, nous n'allons pas utiliser le signal de vitesse présenté dans la figure 36(a) (c.-à-d. capturé lors d'une interaction réelle avec un robot à 1-DDL), mais plutôt un autre signal de vitesse  $v_d$  obtenu à partir d'une simulation de la boucle de commande incluant le modèle du IAD comme représenté dans la figure 43. Ces signaux de vitesse simulés seront représentés dans les prochaines sections.

Ainsi, vu que le signal de vitesse a été changé lors de ces simulations comparativement à la première expérimentation avec un manipulateur à 1-DDL, des changements au niveau de l'analyse statistique, de l'entraînement et de l'architecture du réseau de neurones artificiels s'avèrent une étape indispensable pour obtenir les meilleures performances des observateurs. Ces modifications sont expliquées comme suit :

- **Analyse statistique** : nous avons changé la configuration de la *ST-FFT* et celle de la fenêtre d'analyse. En effet, la longueur de la fenêtre d'analyse est devenue de 500 échantillons pour l'analyse de la variance et de 700 échantillons pour l'analyse de l'écart type au lieu de 128 échantillons. Cette augmentation de la

longueur des fenêtres provient d'une diminution de la dynamique à mesurer du fait que l'inertie du mécanisme robotique à 4-DDL est plus élevée que celle du mécanisme à 1-DDL. Les résultats de la simulation des observateurs de type analyse statistique avec le signal de vitesse simulé sont présentés dans la figure 49(b) (c.-à-d. l'indice de la variance  $I_{SS}$ ) et la figure 50(b) (c.-à-d. l'indice de l'écart type  $I_{S-SS}$ ).

En ce qui concerne l'entraînement du nouveau réseau de neurones artificiels, nous avons utilisé la même procédure expliquée dans la section 3.6.2, mais avec quelques modifications. Ces modifications sont expliquées comme suit :

- **Le réseau de neurones** : 10 neurones sigmoïdes sont insérés dans la couche cachée et un neurone linéaire dans la couche de sortie. Ce réseau de neurones a été entraîné et testé avec le signal de vitesse simulé, représenté dans la figure 46(a). Cet entraînement résulte en un indice représenté dans la figure 46(b) ;
  - Ensuite, nous avons construit pour chaque type de mouvement (c.-à-d. mouvement vibratoire et mouvement non vibratoire) 16 vecteurs correspondant à 16 segments du signal de vitesse contenant chacun 300 échantillons ;
  - Par la suite, nous avons établi une matrice P pour l'entraînement du réseau de neurones artificiels, d'une dimension de  $300 \times 32$  (c.-à-d. combinaison de 16 vecteurs correspondant à chaque type de mouvement) ;
  - L'entraînement de ce réseau de neurones artificiels a été effectué avec l'algorithme de rétro propagation « *Levenberg-Marquardt* ».

Maintenant, après avoir terminé les modifications nécessaires pour l'analyse statistique et pour l'entraînement du réseau de neurones artificiels avec le signal de vitesse simulé, nous pouvons exposer, dans ce qui suit, la partie analyse de l'investigation expérimentale.

a) Performance de l'Observateur de Vibrations Actif (AVO)

La première étude expérimentale a été conduite en trois parties. La première partie de l'étude est une simulation de la boucle de commande sans aucun observateur. Ce test a été d'abord réalisé dans le but de nous aider à vérifier la capacité de nos observateurs, en particulier l'AVO, dans la réduction des vibrations. De même, ce test a été réalisé dans le but de vérifier si la rigidité du bras humain se présente comme un élément perturbateur pour les IpHRs [23] et que les environnements rigides sont des sources de vibrations et d'instabilités pour les mécanismes robotiques [21] ou non. Le résultat de ce test est présenté dans la figure 45.

Dans cette figure, nous pouvons distinguer, très clairement, le comportement vibratoire causé par la rigidité du bras humain. En effet, nous constatons qu'une augmentation de la rigidité du bras entraîne une augmentation des vibrations mécaniques. Ces résultats concordent avec l'analyse présentée dans les sections précédentes ainsi que les résultats présentés dans [21, 23]. En effet, en se basant sur les résultats présentés dans la figure 45(b), nous pouvons affirmer que la rigidité du bras humain est une source de vibrations pour les mécanismes robotiques lors des IpHRs. Dans notre cas, ces vibrations sont causées par l'instabilité du pôle situé à 10 rad/s illustré par le pic de résonance représenté dans la figure 34(d).

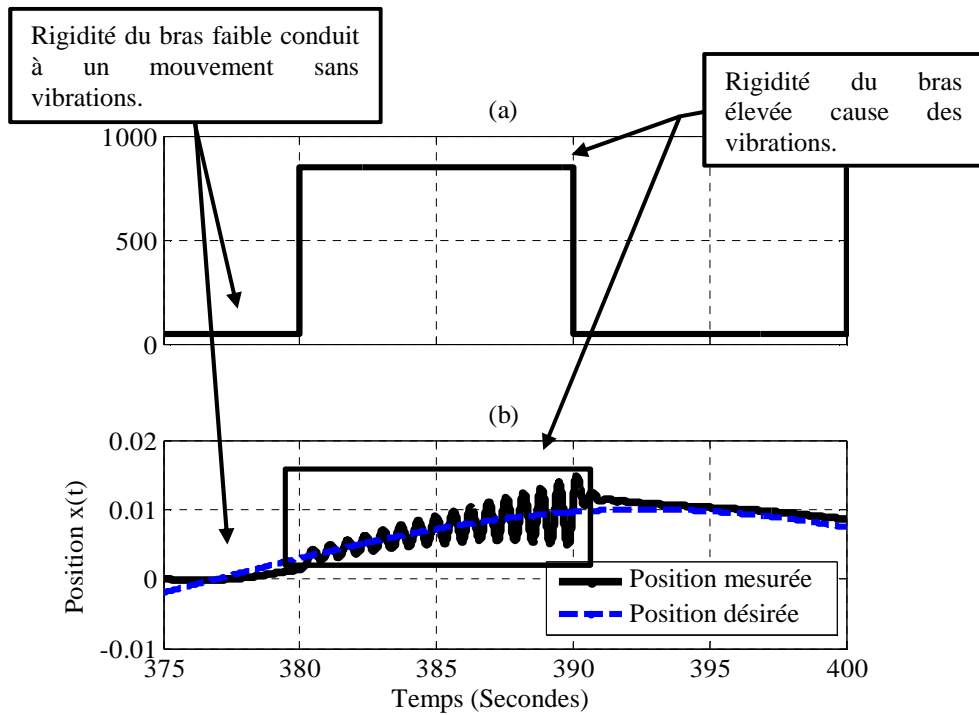


Figure 45 : représente l'évolution de la rigidité du bras humain allant de 50 à 850 N/m (forme d'onde carrée) et (b) représente la réponse de la commande en boucle fermée sans l'AVO.

La deuxième partie de l'étude expérimentale est une simulation de la boucle de commande lorsqu'elle est associée à l'AVO. Le résultat de cette simulation est présenté dans la figure 46(c).

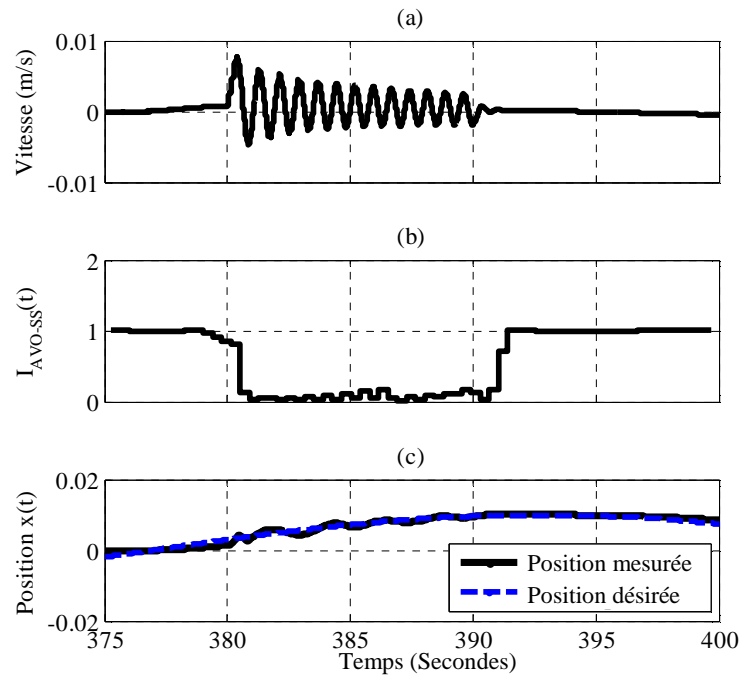


Figure 46 : (a) représente le signal de vitesse simulé (SS), utilisé comme une entrée pour l'AVO, (b) représente l'évolution de l'indice de l'AVO ( $I_{AVO-SS}$ ) et (c) représente la réponse de la boucle de commande lorsqu'elle est associée à l' $I_{AVO-SS}$ .



À partir de cette figure, nous pouvons conclure que l'AVO était en mesure de bien détecter et de bien réduire les vibrations mécaniques générées lors de l'IpHR. Cette tâche a été effectuée comme suit :

- L'indice  $I_{AVO-SS}$ , illustré dans la figure 46(b), est utilisé pour mettre à jour correctement le gain proportionnel  $K_p$  selon la règle de mise à jour donnée par (30). Ce gain proportionnel diminue lorsque l'indice  $I_{AVO-SS}$  se rapproche de 0 (c.-à-d. lorsque l'AVO détecte le mouvement vibratoire) afin d'assurer une réduction des vibrations en temps réel ;
- Ainsi, le  $I_{AVO-SS}$  augmente à 1 (c.-à-d. élimination des vibrations et assurance d'un mouvement sans vibrations) et le gain de la boucle retourne à sa valeur initiale (c.-à-d. multiplication par 1 qui est la valeur de l'indice lorsqu'aucun comportement vibratoire n'est détecté) ;
- Enfin, la mise à jour du gain proportionnel se reproduit de la même manière à chaque fois que l'AVO détecte un comportement vibratoire.

Finalement, la troisième partie de l'étude est une simulation de la boucle de commande lorsqu'elle est associée à l'AVO, mais lorsque ce dernier est exposé à un autre signal de vitesse représenté dans la figure 47(b). Ce signal est issu d'une simulation de la boucle de commande lorsqu'elle est exposée à un signal de force, représenté dans la figure 47(a), en tant qu'entrée au modèle de *l'admittance*.

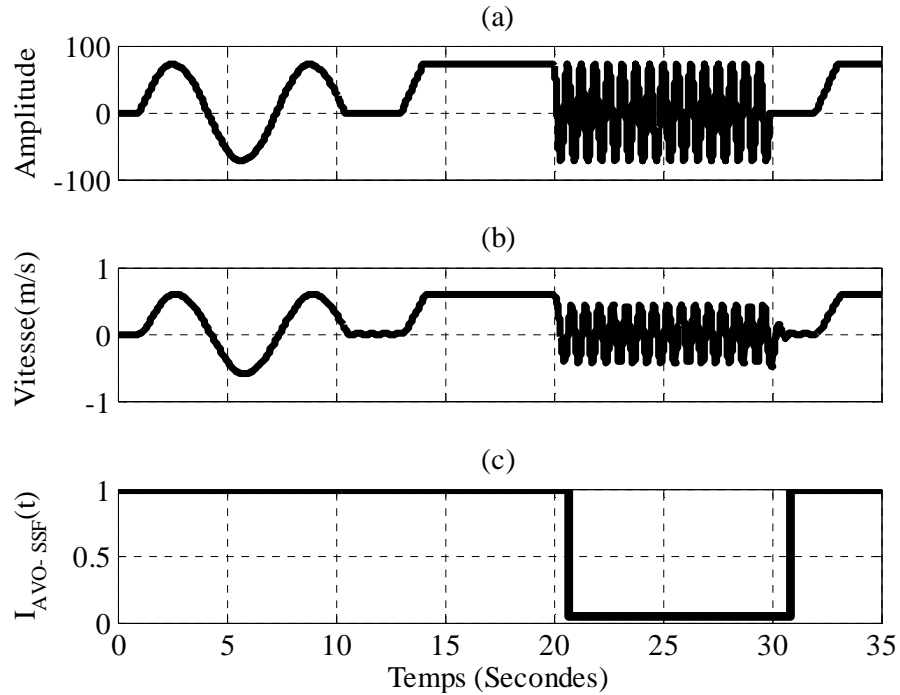


Figure 47 : (a) représente le signal de force utilisé comme entrée pour le modèle d'admittance, (b) représente le signal de vitesse simulé utilisé comme une entrée pour l'AVO et (c) représente l'évolution de l'indice de l'AVO ( $I_{AVO-SSF}$ ).

