

ÉCOLE DOCTORALE D'INFORMATIQUE DE L'UNIVERSITÉ PARIS-SUD
LABORATOIRE D'INFORMATIQUE POUR LA MÉCANIQUE ET LES SCIENCES DE L'INGÉNIEUR

Interactions visio-haptiques pour la coordination et la conscience situationnelle partagée en environnement virtuel collaboratif

THÈSE DE DOCTORAT EN INFORMATIQUE

soutenue le 12/05/2014 par :

Adrien GIRARD

en présence de :

| | | |
|----------------------|----------------------|---|
| <i>Directeur</i> | Yacine BELLIK | Maître de conférences - HDR Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur, Université Paris-Sud |
| <i>Co-Encadrant</i> | Mehdi AMMI | Maître de conférences - HDR Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur, Université Paris-Sud |
| <i>Co-Encadrante</i> | Malika AUVRAY | Chargée de recherche Institut Jean-Nicod |
| <i>Rapporteur</i> | Jean-Marie BURKHARDT | Directeur de recherche Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux |
| <i>Rapporteur</i> | Guillaume MOREAU | Professeur des universités Ecole Centrale de Nantes , Centre de Recherche Méthodologique d'Architecture |
| <i>Examinateur</i> | Anatole LÉCUYER | Directeur de recherche INRIA Rennes, Institut de Recherche en Informatique et Systèmes Aléatoires |
| <i>Examinatrice</i> | Anne VILNAT | Professeur des universités Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur, Université Paris-Sud |
| <i>Examinateur</i> | Gabriel ZACHMANN | Professor Doktor Universität Bremen |

Résumé

La communication haptique interpersonnelle est communément utilisée pour se saluer, se féliciter, ou de manière indirecte pour manipuler des objets lourds. Pourtant, la modalité haptique est absente des systèmes de communication à distance usuels. Les progrès récents de l'informatique et des réseaux de communication ont permis l'émergence d'environnements virtuels collaboratifs offrant un retour haptique aux utilisateurs. Les environnements virtuels collaboratifs constituent une solution prometteuse pour faciliter le travail collaboratif à distance. Les contextes applicatifs sont nombreux : entraînement militaire, conception assistée par ordinateur, télé-apprentissage, jeux-vidéo.

Toutefois, les utilisateurs d'environnements virtuels collaboratifs sont confrontés à deux types de problématiques : celles liées aux environnements virtuels 3D et celles liées à la collaboration à distance. En effet, il est difficile pour un utilisateur peu expérimenté d'interagir avec un environnement virtuel 3D. Se déplacer et manipuler des objets dans ce type d'environnement nécessite une bonne représentation mentale de l'espace. De plus, la collaboration à distance limite les possibilités et la qualité de la communication. Les informations dont disposent les utilisateurs sur leurs partenaires sont donc réduites. Dans ce contexte, la coordination des actions entre les utilisateurs devient plus complexe.

L'objectif de ces travaux de thèse est donc de proposer des méthodes d'interaction visio-haptique pour faciliter la coordination et augmenter l'attention mutuelle entre les utilisateurs. Via l'amélioration de la coordination et de l'attention inter-utilisateurs, une augmentation des performances et de l'efficacité du travail collaboratif est escomptée.

Trois types d'interactions fondamentales sont abordées dans un contexte collaboratif : la coordination des sélections, le paramétrage des sélections et la manipulation d'objets. Pour chacune des tâches d'interactions précédemment citées, des méthodes d'interaction ainsi que des outils de coordination et de communication ont été proposés et évalués.

Ces travaux de thèse présentent les points forts mais aussi les défauts des méthodes d'interaction collaboratives fortement couplées. Les résultats obtenus montrent également l'importance de la communication haptique dans la collaboration à distance.

Mots-clés : environnement virtuel collaboratif - communication haptique - interaction 3D

Abstract

Haptic interpersonal communication is commonly used to salute, to congratulate, or indirectly to manipulate heavy objects. However, the haptic feedback is missing from all the usual communication systems. Recent developments in telecommunications and computer have made possible the use of haptic feedback in collaborative virtual environments. Collaborative virtual environments are a promising solution to facilitate remote work collaboration. They have many applications like military training, engineering design, e-learning or video games.

Nevertheless, users of collaborative virtual environments have to face several issues. First, interacting with a virtual environment is not a straightforward task. Navigation and manipulation of objects in a virtual environment require a good mental representation of space. Secondly, remote collaboration limits the communication quality because even the best video conference system can't support all the richness of a face to face communication. Information available on the partners are reduced thus the coordination of actions between users become a complex task.

The aim of this thesis is to propose visual haptic interactions to simplify coordination and increase mutual awareness between the users. Through the improvement of coordination and mutual awareness an increase of performance and efficiency is expected.

Three kinds of fundamental interactions are studied in collaborative context : the coordination of selections, the setting of selections and the manipulation of objects. For each of these three of fundamental interactions, several methods of interaction and tools of coordination are proposed and assessed.

The findings of this thesis highlight the strengths and the weaknesses of the closely coupled method of interactions. The results of the experiments also confirm the importance of haptic communication in remote collaboration.

Key-words : collaborative virtual environment - haptic communication - 3D interaction

Liste des publications

Adrien Girard, Yacine Bellik, et Mehdi Ammi. Comparative study of collaborative methods to control rotation of shared objects. Dans : *Haptics Symposium (HAPTICS), 2014 IEEE*, pages 531–537, 2014. ISBN : 978-1-4799-3130-9

Adrien Girard, Yacine Bellik, Malika Auvray, et Mehdi Ammi. Visuo-haptic tool for collaborative adjustment of selections. Dans : *Haptic and Audio Interaction Design (HAID), volume 7989 de Lecture Notes in Computer Science*, pages 40-49, 2013. ISBN : 978-3-642-41067-3. doi : 10.1007/978-3-642-41068-0 5.

Adrien Girard, Yacine Bellik, Malika Auvray, et Mehdi Ammi. Poster : Collaborative adjustment of selection areas for polygonal modelling. Dans : *3D User Interfaces (3DUI), 2013 IEEE Symposium on*, pages 135–136, 2013. doi : 10.1109/3DUI.2013.6550215.

Adrien Girard, Yacine Bellik, Malika Auvray, et Mehdi Ammi. Collaborative approach for dynamic adjustment of selection areas in polygonal modelling. Dans : *Proceedings of the 18th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, VRST '12*, pages 205–206, 2012. ISBN : 978-1-4503-1469-5.

Adrien Girard, Malika Auvray, et M. Ammi. Haptic designation strategy for collaborative molecular modelling. Dans : *Haptic Audio Visual Environments and Games (HAVE), 2012 IEEE International Workshop on*, pages 119–123, 2012b. doi : 10.1109/HAVE.2012.6374437.

Jean Simard, **Adrien Girard**, Anaïs Mayeur, et Malika Ammi. How to improve group performances on colocated synchronous manipulation tasks? Dans : *Haptic Audio Visual Environments and Games (HAVE), 2012 IEEE International Workshop on*, pages 13–18, 2012. doi : 10.1109/HAVE.2012.6374435.

Adrien Girard, Mehdi Ammi, Jean Simard, et Malika Auvray. Improvement of collaborative selection in 3d complex environments. Dans : *Haptics Symposium (HAPTICS), 2012 IEEE*, pages 281–288, 2012. doi : 10.1109/HAPTIC.2012.6183803.

Un homme dont la réputation est basée sur son habileté pour une technique précise est insignifiant. En concentrant toute son énergie sur un objet, il y est certes devenu excellent mais s'est abstenu de s'intéresser à autre chose. Un tel homme n'est d'aucune utilité.

*Hagakure, La voie du samouraï, **Tsunetomo Yamamoto**, 1716.*



Remerciements

Je tient tout d'abord à remercier mon professeur de L^AT_EX : Maître Simard qui m'a enseigné la technique ancestral de compilation du L^AT_EX (latex → dvips → ps2pdf). Malheureusement la jeunesse est aujourd'hui pervertie par de nouvelles techniques de compilation (Latex2pdf) sans aucun respect pour nos traditions. Maître, je n'ai pas su transmettre votre savoir, pardon.

Je remercie également mes encadrants : Mehdi, Malika et Yacine pour m'avoir conduit et supporter jusqu'ici. Je tiens à offrir des remerciements tout particulier à Mehdi pour son suivi et son implication sans faille.

Merci à vous tous qui avez rempli mon quotidien durant ces quatre années au labo (classement des noms dans un ordre chronologique très approximatif de rencontre) : Lourdes, Lucie, Jean, Nadège, Florimond, Yoren, David, Pierre, Max, Gaëtan, Lionel, Driss, Jonathan, Kangni, Michael, Mat Gal, Mat Dub, Mat Cour, Mat Falc, Béatrice, Houda, Anne-Lyse, Yacine, Van-Minh dit Sami, Richard, Marc, Paul, Julien, Mohamed. C'était bien mais un peu court, on recommence ?

Mes convictions animistes me forcent également à remercier la carrière de grès de La Troche, le viaduc des Fauvettes, le bowl de Cachan, les ledges de Wissous, et les couloirs de bus de Palaiseau pour m'avoir servi d'exutoire. En revanche, je ne remercie pas le dernier virage en épingle à cheveu dans la descente vers la gare d'Orsay que je trouve un peu trop serré.

Enfin, je remercie mes parents : Madame Girard pour son indispensable travail de relecture et Monsieur Girard pour son travail de coursier à deux roues. Merci à tous.

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| Introduction générale | 1 |
| 1 État de l'art | 3 |
| 1.1 Introduction | 3 |
| 1.2 Psychologie sociale du travail en groupe | 3 |
| 1.2.1 Facilitation sociale | 4 |
| 1.2.1.1 Facilitation sociale en TCAO | 5 |
| 1.2.2 Paresse sociale | 5 |
| 1.2.2.1 Paresse sociale en TCAO | 7 |
| 1.2.3 Conscience situationnelle | 8 |
| 1.2.3.1 Conscience situationnelle partagée | 9 |
| 1.2.3.2 Conscience situationnelle en TCAO | 10 |
| 1.3 Travail coopératif assisté par ordinateur et environnement virtuel collaboratif . . | 13 |
| 1.3.1 Les collecticiels | 13 |
| 1.3.2 Les environnements virtuels collaboratifs | 14 |
| 1.4 Interactions haptiques collaboratives | 16 |
| 1.4.1 Communication haptique interpersonnelle | 16 |
| 1.4.2 Interactions haptiques en environnement virtuel collaboratif | 17 |
| 1.4.2.1 Interactions haptiques pour la coordination des actions | 17 |
| 1.4.2.2 Interactions haptiques métaphoriques | 19 |
| 1.4.2.3 Interactions haptiques pour l'apprentissage | 20 |
| 1.4.3 Architectures réseaux pour la collaboration avec retour haptique | 21 |
| 1.4.3.1 Architectures centralisées (client-serveur) | 22 |
| 1.4.3.2 Architectures distribuées (pair à pair) | 22 |
| 1.4.3.3 Architectures hybrides | 23 |
| 1.4.3.4 Influence de la qualité de connexion sur les utilisateurs | 24 |
| 1.5 Conclusion | 25 |
| 2 Désignation pour la sélection collaborative | 29 |
| 2.1 Introduction | 29 |
| 2.1.1 Contexte : Manipulation moléculaire | 31 |
| 2.1.2 État de l'art | 32 |
| 2.2 Contributions : Assistance à la désignation | 34 |
| 2.2.1 Désignation de cible | 34 |
| 2.2.1.1 Désignation par contact | 34 |
| 2.2.1.2 Désignation à distance | 35 |
| 2.2.2 Notification de désignation | 37 |
| 2.2.3 Guidage sur cible | 37 |
| 2.3 Expérience 1 : Assistance Haptique | 39 |
| 2.3.1 Hypothèses et conditions | 39 |
| 2.3.2 Dispositif | 40 |
| 2.3.3 Protocole | 40 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 2.3.3.1 | Mesures | 42 |
| 2.3.4 | Résultats | 43 |
| 2.3.4.1 | Performance | 43 |
| 2.3.4.2 | Efficacité de désignation et de sélection de cible | 43 |
| 2.3.4.3 | Communication verbale | 45 |
| 2.3.5 | Discussion | 46 |
| 2.4 | Expérience 2 : Coordination des sélections | 47 |
| 2.4.1 | Hypothèses et conditions | 47 |
| 2.4.2 | Dispositif | 48 |
| 2.4.3 | Protocole | 48 |
| 2.4.3.1 | Mesures objectives | 49 |
| 2.4.3.2 | Mesures subjectives | 49 |
| 2.4.4 | Résultats | 50 |
| 2.4.4.1 | Performances | 50 |
| 2.4.4.2 | Efficacité de déformation | 50 |
| 2.4.4.3 | Répartition du travail | 52 |
| 2.4.5 | Discussion | 53 |
| 2.5 | Conclusion et perspectives | 53 |
| 3 | Paramétrage de sélection collaboratif | 55 |
| 3.1 | Introduction | 55 |
| 3.1.1 | État de l'art | 56 |
| 3.1.2 | Contexte : Manipulation polygonale | 58 |
| 3.2 | Contributions | 59 |
| 3.2.1 | Paramétrage collaboratif du mode de sélection | 59 |
| 3.2.2 | Paramétrage collaboratif de la taille de sélection | 61 |
| 3.2.3 | Outils haptiques | 62 |
| 3.2.3.1 | Assistance au maintien de contact | 63 |
| 3.2.3.2 | Indication du mode de sélection | 63 |
| 3.2.3.3 | Indication des éléments interdits | 64 |
| 3.2.3.4 | Communication de la taille de sélection | 65 |
| 3.3 | Expérience 3 : Paramétrage de la taille de sélection | 66 |
| 3.3.1 | Hypothèses et conditions | 66 |
| 3.3.2 | Dispositif | 68 |
| 3.3.3 | Protocoles | 68 |
| 3.3.3.1 | Mesures objectives | 68 |
| 3.3.3.2 | Mesures subjectives | 69 |
| 3.3.4 | Résultats | 70 |
| 3.3.4.1 | Performance | 70 |
| 3.3.4.2 | Efficacité | 71 |
| 3.3.4.3 | Distribution du travail | 71 |
| 3.3.4.4 | Conscience situationnelle | 72 |
| 3.3.4.5 | Discussion | 72 |
| 3.4 | Expérience 4 : Paramétrage de la taille et du mode de sélection | 73 |
| 3.4.1 | Hypothèses et conditions | 73 |
| 3.4.2 | Protocole | 74 |
| 3.4.2.1 | Mesures objectives | 74 |
| 3.4.2.2 | Mesures subjectives | 76 |
| 3.4.3 | Résultats | 76 |
| 3.4.3.1 | Performance et efficacité | 76 |
| 3.4.3.2 | Répartition du travail | 78 |
| 3.4.3.3 | Conscience situationnelle | 78 |
| 3.4.3.4 | Communication verbale | 79 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 3.4.3.5 | Discussion | 79 |
| 3.5 | Conclusion et perspectives | 80 |
| 4 | Manipulation collaborative | 83 |
| 4.1 | Introduction | 83 |
| 4.1.1 | État de l'art | 84 |
| 4.2 | Contributions | 86 |
| 4.2.1 | Manipulation par rotule | 88 |
| 4.2.2 | Manipulation par pivot | 89 |
| 4.2.3 | Manipulation par clé | 90 |
| 4.2.4 | Manipulation par encastrement | 91 |
| 4.2.5 | Contrôle de position de l'objet | 92 |
| 4.3 | Expérience 5 : Rotation collaborative d'objet | 94 |
| 4.3.1 | Hypothèses et conditions | 94 |
| 4.3.2 | Dispositif | 95 |
| 4.3.3 | Protocoles | 95 |
| 4.3.4 | Participants | 97 |
| 4.3.5 | Mesures objectives | 97 |
| 4.3.6 | Mesures subjectives | 98 |
| 4.3.7 | Résultats | 98 |
| 4.3.7.1 | Performance de manipulation | 98 |
| 4.3.7.2 | Efficacité de manipulation | 99 |
| 4.3.7.3 | Répartition du travail | 101 |
| 4.3.7.4 | Quantité de manipulations | 102 |
| 4.3.7.5 | Conscience situationnelle partagée | 103 |
| 4.3.8 | Discussion | 104 |
| 4.4 | Conclusion et perspectives | 105 |
| | Conclusion et perspective | 107 |
| | Bibliographie | 111 |
| A | Interfaces haptiques | 129 |
| A.1 | Systèmes électromécaniques | 130 |
| A.2 | Systèmes à câbles tendus | 130 |
| A.3 | Exosquelette | 132 |
| B | Protocoles expérimentaux | 135 |
| B.1 | Expériences 1 : Guidage Haptique | 135 |
| B.1.1 | Hypothèses | 135 |
| B.1.2 | Participants | 135 |
| B.1.3 | Mesures objectives | 135 |
| B.1.4 | Mesures subjectives | 136 |
| B.2 | Expériences 2 : Coordination | 136 |
| B.2.1 | Hypothèses | 136 |
| B.2.2 | Participants | 136 |
| B.2.3 | Mesures objectives | 136 |
| B.2.4 | Mesures subjectives | 137 |
| B.3 | Expérience 3 : Taille de sélection | 137 |
| B.3.1 | Hypothèses | 137 |
| B.3.2 | Participants | 137 |
| B.3.3 | Mesures objectives | 137 |
| B.3.3.1 | Mesures de conscience situationnelle partagée | 138 |
| B.3.4 | Mesures subjectives | 138 |

| | | |
|---------|---|-----|
| B.4 | Expérience 4 : Mode de sélection | 139 |
| B.4.1 | Hypothèses | 139 |
| B.4.2 | Participants | 139 |
| B.4.3 | Mesures objectives | 139 |
| B.4.3.1 | Mesures de conscience situationnelle partagée | 139 |
| B.4.4 | Mesures subjectives | 140 |
| B.5 | Expérience 5 : Manipulation collaborative | 140 |
| B.5.1 | Hypothèses | 140 |
| B.5.2 | Participants | 141 |
| B.5.3 | Mesures objectives | 141 |
| B.5.4 | Mesure de conscience situationnelle partagée | 141 |
| B.5.5 | Mesures subjectives | 141 |