Pour les besoins de cette simulation, nous avons commencé par le réentraînement du réseau de neurones avec le signal de la vitesse simulé. Notre choix du réseau de neurones a été basé sur la minimisation de la valeur de la MSE. En effet, la plus petite valeur de la MSE a été trouvée avec un perceptron ayant 10 neurones dans la couche cachée, évaluée à  $2.39952 \times 10^{-25}$ . Cet entraînement résulte en un indice  $I_{AVO-SSF}$  représenté dans la figure 47(c). Cet indice sera utilisé pour régler le gain de la boucle de commande  $K_p$ , afin d'assurer une réduction des vibrations mécaniques présentes dans le signal électrique. Pour cela, nous avons associé la boucle de commande à l'indice  $I_{AVO-SSF}$ .

La réponse du système lorsqu'il est associé à cet indice est représentée dans la figure 48 où la ligne continue noire représente la réponse en vitesse de la boucle de

commande avec l'indice et la ligne bleue en pointillée représente la réponse en vitesse de la boucle de commande sans cet indice.

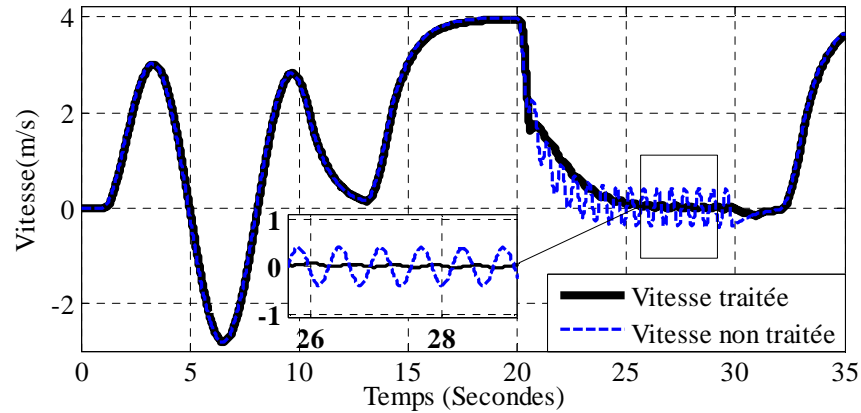


Figure 48 : La réponse de la boucle de commande lorsqu'elle est associée à l' $I_{AVO-SSF}$  (ligne noire solide) et la réponse de la boucle de commande sans l'AVO (ligne bleue en pointillée).

En se basant sur ces résultats, nous pouvons conclure que l'indice  $I_{AVO-SSF}$  était capable de réduire les vibrations mécaniques présentes dans le signal électrique. En effet, en comparant la réponse en vitesse du système lorsqu'il est associé à cet indice (c.-à-d. la ligne continue noire) à celle sans cet indice (c.-à-d. la ligne bleue en pointillée), nous constatons une diminution significative des vibrations.

#### b) Performance de l'observateur de type analyse statistique

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer la capacité de l'observateur de type analyse statistique dans la détection et la réduction des vibrations mécaniques mesurées dans le signal électrique. Pour ce faire, nous avons remplacé l'indice de l'AVO dans la boucle fermée par l'indice de la variance (c.-à-d. l'indice  $I_{SS}$ ) dans les domaines temporel et fréquentiel tel que représenté dans la figure 49(b). La réponse du système lorsqu'elle est associée à cet indice est représentée dans la figure 49(c).

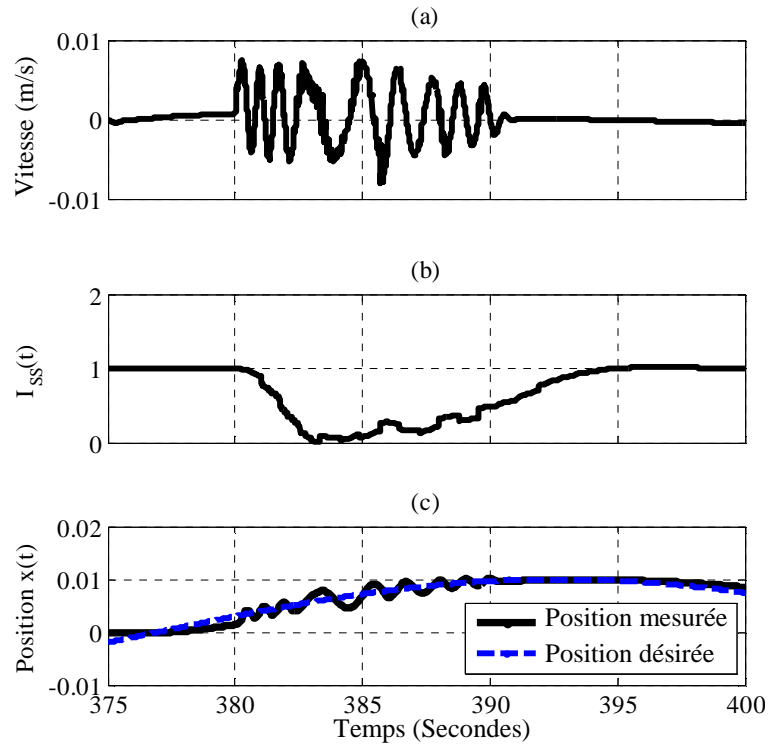


Figure 49 : (a) représente le signal de vitesse simulé utilisé comme une entrée à l'observateur de la variance, (b) représente l'évolution de l'indice de variance dans les domaines temporel et fréquentiel et (c) représente la réponse de la boucle de commande suggérée lorsqu'elle est associée à l' $I_{SS}$ .

De même, nous avons voulu évaluer la capacité de l'observateur de type écart type dans la réduction des vibrations lors des IpHRs. Pour ce faire, nous avons remplacé l'indice précédent par l'indice de l'écart type,  $I_{S-SS}$ , dans les domaines temporel et fréquentiel, tel que représenté dans la figure 50(b). La réponse du système lorsqu'il est associé à cet indice est représentée dans la figure 50(c).

En se basant sur ces résultats, nous pouvons conclure que les indices  $I_{SS}$  et  $I_{S-SS}$  ont été en mesure de réduire les vibrations mécaniques. En effet, en comparant les réponses du système lorsqu'il est associé à ces deux indices à la réponse du système présentée dans la figure 45(b), nous remarquons une diminution significative de l'amplitude des vibrations.

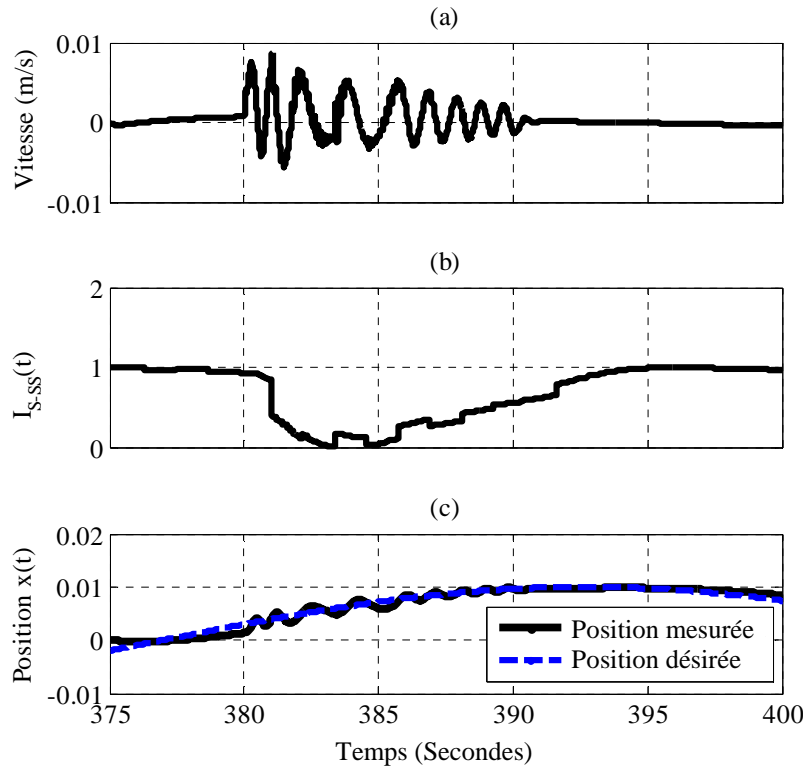


Figure 50 : (a) représente le signal de vitesse simulé utilisé comme une entrée à l'observateur de type écart type, (b) représente l'évolution de l'indice écart type dans le domaine temporel et fréquentiel et (c) représente la réponse de la boucle de commande lorsqu'elle est associée à  $I_{S-SS}$ .

### 3.7.3 Comparaison de l'AVO avec le TD-VOVC

Pour des fins de comparaison de notre observateur avec d'autres observateurs déjà existants, l'étude expérimentale finale a été réalisée avec une approche différente de celle présentée dans cette étude. Cette approche, le TD-VOVC (*Time Domain Vibration Observer Vibration Controller*), est basée sur une détection des vibrations mécaniques présentes dans le signal à travers une observation de leurs maximums et leurs minimums locaux dans le domaine temporel [39]. Pour ce faire, nous avons remplacé les indices de nos observateurs par l'indice présenté dans la figure 51(b) obtenu avec cette approche. La réponse du système quand il est associé à cet indice est représentée dans la figure 51(c).

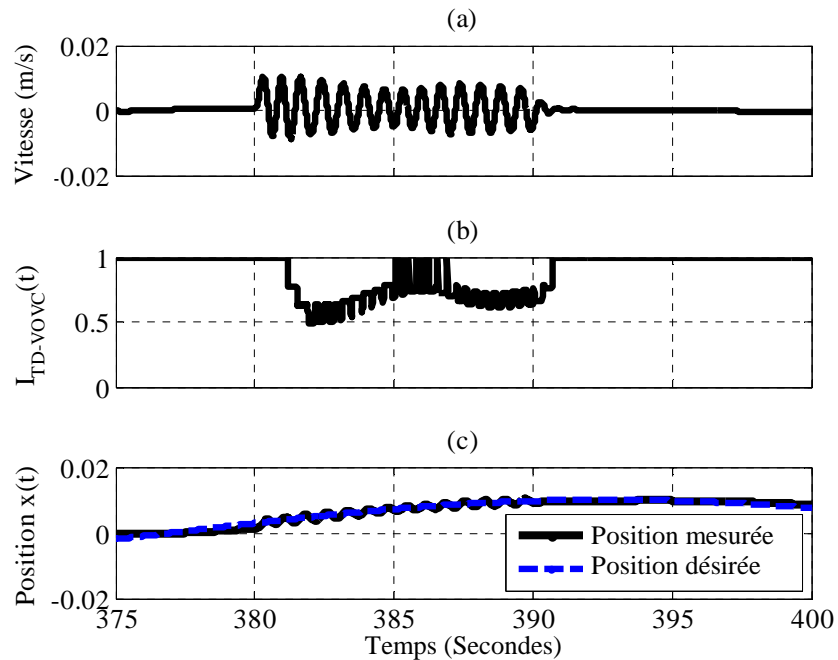


Figure 51 : (a) représente le signal de vitesse simulé utilisé comme une entrée à l'observateur de vibrations TD-VOVC, (b) représente l'évolution de l'indice généré par cet observateur et (c) représente la réponse de la boucle de commande lorsqu'elle est associée à l'  $I_{TD-VOVC}$ .