Table des figures

| | | |
|------|--|----|
| 1.1 | La facilitation sociale selon le modèle de Zajonc vue par Strauss . | 5 |
| 1.2 | Modèle d'effort collectif selon Karau et Williams . | 7 |
| 1.3 | Modèle de CS dans un contexte de prise de décision dynamique selon Endsley . | 9 |
| 1.6 | Interface graphique du système SAVER de Javed et al. | 12 |
| 1.4 | Interface graphique du jeu collaboratif de Bolstad et Endsley . | 12 |
| 1.5 | Interface graphique du jeu collaboratif de Nova et al. | 12 |
| 1.7 | Dispositif et capture d'écran de l'expérience de Ho et al. | 18 |
| 1.8 | Dispositif et capture d'écran de l'expérience de Sallnäs et al. | 18 |
| 1.9 | Dispositif et capture d'écran de l'expérience de Simard et Ammi . | 20 |
| 1.10 | Dispositif expérimental de Ullah et al. | 20 |
| 1.11 | Dispositif expérimental de Chellali et al. | 21 |
| 1.12 | Dispositif expérimental de Moll et Sallnäs . | 21 |
| 1.13 | Architecture centralisée (client-serveur) | 22 |
| 1.14 | Architecture distribuée (pair à pair) | 23 |
| 1.15 | Architecture hybride en anneau à jeton | 23 |
| 1.16 | Architecture hybride avec serveur itinérant | 24 |
| | | |
| 2.1 | Catégories d'indices visuels de profondeur selon Howard et Rogers . | 31 |
| 2.2 | Méthode de représentation moléculaire | 36 |
| 2.3 | Désignation à distance par la technique de l'image-plan | 37 |
| 2.4 | Procédure de désignation | 38 |
| 2.5 | Dispositif de l'expérience à 2 personnes. | 40 |
| 2.6 | Indication de déformation et désignation de cible. | 41 |
| 2.7 | Tâches de déformations moléculaires | 42 |
| 2.8 | Temps d'exécution (M_o1) en fonction de la méthode de désignation. | 44 |
| 2.9 | Résultat des mesures subjectives en fonction du rôle de l'utilisateur. | 44 |
| 2.10 | Temps pour rejoindre un cible (M_o2) en fonction de la méthode de désignation. | 45 |
| 2.11 | Distance parcourue (M_o3) en fonction de la méthode de désignation. | 45 |
| 2.12 | Nombre de désignation (M_o5) en fonction de la méthode de désignation | 46 |
| 2.13 | Stratégies de travail comparées | 48 |
| 2.14 | Photographies du dispositif expérimental. | 48 |
| 2.15 | Dispositif de l'expérience en version 3 utilisateurs. | 49 |
| 2.16 | Temps d'exécution (M_o1) en fonction de la stratégie de travail et de la molécule. | 50 |
| 2.17 | Mesures subjectives Efficacité (M_s1), Situation conflictuelle (M_s2), Communication (M_s3). | 50 |
| 2.18 | Distance de manipulation (M_o2) en fonction de la stratégie de travail et de la molécule. | 51 |
| 2.19 | Temps de manipulation (M_o3) en fonction de la stratégie de travail et de la molécule. | 51 |
| 2.20 | Temps d'inactivité (M_o4) en fonction de la stratégie de travail et de la molécule. | 52 |
| 2.21 | Fréquence de manipulation (M_o5) en fonction de la stratégie de travail et de la molécule. | 52 |
| 2.22 | Différence de Distance de manipulation (M_o2) entre les utilisateurs. | 52 |
| 2.23 | Différence de Temps de manipulation (M_o3) entre les utilisateurs. | 53 |
| | | |
| 3.1 | Échelles de sélection en manipulation moléculaire. | 55 |
| 3.2 | Modes de sélection en fonction de la configuration des participants. | 60 |
| 3.3 | Critères définissant le passage d'un mode de sélection vers un autre. | 61 |
| 3.4 | Tailles des sélections en fonction du nombre de faces séparant les curseurs. | 62 |
| 3.5 | Définition des variables des équations 3.1 et 3.2 selon le mode de sélection. | 64 |

| | | |
|------|---|-----|
| 3.6 | Positions de curseur interdites | 65 |
| 3.7 | Communication de taille de sélection. | 66 |
| 3.8 | Limitation de l'espace de liberté. | 66 |
| 3.9 | Différence entre la condition PCS et la condition PIS. | 67 |
| 3.10 | Dispositif expérimental | 68 |
| 3.11 | Exercice de déformation avec guide à la sélection. | 69 |
| 3.12 | Exercices de déformation. | 74 |
| 3.13 | Interface graphique pour le paramétrage du mode et de la taille de sélection. | 75 |
| 3.14 | Interface graphique de sélection avec mise en situation. | 75 |
| 3.15 | Nombre de déformations (\mathbf{M}_o5) en fonction de la méthode de sélection. | 77 |
| 3.16 | Résultats subjectifs. | 77 |
| | | |
| 4.1 | Interface graphique de l'application en mode liaison rotule. | 89 |
| 4.2 | Différents exemples d'axe de pivot en fonction de la surface touchée. | 90 |
| 4.3 | Interface graphique de l'application en mode liaison pivot. | 90 |
| 4.4 | Différence de contrôle de rotation entre manipulation par pivot et par clé. | 92 |
| 4.5 | Interface graphique de l'application en mode encastrement. | 93 |
| 4.6 | Cas de retour de force suite à l'application d'un couple. | 93 |
| 4.7 | Contrôle collaboratif de la position | 93 |
| 4.8 | Dispositif expérimental | 95 |
| 4.9 | Descriptif des 4 problèmes du déménageur de piano. | 96 |
| 4.10 | Point de vue et affichage en fonction de la position des curseurs | 97 |
| 4.11 | Distance de collision (\mathbf{M}_o1) en fonction de la méthode de manipulation et du scénario. | 99 |
| 4.12 | Temps de collision (\mathbf{M}_o2) en fonction de la méthode de manipulation et du scénario. | 100 |
| 4.13 | Temps d'exécution (\mathbf{M}_o3) en fonction de la méthode de manipulation et du scénario. | 100 |
| 4.14 | Résultats subjectif (\mathbf{M}_s1 à \mathbf{M}_s5) en fonction des méthodes de manipulation. | 100 |
| 4.15 | Translation utilisateur (\mathbf{M}_o4) en fonction de la méthode de manipulation et du scénario. | 101 |
| 4.16 | Rotation utilisateur (\mathbf{M}_o5) en fonction de la méthode de manipulation et du scénario. | 101 |
| 4.17 | Différence de translation (\mathbf{M}_o6) en fonction de la méthode de manipulation. | 102 |
| 4.18 | Différence de rotation (\mathbf{M}_o7) entre les deux utilisateurs en fonction de la méthode de manipulation. | 102 |
| 4.19 | Translation de l'objet (\mathbf{M}_o8) en fonction de la méthode de manipulation et du scénario. | 103 |
| 4.20 | Rotation de l'objet (\mathbf{M}_o9) en fonction de la méthode de manipulation et du scénario. | 103 |
| 4.21 | Erreur de projection en translation (\mathbf{M}_c1) en fonction de la méthode de manipulation. | 103 |
| 4.22 | Erreur de projection en rotation (\mathbf{M}_c2) en fonction de la méthode de manipulation. | 103 |
| | | |
| A.1 | Exemple d'interfaces haptiques électromécaniques. | 131 |
| A.2 | Exemple d'interfaces haptiques à câble tendu. | 132 |
| A.3 | Exemple d'interfaces haptiques de type exosquelette. | 133 |

Liste des tableaux

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | Éléments nécessaires à la conscience de l'espace de travail. | 11 |
| 1.2 | Matrice espace-temps des collecticiels dédiée au TCAO selon Baecker (1995) | 14 |
| 1.3 | Matrice espace-temps étendue des collecticiels selon Renevier (2005) | 14 |
| 2.1 | Caractéristique des molécules. | 42 |
| 2.2 | Communication verbale (M_o6 et M_o7) en fonction de la méthode de désignation | 46 |
| 3.1 | Performance et efficacité (M_o1 à M_o5) en fonction de la méthode de sélection. | 70 |
| 3.2 | Mesures subjectives (M_s1 à M_s5) en fonction de la méthode de sélection. | 70 |
| 3.3 | Répartition du l'effort (M_o6 et M_o7) en fonction de la méthode de sélection. | 71 |
| 3.4 | Conscience Situationnnelle Partagée (M_c1 et M_c2) en fonction de la méthode de sélection. | 72 |
| 3.5 | Performance et efficacité (M_o1 à M_o4) en fonction de la méthode de sélection. | 77 |
| 3.6 | Nombre de déformation (M_o5) en fonction de la méthode de sélection. | 77 |
| 3.7 | Distance de déformations (M_o4) en fonction de la méthode de sélection. | 78 |
| 3.8 | Nombre de déformations (M_o5) en fonction de la méthode de sélection et des utilisateurs. | 78 |
| 3.9 | Conscience Situationnnelle (M_c1 , M_c2 et M_c3) en fonction de la méthode de sélection. | 79 |
| 3.10 | Communication verbale (M_o7 , M_o8 et M_o9) en fonction de la méthode de sélection. | 79 |
| 4.1 | Récapitulatif du nombre de DdL exploités dans diverses expériences. | 85 |
| 4.2 | Caractéristiques des différentes méthodes de rotation. | 94 |
| 4.3 | Difficultés des scénarios | 96 |

Introduction générale

Cette thèse se place dans un contexte de collaboration à distance en environnement virtuel 3D par interactions haptiques. Les environnements virtuels collaboratifs représentent une solution prometteuse pour promouvoir et faciliter le travail collaboratif à distance. Toutefois, plusieurs problématiques propres à cette méthode de travail rendent la coordination entre les utilisateurs particulièrement complexe.

On peut distinguer deux types de problématiques, celles liées aux environnements virtuels 3D et celles liées à la collaboration distante. Pour un utilisateur peu expérimenté, il est souvent difficile d'interagir avec un environnement virtuel 3D. En effet, apprécier et estimer correctement la profondeur d'un environnement virtuel peut s'avérer délicat. Se déplacer et interagir avec les objets dans ce type d'environnement nécessite une bonne représentation mentale de l'espace. Certains environnements 3D comme les représentations moléculaires ou les écoulements de fluide sont particulièrement complexes, abstraits et saturés en détails. Les caractéristiques de ces environnements exacerbent les problèmes de représentation 3D précédemment énoncés.

La problématique majeure de la collaboration distante est la réduction des possibilités de communication. Les systèmes de visioconférence ne permettent pas de transmettre la gestuelle ou l'orientation du regard. Dans un environnement réel, ces informations corporelles sont utilisées en complémentarité avec la parole pour transmettre des subtilités de communication importantes. Cette baisse de la qualité de communication augmente la difficulté de coordination des actions entre utilisateurs.

Dans un travail collaboratif, il est également important que les utilisateurs soient en permanence conscients de la situation et des actions de leurs partenaires. Cette capacité d'attention mutuelle est appelée conscience situationnelle partagée. Maintenir cette capacité permet de garantir une bonne coordination entre les utilisateurs. Or, dans une collaboration à distance les informations dont disposent les utilisateurs sur leurs partenaires sont limitées. La conscience situationnelle partagée est donc réduite et la qualité de la coordination aussi.

Dans toute collaboration, des phénomènes sociaux comme la facilitation sociale et la paresse sociale entrent en jeu. La paresse sociale est la tendance d'un utilisateur à fournir moins d'efforts lorsqu'il travaille en groupe que lorsqu'il travaille seul. Ce phénomène est à l'origine de la diminution des performances du travail collectif. La collaboration à distance permet facilement d'anonymiser le travail de chacun ce qui exacerbe les effets de la paresse sociale.

L'objectif de cette thèse est donc de proposer des outils et des méthodes d'interaction pour :

- simplifier la communication entre les utilisateurs.

- augmenter la conscience situationnelle partagée.
- encourager la collaboration rapprochée entre les utilisateurs.
- limiter la paresse sociale.

Via l'amélioration de ces composantes, l'objectif final est d'augmenter la performance et l'efficacité du travail en environnements virtuels collaboratif.

Ce manuscrit de thèse comporte quatre chapitres. Le chapitre 1 est consacré à l'étude bibliographique. Les différentes problématiques liées aux environnements 3D, au travail collaboratif à distance et à la psychologie sociale y sont abordées en détail. Les travaux ayant contribué à apporter des solutions pour répondre à ces problématiques sont également présentés.

Les trois chapitres suivants présentent les contributions apportées par ces travaux de thèse pour répondre aux problématiques précédemment soulevées. Trois catégories d'interactions fondamentales sont abordées dans un contexte collaboratif. Les tâches d'interaction 3D étudiées sont la sélection, le contrôle système et la manipulation. Chaque chapitre propose un ou plusieurs outils de communication dédiés aux tâches d'interactions précédemment citées. Ces outils sont tous évalués par des études utilisateurs.

Le chapitre 2 s'intéresse à la coordination des sélections entre utilisateurs. Afin d'aider des partenaires à coordonner leurs sélections efficacement, un outil de désignation 3D couplé à un système de guidage visio-haptique est proposé. La manipulation moléculaire est utilisée comme contexte applicatif.

Le chapitre 3 porte sur le contrôle collaboratif du mode de sélections. La méthode d'interaction proposée implique les deux utilisateurs dans le processus de contrôle de sélection afin d'augmenter leurs attentions mutuelles. Cette méthode d'interaction est étudiée dans un contexte de manipulation polygonale.

Enfin le chapitre 4 s'intéresse à l'étape qui vient après la tâche de sélection, à savoir la manipulation. Le contexte applicatif employé est l'assemblage mécanique avec 6 degrés de liberté. Différentes méthodes de manipulation basées sur l'utilisation de contraintes mécaniques telles que les joints de rotules et les joints de pivots sont proposées pour améliorer la coordination des manœuvres de manipulation collaboratives.

Pour finir, une synthèse des travaux et des résultats obtenus est présentée dans la conclusion suivie par des propositions d'amélioration et des perspectives de recherche qui permettraient d'approfondir certaines des études menées.

État de l'art

1.1 Introduction

Cet état de l'art comporte trois parties. La première partie portera sur la psychologie sociale appliquée au travail coopératif en général et au Travail Coopératif Assisté par Ordinateur (TCAO). Afin de comprendre les bases du travail collaboratif, il convient d'en connaître les différents phénomènes psychologiques et sociaux qui les régissent. Les phénomènes sociaux majeurs que sont la facilitation et la paresse sociale seront donc détaillés en premier. Par la suite, la notion de Conscience Situationnelle Partagée (CSP) sera abordée. Un des objectifs de cette thèse est d'améliorer la coordination des utilisateurs en renforçant l'attention qu'ils se portent mutuellement, cette capacité est appelée CSP. Pour répondre à cette problématique, il est important de savoir comment maintenir l'attention des utilisateurs mais aussi de savoir comment mesurer les capacités d'attention des utilisateurs.

La seconde partie de cet état de l'art définira les termes Environnement Virtuel Collaboratif (EVC) et collecticiel. Les points communs et les différences entre ces deux types d'applications seront présentés. Les liens importants entre EVC, collecticiel et Travail Coopératif Assisté par Ordinateur (TCAO) seront également abordés.

La troisième partie sera consacrée aux interactions haptiques en EVC. Dans un premier temps, nous nous intéresserons au rôle de la modalité haptique dans les interactions interpersonnelles. Ensuite, les recherches étudiant l'influence des interactions haptiques sur les performances et sur l'apprentissage dans les EVC seront présentées. Enfin, les problématiques techniques liées à l'utilisation d'interfaces haptiques dans les applications collaboratives seront abordées. L'influence de ces problèmes techniques sur les utilisateurs et les différents modèles d'architecture réseaux proposés pour y répondre seront également présentés.