En se basant sur les résultats de la figure précédente, nous pouvons conclure que l'observateur de vibrations TD-VOVC a été en mesure de bien détecter et de bien minimiser les vibrations mécaniques quand elles apparaissent lors d'une IpHR. En effet, en comparant la réponse du système quand il est associé à cet observateur à la réponse du système quand il n'est associé à aucun observateur tel que présenté dans la figure 45(b), nous remarquons une diminution significative de l'amplitude des vibrations mécaniques. Dans ce qui suit, une étude comparative plus approfondie sera menée dans le but de pouvoir choisir l'approche la plus efficace, parmi les différentes approches présentées dans ce mémoire.

### 3.7.4 Discussion

Le moyen le plus efficace pour éviter les entraves à la performance humaine et pour assurer des IpHRs plus intuitives et plus transparentes est de détecter et d'éliminer

les sources d'instabilités et de vibrations. En ce sens, l'observateur proposé, l'AVO, a fait ses preuves dans l'amélioration des interactions grâce à sa capacité à détecter et à prévenir les comportements vibratoires à l'aide d'une commande adaptative. En effet, l'AVO a démontré sa capacité à détecter en temps réel les vibrations lorsqu'elles se produisent en raison d'une augmentation de la rigidité structurelle du bras de l'opérateur dans la boucle de commande. Plusieurs simulations en vitesses, dont celles présentées dans les figures 46(a) (vitesse simulée) et 47(b) (vitesse produite par le modèle d'admittance), ont été effectuées afin de valider le comportement de l'AVO. En effet, lorsque les vibrations sont détectées, les indices ont tendance à se rapprocher de zéro, sinon ils augmentent à un. Ces indices ont été utilisés pour mettre à jour le gain proportionnel selon la règle de mise à jour précitée (équation (30)), ce qui permet de contrer l'augmentation du gain introduit par la rigidité du bras humain. Ainsi, le gain de la boucle de commande devient proportionnel à  $I_{AVO-SS}$  (vitesse simulée) et à  $I_{AVO-SSF}$  (force simulée produisant une vitesse via le modèle d'admittance). Quand les indices diminuent, le gain de boucle diminue pour assurer des interactions avec des vibrations sous le seuil de perception de l'opérateur (c.-à-d. éloigner les pôles de l'axe imaginaire). Autrement, les indices augmentent à la valeur *un* et le gain de boucle revient à sa valeur initiale lorsque la rigidité structurelle du bras diminue (c.-à-d. opération optimale).

De même, l'observateur de type analyse statistique, ainsi que l'approche basée sur l'identification des vibrations avec une référence aux maximums et aux minimums locaux (TD-VOVC), ont également été conçus dans le but de réduire les vibrations mécaniques qui représentent des entraves à la stabilité et à la transparence des

mécanismes robotiques. Finalement, puisque nous avons effectué plusieurs simulations avec différentes approches, nous allons les comparer. Pour ce faire, nous avons évalué, pour chaque approche, la robustesse du système en analysant l'évolution de l'erreur entre les positions désirées et les positions mesurées comme le montre la figure 52.

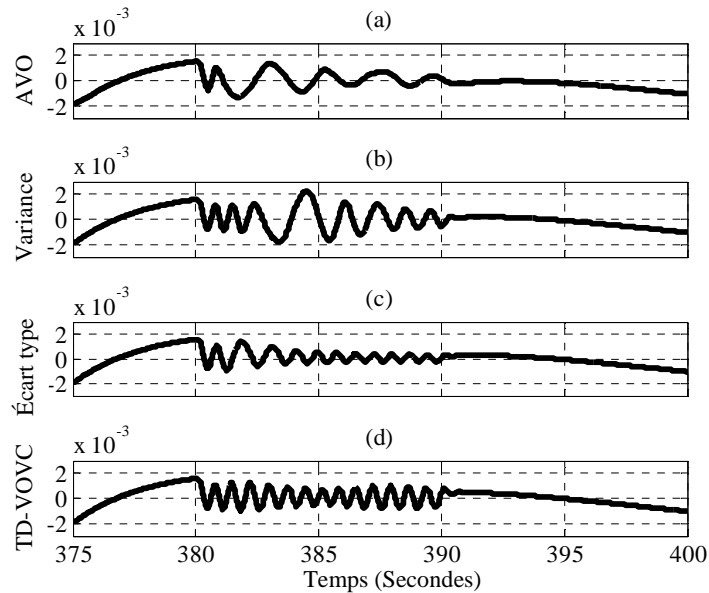


Figure 52 : L'évolution de l'erreur lorsque la boucle de commande est associée à l'observateur AVO (a), à l'observateur de la variance (b), à l'observateur d'écart type (c) et à l'observateur TD-VOVC (d).

De même, dans le but de mieux visualiser la distribution de l'erreur présentée dans la figure précédente, nous avons vu l'intérêt de présenter l'histogramme illustré dans la figure 53.

En analysant ces deux figures, nous constatons que l'erreur entre la position désirée et la position mesurée, lorsque la boucle de commande est associée à l'observateur AVO, est celle qui a plus de tendance à converger vers zéro (c.-à-d. minimisation de l'erreur) par rapport aux autres erreurs.



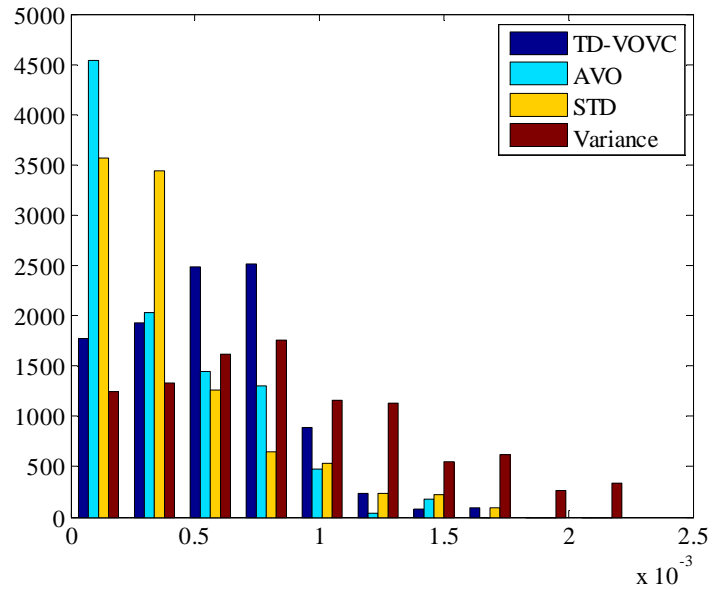


Figure 53 : Distribution de l'erreur lorsque la boucle de commande est associée à l'observateur TD-VOVC, à l'observateur AVO, à l'observateur avec écart type et à l'observateur avec variance.

Dans ce qui suit, une analyse statistique ainsi qu'une analyse de performance basée sur le temps d'exécution de chaque approche seront menées afin de nous aider à vérifier la validité de notre algorithme et à affirmer la constatation précitée. Les variables statistiques utilisées dans cette investigation sont l'écart type, la variance et la moyenne effectuées dans une période de temps entre 380 et 390 secondes, exactement quand les observateurs sont activés (c.-à-d. lors de la détection des vibrations). Les temps d'exécution vont illustrer le temps mis par chaque algorithme pour effectuer un traitement unique (c.-à-d. entre deux périodes d'échantionnage). Les résultats de ces analyses sont présentés dans le Tableau 2 où le « *overhead* » présente le temps nécessaire pour calculer tous les autres blocs dans la boucle de commande (c.-à-d. tel que le modèle du robot, le modèle humain, *l'admittance* et le modèle *d'imperfections*) et le temps pris pour assurer les additions, les multiplications et l'ouverture ainsi que la fermeture du fichier *Simulink*.

Tableau 2 : Résultat de l'analyse statistique et du temps d'exécution.

		<b>AVO</b>	<b>Variance</b>	<b>Écart type</b>	<b>TD-VOVC</b>
<b>Variable statistiques</b>	<b>Écart type</b>	0.2941 $\times 10^{-3}$	0.5338 $\times 10^{-3}$	0.3443 $\times 10^{-3}$	0.3198 $\times 10^{-3}$
	<b>Variance</b>	0.0865 $\times 10^{-6}$	0.2849 $\times 10^{-6}$	0.1186 $\times 10^{-6}$	0.1023 $\times 10^{-6}$
	<b>Moyenne</b>	0.3324 $\times 10^{-3}$	0.8468 $\times 10^{-3}$	0.4008 $\times 10^{-3}$	0.5634 $\times 10^{-3}$
<b>Temps d'exécution en secondes</b>	<b>Overhead</b>	16.21	16.21	16.21	16.21
	<b>Temps d'exécution pour chaque traitement</b>	2.9199 $\times 10^{-5}$	7.7997 $\times 10^{-5}$	110 $\times 10^{-5}$	320 $\times 10^{-5}$

En se basant sur ces résultats, nous constatons que les valeurs les plus faibles des variables statistiques et du temps d'exécution sont celles obtenues lorsque la boucle de commande est associée à l'observateur AVO. Ainsi, nous pouvons conclure que l'AVO effectue une meilleure identification et une meilleure réduction des vibrations et donc il permet des interactions plus confortables et plus intuitives. Par conséquent, nous pouvons confirmer que l'AVO est l'approche la plus appropriée pour assurer des tâches d'assemblage. Nous devons encore améliorer ces résultats avec une évaluation avec des participants humains. Cependant, puisque nous connaissons le seuil de perception de l'humain à des vibrations dans la peau [22], il serait possible d'optimiser l'AVO sous ce seuil.

### 3.8 Conclusion

Ce chapitre a présenté et détaillé la démarche préconisée permettant de réaliser la conception et le développement de deux observateurs de vibrations dans le but

d'assurer une détection et une minimisation des vibrations en situation d'IpHR. Le premier observateur est basé sur une analyse statistique d'un signal de vitesse capturé, à partir d'une réelle IpHR avec un mécanisme robotique à 1-DDL, grâce à un capteur de vitesse. Le deuxième, quant à lui, est un observateur de type réseau de neurones artificiels (c.-à-d. AVO) capable de remplacer le premier observateur dans le but d'assurer une détection et une minimisation, en temps réel, des vibrations mécaniques.

Suite à plusieurs simulations des deux observateurs susmentionnés, il est possible de conclure que l'AVO est l'approche la plus adaptée pour assurer une IpHR plus intuitive et plus transparente. En effet, l'AVO a fait ses preuves dans l'assurance d'une détection et d'une minimisation en temps réel des comportements vibratoires lorsqu'ils se produisent en raison de l'existence de la rigidité structurelle du bras humain dans la boucle de commande.

## Chapitre 4

### Guide haptique virtuel

Ce chapitre traite des démarches et des résultats de conception et de développement d'un guide haptique virtuel dans *ROS* interfacé avec la technologie RA grâce aux lunettes *Epson Moverio BT-200* et manipulé, dans l'environnement de visualisation 3D (*RVIZ*), avec une interface haptique *PHANTOM Omni*. Ce guide permettra d'assister et de faciliter les opérations de manutention telles que le déplacement et l'insertion des pièces dans un assemblage, tout en retournant des efforts de force adaptés lorsqu'il se produit une collision entre la masse à déplacer et le guide virtuel. Puisque le guide haptique génère une rigidité lors d'un contact avec l'objet à assembler, l'observateur de vibrations sera aussi utilisé pour réduire les problèmes de vibrations. En premier lieu, il est fondamental de rappeler la problématique à résoudre dans ce projet de recherche. Ensuite, nous exposerons les spécifications logicielles et matérielles nécessaires pour le développement et la mise en place du système haptique. Les simulations et les résultats expérimentaux sont ensuite menés afin d'évaluer la validité du système proposé.

## 4.1 Introduction

Comme il a été expliqué au début de ce mémoire, la problématique à résoudre dans ce projet de recherche se présente en deux parties. La première partie consiste à réduire les vibrations mécaniques générées en situation d'IpHR par le biais d'un observateur de vibrations et d'une commande adaptative. Cette étude a été présentée et détaillée dans le chapitre précédent. En effet, il a été démontré expérimentalement que l'AVO s'est présenté comme l'approche la plus efficace pour satisfaire les critères d'intuitivité, de performance et de transparence des mécanismes robotiques en situation d'IpHR grâce à une détection et une minimisation, en temps réel, des vibrations mécaniques à l'aide d'une commande adaptative.

La deuxième partie de la problématique susmentionnée réside dans la modélisation et la réalisation d'un guide haptique virtuel visant à assister les tâches d'assemblage. Cette partie sera détaillée tout au long de ce présent chapitre. Ainsi, pour modéliser la partie de l'objet à assembler par le robot, nous avons créé une sphère virtuelle (*Haptic Interactive Point*), pour les besoins des simulations, dans l'environnement 3D de simulation virtuelle. Puisque ce guide haptique génère une force proportionnelle à sa rigidité, comme dans le cas d'une augmentation de la rigidité structurelle du bras de l'opérateur, l'observateur de vibrations avec sa commande adaptative demeure nécessaire.

Ce chapitre se présente comme une suite logique de la revue présentée dans le chapitre 2, qui était une étape indispensable pour la compréhension des notions de la RA et du rendu haptique. Ainsi, ce chapitre permettra, en premier lieu, de définir les

spécifications matérielles et logicielles nécessaires pour le développement d'un entonnoir servant d'un guidage pour l'assemblage des pièces. Par la suite, ce chapitre détaillera la partie conception et développement de ce système haptique. Finalement, nous allons finir ce chapitre par présenter des simulations de ce guide dans *ROS*.

## 4.2 Spécification logicielle et matérielle

Cette section se veut une présentation détaillée des différents outils logiciels et matériels utilisés dans la réalisation du système haptique virtuel incluant la technologie de la RA favorisant une amélioration de la performance des opérateurs lors de l'assemblage des pièces.

### 4.2.1 Robot Operating System (ROS)

ROS, originellement développé par la société Willow Garage en 2006, est une plateforme de développement logicielle en libre accès pour les robots, fonctionnant sur une distribution Linux. La dernière version, lors de l'écriture de ce mémoire, est ROS Jade qui est sortie en avril 2015, mais c'est sur la version précédente, ROS Indigo, que nous avons effectué ce projet de recherche. ROS est compatible sur un bon nombre de robots existants sur le marché tel que Qbo et Robotino [82].

ROS fournit des bibliothèques et des outils permettant aux développeurs de créer des applications robotiques complexes et robustes. Également, il procure une abstraction matérielle, des pilotes de périphériques, des environnements de visualisation ainsi qu'une gestion des paquets pour la télécommunication. Grâce à plus de 3000 bibliothèques, il constitue le logiciel le plus utilisé dans le domaine de la

robotique en recherche scientifique et en industrie. En effet, il est doté d'une grande communauté de développeurs et de chercheurs assurant le transfert des connaissances et accélérant la phase de développement. ROS propose, aussi, une multitude de langages de programmation tels que le C++, le python et le lisp. Cette variété de langages accorde aux développeurs la possibilité de programmer avec le langage qui leur semble le plus facile et le plus approprié. Avec tous ces avantages, ROS semble être le logiciel le mieux adapté pour ce projet de recherche. ROS est composé de plusieurs fonctionnalités nécessaires pour son fonctionnement. Parmi ces fonctionnalités, nous allons détailler les plus importants soient :

- *Nodes* (noeuds) ;
- *Messages* ;
- *Topics* (sujets) et ;
- *ROS Master* (*le maître*)

Un « *Node* » ou nœud est un simple programme qui peut être écrit soit en Lisp, soit en Python ou en C++. Ces nœuds communiquent entre eux en publiant des messages à un *Topic*. Ces messages sont des structures de données et les sujets (*Topics*) sont les bus avec lesquels les nœuds peuvent échanger ces messages. Le ROS Master est celui qui permet aux nœuds de se localiser l'un et l'autre. La figure ci-dessous montre un exemple<sup>7</sup> d'un *sujet* qui permet de comprendre le fonctionnement des nœuds dans ROS :

---

<sup>7</sup> Cet exemple est pris à partir du Wiki de ROS.  
<http://wiki.ros.org/ROS/Tutorials/UnderstandingTopics>.



Figure 54: Communication entre deux nœuds via le *Topic command\_velocity*.

Dans cette figure, le nœud « teleop\_turtle » communique avec le deuxième nœud « turtlesim ». Le premier publie des données (c.-à-d. les messages) de vitesse à un *sujet* et le deuxième nœud récupère, les messages envoyés par le premier nœud, par une souscription au même *sujet*. Chaque nœud (un logiciel) est indépendant et il peut donc se retrouver sur différentes plateformes, dont Android ou sur plusieurs robots.

#### 4.2.2 RVIZ

Rviz est un environnement de visualisation 3D pour ROS permettant d’afficher des données, des objets et des robots virtuels grâce à un nœud. Il est possible d’interagir dans l’environnement virtuel et d’effectuer des simulations des systèmes robotiques via des programmes en C++, Python et lisp [82]. Nous l’utiliserons plus tard pour effectuer des simulations avec l’entonnoir de guidage haptique et la sphère virtuelle (ou *Haptic Interactive Point - HIP*).

#### 4.2.3 Epson Moverio BT-200

La lunette Moverio BT-200, présentée dans la figure 55, est une lunette équipée d’une technologie d’affichage Si-OLED de (960x540) x 3 pixels avec 23 degrés de champs de vision permettant d’afficher des objets virtuels dans le monde réel d’une dimension de 80 pouces à une distance de cinq mètres. Elles sont dotées d’une caméra, d’une centrale inertielle, d’un GPS et d’un processeur avec un OS Android permettant



aux logiciels de comprendre les mouvements et l'environnement de l'utilisateur afin de procurer un rendu visuel intéressant. Forts du succès des *BT-100*, les *BT-200* sont élégantes et possèdent une luminosité 60 % plus élevée, tout en étant deux fois plus petites et plus confortables. Les *BT-200* fonctionnent sous Android, ce qui permet d'accéder à de nombreuses applications via le « *Moverio Apps Market* », alimenté par une importante communauté de développeurs. Ces derniers peuvent utiliser le kit de développement logiciel Android standard pour créer des applications innovantes ou adapter des applications existantes à cet appareil. Un vaste choix d'options de connexion, notamment le Wi-Fi, le Bluetooth 3.0 et le *Miracast*<sup>8</sup>, permet de connecter et d'utiliser des périphériques intelligents, de surfer sur le Web ou même de lire du contenu vidéo en continue. Ce choix peut se faire grâce à une télécommande équipée d'un pavé tactile multicouche, permettant de prendre le contrôle facilement de la lunette [83]. Nous utiliserons ce dispositif afin de visualiser l'entonnoir de guidage haptique et la sphère virtuelle lors des simulations dans RVIZ.



Figure 55 : La lunette Epson Moverio BT-200.

---

<sup>8</sup> **Miracast** est une technologie développée par le consortium Wi-Fi Alliance permettant le partage des signaux vidéo/audio affichés sur un appareil mobile vers un diffuseur (TV / moniteur), et vice versa, sans nécessiter de connexion filaire entre les deux équipements et sans passer par un routeur. Il s'agit d'une connexion de type P2P (peer-to-peer) qui établit un lien direct entre les deux objets [85].

#### 4.2.4 PHANToM Omni

Le *PHANToM Omni*<sup>9</sup> est un dispositif haptique développé au *MIT* et produit par la compagnie *Sensable Technologies*. Ce bras haptique avec 6-DDL permet aux utilisateurs de toucher et de manipuler des objets virtuels dans des environnements virtuels. Il constitue l'une des plus importantes avancées technologiques (pour son faible coût et son accessibilité) dans le domaine des interfaces Homme-Machine [17]. Dans ce sens, afin de pouvoir contrôler et manipuler le HIP développée dans ROS, nous avons choisi d'utiliser cette interface haptique, comme bras maître dans un système télé-opéré, afin de débiter des tests pratiques [53]. Dans ce système télé-opéré, le *PHANToM* est le maître et l'HIP, lié à l'effecteur du robot manipulateur, devient l'esclave.

Bien que le *PHANToM*, présenté dans la figure 56, ne soit pas commandé en admittance, ce choix a été fait afin de pouvoir, d'une part, utiliser les positions de ce dispositif comme consignes pour le positionnement du HIP dans l'environnement virtuel (c.-à-d. RVIZ) dans le but de déplacer l'effecteur d'un manipulateur virtuel, qui lui utilise une commande en admittance. D'autre part, le *PHANToM* permet de ressentir les forces restituées lors d'une interaction entre la sphère virtuelle, lié à l'effecteur du robot, et le guide haptique favorisant l'assemblage.

---

<sup>9</sup> <http://www.sensable.com/>.



Figure 56 : Le bras PHANToM Omni.

Enfin, il faut comprendre qu'il faut, dans un premier temps, tester la plateforme et le système de commande avant une mise en œuvre réelle.

Le manipulateur virtuel utilisé est le robot « UR5 » (figure 57) qui a été développé dans RVIZ par la communauté ROS. Cette manipulation sera réalisée ultérieurement avec le mécanisme réel. Cette stratégie réduira les risques d'accidents lors du déploiement de la solution. Bien entendu, le modèle qui sera mis en œuvre dans ROS sera celui de la figure 43. Les vibrations pourront être reproduites au *PHANToM* via son retour haptique.

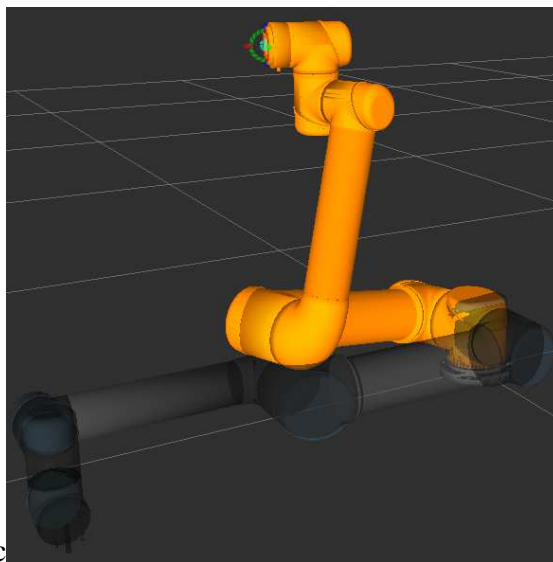


Figure 57 : Robot UR5 simulé dans RVIZ.