1.2 Psychologie sociale du travail en groupe

[Brown \(1965\)](#) définit la psychologie sociale comme étant la science qui étudie les comportements des individus déterminés par les interactions actuelles ou passées que ces derniers entretiennent avec d'autres personnes. La psychologie sociale s'intéresse donc à un grand nombre de thématique depuis la psychologie des foules ([Bon, 1896](#)) jusqu'à la psychologie environnementale ([Moser,](#)

2009). Dans le cadre de cette thèse, seule la psychologie sociale appliquée au travail en groupe sera abordée. Dans la psychologie sociale appliquée au travail en groupe, deux phénomènes en apparence opposés constituent des thématiques de recherche importantes et historique, il s'agit de la facilitation sociale et de la paresse sociale.

1.2.1 Facilitation sociale

La première utilisation et définition du terme facilitation sociale a été introduite par [Allport \(1924\)](#). [Allport](#) définit la facilitation sociale comme étant l'influence d'un groupe sur l'activité individuelle. [Allport](#) précise que les stimuli sociaux réduisant ou augmentant l'activité individuelle sont la vue et l'écoute des partenaires réalisant la même activité.

L'étude réalisée par [Triplet \(1898\)](#) sur les performances des cyclistes en fonction de la présence ou de l'absence de compétiteurs est souvent considérée comme une des premières expériences mettant en évidence le phénomène de facilitation sociale ([Allport, 1954](#); [Zajonc, 1965](#); [Strauss, 2002](#)). [Triplet](#) a comparé la vitesse d'enfants cyclistes en fonction de la présence ou de l'absence de compétiteurs. Ses résultats ont montré que les cyclistes étaient en moyenne plus rapides en présence de compétiteurs que lorsqu'ils couraient seuls. Ces résultats sont aujourd'hui en partie remis en cause par [Strube \(2005\)](#). [Strube](#) montre avec des moyens d'analyses statistiques modernes que les résultats de [Triplet](#) ne permettent pas de mettre en évidence le phénomène de facilitation sociale de manière significative.

[Zajonc](#) apporte une nuance importante à la définition de la facilitation sociale. En analysant les précédentes recherches, [Zajonc](#) remarque que dans les expériences portant sur des exercices physiques ou sur des tâches de surveillance, la présence d'observateur augmente les performances des sujets. À l'inverse dans les expériences portant sur la mémorisation de syllabes ou sur l'apprentissage de labyrinthe, les performances sont diminuées par la présence d'observateur. [Zajonc](#) émet l'hypothèse selon laquelle la facilitation sociale serait bénéfique pour les exercices physiques mais néfaste pour les tâches intellectuelles.

Selon [Strauss](#), et sur la base de l'hypothèse de [Zajonc](#), la présence d'une personne tierce augmente le niveau d'activité et d'éveil des sujets ce qui augmente à son tour les probabilités d'obtenir une réponse dominante, soit une réaction spontanée et naturelle suscitée par un stimulus. Dans le cas des tâches simples ou du moins bien maîtrisées, avoir une réponse dominante est une solution efficace pour augmenter les performances. À l'inverse, dans le cas des tâches complexes ou mal maîtrisées, les réactions dominantes constituent des solutions inefficaces. [Strauss](#) résume ce processus sous forme de diagramme (voir Figure 1.1).

[Bond et Titus \(1983\)](#) ont compilé 241 études comprenant plus de 24 000 participants, sur des tâches essentiellement cognitives que les participants ont réalisées seuls ou en présence d'autres personnes. Leurs résultats confirment l'effet positif de la facilitation sociale sur les performances des tâches faciles et l'effet négatif sur les performances des tâches complexes. En revanche [Bond et Titus](#) concluent que la facilitation sociale ne permet d'expliquer que 0.3 à 3% des variations de performances des participants. Ces résultats appuient l'hypothèse formulée par [Zajonc](#) même si l'influence du phénomène de facilitation sociale sur les performances finales n'est que très faible. De nombreuses hypothèses ont été formulées par la suite pour essayer d'expliquer le phénomène

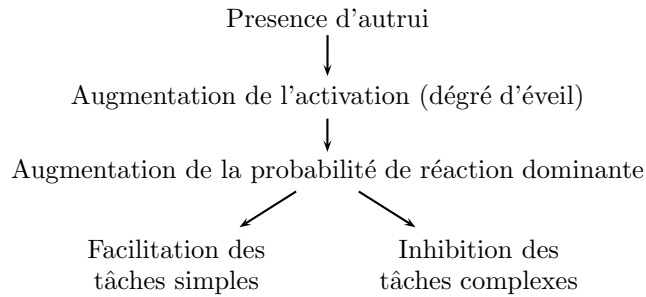


FIGURE 1.1: La facilitation sociale selon le modèle de Zajonc vue par Strauss.

de facilitation sociale mais ces hypothèses ont bien souvent été uniquement supportées par les auteurs qui les ont eux même formulées (Strauss, 2002).

1.2.1.1 Facilitation sociale en TCAO

La très grande majorité des études expérimentales en psychologie sociale se place en environnement réel. Peu de travaux abordent la question de la facilitation sociale dans un contexte de TCAO. Les études réalisées par Park et Catrambon (2007) et par Anderson-Hanley et al. (2011) cherchent à vérifier la validité du phénomène de facilitation sociale lorsqu'une personne se trouve face à un humain virtuel. Ces deux études montrent que pour les exercices physiques comme pour les exercices cognitifs, la présence d'humain virtuel permet de déclencher le phénomène de facilitation sociale. Toutefois, il ne s'agit pas de contexte collaboratif, la présence humaine est purement virtuelle dans ces deux études.

Une étude de Wigert et al. (2012) s'intéresse à l'influence d'une personne jouant le rôle de facilitateur lors d'une collaboration en environnement virtuel, Second Life en l'occurrence. L'objectif du facilitateur étant d'aider les collaborateurs à surmonter les difficultés de communication à distance en environnement virtuel. La fonction du facilitateur s'éloigne ici quelque peu de la définition du concept de facilitation sociale dans la mesure où c'est un rôle actif au sein d'une tâche collaborative et il n'est pas limité à un rôle d'observateur ou de co-acteur. Cette étude présente une analyse purement subjective du rôle de facilitateur et montre que ce type de rôle s'avère autant utile en EVC que dans la réalité.

1.2.2 Paresse sociale

Le phénomène de facilitation sociale se manifeste dans des situations de compétition, de coopération, et d'observation par un individu mais son existence dans une situation collaborative est bien moins fréquente (Meudell et al., 1992). À l'inverse, le phénomène de paresse sociale est spécifique aux situations collaboratives. La paresse sociale a été définie par Latane et al. comme la tendance d'un individu à fournir moins d'effort lorsqu'il travaille en groupe que lorsqu'il travaille de manière individuelle. Ce phénomène a été mis en évidence par Ringelmann (1913) qui s'est intéressé aux différences de rendement entre un individu seul et un groupe de personnes. L'expérience mise en place par Ringelmann consistait dans un premier temps à mesurer l'effort de traction de plusieurs personnes tirant individuellement sur une corde puis comparer ce résultat à l'effort de traction de ces mêmes personnes tirant collectivement sur une corde. Les résultats de l'expérience

montrent que l'effort de traction fourni par le groupe est toujours inférieur à la somme des efforts de tractions individuels. Plus le nombre de membres au sein du groupe est important plus l'effort par individu est réduit.

L'expérience de Ringelmann est reproduite par Ingham et al. (1974) afin de déterminer si la baisse de performance a pour origine un manque de coordination ou un manque de motivation. Ingham et al. constatent tout d'abord que l'ajout d'un partenaire supplémentaire dans un groupe composé d'au moins trois personnes n'engendre pas de réduction significative de la performance individuelle. La baisse de performance individuelle la plus importante a lieu au passage d'une activité individuelle à une activité en binôme. Grâce à la complicité d'un participant faisant semblant de tracter la corde, Ingham et al. déterminent que la diminution de la motivation est la cause principale de la baisse de performance d'autant que l'exercice demandé ne nécessite pas une coordination très importante. Il n'est pas exclu, notamment dans les tâches plus complexes, que les problèmes de coordination aient une influence négative sur les performances collectives mais c'est cette baisse de motivation chez les participants qui sera, 5 années plus tard, identifiée par Latane et al. (1979) sous le nom de paresse sociale.

De nombreux autres expériences ont été menées par la suite pour vérifier l'existence du phénomène de paresse sociale dans d'autres exercices physiques comme la natation (Miles et Greenberg, 1993), l'aviron (Anshel, 1995) ou des tâches consistant à faire un maximum du bruit en hurlant et en tapant des mains (Latané et al., 1979). L'influence de la paresse sociale sur les tâches cognitives a également été abordée particulièrement sur des exercices de type remue ménage ou "brainstorming" (Diehl et Stroebe, 1991; Karau et Williams, 1997). Karau et Williams (1993) ont compilé 78 études expérimentales réalisées dans des contextes applicatifs variés et ont montré que cet effet est généralisable à l'ensemble des tâches même si l'influence de la paresse sociale varie en fonction de la nature de la tâche effectuée. À partir de cette ensemble d'expériences, Karau et Williams ont formulé plusieurs théories pour expliquer les causes de la paresse sociale :

- Potentiel d'évaluation "*Evaluation Potential*" : Les individus sachant qu'ils sont évalués de manière collective, se fondent dans le groupe en sachant qu'ils ne pourront pas être blâmés pour une mauvaise performance collective ou à l'inverse, récompensés pour une bonne performance du groupe.
- Réduction de stimulation "*Arousal Reduction*" : La présence de partenaires réduit la stimulation car l'appréhension de l'évaluation individuelle est réduite.
- Effort dispensable "*Dispensability of effort*" : Les individus réduisent leurs efforts parce qu'ils estiment que leurs efforts individuels ne sont pas essentiels pour obtenir une bonne performance collective.
- L'équilibre des efforts "*Matching of effort*" : Les individus s'attendent à ce que leurs partenaires relâchent leurs efforts, en conséquence afin de maintenir l'équilibre des efforts entre partenaires ils réduisent les leurs.
- Attention propre "*Self-Attention*" : Travailler en groupe entraîne une réduction de l'attention portée à soi-même entraînant par la suite les individus à réguler leurs activités de manière moins efficace.

Afin d'éviter les situations favorisant la paresse sociale, Karau et Williams proposent un modèle de description des efforts collectifs (voir Figure 1.2). Ce modèle détaille les implications de chaque paramètre entrant en jeu dans la motivation individuelle dans le cadre d'une situation de travail collaborative. La Figure 1.2 montre que pouvoir évaluer la contribution de chacun, effectuer des

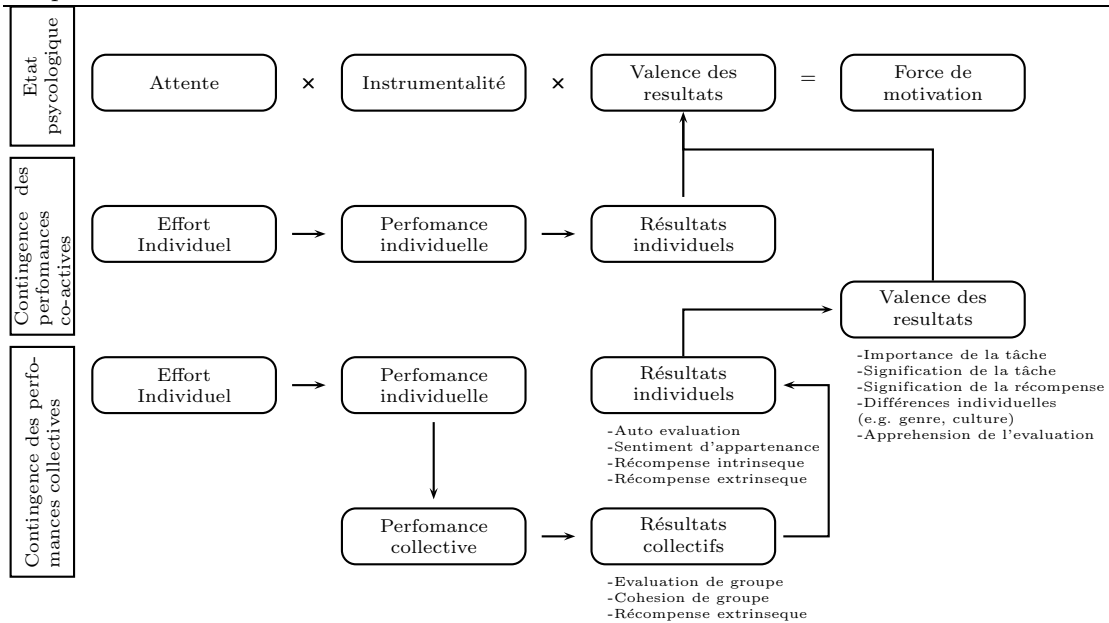


FIGURE 1.2: Modèle d'effort collectif selon Karau et Williams.

tâches sensées ou obtenir une récompense sont des éléments clés permettant le maintien de la motivation des membres d'un groupe.

La paresse sociale n'est pas un phénomène à l'influence purement négative. Jackson et Williams (1985) montrent que les avantages de la facilitation sociale et de la paresse sociale dépendent de la méthode de travail adoptée. Selon Jackson et Williams, le travail co-actif (individuel mais en présence d'une personne réalisant la même tâche) est plus performant pour les tâches simples grâce au phénomène de facilitation sociale. À l'inverse, le travail collaboratif est plus performant que le travail co-actif pour les tâches complexes. En effet, le travail collaboratif, via le phénomène de paresse sociale, réduit la stimulation et l'effort et donc diminue les performances pour les tâches simples, tâches dans lesquelles une réponse dominante (impulsive et spontanée) constitue une solution efficace. Dans le cas des tâches difficiles et nouvelles, où une réponse dominante a plus de probabilités d'engendrer des erreurs, le travail collaboratif augmente les performances.

1.2.2.1 Paresse sociale en TCAO

La facilitation sociale peut être étudiée en environnement virtuel par la simple représentation d'un humain virtuel. En effet, la présence virtuelle d'un observateur ou d'un co-acteur est suffisante pour déclencher le phénomène de facilitation sociale comme ont pu le montrer Park et Catrambon (2007) et Anderson-Hanley et al. (2011). Dans le cas de la paresse sociale cette condition n'est pas suffisante, il est nécessaire qu'il y ait collaboration et interaction entre deux individus pour que le phénomène puisse se manifester. Trois études se sont intéressées au cas de la paresse sociale en TCAO dans le cadre de tâches de remue-méninge (Chidambaram et Tung, 2005; Alnuaimi et al., 2010) et d'exercice de management (Suleiman et Watson, 2008). Ces trois travaux confirment l'existence du phénomène de paresse sociale dans un contexte de collaboration assisté par ordinateur. Piezon et Donaldson (2005) ont formulé une liste de recommandations pour éviter l'apparition du phénomène de paresse sociale dans les situations de TCAO.

- Rendre interdépendant les membres du groupe : les membres seront ainsi convaincus de l'utilité de leurs contributions au travail collectif.

- Augmenter la visibilité du travail de chacun : la visibilité du travail permet de renforcer la sensation d'être observé par ses partenaires. L'assignation d'un chef d'équipe pour définir des rôles individuels permet d'accroître la visibilité du travail.
- Créer une justice distributive : chacun individu doit être recomposé à la hauteur de sa contribution.
- Réduire la perception de la paresse chez les partenaires : les individus régulent leurs actions sur les actions qu'ils perçoivent de leurs partenaires. Si les individus ne perçoivent pas de signe de paresse chez leurs partenaires, ils seront moins enclins à réduire leur effort.
- Créer une cohésion de groupe : si les individus considèrent qu'ils participent à une collaboration de grande qualité, leurs contributions à l'objectif collectif sera d'autant plus importantes.

En accord avec la recommandation de [Piezon et Donaldson \(2005\)](#) sur le besoin de visibilité du travail de chacun, [Suleiman et Watson \(2008\)](#) mettent en avant l'importance de l'identifiabilité du travail dans le TCAO. Selon [Suleiman et Watson](#) l'identifiabilité du travail de chacun et le retour d'information individuelle sur ses performances réduisent la paresse sociale. À l'inverse, l'augmentation de la taille du groupe de travail, l'anonymisation des participants et l'absence total de retour sur l'évolution des performances sont des facteurs aggravant la paresse sociale. L'expérience de [Suleiman et Watson](#) montrent qu'à l'inverse des résultats attendus, la paresse sociale est réduite par l'absence de retour d'information sur la progression. La taille du groupe et l'identifiabilité des utilisateurs n'ont pas d'effet significatif sur les performances (le nombre de tâches accomplies) ou sur la paresse sociale.

1.2.3 Conscience situationnelle

À la différence de la facilitation et de la paresse sociale qui sont des phénomènes sociaux, la Conscience Situationnelle représente une capacité de perception des éléments environnants. Le terme Conscience Situationnelle (CS) est la traduction canadienne du terme anglais "*situation awareness*". [Endsley](#) définit la CS comme la perception des éléments de l'environnement dans l'espace et le temps, la compréhension de leurs significations et la projection de leurs statuts dans un futur proche (voir Figure 1.3). Un individu bénéficiant d'une bonne CS signifie que sa perception et sa connaissance de l'environnement correspond à la réalité actuelle et prochaine et qu'il est pleinement conscient de l'impact de ses actions sur l'environnement.