### 4.3 Communication entre ROS, le *PHANToM* Omni et l'Epson Moverio

Comme nous l'avons mentionné plus tôt, il y a une télécommunication entre les différentes composantes du système. En effet, nous allons interfacer le guide haptique (c.-à-d. l'entonnoir avec le cylindre et la sphère) en utilisant une lunette de la RA (c.-à-d. l'*Epson Moverio*) pour pouvoir afficher ce guide dans notre monde réel. Ensuite, nous allons utiliser le *PHANToM Omni* pour déplacer la sphère à l'intérieur de l'entonnoir tout en mettant l'accent sur le rendu haptique pour assurer une interaction optimale. La télécommunication mise en œuvre, représentée dans la figure 58, va être réalisée grâce à des nœuds ROS qui communiquent à leurs tours entre eux par le biais d'un *sujet* (i.e. soit pour envoyer ou recevoir des messages).

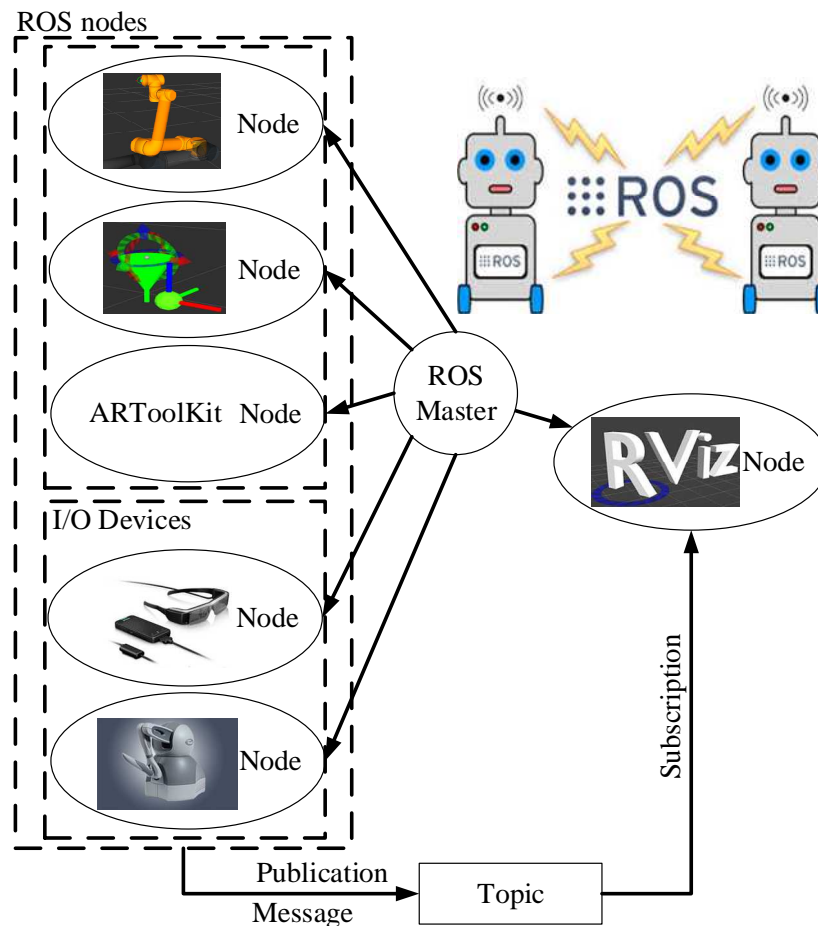


Figure 58 : Communication entre le *PHANToM Omni*, ROS et l'Epson Moverio.

Maintenant, après avoir introduit les différentes spécifications et composantes matérielles et logicielles nécessaires pour la mise en place de ce système de guidage haptique, nous pouvons détailler, dans la prochaine section, la procédure suivie pour la conception et le développement du système.

#### 4.4 Conception et développement du guide haptique virtuel

Dans ce qui suit, nous allons détailler la procédure suivie pour la mise en place de l'entonnoir de guidage haptique et du HIP dans RVIZ. Tout d'abord, nous avons commencé par concevoir un entonnoir, comme le présente la figure 59, dans *SolidWorks*<sup>10</sup>. Cet entonnoir avec un cylindre à sa pointe a été conçu avec des dimensions complètement arbitraires, mais qui peuvent être modifiées lors de son intégration dans l'environnement de visualisation 3D (c.-à-d. RVIZ).

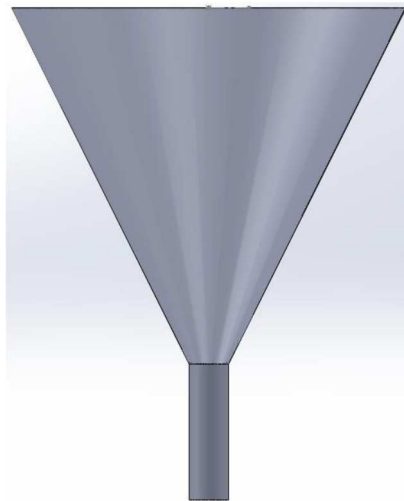


Figure 59 : Entonnoir de guidage développé dans SolidWorks.

---

<sup>10</sup> **SolidWorks** est un logiciel de conception 3D assistée par ordinateur fonctionnant sous Windows [84].

Ensuite, pour pouvoir afficher cet entonnoir dans RVIZ, nous avons eu recours à l'extension<sup>11</sup> *SolidWorks to URDF*<sup>12</sup> *Exporter*, et ce dans le but de le convertir en un fichier *STL*<sup>13</sup>. Par la suite, nous l'avons affiché dans RVIZ, comme le montre la figure 60 et la figure 61, grâce à un programme ROS (c.-à-d. via un *Node*) qui est le même pour afficher n'importe quelle forme.

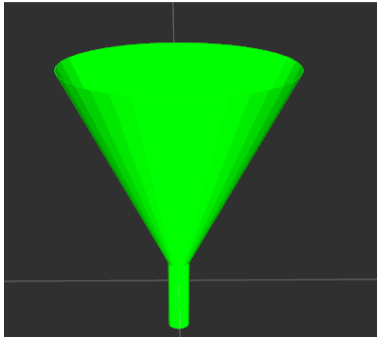


Figure 60 : L'entonnoir de guidage dans RVIZ (vu de face).

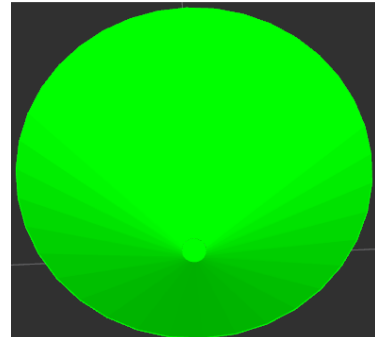


Figure 61 : L'entonnoir de guidage dans RVIZ (vu de dessus).

Comme nous l'avons mentionné précédemment, nous allons représenter la masse à assembler par le robot par une sphère nommée le *Haptic Interactive Point*. Cette dernière, présentée dans la figure 62, a été ajoutée dans l'environnement de visualisation 3D grâce un autre nœud.

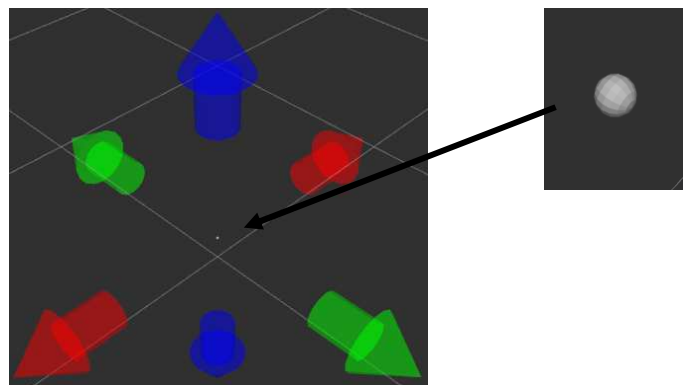


Figure 62 : Le marqueur interactif dans RVIZ.

<sup>11</sup> **SolidWorks to URDF Exporter** C'est un "add-in" pour SolidWorks qui permet d'exporter des pièces et des assemblages SolidWorks dans un fichier URDF.

<sup>12</sup> **URDF** C'est un fichier à base de balise qui permet de dessiner un objet ou un robot dans un environnement de visualisation 3D.

<sup>13</sup> **STL** Un fichier STL décrit la géométrie de surface d'un objet en 3 dimensions.

Cette sphère a été conçue dans le but de déplacer la pointe de l'objet, qui sera assemblé, à l'intérieur de l'entonnoir de guidage, allant du haut de l'entonnoir jusqu'à arriver à la pointe de ce dernier (c.-à-d. mouvement normal) pour l'assembler sur un convoyeur. Ce type de mouvement sera accompli grâce à un marqueur interactif (lié aux différentes flèches présentées dans la figure 62). Ces flèches vont rendre la sphère interactive d'où le nom « *Interactive Marker* » dans ROS, (i.e. mais nommé HIP dans le domaine de l'haptique). En effet, un mouvement des flèches rouges provoque un mouvement de la sphère sur l'axe x. De même, un mouvement des flèches vertes déclenche un mouvement de la sphère sur l'axe y. Par ailleurs, un mouvement des flèches bleues occasionne à son tour un mouvement de la sphère sur l'axe z. Ensuite, nous avons associé les deux objets virtuels (c.-à-d. à savoir l'entonnoir et la sphère) dans l'environnement de visualisation 3D RVIZ, comme le montre la figure 63.

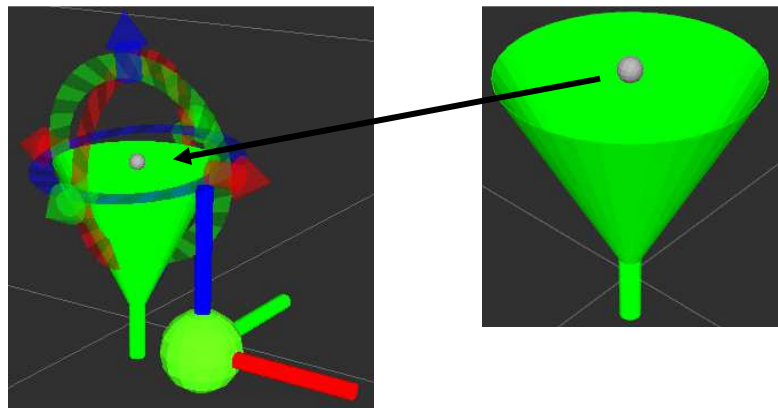


Figure 63 : Le marqueur interactif à l'intérieur du cône de guidage dans RVIZ.

Cette sphère ne doit en aucun cas dépasser les frontières de l'entonnoir de guidage afin d'arriver à compléter un assemblage précis d'une pièce lourde. Le guide haptique est donc d'une rigidité très élevée pouvant augmenter le risque de vibrations lors d'une interaction physique. Pour ce faire, une détection des collisions entre la sphère et le cône et celles entre la sphère et le cylindre s'avère une première étape avant

le rendu haptique. En effet, à chaque fois qu'une collision se produit, il faut retirer le mouvement excédentaire et parfois appliquer un léger déplacement inverse pour aider à guider l'opérateur vers le bas de la pièce. Cette collision ne se fait pas à partir du modèle visuel du guide, mais plutôt à partir de sa modélisation mathématique.

Comme nous l'avons mentionné ci-dessus, les dimensions de l'entonnoir peuvent être modifiées lors de l'intégration de ce guide dans RVIZ. Dans ce sens, pour assurer la compréhension du lecteur, nous allons utiliser des dimensions fixes pour expliquer comment nous avons fait pour détecter la collision entre le cône et la sphère et celle entre cette dernière et le cylindre. Ainsi, nous fixons les dimensions suivantes pour la démonstration (voir la figure 64) :

- la hauteur  $h = 3\text{m}$  ;
- le rayon  $R = 2\text{m}$  et ;
- l'équation d'un cône de révolution:

$$x^2 + y^2 = z^2 \times \tan^2 \alpha, \quad (31)$$

avec  $\alpha$  est l'angle intérieur du cône.