Cette composante de la perception humaine a pris une place importante dans les domaines qui nécessite des prises de décisions critiques telles que l'aviation ([Spirkovska et Lodha, 2003](#)), la régulation du trafic aérien ([Vu et al., 2009](#)) ou encore les opérations militaires ([Strater, 2001](#)). Le Bureau de Sécurité des Transports du Canada cite la faible CS des pilotes comme causes d'incidents aéronautiques dans certain de ses rapports ([BSTC, 2000](#)). Dans ces domaines, une mauvaise décision peut avoir des conséquences dramatiques. Il est crucial que les personnes concernées bénéficient d'une connaissance complète de leur environnement. Afin de mieux comprendre les facteurs qui influent sur la CS, il est nécessaire de pouvoir quantifier la CS. Pour cela il existe plusieurs techniques de mesure ([Nofi, 2000](#)) :

- Mesure subjective : Les sujets évaluent leurs propres CS en répondant à un questionnaire.
- Mesure objective implicite : En partant de l'hypothèse selon laquelle la CS est corrélée aux performances, on peut présumer que la CS est augmentée lorsque les performances le sont aussi.

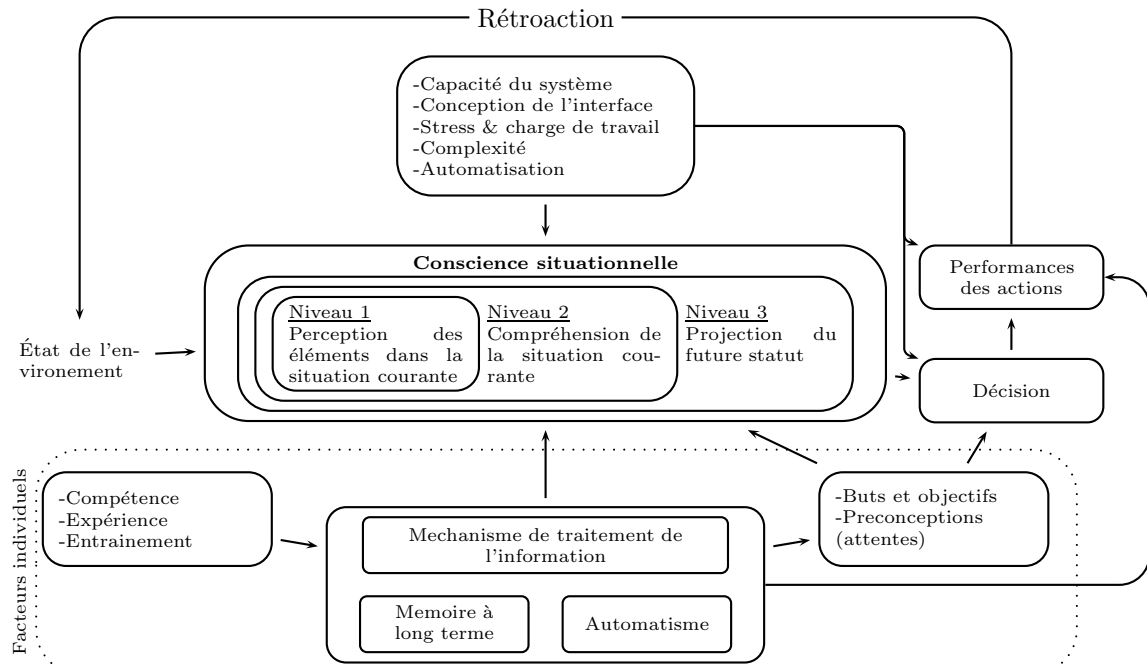


FIGURE 1.3: Modèle de CS dans un contexte de prise de décision dynamique selon Endsley.

- Mesure objective explicite : La CS est directement évaluée via des questions posées durant une suspension de l'activité. Ces questions visent à évaluer l'exactitude de la situation perçue par les sujets.

Endsley a proposé une technique de mesure objective explicite nommée Situation Awareness Global Assessment Technique (SAGAT). Bien que cette technique soit très utilisée en aéronautique, elle est en fait très générique et adaptable à de nombreux domaines. Cette mesure comporte quatre étapes clés :

- Suppression des sources d'information que l'on souhaite évaluer.
- Arrêt temporaire de l'activité de l'opérateur à un instant choisi de manière aléatoire pour éviter toutes anticipations de la part des sujets.
- Soumission d'un ensemble de questions qui cible les besoins individuels d'informations dynamiques en fonction du domaine d'intérêt.
- Reprise de l'activité suspendue.

La situation décrite dans le questionnaire est ensuite comparée à la réalité du moment pour évaluer la CS du sujet.

1.2.3.1 Conscience situationnelle partagée

La CS représente une capacité d'attention individuelle, elle n'intègre pas d'aspect collaboratif. Deux variantes de la CS intègrent la notion de groupe, il s'agit de la Conscience Situationnelle d'Équipe et de la Conscience Situationnelle Partagée. La Conscience Situationnelle d'Équipe (CSE) représente une capacité de perception spécifique à la coopération alors que la CSP est spécifique à la collaboration. Le travail coopératif est accompli par le partage du travail entre les participants, chacun est responsable d'une partie de l'objectif commun (Roschelle et Teasley, 1995). Le travail collaboratif est l'engagement mutuel des participants dans un effort coordonné pour accomplir ensemble un objectif commun (Roschelle et Teasley, 1995). La CSE est définie

par [Endsley \(1995\)](#) comme étant le degré de CS requis pour pouvoir assurer ses responsabilités lié à son objectif individuel. La CSP est définie par [Bolstad et al. \(2005\)](#) comme étant le degré de similitude entre les différentes CS de chaque membre d'une même équipe pour une même situation donnée. En effet, dans une collaboration il est utile que chaque individu partage une perception commune de la situation actuelle et une vision commune de la situation future pour pouvoir coordonner leurs actions avec facilité. Cet état de l'art sera uniquement centré sur la CSP car ces travaux de thèse portent essentiellement sur le travail collaboratif.

La CSP est considérée comme essentielle dans le cadre des opérations militaires notamment pour que les soldats aient pleinement conscience des capacités de leur équipe mais aussi de leurs limites ([Bolstad et al., 2005](#)). Ainsi nombre d'études sur la CSP ont pour contexte les opérations militaires ([Nofi, 2000](#); [Bolstad et al., 2005](#); [Saner et al., 2009](#)). Les situations d'urgences telles que les catastrophes naturelles ([Seppänen et al., 2013](#)) ou les catastrophes aériennes ([Harrald et Jefferson, 2007](#)) sont également des contextes dans lesquels maintenir une bonne CSP s'avère critique afin que les équipes de secours interviennent rapidement et efficacement.

Afin de déterminer quelles conditions sont favorables à la CSP, il est nécessaire de pouvoir mesurer la CSP de manière indépendante. Mesurer la CSP consiste à mesurer la CS de chaque membre de l'équipe puis à comparer les résultats entre les différents membres. Dans le cas d'une équipe composée de deux personnes, [Saner et al. \(2009\)](#) ont identifié quatre cas de figure dans la comparaison des résultats :

- Les deux sujets ont une CS correcte (conforme à la réalité de la situation) ce qui indique que la CS est partagée.
- Un des deux sujets a une CS correcte mais celle de son partenaire est incorrecte, dans ce cas il n'y a pas de CSP.
- Les deux sujets ont une CS incorrecte et différentes entre elle : la CSP est inexistante.
- Les deux sujets ont une CS incorrecte mais identique entre elle. La CS est inexacte mais elle est partagée.

En effet contrairement à la CS, une équipe avec une bonne CSP n'implique pas nécessairement que sa perception de la situation corresponde à la réalité mais uniquement que sa vision de la situation soit homogène au sein du groupe.

1.2.3.2 Conscience situationnelle en TCAO

Le terme CSPs n'est pas unanimement employé dans le domaine du TCAO. Il existe d'autres termes à la définition très proche. [Nova et al. \(2006\)](#) utilisent le terme "*mutual modeling*" qu'ils définissent comme étant le processus par lequel les partenaires se construisent et maintiennent une compréhension partagée de la situation mais aussi des présuppositions, des croyances et des suppositions requises pour une collaboration efficace. [Gross \(2013\)](#) emploie le terme de *cooperation awareness* qu'il définit comme étant les informations mutuelles échangées par les utilisateurs sur leurs activités et les changements appliqués aux artefacts partagés.

À la différence des deux travaux, précédents [Gutwin et Greenberg \(2002\)](#) s'appuient sur la définition de la CS pour l'appliquer au cas du TCAO. [Gutwin et Greenberg](#) s'intéressent au concept de conscience de l'espace de travail ("*workspace awareness*") et considèrent la CSP comme étant à la base de ce concept. [Gutwin et Greenberg](#) définissent la "*workspace awareness*"

| Catégorie | Élément | Question spécifique |
|-----------|---------------------------|--|
| Qui | Présence | Y a-t-il quelqu'un dans l'espace de travail ? |
| | Identité | Qui participe ? |
| | Auteur | Qui s'occupe de ça ? |
| Quoi | Action | Que sont-ils en train de faire ? |
| | Intention | Quel est l'objectif de cette action ? |
| | Artefact | Sur quel objet sont-ils en train de travailler ? |
| Où | Emplacement | Où sont-ils en train de travailler ? |
| | Regard | Où sont-ils en train de regarder ? |
| | Vision | Jusqu'où peuvent-ils voir ? |
| | Porté | Jusqu'où s'étend leur porté ? |
| Quand | Historique des événements | Quand cela a-t-il eu lieu ? |
| Comment | Historique des actions | Comment cela s'est-t-il déroulé ? |
| | Historique des artefacts | Comment cet objet a-t-il atteint cet état ? |

TABLEAU 1.1: Éléments nécessaires à la conscience de l'espace de travail pour les activités en temps-réel selon [Gutwin et Greenberg \(2002\)](#).

comme la compréhension permanente des interactions des partenaires avec l'espace de travail partagé. [Gutwin et Greenberg](#) ont listé un certain nombre d'éléments d'informations qu'une application collaborative doit être capable de fournir aux utilisateurs pour maintenir une bonne conscience de l'espace de travail (voir Tableau 1.1).

Les études de [Bolstad et Endsley \(2000\)](#) et de [Perla et al. \(2000\)](#) portent toutes les deux sur la CSP dans un contexte de jeu collaboratif 2D. [Bolstad et Endsley](#) utilisent un jeu de défense de base militaire face à des attaques aériennes (voir Figure 1.4). [Perla et al.](#) utilisent un jeu de recherche d'objets cachés dans une grille. Ces deux études ont évalué l'influence d'un affichage avec partage d'informations face à un affichage sans aucun partage. Les résultats de ces deux études montrent l'effet positif d'un affichage partagé sur la CSP ([Perla et al., 2000](#)) et sur les performances ([Bolstad et Endsley, 2000](#)). Les résultats de [Bolstad et Endsley](#) montrent aussi que la duplication intégrale de l'affichage des partenaires à des effets négatifs sur les performances de l'équipe et que l'absence d'affichage partagé est préférable à une duplication intégrale. Ce problème abordé par [Bolstad et Endsley](#) est également soulevé par [Endsley \(2000\)](#). [Endsley \(2000\)](#) rappelle qu'il est essentiel de faire la différence entre une donnée et une information. En effet, il est facile de noyer un utilisateur sous une masse de données au milieu de laquelle il devra trouver les informations qui lui sont utiles pour prendre une décision. Cette surabondance de données offerte à l'utilisateur, peut conduire à une désinformation de ce dernier. Le problème n'est donc pas le manque d'information mais de déterminer quelles données constituent une information.

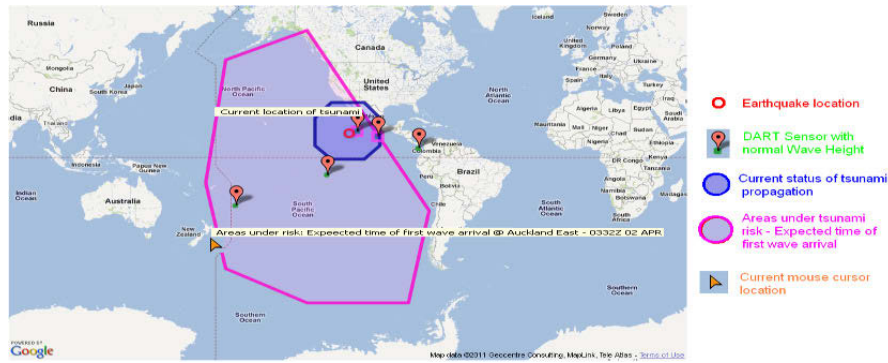


FIGURE 1.6: Interface graphique du système SAVER de Javed et al..

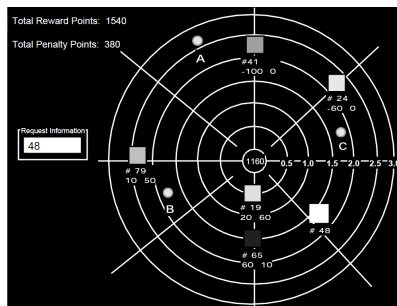


FIGURE 1.4: Interface graphique du jeu collaboratif de Bolstad et Endsley.

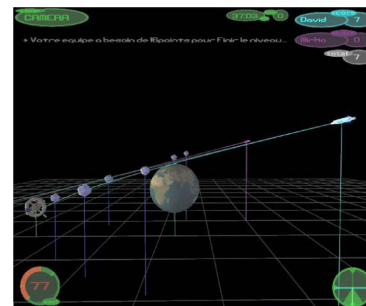


FIGURE 1.5: Interface graphique du jeu collaboratif de Nova et al..

Javed et al. (2012) ont proposé un système d'aide à la prise de décision pour l'évacuation massive de personnes en cas de tsunami. Ce système nommé Situation Aware Vigilant Emergency Reasoner (SAVER) indique l'épicentre du séisme, la propagation actuelle du tsunami et les zones à risque sur une carte du monde (voir Figure 1.6). Javed et al. ont comparé le système SAVER aux systèmes actuels de renseignement en temps réel sur l'activité sismique et océanographique fournis par les sites internet gouvernementaux. Les résultats de tests de SAGAT montrent une amélioration significative de la CS et de la CSP grâce à l'utilisation du système SAVER. En revanche, l'expérience de Javed et al. ne comporte aucun résultat de performance concernant le choix du plan d'évacuation. Les participants sont exclusivement évalués sur leurs capacités à percevoir et à restituer une situation d'urgence.

Une des rares études à avoir objectivement évalué à la CSP en EVC 3D a été réalisée par Nova et al. (2006). Nova et al. ont évalué l'efficacité d'un outil dédié au maintien de la CSP grâce à la transmission d'information visuelle sur les actions de son partenaire. Un jeu vidéo collaboratif 3D est utilisé comme contexte applicatif pour cette étude expérimentale (voir Figure 1.5). Les utilisateurs contrôlent le lancement d'un engin spatial, les paramètres tels que la gravité des planètes, la direction et la force de lancement sont à prendre en compte. L'objectif des participants est de rechercher les trajectoires permettant d'intercepter un maximum d'astéroïdes. L'outil d'information mis au point par Nova et al. s'est avéré sans influence sur la CSP mesurée, en revanche les résultats révèlent une amélioration significative des performances (nombre d'astéroïdes collectés) de l'équipe.

1.3 Travail coopératif assisté par ordinateur et environnement virtuel collaboratif

Le Travail Coopératif Assisté par Ordinateur (TCAO) ou, Computer Supported Cooperative Work (CSCW) en anglais, est une méthode de travail qui fait usage de la technologie et des réseaux informatiques pour coordonner des activités menées par des groupes d'individus (Baecker, 1995). L'utilisation de logiciels collaboratifs ou collecticiels dédiés au TCAO est aujourd'hui extrêmement répandue dans le monde de l'entreprise. L'intérêt des collecticiels permettant le partage de documents ou la messagerie instantanée n'est plus à démontrer. En revanche l'utilisation d'EVC pour le TCAO est beaucoup moins répandue. Il convient donc de s'interroger sur les différences entre collecticiels et EVC.

1.3.1 Les collecticiels

Les collecticiels ou "*groupeware*" sont souvent considérés comme étant des logiciels spécialement dédiés au TCAO. Or, dans la définition de Lynch et al. (1990), les collecticiels rendent conscients les utilisateurs qu'ils font partie d'un groupe alors que les logiciels isolent les utilisateurs les uns des autres. Les collecticiels ne sont pas restreints au seul cadre du travail, cependant la variété de collecticiels dédiés au TCAO est très large. Johansen (1988) propose de catégoriser les collecticiels dédiés au TCAO selon des critères de proximité spatiaux-temporelles inter-utilisateurs. Cette même classification a été reprise plus tard par Baecker (1995) (voir Tableau 1.2).

Dans cette classification, chaque sous-espace de la matrice correspond à des méthodes de collaboration et à des contraintes technologiques différentes.