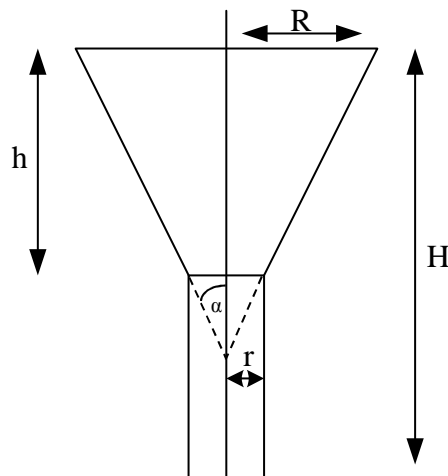


Figure 64 : Modélisation de l'entonnoir de guidage.



Ainsi, dans notre cas,  $\alpha$  est calculé comme suit :

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{R}{h} = \tan^{-1} \frac{2}{3} = 33.69^\circ \quad (32)$$

De ce fait, si l'angle de la sphère par rapport à l'origine du cône (c.-à-d.  $\beta$  dans la figure 65) est supérieur à  $33.69^\circ$  (c.-à-d. la valeur de l'angle  $\alpha$ ), cela indique que la sphère s'est dirigée hors du cône et sa position doit être corrigée pour la commande en admittance proposée dans la figure 7.

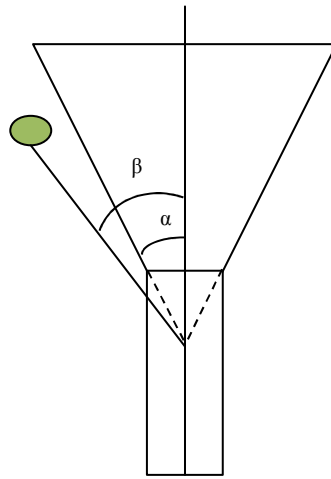


Figure 65 : Direction de la sphère hors de l'entonnoir.

Dans ce sens, d'une manière générale, si  $z$  est la position de la sphère sur l'axe vertical et  $x$  et  $y$  sont les positions de la sphère sur l'axe horizontal, ainsi, la décision de la collision prend la forme suivante :

- Si  $\arctan\left(\frac{\sqrt{x^2+y^2}}{z}\right) > \arctan\left(\frac{\text{rayon}}{\text{hauteur}}\right)$ , donc nous aurons une collision et la position de la sphère doit être corrigée tout en éliminant le mouvement excédentaire via un retour de force soumis à l'opérateur ;
- De même, si  $z > h$ , donc nous aurons aussi une collision et la position de la sphère doit être corrigée.

Dans ce qui suit, nous allons voir comment nous avons fait pour détecter les collisions entre la sphère et le cylindre. Tout d'abord, nous rappelons l'équation du cylindre qui est la suivante :

$$x^2 + y^2 = r^2 \quad (33)$$

La collision est calculée grâce au rayon de base  $r$  du cylindre. En effet, en considérant que  $x$  et  $y$  sont les positions de la sphère sur l'axe horizontal, nous pouvons déduire que si la distance horizontale entre la sphère et l'axe central du cylindre est supérieure à  $r$ , alors nous aurons une collision. Ainsi, la décision de la collision prend la forme suivante :

- Si  $x^2 + y^2 > r^2$ , donc nous aurons une collision entre le cylindre et la sphère et la position de cette dernière doit être corrigée.

Jusqu'à maintenant, le guide virtuel a été défini dans ROS en utilisant les relations mathématiques décrivant la géométrie de la frontière, ce qui permet de communiquer les positions à la commande en admittance pour gérer la collision. Dans ce qui suit, nous allons présenter la démarche suivie pour assurer le ressenti du guidage haptique entre la frontière du guide et la sphère virtuelle à travers le dispositif haptique le *PHANToM Omni* (c.-à-d. présenté dans la figure 56). Pour ce faire, nous avons fixé un ressort virtuel (i.e. programmé avec à un nœud (programme ROS)) sur l'extrémité du guide virtuel comme le montre la figure 66. Ce ressort est fixé à partir du centre du cône pour s'assurer que l'opérateur puisse compléter une opération d'approche vers le cylindre. De même, il est possible d'augmenter la rigidité  $K$  plus l'HIP est près du cylindre pour rendre les tâches d'assemblage de plus en plus facile.

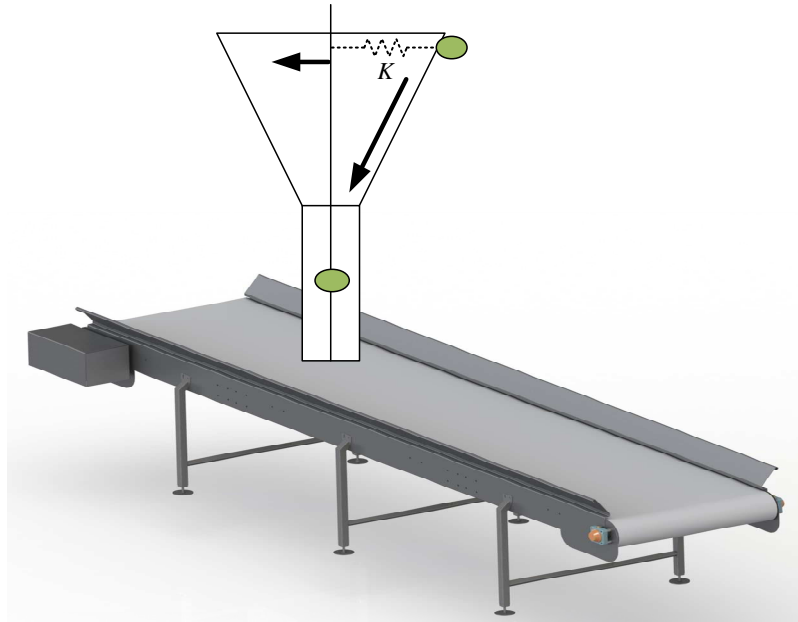


Figure 66: Modélisation du système de retour de force où  $K$  est la raideur.

Ce type d'assistance sera effectué d'une façon permanente jusqu'à ce que l'opérateur réussisse sa tâche d'assemblage (c.-à-d. déplacement de la sphère virtuelle à partir du haut de l'entonnoir vers le bas pour arriver au bon endroit de l'assemblage sur le convoyeur).

Comme nous l'avons indiqué ci-dessus, les mouvements de l'opérateur sont guidés à l'intérieur de l'entonnoir et restreints en position sur ses frontières. Cette restriction est réalisée grâce à une commande hybride (c.-à-d. force du ressort et position du HIP), assurant ainsi une insertion intuitive dans le cylindre même s'il y a des interférences visuelles entre l'humain et les pièces réelles dans l'environnement de travail. Cette force opposée est envoyée, en temps réel, au *PHANToM Omni* générant une impression de retour des forces à l'opérateur et empêchant la sortie de la sphère de l'intérieur du guide haptique (c.-à-d. le cône et le cylindre). Le *PHANToM* démontre ainsi la faisabilité de compléter une réalisation réelle avec un IAD.

Finalement, nous présentons, dans la figure suivante, le système final incluant le guide haptique et le manipulateur virtuel (c.-à-d. le robot UR5) interfacés par la technologie RA et manipulé avec le dispositif haptique *PHANToM Omni* pour les retours de forces adaptés aux opérateurs. Ce système nous a permis parfaitement de visualiser les objets virtuels (i.e. la masse virtuelle à déplacer, l'environnement de travail virtuel ainsi que le robot UR5 développés dans RVIZ) avec la technologie RA grâce aux lunettes *Epson Moverio*. De même, grâce au *PHANToM Omni*, nous avons pu interagir avec ces objets virtuels pour effectuer des déplacements de la masse virtuelle uniquement à l'intérieur de l'entonnoir virtuel (i.e. restriction du mouvement comme expliqué ci-dessus). Cette interaction a été caractérisée, lors des simulations, par des retours haptiques adaptés lors des collisions entre les objets virtuels.

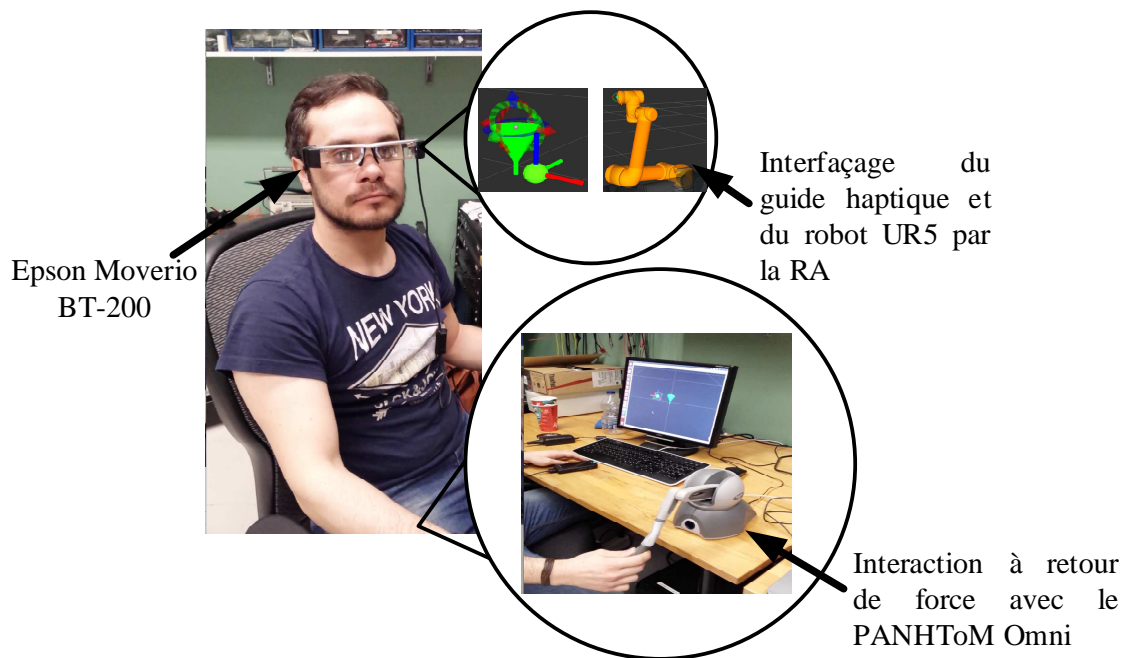


Figure 67 : Système final incluant le guide haptique et le robot UR5 interfacés par la RA et manipulé par le PHANToM Omni pour le retour de forces.

## 4.5 Conclusion

Ce chapitre a présenté et détaillé la démarche préconisée pour réaliser la conception et le développement d'un guide haptique interfacé par la technologie RA dans le but d'assister et de faciliter les tâches d'assemblages en industrie. L'interaction avec ce guide haptique a été rendue possible grâce à un dispositif haptique le *PHANToM Omni*. Ce dernier a permis une restriction du mouvement dans l'environnement de visualisation 3D (c.-à-d. RVIZ) et a assuré les retours de forces aux opérateurs lors des collisions entre les objets virtuels. Finalement, il convient de souligner que suite à plusieurs simulations du système susmentionné dans ROS, nous avons été en mesure d'interagir avec des objets virtuels (c.-à-d. la sphère et le guide haptique), interfacés par la technologie RA grâce aux lunettes *Epson Moverio BT-200* et avec un *PHANToM Omni* comme le montre la figure 67.

## Chapitre 5

### Conclusion et travaux futurs

#### 5.1 Conclusion générale

Ce projet de recherche traite une problématique d'amélioration des conditions des employés en industrie en situation d'IpHR via un contact direct entre le robot et l'humain à travers une poignée sensible. L'interaction physique directe a comme conséquence, comme il a été détaillé tout au long de ce mémoire, la génération d'un mouvement vibratoire causé par une augmentation de la rigidité structurelle du bras humain. Ces vibrations réduisent la transparence de l'opération et donc diminuent la transparence du mécanisme.

Dans ce sens, ce projet de recherche apporte une contribution liée à la réduction des vibrations. En effet, le présent mémoire propose deux observateurs conçus dans le but de minimiser ou, dans les meilleures conditions, éliminer les vibrations qui peuvent être générées lors d'une IpHR. Une revue de ces deux systèmes, comportant trois parties, est présentée ci-dessous.

Tout d'abord, le deuxième chapitre traitait, d'une part, des différents outils utilisés dans le domaine de l'IpHR pour satisfaire des interactions plus intuitives et plus transparentes, et d'autre part, de la notion et du concept de la RA avec retour d'effort en situation d'IpHR. Dans un premier temps, les commandes en forces et les observateurs de vibrations ont été présentés. Ensuite, la technologie RA a été introduite pour la réalisation d'un guide virtuel. Par la suite, la notion des interactions à retour

haptique ainsi que leurs modalités sensorielles à savoir la kinesthésie et le sens de toucher sont abordées. Finalement, une revue de la littérature sur les systèmes basés sur le retour haptique et/ou la RA a été présentée dans le but de démontrer, à partir des travaux réalisés antérieurement, l'importance de la RA en situation d'IpHR.

Le troisième chapitre présentait la démarche préconisée afin de développer deux observateurs de vibrations faisant face aux problèmes susmentionnés. Le premier était un observateur de type analyse statistique. Ce dernier a été réalisé avec une analyse de la variance et de l'écart type. Le deuxième observateur, quant à lui, était de type réseau de neurones artificiels. Ces deux observateurs ont été réalisés dans le but de détecter et de minimiser les comportements vibratoires lors d'une IpHR. En effet, ces observateurs génèrent, en fonction d'un signal de vitesse et en temps réel, des indices judicieux (c.-à-d. entre 0 et 1) proportionnels aux amplitudes et aux fréquences des vibrations mécaniques éparpillées dans le signal électrique. Ces indices ont été utilisés pour assurer une mise à jour efficace et automatique du gain de la boucle de commande en fonction des vibrations détectées via une commande adaptative. Un tel ajustement pourrait éviter toutes entraves à la performance et à l'intuitivité des opérations normales grâce à une élimination des vibrations. De même, à travers ce chapitre, il a été aussi démontré avec des simulations que l'AVO, basé sur une approche par réseau de neurones artificiels, serait l'approche la plus efficace dans l'assurance d'une IpHR plus transparente et intuitive.

Le dernier chapitre, quant à lui, se souciait de la conception et du développement de l'outil final pour assurer une assistance et une facilitation des opérations de manutention telles que le déplacement et l'insertion des charges lourdes dans un

assemblage. Cet outil réside en un guide haptique virtuel, interfacé par la technologie RA, grâce aux lunettes *Epson Moverio BT-200*. L'interaction avec le guide haptique a été réalisée grâce à un dispositif haptique, le *PHANTOM Omni*, qui permettait d'assurer le rendu haptique lors d'une interaction avec des objets virtuels créés dans l'environnement de visualisation 3D (c.-à-d. RVIZ). De même, il a été aussi démontré avec des simulations que nous avons pu réaliser des interactions à retour d'efforts avec le guide haptique, interfacé par la technologie RA. Ce système assistera et facilitera, donc, les tâches d'assemblages en industrie tout en assurant une restriction du mouvement des objets à assembler ainsi qu'un retour haptique lors d'une collision entre le guide et la sphère.

## 5.2 Travaux futurs

Les perspectives de ce projet de recherche se concentreront à améliorer les fonctionnalités des systèmes présentés dans ces travaux de recherche. En effet, nous devons améliorer les résultats de l'AVO avec une évaluation avec des participants humains. Cependant, puisque nous savons que le seuil de perception de l'homme à des vibrations [22], il serait possible, alors, d'optimiser les résultats de l'AVO en dessous de ce seuil sans faire recours à l'évaluation susmentionnée. De même, nous devons aussi améliorer le niveau de perception du retour haptique lors d'une interaction avec le guide haptique ainsi que le moyen d'interfaçage de ce guide par la technologie RA.

Dans le cadre général des travaux de recherche menés par le Laboratoire à l'UQAC, un robot réel sera interfacé pour réaliser les opérations d'assemblage avec un opérateur. L'interaction avec le système haptique et le système de réalité augmentée



ont été introduits, dans un premier temps, par le biais d'un dispositif haptique (le *PHANToM Omni*) dans le but de tester la plateforme d'assemblage en RA. Dans les travaux futurs, le *PHANToM Omni* sera remplacé par un mécanisme parallèle entraîné par des câbles afin de simuler différents types de robot industriel, dont l'IAD, présenté dans le chapitre 3. Ces travaux ont proposé d'utiliser un robot UR5 comme première approche considérant son intégration déjà disponible dans ROS. Dans cette recherche, le *PHANToM* a permis de télé-opérer l'effecteur d'un robot industriel simulé dans *Robotic Operating System* (ROS) afin d'assister un opérateur dans des assemblages de pièces lourdes.

## Bibliographies

- [1] AIEA, "Matériel télécommandé et déclassement Les robots et les manipulateurs perfectionnés offrent de nouvelles possibilités," *IAEA Bulletin*, vol. 27, no. 3, pp. 35-39, 1985.
- [2] O. Fallou, R. Millet, S. Creuchet, T. Ranaivondrambola, and R. Chatila, *Le développement industriel futur de la robotique personnelle et de service en France*, 2012.
- [3] P.-Y. Oudeyer, *Les grands défis de la robotique du 21e siècle*, Paris, 2009.
- [4] P. Martinez, F. Coste, and A. Taravella, *Relation homme-robot: prise en compte des nouveaux facteurs sociologiques*, 2012.
- [5] R. Gunther, S. Ruediger, and S. Yi, "Approaches of Applying Human-Robot-Interaction-Technologies to Assist Workers with Musculoskeletal Disorders in Production," in *Intelligent robotics and applications - IEEE ICRA, USA, 2012*, pp. 74-84.
- [6] P. Maurice, Y. Measson, V. Padois, and P. Bidaud, *Assessment of physical exposure to musculoskeletal risks in collaborative robotics using dynamic simulation*: Springer, 2013.
- [7] R. Arcand, F. Labrèche, S. Stock, K. Messing, and T. F., *Travail et santé, enquête sociale et de santé*, deuxième édition ed., p. pp. 525-570, Montréal: Institut de la statistique du Québec, 2001.
- [8] H. Camirand, *Qui sont les victimes de blessures en milieu de travail?*, Institut de la statistique du Québec, 2013.
- [9] S. Serge, S.-V. Marie, and C. Denise, "Les TMS des membres supérieurs Mieux les comprendre pour mieux les prévenir desmembres supérieurs," *Association paritaire pour la santé et la sécurité du travail - Secteur de la fabrication de produits en métal, de la fabrication de produits électriques et des industries de l'habillement, Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail*, 2013.
- [10] D. Bernard, P. Claire, S. Hélène, and S. Josée, "Guide d'évaluation des risques, méthode QEC," *Commission de la santé et de la sécurité du travail du Québec Dépôt légal - Bibliothèque nationale du Québec, 2005 ISBN 2-550-44086-2*, 2005.
- [11] A. Michel, A.-C. Agnès, and C. Jean-Claude, "Les troubles musculosquelettiques du membre supérieur liés au travail," *Work-related musculoskeletal disorders of the upper limb – Joint Bone Spine 2002 2002 Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS. Tous droits réservés*, vol. 69, pp. 1181-1190, 2002.
- [12] P. Anna, M. Sandrine, and B. Éric, "Les TMS et leurs facteurs de risque chez les MK libéraux," *Kinésithérapie la revue ISSN 1779-0123*, vol. 88, pp. 56-60, 2009.
- [13] "FIBROMYALGIE ET TROUBLES MUSCULO-SQUELETTIQUES – TMS," 20/04/2016, 2016; <http://www.posturologie-essonne.fr/pathologies/fibromyalgie-et-troubles-musculo-squelettiques-tms/>.
- [14] G. Abdoul Aziz, G. Christine, and P. Josée, "Les maladies musculosquelettiques," *Les maladies chroniques dans lanaudière*, pp. 1-35, Fev., 2011.
- [15] wikipedia. "Trouble musculosquelettique," 20/04/2016, 2016; [https://fr.wikipedia.org/wiki/Trouble\\_musculosquelettique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Trouble_musculosquelettique).

- [16] "PRINCIPAUX TMS PAR OSTÉOCITY," 20/04/2016, 2016; <http://www.osteopathe-entreprises-paris.com/principaux-troubles-musculo-squelettiques-osteopathie-paris.php>.
- [17] A. Hichem, "Commande de dispositifs à retour haptique en présence de retards de transmission," L'Université d'Evry Val d'Essonne, 2012.
- [18] M. J.-D. OTIS, "Analyse, commande et intégration d'un mécanisme parallèle entraîné par des câbles pour la réalisation d'une interface haptique comme métaphore de navigation dans un environnement virtuel," Science et génie, Université Laval, QUÉBEC, 2009.
- [19] S. Haddadin, A. Albu-Schäffer, and G. Hirzinger, "Safety evaluation of physical human-robot interaction via crash-testing," in *Robotics : Science and Systems Conference*, 2007, pp. 217–224.
- [20] M. Zinn, O. Khatib, B. Roth, and J. K. Salisbury, "Playing it safe [human friendly robots]," *Robotics & automation magazine - IEEE*, vol. 11, pp. 12-21, 2004.
- [21] E. Colgate, and N. Hogan, "An analysis of contact instability in terms of passive physical equivalents," *Robotics and automation - IEEE*, vol. 1, pp. 404-409, 14- 19 May 1989, 1989.
- [22] L. A. Jones, and N. B. Sarter, "Tactile Displays: Guidance for Their Design and Application," *The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, vol. 50, no. 1, pp. 90-111, 2008.
- [23] V. Duchaine, and C. Gosselin, "Safe, Stable and Intuitive Control for Physical Human-Robot Interaction," *Robotics and Automation - IEEE*, pp. 3383-3388, May, 2009.
- [24] C.-L. Alexandre, "Développement d'algorithmes de commande et d'interfaces mécatroniques pour l'interaction physique humain-robot," Faculté des sciences et de génie université Laval Québec, Laval, Québec, 2012.
- [25] R. Ikeura, H. Monden, and H. Inooka, "Cooperative motion control of a robot and a human," *Robot and Human Communication*, pp. 112-117, 1994.
- [26] K. Kosuge, and N. Kazamura., "Control of a robot handling an object in cooperation with a human," *Robot and Human Communication - Proceedings of the 6th IEEE International Workshop RO-MAN*, pp. 142 –147, 1997.
- [27] C. R. Carignan, and K. R. Cleary, "Closed-loop force control for haptic simulation of virtual environments," *Haptics-e*, vol. 1, no. 2, pp. 1-14, 2000.
- [28] V. Hayward, and K. E. Maclean, "Do it yourself haptics: part i," *Robotics & Automation Magazine, IEEE* vol. 14, no. 4, pp. 88-104, 2007.
- [29] R. Q. v. d. Linde, and P. Lammertse, "Hapticmaster - a generic force controlled robot for human interaction," *Industrial Robot: An International Journal*, vol. 30, pp. 515-524, 2003.
- [30] T. Tsumugiwa, R. Yokogawa, and K. Hara, "Variable impedance control based on estimation of human arm stiffness for human-robot cooperative calligraphic task," *Robotics and Automation, IEEE*, vol. 1, 2002.
- [31] D. Surdilovic, "Contact stability issues in position based impedance control: Theory and experiments," *Robotics and Automation*, vol. 4, pp. 1675–1681, 1996.
- [32] M. Ueberle, and M. Buss, "Control of kinesthetic haptic interfaces."
- [33] T. Yoshikawa, *Foundations of robotics : analysis and control*, 1990.
- [34] R. Ikeura, and H. Inooka, "Variable impedance control of a robot for cooperation with a human," *Robotics and Automation, IEEE*, vol. 3, pp. 3097 - 3102, 1995.