- Les collecticiels dédiés aux **interactions face à face** servent essentiellement de support d'information aux groupes. Les salles de réunions informatisées sont un exemple de système de collaboration colocalisé synchrone. Elles offrent aux utilisateurs des outils pour organiser et faire converger leurs idées ainsi que des modèles de processus à suivre pour résoudre leurs problèmes étapes par étapes.
- Les collecticiels dédiés aux **tâches continues** garantissent et maintiennent l'enchaînement des actions entre les membres d'un groupe. Les gestionnaires de travail posté (aussi appelé travail en rotation) permettent d'assurer le fonctionnement continu des postes de travail chez les entreprises appliquant un système d'organisation horaire en trois-huit.
- Les collecticiels dédiés aux **interactions à distance** ont pour objectif de mettre en relation différentes personnes simultanément. Les objectifs de ces collecticiels sont d'offrir la meilleure qualité de communication possible (vidéo-conférence) ou de permettre l'édition et le partage de données à distance (éditeur collaboratif).
- Les collecticiels dédiés à la **communication et à la coordination** permettent aux participants de s'affranchir du besoin d'être au même endroit et au même moment pour travailler ensemble. Les gestionnaires de processus métier sont des systèmes capables d'automatiser les procédures de travail. Ces dernières représentent une suite de tâches effectuées par un groupe de personnes à des instants et dans des lieux différents.

| | Même instant Synchrone | Instant différent Asynchrone |
|---------------------------|--|--|
| Même lieu Colocalisé | Interactions Face à face -Collecticiel à affichage unique -Système d'aide à la décision -Salle de réunion informatisée | Tâche continue -Gestionnaire de travail posté -Gestionnaire de projet -Système d'affichage public |
| Lieu différent Distant | Interactions à distance -Vidéo conférence -Messagerie instantanée -Éditeur collaboratif | Communication et coordination -Courriel -Planificateur de réunion -Gestionnaire de processus métiers |

TABLEAU 1.2: Matrice espace-temps des collecticiels dédiée au TCAO selon [Baecker \(1995\)](#)

| | Même instant Synchrone | Instant différent Asynchrone | Instant différent et imprévisible |
|-----------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| Même lieu Colocalisé | Jeux sur console de salon | Gestionnaire de travail posté | Système d'affichage public |
| Lieu différent Distant | Vidéo-conférence | Gestionnaire de processus métiers | Courriel |
| Lieu différent et imprévisible | Jeux temps réel en ligne | Éditeur collaboratif | Jeux à univers persistant en ligne |

TABLEAU 1.3: Matrice espace-temps étendue des collecticiels selon [Renevier \(2005\)](#)

Une seconde classification proposée par [Grudin \(1994\)](#) ajoute la notion de prévisibilité à la classification de ([Johansen, 1988](#)). La notion de prévisibilité de temps et de lieu indique si les utilisateurs connaissent ou non l'instant et l'endroit où ils vont entrer en collaboration. [Renevier \(2005\)](#) utilise cette classification étendue pour catégoriser les collecticiels sans se limiter aux applications de TCAO (voir Tableau 1.3). Les collecticiels dédiés au divertissement ou à l'enseignement sont également représentés. Parmi les collecticiels dédiés au jeux, l'utilisation d'environnements virtuels 2D ou 3D est de plus en plus répandue. C'est précisément l'introduction de la notion d'environnement qui fait la différence entre un collecticiel standard et un Environnement Virtuel Collaboratif (EVC).

1.3.2 Les environnements virtuels collaboratifs

Les EVC sont nés du besoin d'entraîner les pilotes de l'armée américaine à moindre coût ([Lenoir, 2003](#)). Au début des années 80, la Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) a initié le développement du premier EVC sous le nom de projet SIMulator NETworking (SIMNET). D'autres simulateurs militaires dédiés à l'entraînement ont vu le jour avant le projet SIMNET mais SIMNET se différencie par un entraînement centré sur la collaboration. À la même époque, l'émergence de nouvelle technologie de visualisation 3D et d'architecture réseaux ont également

contribué au développement des EVC. La simulation militaire est le domaine d'application historique des EVC mais les EVC ne se limitent pas uniquement à ce domaine. Dans la définition que [Pečiva \(2007\)](#) donne des EVC, les deux principaux objectifs des EVC sont de :

- permettre à des utilisateurs distants de partager un même environnement.
- utiliser la communication entre ordinateurs pour augmenter la capacité de calcul offerte à l'application.

Les EVC englobent donc deux types d'application : les collaborations avec interaction inter-utilisateurs et les applications de distribution de charge de calcul. Les EVC dédiés au interaction inter-utilisateurs regroupent les jeux vidéos, les simulations (entraînement militaire virtuel [Singer et Barnett \(2010\)](#)), les applications d'ingénierie (Conception Assistée par Ordinateur (CAO) [Tay et Roy \(2003\)](#)), et le télé-travail. Ces applications exploitent principalement la possibilité d'interaction à distance des EVC, les possibilités de calcul distribué sont secondaires. L'augmentation de la capacité de calcul grâce à la multiplication des ordinateurs connectés n'est ici qu'une conséquence de la nécessité d'avoir plusieurs ordinateurs en réseau pour que chaque utilisateur puisse interagir.

Les EVC constituent donc une catégorie spécifique de collecticiels. Comme les collecticiels, les EVC ont pour principal objectif de permettre le partage et la manipulation des données entre utilisateurs. En utilisant la classification proposée par [Johansen](#), on peut voir qu'ils existe des EVC pour la collaboration synchrone distante (jeux vidéos en ligne), la collaboration synchrone colocalisée (simulateur de pilotage) et la collaboration asynchrone distante (CAO). Aujourd'hui, il n'existe pas d'EVC appartenant à la catégorie des collecticiels asynchrones colocalisés. Aucune contrainte technique ne l'empêche, seule l'absence d'application pertinente et utile dans le cadre d'une collaboration asynchrone colocalisée explique que les EVC soient absents de cette catégorie.

[Hannes et Niels \(2007\)](#) considèrent que les EVC ont trois avantages majeurs sur les collecticiels classiques pour le TCAO. Certains EVC offrent à leurs utilisateurs la possibilité de personnaliser leurs avatars et de l'animer. Cette possibilité permet aux utilisateurs de mieux refléter leur comportement général et d'exprimer leur état émotionnel. La possibilité d'animer un avatar permet de recourir à la communication gestuelle et ainsi de réduire les problèmes de coordination. Il est vrai que les avatars virtuels n'offrent ni la richesse des expressions faciales humaines, ni la variété gestuelle dont le corps humain est capable. Toutefois, [Yee et al. \(2007\)](#) montrent que les avatars représentés de manière non réalistes sont suffisants pour supporter des interactions sociales. Les EVC favorisent également la création de liens sociaux en offrant la possibilité de pause récréative. Ces pauses n'ont pas d'influence positive directe sur le travail. Cependant elles permettent de construire des liens de confiance plus rapidement entre les partenaires et ce sont ces liens qui améliorent l'efficacité de travail.

Enfin, les collecticiels sont souvent basés sur des interfaces conventionnelles : clavier, souris et écran. [Takemura et Kishino \(1992\)](#) considèrent que les EVC sont plus flexibles que les collecticiels car ils intègrent des dispositifs immersifs. En effet, bien que le lien entre Réalité Virtuelle (RV) et EVC ne fasse pas partie intégrante de la définition des EVC, de nombreuses plateformes collaboratives sont dotées de dispositifs immersifs comme par exemple :

- Casque de visualisation stéréoscopique avec suivi des mouvements de tête ([Jackson et Fagan, 2000](#))
- Écran stéréoscopique ([Sallnäs et Zhai, 2003](#))
- Système de suivi de main ([Ruddle et al., 2002](#))

– Interfaces haptiques (Ho et al., 1998)

De nombreuses définitions de la RV se limitent aux interfaces immersives employées par cette dernière. Or, d'après Steuer (1992), une notion fondamentalement associée à la RV est la notion de présence ("*feeling of presence*"), soit la sensation d'être dans un environnement autre que l'environnement réel. Via les dispositifs de RV, les EVC cherchent à atteindre cette sensation de présence mais aussi à augmenter la sensation de proximité entre les utilisateurs (Ho et al., 1998; Sallnäs et al., 2000). Cette thèse étant centrée sur la modalité haptique, seuls les EVC disposant d'interface à retour haptique seront abordés en détail dans la section suivante de cet état de l'art.

1.4 Interactions haptiques collaboratives

Le toucher est le sens le plus naturel et fondamental pour explorer et interagir avec le monde extérieur. Le toucher est aussi la modalité de communication la plus souvent négligée par les sciences cognitives et sociales (Gallace et Spence, 2010). Pourtant, ce sens est un puissant canal de communication, capable de susciter des émotions plus efficacement que les autres modalités de communication comme le langage. La communication haptique est également utilisée pour modifier la signification d'une communication verbale ou gestuelle.

1.4.1 Communication haptique interpersonnelle

La communication interpersonnelle haptique est utilisée dans différents contextes de la vie courante. Dans les relations sociales, la communication haptique est souvent utilisée pour la salutation : se serrer la main, se serrer dans les bras, s'embrasser. L'utilisation et l'interprétation de la communication haptique restent cependant très dépendante de la culture des individus. Dans la culture japonaise, le salut entre deux personnes exclut toute forme de contact physique alors que dans les cultures latines s'embrasser sur les joues est une forme de salutation communément acceptée. Dans un contexte professionnel, plusieurs expériences montrent qu'un bref contact physique de la main entre un serveur de restaurant et son client augmente la valeur du pourboire (Crusco et Wetzel, 1984; Erceau et Guéguen, 2007). Dans un contexte éducatif, il est montré qu'un simple contact physique sur l'avant bras entre professeur et étudiant, encourage la participation des élèves (Guéguen, 2004). Le contact physique est souvent considéré comme indissociable de la relation amoureuse (Montagu, 1984). Il existe aussi une forme de communication haptique moins étudiée qu'on peut appeler communication haptique indirecte. Il s'agit de la communication haptique transmise par l'intermédiaire d'un objet quand deux personnes manipulent simultanément ce même objet. Cette forme de communication est utilisée pour coordonner les mouvements avec des partenaires quand des personnes déplacent un objet lourd. Reed et Peshkin (2008) montrent que dans certains binômes, des rôles spécialisés se mettent naturellement en place entre les partenaires. Un individu se spécialise dans l'accélération de l'objet conjointement manipulé et son partenaire se spécialise dans le ralentissement du mouvement.

L'importance de la modalité haptique dans la communication interpersonnelle n'est donc pas à démontrer. Or, les systèmes de communication à distance actuels sont dépourvus d'interactions haptiques et très peu d'efforts sont réalisés pour intégrer le retour haptique dans ces plateformes.

Il existe pourtant de nombreuses interfaces haptiques utilisables dans le cadre d'une collaboration à distance (voir Annexe A). L'objectif de ces dispositifs est de reproduire les sensations tactiles et proprioceptives grâce à des dispositifs mécaniques. Toutefois, les possibilités offertes par les interfaces haptiques actuelles sont loin de pouvoir retranscrire toute la subtilité et la richesse de communication qu'un échange haptique interpersonnel réel peut offrir. De nombreuses études cherchent donc à déterminer les capacités de communication des interfaces haptiques en EVC.

1.4.2 Interactions haptiques en EVC

La première utilisation du retour haptique en EVC a été réalisée par [Takemura et Kishino \(1992\)](#). Dans l'expérience menée par [Takemura et Kishino](#), deux utilisateurs doivent orienter et déplacer des cubes en fonction de leurs couleurs grâce à un gant sensitif attaché à un bras haptique de type TOCUS ("*Torque Controllable Ultrasonic Motor*"). L'apport du retour haptique n'est pas évalué dans cette expérience, seul l'influence du point de vue entre utilisateurs est étudiée. Les binômes réalisent l'expérience dans deux conditions : avec des points de vue identiques sur la scène et avec des points de vue opposés. La condition reposant sur des points de vue opposés présente une meilleure vitesse de triage des cubes.

L'EVC mis au point par [Takemura et Kishino \(1992\)](#) empêchait la manipulation collaborative et synchrone d'un même objet afin d'éviter les problématiques de synchronisation entre les deux sites de manipulation. La possibilité de manipuler collaborativement et simultanément un objet virtuel avec un retour haptique a été introduite par [Ishii et al. \(1994\)](#). Grâce à un réseau local performant, [Ishii et al. \(1994\)](#) permettent à deux utilisateurs géographiquement proches d'interagir en même temps et sur le même objet via deux Space Interface Device for Artificial Reality (SPIDAR). La collaboration longue distance avec retour haptique est introduite par [Buttolo et al. \(1997\)](#) grâce à un système d'exclusion mutuelle comme décrit dans la section 1.4.3.3. Les travaux de [Ishii et al.](#) et de [Buttolo et al.](#) sont centrés sur les techniques mises en œuvre pour aboutir à leurs plateformes mais ils ne s'intéressent pas à l'influence du retour haptique sur les utilisateurs. Les travaux présentés dans les sections suivantes portent exclusivement sur l'influence et l'utilisation de la modalité haptique dans les EVC.

1.4.2.1 Interactions haptiques pour la coordination des actions

[Ho et al. \(1998\)](#) se sont intéressés à l'influence du retour haptique sur la sensation de proximité "*togetherness*" ou, traduit de façon plus littéral, l'impression d'être ensemble. Cette étude a pour contexte un jeu d'adresse qui consiste à faire passer un anneau le long d'un fil sans le toucher (voir Figure 1.7). Les deux utilisateurs contrôlent conjointement la position de l'anneau. Cette expérience montre que la sensation d'être ensemble est augmentée par la présence du retour haptique et que la précision de manipulation (temps de contact avec le fil) est elle aussi améliorée. La même plateforme et le même contexte expérimental ont été réutilisés par la suite par [Başdoğan et al. \(2000\)](#). [Başdoğan et al.](#) montrent que le retour haptique permet d'augmenter les performances globales que ce soit en termes de précision ou en termes de temps d'exécution.

[Sallnäs et al. \(2000\)](#) se sont eux aussi intéressés à l'influence du retour haptique sur les performances de manipulation et sur la perception de la présence sociale. Le concept de présence

sociale est très proche du concept de “*togetherness*” étudié par [Ho et al.](#) puisqu’il est défini par [Sallnäs et al.](#) comme la sensation d’être socialement présent depuis un emplacement distant. La tâche de manipulation étudiée par [Sallnäs et al.](#) consiste à agencer et à empiler des cubes dans des configurations prédéfinies (voir Figure 1.8). Pour pouvoir soulever un cube, les utilisateurs doivent appliquer une force opposée sur deux faces opposées du cube. Les résultats de cette expérience montrent que la présence du retour haptique permet bien d’améliorer les performances mais qu’elle n’a pas d’influence notable sur la perception de la présence sociale.

L’expérience de [Kim et al. \(2004\)](#) est proche de l’expérience précédente puisque les utilisateurs ont également pour objectif de soulever des cubes en exerçant des pressions sur les faces opposées d’un cube. Toutefois, [Kim et al.](#) se sont placés dans un contexte de communication à longue distance avec toutes les difficultés de synchronisation que cela implique. Comme [Başdoğan et al.](#), [Kim et al.](#) confirment l’influence positive du retour haptique sur la sensation de proximité.

À la différence des recherches précédentes, [Allison et al. \(2004\)](#) comparent une tâche effectuée en présence du retour visuel uniquement face à la même tâche effectuée avec retour haptique uniquement. La tâche étudiée par [Allison et al.](#) demande à deux utilisateurs de maintenir une certaine tension sur un ressort reliant leurs deux curseurs. Cette tâche est décrite plus précisément dans la Section 1.4.3.4. L’expérience montre que les utilisateurs exécutent la tâche plus rapidement avec le retour visuel qu’avec le retour haptique et que la force de tension du ressort a tendance à être trop forte avec le retour visuel et trop faible avec le retour haptique.

Les travaux précédents étaient centrés sur les performances des binômes, l’étude de [Groten et al. \(2009\)](#) porte aussi sur l’efficacité, soit le rapport entre efforts fournis et performances obtenues. Dans l’expérience mise au point par [Groten et al.](#), les utilisateurs doivent faire suivre une ligne 2D à un curseur dont le contrôle est partagé. Un unique degré de liberté est à gérer par les utilisateurs. Le curseur a une masse virtuelle de 20Kg avec la force d’inertie que cela implique. Dans une première condition, les utilisateurs déplacent en commun la masse et ressentent les forces appliquées par leurs partenaires. Dans une seconde condition, la masse est divisée en parts égales entre les deux utilisateurs et les forces appliquées par un utilisateur ne sont pas transmises à son partenaire. Les résultats montrent que les performances (temps d’exécution et précision du suivi de ligne) sont meilleures quand les utilisateurs bénéficient d’une communication haptique. En revanche, lorsque les forces appliquées ne sont pas communiquées, les efforts fournis par les utilisateurs sont moindres et l’efficacité supérieure.

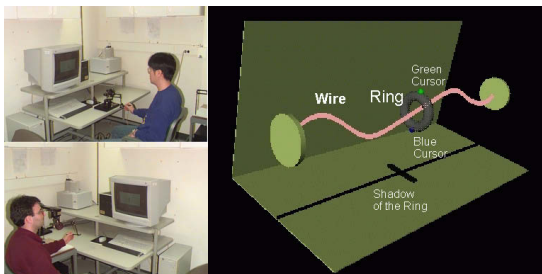


FIGURE 1.7: Dispositif et capture d’écran de l’expérience de [Ho et al.](#).