- [35] T. Toshio, and T. Yoshiyuki, "Tracking Control Properties of Human–Robotic systems based on impedance control," *IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS—PART A: SYSTEMS AND HUMANS*, vol. 35, no. 4, pp. 523-535, July., 2005.
- [36] A. Campeau-Lecours, M. Otis, P.-L. Belzile, and C. Gosselin, "A time-domain vibration observer and controller for physical human-robot interaction," *Mechatronics* vol. 36, pp. 45-53, 2016.
- [37] Alexandre Lecours, Martin J.-D. Otis, and Clément Gosselin, "Modeling of physical human-robot interaction: Admittance controllers applied to intelligent assist devices with large payload," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2016.
- [38] B. Corteville, E. Aertbelien, H. Bruyninckx, J. D. Schutter, and H. V. Brussel, "Human-inspired robot assistant for fast point-to-point movements," *Robotics and Automation, IEEE*, pp. 3639–3644, 10-14 April 2007, 2007.
- [39] A. Lecours, B. Mayer-St-Onge, and C. Gosselin, "Variable admittance control of a four-degree-of-freedom intelligent assist device," *Robotics and Automation (ICRA), IEEE* pp. 3903 - 3908, 14-18 May 2012, 2012.
- [40] D. Vincent, and M. G. Clément, "General Model of Human-Robot Cooperation Using a Novel Velocity Based Variable Impedance Control," *Second Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, 2007.
- [41] B. Hannaford, and J.-H. Ryu, "Time-Domain Passivity Control of Haptic Interfaces," *Robotics and Automation, IEEE*, vol. 18, no. 1, pp. 1-10, 2002.
- [42] R. J. Anderson, and M. W. Spong, "Asymptotic stability for force reflecting teleoperators with time delay," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 11, no. 2, pp. 135-149, 1992.
- [43] G. Niemeyer, and J. J. E. Slotine, "Stable adaptive teleoperation," *Oceanic Engineering, IEEE*, vol. 16, pp. 152-162, 1991.
- [44] K. H. K. Hertkorn, T. H. T. Hulin, P. K. P. Kremer, C. P. C. Preusche, and G. H. G. Hirzinger, "Time Domain Passivity Control for Multi-Degree of Freedom Haptic Devices with Time Delay," *Robotics and Automation (ICRA), IEEE International Conference on Robotics and Automation Anchorage Convention District*, pp. 1313-1319, May., 2010.
- [45] J.-H. Ryu, Y. S. Kim, and B. Hannaford, "Sampled- and Continuous-Time Passivity and Stability of Virtual Environments," *Robotics, IEEE*, vol. 20, no. 4, pp. 772-776, 2004.
- [46] J.-H. Ryu, C. Preusche, B. Hannaford, and G. Hirzinger, "Time Domain Passivity Control With Reference Energy Following," *Control Systems Technology, IEEE* vol. 13, no. 5, pp. 737-742, September, 2005.
- [47] H. Kawabe, N. Tsukiyama, and K. Yoshida, "Active vibration damping based on neural network theory," *Materials Science and Engineering*, vol. 442, no. 1-2, pp. 547-550, 2006.
- [48] J. B. Ali, N. Fnaiech, L. Saidi, B. Chebel-Morello, and F. Fnaiech, "Application of empirical mode decomposition and artificial neural network for automatic bearing fault diagnosis based on vibration signals," *Applied Acoustics*, vol. 89, pp. 16-27, 2015.
- [49] E. De Moura, C. Souto, A. Silva, and M. Irmao, "Evaluation of principal component analysis and neural network performance for bearing fault diagnosis from vibration

- signal processed by RS and DF analyses,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 25, no. 5, pp. 1765-1772, 2011.
- [50] B. Harrap, and M. Jason, "Fault diagnosis of bearings using short data lengths." pp. 410-417.
- [51] T. Barszcz, A. Bielecki, and T. Romaniuk, “Application of probabilistic neural networks for detection of mechanical faults in electric motors,” *Przełąd Elektrotechniczny*, vol. 85, pp. 37-41, 2009.
- [52] T. BARSZCZ, A. BIELECKI, M. WOJCIK, and M. BIELECKA, “Art-2 artificial neural networks applications for classification of vibration signals and operational states of wind turbines for intelligent monitoring,” *Diagnostyka*, vol. 14, pp. 21-26, 2013.
- [53] B. Benjamin, “Réalité augmentée haptique : théorie et applications,” Université d'évry-val d'essonne, 2007.
- [54] I. E. SUTHERLAND, “A head-mounted three dimensional display,” *Proceedings Fall Joint Computer Conference*, pp. 757-764, 1968.
- [55] F. Z. KAGHAT, “Modèle et expériences pour la visite de musées en réalité augmentée sonore,” Laboratoire Cedric, Equipe ILJ, École Doctorale Informatique, Télécommunications et Électronique de Paris, Paris, 2014.
- [56] N. OURAMDANE, “Vers un système d’assistance à l’interaction 3D pour le travail et le télétravail collaboratif dans les environnements de réalité virtuelle et augmentée,” Informatique, Université d'Evry-Val d'Essonne, France, 2008.
- [57] P. Milgram, and F. Kishino, “A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays,” *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems*, vol. E77-D, no. 12, pp. 1321-1329, 1994.
- [58] N. Diolaiti, G. Niemeyer, F. Barbag, and J. K. Salisbury Jr, “Stability of haptic rendering: Discretization, quantization, time delay, and coulomb effects,” *Robotics, IEEE Transactions on*, vol. 22, no. 2, pp. 256-268, 2006.
- [59] K. Salisbury, F. Conti, and F. Barbagli, “Haptic rendering: introductory concepts,” *Computer Graphics and Applications, IEEE*, vol. 24, no. 2, pp. 24-32, 2004.
- [60] U. Sehat, O. Nassima, O. Samir, R. Paul, D. Frédéric, and M. Malik, “Augmenting 3D Interactions with Haptic Guide in Large Scale Virtual Environments,” *International Journal of Virtual Reality (IJVR)*, vol. 8, no. 2, pp. 25-31, 2009.
- [61] U. Sehat, R. Paul, O. Samir, N. Mickael, and M. Malik, “Haptic Guides in Cooperative Virtual Environments: Design and Human Performance Evaluation,” in *Haptics Symposium, IEEE*, 2010.
- [62] A. Batu, A. Afshin, C. Baran, and A. Lars, “Intuitive Industrial Robot Programming Through Incremental Multimodal Language and Augmented Reality,” in *Robotics and Automation (ICRA), Proceedings of the IEEE ICRA 2011*, 2011.
- [63] H. C. Fang, S. K. Ong, and A. Y. C. Nee, “Robot Programming Using Augmented Reality,” in *CyberWorlds, 2009. CW '09. International Conference on*, Bradford, 2009, pp. 13-20.
- [64] R. Marin, S. Castellon, P. J. Sanz, and J. S. Sánchez, “A very high level interface to teleoperate a robot via Web including augmented reality,” in *Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA '02. IEEE International Conference on*, 2002.
- [65] J. Carlos A., C. Francisco A., G. Pablo, F. Manuel, and T. Fernando, “An augmented reality interface for training robotics through the web ”, pp. 189-194, 2005.

- [66] T. S., "Toward a Framework for Human-Robot Interaction," *Human-Computer Interaction*, vol. 19, no. 1-2, pp. 9-24, 2004.
- [67] G. Scott A., C. J. Geoffrey, C. XiaoQi, and B. Mark, "Evaluating the Augmented Reality Human-Robot Collaboration System," in 15th International conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice, Auckland, New-Zealand, 2008, pp. 575-580.
- [68] S. Otmane, M. Mallem, A. Kheddar, and F. Chavand, "Active virtual guides as an apparatus for augmented reality based telemanipulation system on the internet." pp. 185-191.
- [69] S. Ullah, N. Ouramdane, S. Otmane, P. Richard, F. Davesne, and M. Mallem, "Augmenting 3d interactions with haptic guide in a large scale virtual environment." p. 22.
- [70] C. Keshav, E. R. Darin, T. Chin-An, and P. Abhilash, "Automated Augmented Reality Operator Aids for Space Robotic Teleoperations," in HFES Toulouse, 2012.
- [71] F. Michael, R. Daniel, H. David, C. Roberto, H. Mingxing, P. Ose, P. Z. Dong, P. Graeme, B. Fernando, and E. Philip, "Augmented Reality Image Guidance for Minimally Invasive Coronary Artery Bypass," in Medical Imaging, San Diego, CA, 2008.
- [72] F. Volkmar, M. Fabien, A. Louaï, J. Stefan, T. Holger, N. Stefan, W. M. Friedrich, and C.-M. Ève, "Cardio navigation: Planning, simulation, and augmented reality in robotic assisted endoscopic bypass grafting," *The Annals of thoracic surgery*, vol. 79, no. 6, pp. 2040-2047, 2005.
- [73] C. Gosselin, T. Laliberté, B. Mayer-St-Onge, S. Foucault, A. Lecours, D. Gao, and R. Me-nassa, "On the development of a safe and intuitive human assistive robot for handling large payloads," *IEEE Robotics and Automation Magazine*.
- [74] J. E. Colgate, M. Peshkin, and S. H. Klostermeyer, "Intelligent assist devices in industrial applications : a review," *The International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2516-2521, 2003.
- [75] T. Laliberté, C. Gosselin, and D. Gao, "Closed-loop actuation routings for cartesian scara-type manipulators," *Proceedings of the International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference (ASME-IDETC)*, 2010.
- [76] V. Duchaine, and C. M. Gosselin, "Investigation of Human-Robot Interaction Stability Using Lyapunov Theory," *Robotics and Automation, IEEE*, pp. 2189-2194, May, 2008.
- [77] D. Ryu, S. Kang, M. Kim, and J. B. Song, "Frequency domain stability observer and active damping control for stable haptic interaction," *IET Control Theory Applications*, vol. 2, no. 4, pp. 261-268, 2008.
- [78] J. Dumas, *L'analyse temps - fréquence*, 2001.
- [79] M. Jarrah, W. Wasseem, M. Othman, and M. Gdeisat, "Human body model response to mechanical impulse," *Medical Engineering and Physics*, vol. 19, no. 4, pp. 308-316, 1997.
- [80] C. Touzet, *Les réseaux de neurones artificiels introduction au connexionnisme*, Neurosystèmes, Parc Scientifique Georges Besse, 30000 Nîmes., 1992.
- [81] M. Parizeau, *Réseaux de neurones GIF-21140 et GIF-64326*, Université Laval, 2006.
- [82] E. Cocchi, and M. Sibellas, *Contrôle d'une caméra Kinect par le middleware ROS, ISIBOT*.

- [83] "MOVERIO BT-200," 23 Janvier, 2016; <http://www.epson.fr/fr/fr/viewcon/corporatesite/products/mainunits/overview/12411>
- [84] Wikipedia. "SolidWorks," 25 Janvier, 2016; <https://fr.wikipedia.org/wiki/SolidWorks>.
- [85] "Miracast," 23 Janvier, 2016; <https://fr.wikipedia.org/wiki/Miracast>.