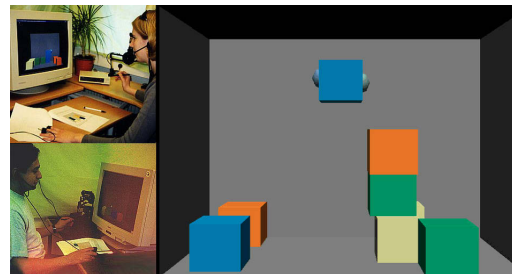


FIGURE 1.8: Dispositif et capture d’écran de l’expérience de [Sallnäs et al.](#).

L’expérience de [Weller et Zachmann \(2012\)](#) se place dans un cas de manipulation asymétrique, deux utilisateurs disposent chacun de deux interfaces haptiques différentes. Les deux utilisateurs

manipulent en bi-manuel mais l'un d'entre eux interagit à l'aide de deux interfaces à 6 Degrés de Liberté (DdL) alors que le second utilisateur interagit via deux interfaces à 3 DdL. Les utilisateurs ne peuvent interagir qu'aux travers des collisions entre leurs curseurs et leur environnement. Contrairement à toutes les autres études, l'expérience de [Weller et Zachmann](#) utilise un contexte de compétition et non de collaboration entre les utilisateurs. Les utilisateurs doivent collecter un maximum d'objets de formes très diverses et les placer dans leurs paniers. L'objectif des participants est de collecter plus d'objets que l'utilisateur concurrent. Les conclusions de cette étude montrent que les interfaces 6 DdL/DdL sont plus rapides à prendre en main que les interfaces 3 DdL/DdL.

1.4.2.2 Interactions haptiques métaphoriques

Les expériences présentées dans la section précédente utilisent la modalité haptique pour reproduire les interactions physiques qui existent dans le monde réel : collision, poids, inertie. Cette section s'intéresse aux études qui ont proposé des modèles d'interactions haptiques ne se limitant pas aux possibilités du monde physique.

[Oakley et al. \(2001\)](#) ont proposé un ensemble de fonctions haptiques pour la communication de position entre utilisateurs. Ces fonctions de communication métaphoriques ont été testées dans un contexte de création de diagramme 2D. Elles permettent aux utilisateurs d'attirer ou d'être attirés vers le curseur de leurs partenaires. Un effet de viscosité est également appliqué en fonction de la distance du curseur du partenaire pour augmenter la sensation de présence. Dans ce contexte, les fonctions d'attractions mutuelles sont utiles pour guider ou être guidées vers un élément du diagramme initialement hors de portée visuelle. L'analyse de cette expérience est purement subjective et montre que les utilisateurs ont trouvé ces fonctions engageantes et utiles mais physiquement plus exigeantes que la même tâche sans interface haptique.

À la différence des travaux de [Oakley et al.](#) qui se limitent aux environnements 2D, les travaux suivants proposent des outils haptiques métaphoriques dédiés aux environnements 3D. Dans l'expérience de [Ullah et al.](#) les utilisateurs doivent déplacer collaborativement des cylindres pour les placer dans des tores (voir Figure 1.10). [Ullah et al.](#) proposent des guides haptiques pour aider les utilisateurs à rester en contact avec l'objet partagé. La tâche est effectuée avec et sans retour haptique, l'influence des guides haptiques est elle aussi évaluée. Les résultats confirment que le retour haptique réduit le temps d'exécution, par contre la présence des guides haptiques n'apporte aucune amélioration de performance. Cependant les mesures subjectives indiquent que l'utilisation des guides est bien appréciée par les utilisateurs.

Une seconde étude de [Simard et Ammi \(2012a\)](#) porte sur une assistance haptique au déplacement collaboratif d'objet. [Simard et Ammi](#) proposent des métaphores de communication pour coordonner les déplacements d'un objet manipulé conjointement. L'expérience se compose d'un utilisateur expert et d'un suiveur, ils doivent déplacer un objet à travers une série d'obstacles (voir Figure 1.9). Les métaphores haptiques proposées ralentissent les mouvements de l'utilisateur expert quand il distance trop le suiveur et accélère les déplacements du suiveur lorsqu'il est trop distancé. Ces deux métaphores emploient des effets de viscosité et d'amortissement ressort pour ralentir ou accélérer les utilisateurs. Une troisième métaphore notifie, par une vibration adressée au suiveur, quand l'expert change brusquement de direction. Cette dernière métaphore a pour

but d'aider le suiveur à anticiper le mouvement de l'expert. Les résultats de cette expérience montrent que les métaphores de communications ont réduit avec succès les écarts de déplacement entre utilisateurs et ont aussi contribué à réduire le nombre de collisions avec les obstacles.

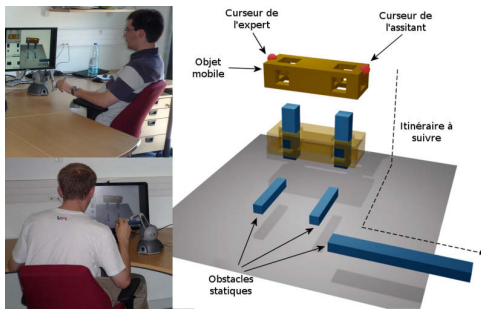


FIGURE 1.9: Dispositif et capture d'écran de l'expérience de [Simard et Ammi](#).

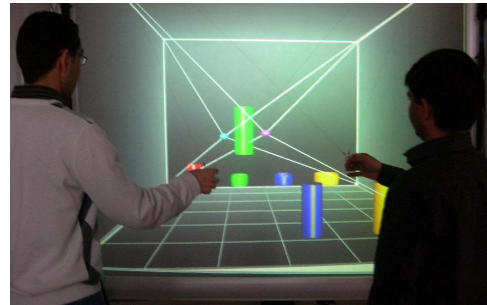


FIGURE 1.10: Dispositif expérimental de [Ullah et al.](#)

Enfin, [Simard et Ammi \(2012b\)](#) proposent un outil de désignation couplé à une guidance haptique vers la cible désignée. La particularité de cette étude est d'utiliser des groupes de trois personnes et de se placer dans un contexte de manipulation moléculaire. La fonction proposée par [Simard et Ammi](#) permet à l'utilisateur le plus expérimenté de désigner des cibles à manipuler à ses partenaires et ainsi de coordonner le travail de déformation moléculaire. Les résultats de cette étude montrent que la présence du guidage haptique permet de réduire le temps d'exécution de la tâche et le temps nécessaire aux partenaires pour atteindre les cibles désignées.

1.4.2.3 Interactions haptiques pour l'apprentissage

Les travaux de [Hutchins et al. \(2006\)](#) et de [Chellali et al. \(2010\)](#) abordent l'utilisation d'EVC appliquée à l'apprentissage et l'entraînement pour les opérations médicales. [Hutchins et al. \(2006\)](#) ont mis au point une plateforme pour l'entraînement à une opération chirurgicale de l'os temporal. Le dispositif propose de former des élèves en chirurgie en les faisant collaborer avec un instructeur spécialisé. Onze élèves apprentis ont participé à l'expérience et ont suivi la formation chirurgicale virtuelle assistée par un instructeur. Chaque utilisateur disposait de deux bras haptiques pour effectuer l'opération qui consiste essentiellement à percer l'os temporal. L'instructeur et l'apprenti étaient situés dans la même pièce et étaient libres de parler. Afin de simplifier la communication, l'instructeur avait la possibilité de saisir et guider la main de l'élève au travers des interfaces haptiques. Le système mis au point est évalué via une analyse de la communication verbale entre les deux utilisateurs. Les résultats montrent que le guidage haptique couplé à la communication verbale permet de supporter l'apprentissage en situation colocalisée. Toutefois, l'objectif à terme est de permettre la formation à distance.

[Chellali et al. \(2010\)](#) proposent une plateforme collaborative pour l'entraînement à la biopsie virtuelle (voir Figure 1.11). Effectuer une biopsie est une opération complexe puisque le chirurgien ne bénéficie que d'un retour visuel très limité et il doit éviter tout contact avec les organes non concernés. L'expérience de [Chellali et al.](#) s'intéresse à l'influence du retour haptique sur l'apprentissage, elle se divise donc en deux parties. Dans une première phase, des étudiants en médecine suivent un entraînement puis dans une deuxième étape ils doivent réaliser une biopsie virtuelle. Une partie des participants est entraîné en écoutant les instructions d'un superviseur

accompagné d'images illustrant ses instructions. Un second groupe de participants est entraîné grâce à l'application collaborative et aux instructions du superviseur mais sans retour haptique. Le dernier groupe bénéficie des mêmes conditions que le second groupe mais avec le retour haptique en plus et la possibilité pour le superviseur de guider physiquement les mouvements de l'apprenti via l'interface haptique. Les résultats de l'expérience montrent que les étudiants entraînés avec retour haptique effectuent la biopsie plus rapidement et plus précisément que les étudiants entraînés sans retour haptique.



FIGURE 1.11: Dispositif expérimental de Chellali et al..



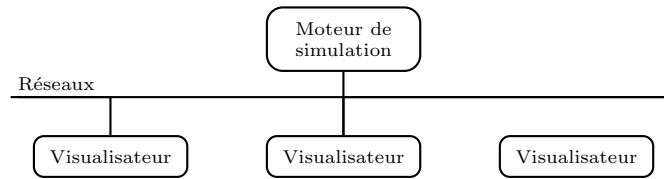
FIGURE 1.12: Dispositif expérimental de Moll et Sallnäs.

Moll et Sallnäs (2009) se sont intéressés au cas du guidage de personne aveugle dans un environnement virtuel (voir Figure 1.12). Chaque binôme est constitué d'un utilisateur voyant et d'un partenaire malvoyant. Les tâches à réaliser par les binômes consistent à construire des figures géométriques à partir d'éléments géométriques simples comme des cubes, des cylindres ou des sphères. Les participants peuvent saisir ou pousser le curseur de leurs partenaires afin que les utilisateurs voyants guident leurs partenaires malvoyants. Étant donné que la tâche ne peut pas être réalisée par un utilisateur seul, les voyants ont aussi besoin de l'aide des malvoyants. L'analyse des échanges verbaux montre que la communication haptique est utilisée pour transmettre des intentions et des informations spatiales. Le guidage haptique permet même de remplacer le guidage verbale.

Ces différents travaux montrent que l'utilisation de la modalité haptique apporte un réel avantage pédagogique permettant d'accélérer la vitesse d'apprentissage. Le retour haptique en EVC apparaît comme donc une solution prometteuse pour améliorer l'efficacité du télé-apprentissage. Toutefois, des obstacles techniques subsistent : maintenir une bonne qualité de rendu haptique dans le cadre d'une communication à distance constitue une problématique technique importante. De nombreuses études abordent cette problématique et proposent des solutions.

1.4.3 Architectures réseaux pour la collaboration avec retour haptique

Le temps de réponse musculaire humain est de l'ordre de 200 ms (5 Hz) en revanche les mécanorécepteurs cutanés sont capables de ressentir des vibrations allant jusqu'à 400 Hz. Minsky et al. (1990) ont montré que les utilisateurs étaient capables de percevoir la différence entre un rafraîchissement à 500 Hz et un rafraîchissement à 1000 Hz. En effet, les légères instabilités qui peuvent survenir avec un rafraîchissement à 500 Hz sont perceptibles par la main humaine. Cependant, cette même fréquence de rafraîchissement est considérée par Minsky et al. comme suffisante pour garantir une perception des forces et une stabilité du système satisfaisante pour l'utilisateur.

FIGURE 1.13: Architecture centralisée (client-serveur) d'après [Marsh et al.](#)

En raison de cette fréquence de rafraîchissement haptique particulièrement élevée comparée au rafraîchissement visuel, la mise en place d'application collaborative avec retour haptique représente un challenge technique important. Une communication internet est soumise à la latence et la gigue (variation de latence). Ces perturbations réseaux ont une influence néfaste sur la stabilité du rendu haptique dans les plateformes collaboratives. La qualité d'une connexion par internet varie très fortement en fonction de la localisation géographique des sites en communication. Une bonne connexion internet entre deux sites proches (> 250 km) est capable d'offrir un rafraîchissement moyen de l'ordre de 60Hz ([Marsh et al., 2006](#)). Les pires conditions de communication couramment testées dans la littérature présentent des latences de l'ordre de 200 ms ([Lin et al., 2010](#); [Iglesias et al., 2008](#); [Huang et al., 2009](#)) soit un rafraîchissement de 5 Hz. La fréquence de rafraîchissement d'une connexion internet à longue distance reste encore loin du 1kHz voir même des 500Hz recommandés pour le retour haptique. Le latence résultante engendre des retours de force disproportionnés et des retards dans les détections des collisions. Seule une connexion locale est capable d'offrir une fréquence de rafraîchissement supérieure à 1 kHz ([Marsh et al., 2006](#)). De nombreuses recherches proposent des solutions pour maintenir la qualité du retour haptique dans les applications collaboratives à distance. Trois types d'architectures se distinguent : distribuées ou pair à pair, centralisées ou client-serveur et hybrides.

1.4.3.1 Architectures centralisées (client-serveur)

Les architectures centralisées sont les plus simples à mettre en place. Un serveur calcule en permanence l'intégralité des données dynamiques de l'environnement et transmet ces informations aux postes clients qui se contentent de gérer le rendu visuel, audio et haptique correspondant à l'environnement décrit (voir Figure 1.13). Les performances des architectures centralisées ont été étudiées par [Ou et Başdoğan \(2002\)](#), [Huang et al. \(2010\)](#) et [Norman et Hamza-Lup \(2010\)](#). Ce modèle d'architecture est considéré comme conservant une bonne cohérence d'environnement entre les nœuds du réseaux. Elle permet d'offrir les simulations les plus riches en termes d'interaction (grand nombre d'objets dynamiques) car elle est robuste aux effets de la latence et de la gigue. En revanche, les connexions client-serveur présentent une latence plus importante que les autres architectures à cause de leurs boucles de communication client→serveur→client.

1.4.3.2 Architectures distribuées (pair à pair)

Dans les cas des architectures distribuées, chaque nœud calcule sa propre simulation de l'environnement et l'ensemble des nœuds communique entre eux pour synchroniser leurs données (voir Figure 1.14). Les performances des architectures distribuées ont été étudiées par [Kim et al. \(2004\)](#) et [Iglesias et al. \(2008\)](#). Ce modèle d'architecture évite l'ajout d'une latence supplémentaire dans

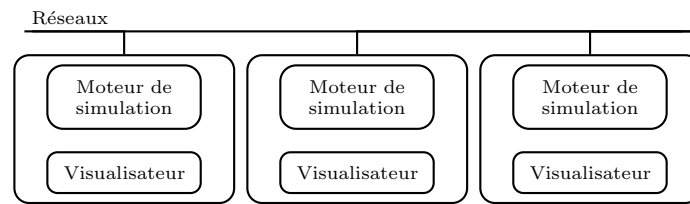


FIGURE 1.14: Architecture distribuée (pair à pair) d'après [Marsh et al.](#)

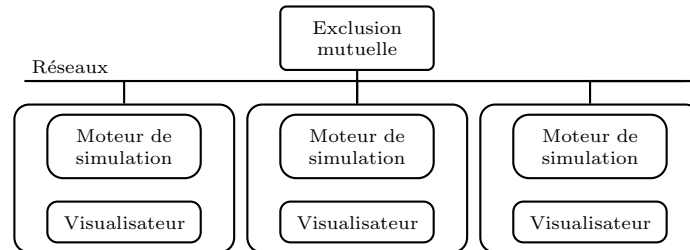


FIGURE 1.15: Architecture hybride en anneau à jeton de [Buttolo et al.](#) d'après [Marsh et al.](#)

le protocole de communication. En revanche, les architectures pair à pair sont sensibles à la latence et la gigue. Elles sont adaptées aux simulations qui présentent un faible nombre d'éléments dynamiques et une connexion avec une faible latence et une faible gigue. Ce type d'architecture est particulièrement sensible aux variations de latence qui viennent complexifier la synchronisation des simulations et rendent les environnements incohérents entre eux.

[Fotoohi et al. \(2007\)](#) ont comparé la stabilité d'une architecture centralisée et d'une architecture distribuée face à un faible débit de transmission et une forte latence. L'expérience de [Fotoohi et al.](#) se place dans un environnement virtuel très simple puisque seul un cube est manipulable par deux utilisateurs en même temps. L'analyse des mouvements des effecteurs terminaux démontre qu'une architecture distribuée couplée à un système d'amortissement négatif offre un retour haptique plus fidèle lors de déplacements libres et des contacts avec l'environnement qu'une architecture centralisée.

1.4.3.3 Architectures hybrides

Les architectures hybrides essaient de combiner l'uniformité de cohérence des architectures client-serveur avec la faible latence des architectures pair à pair. Il n'existe pas de modèle architectural hybride clairement défini. Chaque étude propose un modèle différent.

[Buttolo et al. \(1997\)](#) proposent une architecture appelée "*token-ring*" ou anneau à jeton. Cette approche repose sur une architecture pair à pair améliorée par un système d'exclusion mutuelle empêchant le contrôle simultané d'un même objet (voir Figure 1.15). Un objet manipulé par un utilisateur est réservé par ce dernier. Cette méthode évite tout problème de synchronisation de mise à jour mais elle empêche la manipulation simultanée d'un même objet par plusieurs utilisateurs à la fois.

[Marsh et al. \(2006\)](#) proposent une architecture nommée "*roaming-server*" ou serveur itinérant. Cette méthode est spécialement conçue dans le cas où plusieurs utilisateurs utilisent un même réseau local et sont connectés à d'autres utilisateurs distant via internet (voir Figure 1.16). Cette

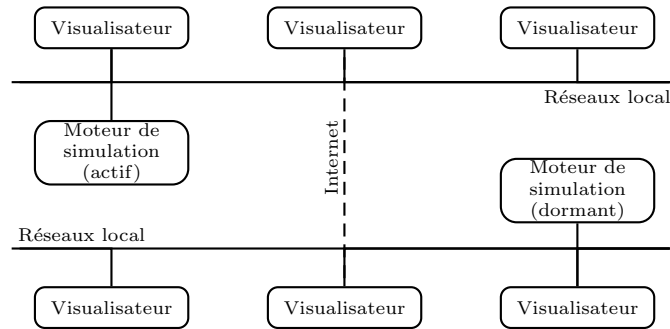


FIGURE 1.16: Architecture hybride avec serveur itinérant de Marsh et al.

architecture se base sur un modèle client-serveur, un serveur est présent au sein de chaque réseau local. Un système régule les serveurs entre eux en les plaçant dans un état actif ou dormant ou en fonction des interactions des utilisateurs. L'interaction simultanée multi-utilisateur sur un même objet est donc permise si les utilisateurs en question appartiennent au même réseau local. Enfin, Lin et al. (2010) présentent un modèle d'architecture similaire à celui proposé par Marsh et al. mais capable de gérer les interactions avec les objets déformables.

1.4.3.4 Influence de la qualité de connexion sur les utilisateurs

Plusieurs études se sont intéressées à l'influence de la qualité de connexion réseaux sur les performances et la perception des utilisateurs dans le contexte d'EVC avec interactions haptiques. Alhalabi et al. (2003) ont étudié l'influence de la latence réseaux dans le cadre d'une tâche de serrage de main virtuelle avec la particularité que les utilisateurs doivent se rejoindre en des positions précises. Les résultats montrent que l'augmentation de la latence augmente également le temps d'exécution de la tâche. Les utilisateurs perçoivent des perturbations haptiques telles que des vibrations, des rebonds, et des discontinuités dans le rendu à partir de 600ms de délais.

L'étude menée par Allison et al. (2004) est très similaire à la précédente. Les curseurs de deux utilisateurs sont reliés entre eux par un ressort virtuel. Ils ont pour consigne de maintenir une tension précise et constante sur le ressort tout en se déplaçant vers des cibles prédéfinies. L'expérience est réalisée avec des latences variant artificiellement de 0 à 200 ms. Comme Alhalabi et al., Allison et al. montrent l'impact négatif de la latence sur le temps de complétion ainsi que sur la précision des forces de tensions.

Boukerche et al. (2006) ont étudié l'influence de la latence, de la gigue et de la perte de paquet sur une tâche de manipulation collaborative en fonction de différents protocoles de communication et de la présence ou de l'absence d'un système de prédiction. Les résultats de cette expérience montrent que la prédiction des mouvements et des rotations des objets limite l'influence néfaste des aléas des connexions réseaux. Le protocole SCTP (Stream Control Transmission Protocol) couplé à un système de prédiction est considéré comme la meilleure méthode pour conserver les performances (temps d'exécution, nombre d'erreurs de manipulation) des utilisateurs face aux perturbations réseaux.

Dans l'expérience menée par Jay et al. (2007), deux utilisateurs ont pour objectif d'atteindre conjointement une série de cibles tout en maintenant le contact entre leurs deux curseurs. Comme

dans les expériences précédentes, le délai de communication varie artificiellement afin d'observer l'impact sur les performances et sur les sensations haptiques perçues par les utilisateurs. À partir de 25 ms de délais le nombre d'erreurs (cible non atteinte ou séparation des curseurs) augmente, à partir de 50ms de délais les utilisateurs perçoivent de légères perturbations dans le rendu haptique. Enfin à partir de 100 ms, la latence est suffisamment importante pour que les utilisateurs modifient leurs comportements afin de s'adapter aux discontinuités du rendu et de réduire les erreurs de déplacement.

L'expérience [Lambeth et al. \(2009\)](#) évalue l'influence de la latence sur une tâche d'empilement de cubes où deux utilisateurs doivent appliquer une pression sur les faces opposées d'un cube afin de pouvoir le soulever. Les résultats sont similaires à ceux obtenus dans les expériences précédentes : les performances (temps d'exécution, nombre de cubes relâchés) sont réduites avec l'augmentation de la latence. À partir de 100ms de latence, la baisse du temps d'exécution devient significative. En revanche, le délais n'influence que très peu la précision avec laquelle les cubes sont empilés.

Enfin, dans l'étude de [Huang et al. \(2009\)](#) les utilisateurs doivent empiler des blocs pour construire une maison de poupées. [Huang et al.](#) ont évalué la perceptibilité de la latence et de la perte de paquets sur le rendu haptique. Les résultats subjectifs de l'expérience indiquent que les utilisateurs considèrent comme légèrement agaçante ("*slightly annoying*") la latence à partir de 150 ms de délais. La perte de paquet couplée à 50ms de latence constante est considérée comme agaçante à partir de 50% de perte.

Toutes ces études montrent et s'accordent sur le fait que le seuil de perturbation de connexion à partir duquel les sensations et les performances du groupes sont modifiées dépend de la nature de la tâche. Il n'est donc pas possible de définir unanimement un seuil maximal de perturbation à ne pas franchir.

1.5 Conclusion

La première partie de cet état de l'art s'est intéressée aux phénomènes de facilitation sociale et de paresse sociale. Les variables extrinsèques qui influent sur ces phénomènes sociaux sont le mode de fonctionnement du groupe (co-actif, coopératif ou collaboratif) et la nature de la tâche (simple et bien maîtrisé, ou complexe et nouvelle). Les tâches étudiées dans ces travaux de thèse portent essentiellement sur des tâches complexes réalisées via des méthodes de travail collaboratives. Dans ces conditions, le phénomène de paresse sociale a un effet bien plus important que la facilitation sociale. Les variables intrinsèques qui influent sur la paresse sociale sont l'identifiabilité des actions de chacun, l'équilibre des efforts, l'interdépendance entre les membres et la perception de la paresse chez les partenaires . Or, dans le cas d'un travail à distance, les limitations de la communication entre utilisateurs font qu'il est potentiellement plus facile pour un utilisateur d'anonymiser son travail. Ces paramètres seront pris en compte dans chacune des problématiques abordées dans ces travaux de thèse afin d'éviter les comportements provoqués par paresse sociale.

Outre les phénomènes sociaux, il est également important de ne pas négliger l'attention portée à son partenaire. Soutenir la CSP est donc essentielle pour assurer une coordination intuitive des actions entre les membres d'un groupe. Or, le travail à distance réduit la qualité de la

communication inter-utilisateurs. La qualité des informations dont disposent les utilisateurs sur leurs partenaires est donc également réduite. Afin de compenser les effets de la communication à distance, plusieurs études suggèrent un certain nombre d'informations clés qu'une application collaborative doit être capable de fournir aux utilisateurs pour soutenir la CSP. Bien que tous les outils collaboratifs proposés dans ces travaux de thèse ont pour objectif de soutenir la CSP, cette solution ne sera pas retenue. Comme relevé par [Endsley](#), il n'est pas simple de déterminer quelle donnée constitue une information utile et il est facile de submerger les utilisateurs sous une masse de données inutiles. Des techniques de collaboration augmentant l'attention porter au partenaire sans augmenter la transmission d'informations seront employées. La technique de mesure SAGAT sera utilisée pour évaluer de manière précise l'apport ces méthodes de travail sur la CSP.

La deuxième partie de cet état de l'art présente une définition des collecticiels et montre en quoi les EVC constituent un type particulier de collecticiels. Les collecticiels peuvent être classés selon les contraintes d'espace et de temps auxquelles ils souhaitent apporter une solution. Les EVC abordés dans ces travaux de thèse seront exclusivement synchrones et distants. En effet, les possibilités d'interactions entre partenaires sont bien plus importantes dans les collaborations synchrones et la collaboration à distance présente des problématiques de communication inter-utilisateurs majeures.

La dernière partie de cet état de l'art montre que les applications collaboratives avec interfaces haptiques constituent une problématique technique à part entière, que ce soit au niveau de la mise en communication des interfaces haptiques ou au niveau des algorithmes supportant les simulations physiques. Les problématiques techniques liées à la communication à distance seront entièrement contournées grâce à l'utilisation d'un réseau local ou à l'utilisation d'un unique ordinateur pour les plateformes ne nécessitant que 2 utilisateurs. La collaboration à distance sera artificiellement reconstituée afin d'aborder les problématiques qu'elle apporte.

Enfin de nombreuses études se sont intéressées à l'influence du retour haptique en EVC. Toutes ces études s'accordent sur le fait que la collaboration virtuelle avec interaction haptiques constitue un réel avantage en termes de :

- sensations de la présence des partenaires.
- coordination des actions entre utilisateurs.
- communication d'information de position ou de geste.
- vitesse d'apprentissage d'une tâche.

Tous ces avantages font que la présence du retour haptique en EVC améliore les performances du travail collaboratif. De nombreuses possibilités d'interactions offertes par les EVC avec retour haptique sont encore à proposer et c'est précisément sur ce point de recherche que mes travaux de thèse entendent contribuer.

Pour cela, il convient tout d'abord donc de déterminer quelle tâche d'interaction étudier. [Bowman et al. \(2005\)](#) distinguent six tâches fondamentales en interaction 3D :

- La navigation : l'action de se mouvoir depuis une position vers une nouvelle position cible.
- La sélection : l'action d'acquiescer un objet précis parmi un ensemble d'objets.
- La manipulation : l'action de changer la position et l'orientation d'un objet.
- La modélisation : l'action de créer et modifier les propriétés des objets.
- Le contrôle de système : l'action de demander au système d'activer une fonctionnalité particulière, de changer de mode d'interaction ou de changer l'état du système.

- Les entrées symboliques : l'action de communiquer des informations symboliques (texte, valeur numérique) au système.

Parmi ces tâches fondamentales, nous allons aborder la sélection, la manipulation et le contrôle de système à travers l'utilisation d'interfaces haptiques. Ces trois tâches sont complémentaires et récurrentes en EVC. Dans chaque chapitre, des outils visio-haptiques seront proposés afin de réduire la paresse sociale, d'améliorer la CSP et la coordination des utilisateurs. Via ces améliorations, une augmentation des performances et de l'efficacité du travail collaboratif est escomptée. Dans le premier, chapitre un outil de désignation pour la coordination des sélections sera proposé et évalué. Le chapitre suivant présentera un outil pour le paramétrage collaboratif du mode de sélection. Enfin, plusieurs méthodes de manipulation collaboratives basées sur des contraintes mécaniques seront proposées et étudiées.

Désignation pour la sélection collaborative

2.1 Introduction

Ce chapitre porte sur la coordination des sélections entre partenaires. Comme définie précédemment, la sélection est l'action d'acquiescer un objet précis parmi un ensemble d'objets. La coordination de sélections consiste à choisir des sélections cohérentes et complémentaires entre elles. Un ensemble ou une combinaison de sélections judicieusement choisies doit permettre de simplifier la tâche de manipulation qui suit. Quand deux personnes souhaitent déplacer un objet avec précision, il est par exemple plus judicieux de saisir l'objet par ses deux extrémités que par des points rapprochés. À l'inverse, quand deux personnes souhaitent désencasturer un objet, il est plus efficace de le saisir à des points rapprochés. Dans le cas où la manipulation concerne un objet souple, les positions des sélections définissent la manière avec laquelle l'objet va se déformer. Les sélections doivent donc être coordonnées en fonction de l'objectif de manipulation visé. Afin de coordonner leurs sélections, les utilisateurs doivent pouvoir désigner des cibles de sélection à leurs partenaires avec précision. Désigner une cible permet de prévenir de ses propres choix de sélections ou de suggérer des sélections à un partenaire. La désignation consiste à indiquer un objet par la parole, le regard, la gestuelle ou une combinaison des trois.

Plusieurs problématiques propres aux EVC rendent la désignation et donc la coordination des sélections particulièrement difficiles. Dans le cas d'une collaboration à distance, la qualité de la communication est inévitablement réduite. Les systèmes de vidéo-conférence permettent d'offrir un bon support de communication mais ne permettent pas de transmettre toute la richesse d'une communication en face à face. En EVC, les référentiels de chaque utilisateur sont différents, les indices de communication corporelle comme la désignation gestuelle ou l'orientation du regard ne sont donc plus directement exploitables. [Wong et Gutwin \(2010\)](#) soulignent que, dans le monde réel, la désignation gestuelle est très importante car elle permet de rendre la désignation verbale bien plus précise en libérant les personnes du besoin de se construire un identifiant verbal unique pour chaque élément.

La désignation verbale n'est donc possible que si un identifiant verbal a été préalablement défini. En cas d'absence d'identifiants verbaux communs, la communication entre partenaires devient

plus difficile. Dans le cadre des EVC ce détail est important car les éléments constituant les environnements virtuels sont parfois des objets abstraits sans identifiants verbaux préétablis. Cette absence d'identifiant touche particulièrement les environnements de type simulation moléculaire ou simulation d'écoulement de fluide. À l'inverse, les applications représentant des environnements qui nous sont familiers sont moins confrontées à cette problématique. Les applications d'assemblage mécanique ou de sculpture virtuelle représentent des environnements avec lesquels nous avons l'habitude d'interagir dans le monde réel. Dans ce type d'environnement, le vocabulaire du quotidien est suffisant pour supporter une communication précise.

Les EVC sont confrontés à une seconde problématique liée à la sélection en environnement virtuel 3D. L'utilisation de dispositif d'interaction 3D (bras haptiques, gant sensitif, traqueur de position) en EVC est très courante. Ce type d'interface offre de plus grandes possibilités d'interaction et une plus grande liberté de mouvements que les interfaces standards (clavier, souris). La liberté de mouvements offerte aux utilisateurs n'est pas sans inconvénient. Elle requiert une bonne appréciation de l'espace, notamment de la profondeur, pour être capable de se déplacer et de se positionner correctement. Les indices visuels de profondeurs sont multiples (voir Figure 2.1), [Howard et Rogers \(2012\)](#) distinguent deux grande catégories : les indices monoculaires et les indices binoculaires. Toutes les expériences menées dans ces travaux de thèse sont réalisées sans retour stéréoscopique, seul un retour monoculaire est fourni aux utilisateurs. La majorité des indices monoculaires statique et dynamique sont facilement reproductibles en RV. Les effets de perspective, d'interposition, d'éclairage, d'atmosphère et de parallaxe sont supportés nativement par de nombreux moteurs graphiques. Les effets de flou sont réalisables mais ils nécessitent de connaître la direction du regard pour connaître le point de focalisation. L'effet d'accommodation du cristallin est quant à lui quasiment impossible à obtenir chez l'utilisateur.

Une autre forme d'indice monoculaire qui n'est pas présentée dans la Figure 2.1 est appelée la constance de taille ([Howard et Rogers, 2012](#)). L'homme est capable d'estimer les distances quand ils connaît à l'avance la taille des objets qui composent une scène. Des objets familiers comme un arbre, une voiture ou un visage ont des échelles de taille respectives qui permettent d'estimer leurs distances depuis son propre point de vue ou relativement à un autre objet connu. Dans les environnements virtuels abstraits, les utilisateurs sont amenés à évoluer dans des univers composés d'objets qui ne leurs sont pas familiers. Dans le cas de la simulation moléculaire, les utilisateurs naviguent et manipulent des objets à une échelle spatiale qui ne correspond à aucun référentiel de la vie courante. Les utilisateurs ne disposent donc d'aucune connaissance qui leur permettent de déterminer le rapport de taille entre les objets. Un utilisateur inexpérimenté aura beaucoup de difficultés à estimer les distances entre son curseur virtuel et un élément de l'environnement. Apprécier correctement la profondeur et appréhender l'environnement dans sa globalité demande de l'entraînement. Dans ces conditions, la tâches de sélection devient particulièrement complexes.

Afin de répondre à ces problématiques de sélection dans l'espace et de coordination des sélections, il est proposé un outil de désignation par pointage visio-haptique. Ce outil a pour objectif de simplifier deux tâches précises :

- la procédure de désignation pour l'utilisateur qui indiqué une cible à un partenaire.
- la procédure de sélection pour l'utilisateur à qui un partenaire a désigné une cible afin de pallier les problèmes de navigation dans l'espace.

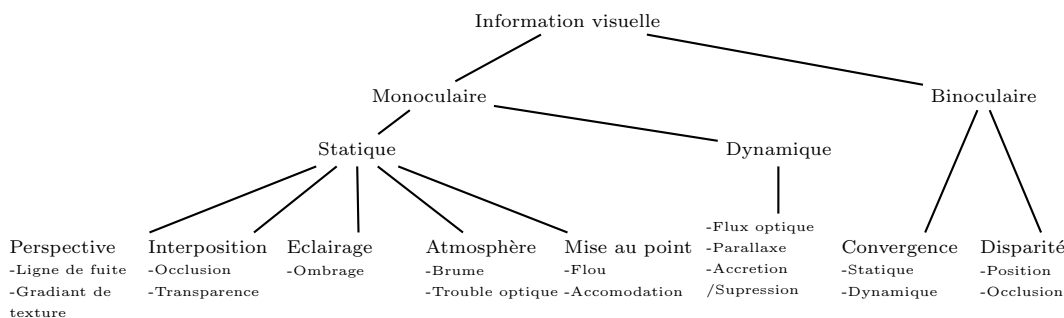


FIGURE 2.1: Catégories d'indices visuels de profondeur selon Howard et Rogers.

Les environnements moléculaires présentent des caractéristiques qui rendent la problématique abordé particulièrement critique. De plus, il existe aujourd'hui de nombreux logiciels de manipulation moléculaire permettant le travail collaboratif synchrone. Pourtant, les problématiques de communication dans ce contexte applicatif n'ont été que très peu abordées. L'outil proposé sera évalué dans un contexte de manipulation moléculaire collaborative. Il est donc important de comprendre les enjeux propres au domaine de la manipulation moléculaire.

2.1.1 Contexte : Manipulation moléculaire

La manipulation moléculaire est essentiellement utilisée pour rechercher et étudier de nouvelles configurations d'amarrage moléculaire. L'amarrage moléculaire est la discipline qui consiste à trouver la configuration d'assemblage entre deux molécules qui maximise la stabilité de l'amarrage. La recherche de nouveaux complexes moléculaires (assemblage de deux ou plusieurs molécules) est particulièrement importante pour l'industrie pharmaceutique notamment dans la mise au point de médicaments (Meng et al., 2011; Stark et Powers, 2012). Une première méthode employée pour découvrir de nouveaux complexes moléculaires est appelée criblage virtuel. Un ordinateur passe au crible toutes les combinaisons possibles pour essayer de trouver les configurations les plus stables. Le criblage virtuel n'est pas une solution parfaite : plus une molécule comporte d'atomes, plus le nombre de degré de liberté est important et plus les possibilités d'amarrage deviennent énormes. Cette méthode réclame donc beaucoup de temps et une puissance de calcul importante avant de fournir des résultats exploitables.

La seconde méthode de manipulation moléculaire consiste à simuler la physique moléculaire et à offrir aux spécialistes la possibilité d'interagir en temps réel avec ces molécules. Cette méthode exploite les capacités de raisonnement humaines pour trouver de nouvelles configurations d'amarrage. L'ordinateur se contente de simuler le comportement physique de la molécule et d'appliquer les forces exercées par les utilisateurs. Souvent, afin de limiter les possibilités de combinaison, seules la position et l'orientation des molécules sont contrôlables. Cependant une molécule n'est pas un corps rigide, il est possible de la déformer. Cette caractéristique augmente considérablement la complexité d'une tâche d'amarrage moléculaire. C'est précisément cette sous-tâche de déformation moléculaire qui servira de contexte applicatif pour cette étude. La déformation moléculaire constitue aussi un domaine de recherche à part entière. L'arrangement structurel (conformation) des molécules influe sur leurs propriétés physicochimiques. La recherche de nouvelles conformations stables représente donc un réel enjeu scientifique.

Il existe plusieurs logiciels dédiés au travail collaboratif en environnement moléculaire. Ces collecticiels offrent la possibilité de réaliser des tâches de manipulation moléculaire synchrone en temps réel. Un des principaux collecticiels professionnels dans ce domaine est BioCore ([Bhandarkar et al., 1999](#)). Ce collecticiel s'appuie sur les logiciels Visual Molecular Dynamics (VMD) ([Humphrey et al., 1996](#)) pour la visualisation moléculaire et sur Not Another (scalable) Molecular Dynamic (NAMD) ([Kalé et al., 1998](#)) pour la simulation moléculaire. À la différence de BioCore qui est destiné aux professionnels, le jeu collaboratif FoldIt ([Cooper et al., 2010](#)) est destiné au grand public. Le collecticiel FoldIt a pour objectif de faire contribuer le grand public à la recherche scientifique en les faisant "jouer" à des exercices de déformation moléculaire. D'autres logiciels de manipulation moléculaire initialement individuels ont été modifiés afin de supporter le travail collaboratif. C'est par exemple le cas de Crystallographic Object-Oriented Toolkit (Coot) et de Another Molecular Modeling Program (AMMP) dont les sources ont été modifiées pour devenir Co-Coot ([Lee et al., 2012](#)) et AMMP-Vis ([Chastine et al., 2005](#)). On peut aussi signaler Virtual Reality Molecular Modeling System (VRMMS) ([Lee et al., 2012](#)) qui est spécialement dédié à l'utilisation d'interface de réalité virtuelle pour la manipulation moléculaire collaborative. L'intérêt de ces plateformes collaboratives est de permettre aux chercheurs en bio-chimie de partager leurs résultats expérimentaux, de résoudre des problèmes complexes ou encore d'entraîner de nouveaux utilisateurs aux techniques de manipulation moléculaire.

Les collecticiels dédiés à la manipulation moléculaire sont donc nombreux et commencent à atteindre le grand public comme en témoigne le jeu FoldIt. De plus, d'importants enjeux scientifiques comme la conception de médicaments sont liés à la manipulation moléculaire. Or, comme le montre la section suivante, les recherches s'intéressant aux problématiques de communication en environnement moléculaire sont peu nombreuses.

2.1.2 État de l'art

De nombreuses méthodes dédiées à la désignation via dispositif 3D ont été proposées dans la littérature. [Hinckley et al. \(1994\)](#) présentent une étude bibliographique sur la sélection dans l'espace via une interface 3D. Les solutions proposées sont certes dédiées à la sélection mais elles sont parfaitement transposables aux problématiques de désignation en 3D. [Hinckley et al. \(1994\)](#) comparent trois méthodes de sélection en 3D : par positionnement direct, par lancer de rayon et par lancer de cône. La sélection par lancer de rayon est présentée comme plus efficace que la technique standard du positionnement 3D car plus confortable et permettant de sélectionner des objets hors de portée. La sélection par lancer de cône est plus adaptée pour réaliser des sélections approximatives.

[Poupyrev et al. \(1998\)](#) comparent la méthode du lancer de rayon à une méthode de sélection basée sur une métaphore d'extension de bras appelée *Go-Go*. [Poupyrev et al.](#) montrent que chaque méthode présente des avantages : la méthode *Go-Go* est plus efficace pour les sélections éloignées nécessitant de la précision alors que la méthode par lancer de rayon est plus rapide pour la sélection d'objets de grand taille. En revanche, les utilisateurs préfèrent clairement la méthode *Go-Go* car elle est plus intuitive.

Plusieurs techniques d'interactions à distance basées sur la métaphore de l'image-plan ont été formalisées par [Pierce et al. \(1997\)](#). La métaphore de l'image-plan utilisent les mains de l'utilisateur pour interagir avec la projection 2D d'objets 3D. Afin de mettre en œuvre cette métaphore de désignation, un système de suivi de tête et de main est nécessaire. La méthode de sélection par image-plan présente l'avantage d'être très simple d'utilisation. En revanche, dans le cas où les partenaires disposent de points de vue différents sur la scène, la méthode image-plan ne peut pas être utilisée pour la désignation sans l'ajout d'un retour visuel supplémentaire.

À la différence des deux études précédentes qui sont dédiées à la sélection, les travaux suivants sont centrés sur la tâche de désignation. [Olwal et Feiner \(2003\)](#) proposent une méthode de désignation via une interface à 6 DdL basée sur des pointeurs flexibles. Cette méthode de désignation présente l'avantage de limiter l'obstruction visuelle liée à l'affichage du pointeur. Cependant aucune étude expérimentale n'a été réalisée pour évaluer sa précision. [Wong et Gutwin \(2010\)](#) proposent de reproduire intégralement la gestuelle de désignation humaine via un avatar virtuel pour permettre une désignation plus précise. L'expérience de [Wong et Gutwin \(2010\)](#) montre que cette méthode de désignation est fonctionnelle en EVC, néanmoins elle reste moins précise qu'une désignation gestuelle réelle.

La désignation visuelle est la plus couramment utilisée mais d'autres modalités sensorielles sont également exploitables. L'utilisation de contraintes physiques est une des solutions proposée par [Hinckley et al.](#) pour améliorer la perception spatiale. [Oakley et al. \(2001\)](#) proposent d'utiliser la modalité haptique pour désigner un objet en guidant le partenaire jusqu'à son emplacement. L'expérience conduite par [Oakley et al. \(2001\)](#) montre que l'utilisation de la modalité haptique est utile pour indiquer la position d'éléments hors du champs de vision. En revanche, la désignation haptique apparaît comme plus fatigante qu'une méthode de désignation purement visuelle.

L'étude de [Oakley et al. \(2001\)](#) se limite à un environnement collaboratif 2D, or la nature de l'environnement a une influence importante sur la complexité de la tâche de désignation. [Chastine et al. \(2005\)](#) se sont placés dans un contexte de manipulation moléculaire collaborative et ont proposé des solutions pour indiquer les zones d'attention entre partenaires. Les problématiques rencontrées pour indiquer les points d'attention des partenaires sont similaires à celles de la désignation. [Chastine et al. \(2005\)](#) proposent l'affichage d'une boîte englobante sur les atomes cibles et un floutage des éléments environnants afin d'éviter toute ambiguïté de désignation. Toujours dans un contexte de manipulation moléculaire, [Simard et Ammi \(2012b\)](#) proposent un outil de communication qui utilise le retour haptique pour guider les utilisateurs sur les cibles désignées par un partenaire. Les résultats de l'expérience menée par [Simard et Ammi \(2012b\)](#) montrent que cette technique améliore l'efficacité et la coordination du groupe.

Bien qu'aucune étude n'est évaluée l'efficacité de la métaphore d'image plan de [Pierce et al. \(1997\)](#), cette méthode d'interaction semble parfaitement adaptée pour une tâche de désignation. Elle est très simple à comprendre et contourne tous les problèmes de perception de profondeur. Les travaux de [Oakley et al.](#) et [Simard et Ammi](#) montrent que le guidage haptique est une méthode efficace pour communiquer une position à un partenaire. Ces méthodes de désignation et de communication haptique s'imposent donc comme des solutions pertinentes pour répondre à nos problématiques de perception de profondeur et de communication à distance.

2.2 Contributions : Assistance à la désignation

Afin de répondre aux problématiques liées à la coordination des sélections dans le cadre d'une communication à distance en environnement moléculaire, un outil de désignation est proposé. Cet outil intègre trois fonctions indépendantes.

- **La désignation de cible** : elle permet à l'utilisateur d'indiquer une cible avec facilité. L'objectif de cette fonctionnalité est de remédier aux problèmes de communication à distance : manque d'identifiants verbaux pour désigner les objets et absence de retour visuel sur son partenaire pour supporter une communication gestuelle.
- **La notification de désignation** : elle indique à l'utilisateur concerné que son partenaire lui a désigné une cible. L'objectif de cette fonctionnalité est de simplifier la communication entre les partenaires et surtout de préparer les utilisateurs à l'activation de la fonctionnalité suivante.
- **Le guidage sur cible** : il indique à l'utilisateur concerné quelle cible lui a été désignée et l'aide à atteindre sa cible. L'objectif de cette fonctionnalité est de pallier aux difficultés de sélection en 3D dues à la représentation abstraite des environnements moléculaires.

Les sections suivantes présentent en détail le fonctionnement de ces trois composantes.

2.2.1 Désignation de cible

Instinctivement, les utilisateurs positionnent leurs curseurs sur la cible visée. Cette méthode de désignation est confrontée aux problèmes d'appréciation de profondeur, elle est donc difficile d'utilisation. Une assistance haptique est donc offerte pour simplifier le positionnement. Une deuxième méthode de désignation est également proposée afin de permettre la désignation à distance. Cette méthode s'inspire de la métaphore de l'image-plan proposée par [Pierce et al. \(1997\)](#). Elle est plus simple d'utilisation car elle permet aux utilisateurs de faire abstraction de la profondeur.

Deux méthodes de désignation sont donc proposées :

- La désignation par contact direct entre le curseur et l'objet couplé à une assistance haptique au positionnement.
- La désignation à distance par lancer de rayon entre le point de vue de l'utilisateur et son curseur.

2.2.1.1 Désignation par contact

La méthode de désignation 3D de base consiste à positionner directement son curseur sur l'atome à désigner. Positionner son curseur sur un atome permet de désigner un élément mais aussi de le sélectionner pour ensuite le manipuler. Afin de simplifier cette méthode de désignation et de sélection, une assistance haptique est fournie aux utilisateurs. Cette assistance aide les participants à positionner leurs curseurs en les attirant sur les atomes qui composent la molécule. L'assistance haptique peut être utilisée pour sélectionner un atome comme pour le désigner. Le modèle de force employé est calculé en deux étapes. Dans une première étape, la direction du vecteur d'attraction est calculée selon l'équation 2.1. Ce calcul dépend du nombre d'atomes à

proximité et de leurs distances au curseur. Dans une seconde étape, l'intensité de la force d'attraction est calculée en fonction de la vitesse du curseur et de la norme du vecteur d'attraction comme décrit dans l'équation 2.2. L'idée d'adapter l'intensité de la force en fonction de la vitesse de déplacement du curseur a été proposée par Picon et al. (2008). Cette relation de proportionnalité inverse entre vitesse de déplacement et intensité d'attraction a pour objectif de rendre plus confortable les déplacements rapides au travers la molécule.

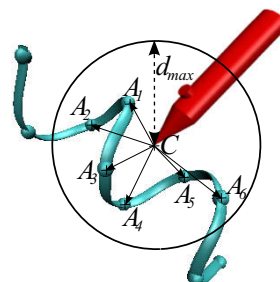
Cette assistance haptique est comparable au guide sphérique proposé par Ullah et al. (2008) ou à l'assistance haptique par champ de potentiel de Simard et al. (2009). Toutefois le modèle de force employé par Ullah et al. (2008) est plus limité car prévu pour des situations simples. Le guide sphérique ne fonctionne que lorsque les éléments sélectionnables sont suffisamment éloignés les uns des autres pour que le guidage ne soit actif que sur un objet à la fois. À l'inverse, la technique du champ de potentiel est prévue pour des situation où tous les éléments de l'environnement sont sélectionnables. Dans notre cas, seuls les atomes peuvent être désignés ou sélectionnés, les liaisons inter-atomes ne sont pas manipulables.

$$\vec{V}_a = \left(\sum_{i=0}^N \frac{\sigma(d_{max}, \|\vec{V}_i\|)^2}{\sum_{j=0}^N \sigma(d_{max}, \|\vec{V}_j\|)^2} \times A_i \right) - C \quad (2.1)$$

$$\sigma(x, y) = \begin{cases} y & , \text{if } x \geq y \\ 0 & , \text{if } x < y \end{cases}$$

Avec :

- \vec{V}_a : le vecteur orienté vers le point d'attraction.
- C : position du curseur.
- A_i position de l'atome i .
- \vec{V}_i : vecteur $\overrightarrow{CA_i}$.
- d_{max} : la distance maximum d'influence.
- N nombre d'atomes dans la molécule.



$$\vec{F} = k \times \left(\frac{\lambda(d_{max}, \|\vec{V}_a\|)}{d_{max}} \right)^2 \times \left(\frac{\lambda(v_{max}, v)}{v_{max}} \right)^2 \times \vec{V}_a \quad (2.2)$$

$$\lambda(x, y) = \begin{cases} x - y & , \text{if } x \geq y \\ 0 & , \text{if } x < y \end{cases}$$

Avec :

- \vec{F} : la force appliquée (en Newton).
- k : la raideur de l'attraction (en N/m).
- d_{max} : la distance maximum d'influence.
- v : la vitesse du curseur.
- v_{max} : seuil de vitesse au delà duquel la force d'attraction disparaît.

2.2.1.2 Désignation à distance

Afin de remédier aux problématiques liées à la perception de la profondeur, une méthode de désignation à distance a été mise en place. La désignation à distance s'inspire de la technique de

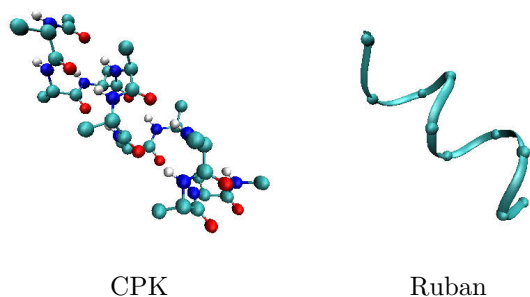


FIGURE 2.2: Méthode de représentation moléculaire

l'image-plan proposée par [Pierce et al. \(1997\)](#). La méthode de désignation à distance permet à l'utilisateur de s'affranchir du besoin de se positionner en 3D comme le requiert la désignation par contact. La désignation passe ainsi d'une tâche 3D à une tâche 2D. Cependant la méthode proposée par [Pierce et al.](#) a été adaptée à l'utilisation d'un bras haptique et à l'absence de suivi de position de tête. Au lieu d'utiliser l'œil et la main de l'utilisateur, le lancer de rayon est effectué depuis le point de vue caméra de l'utilisateur vers la position de son curseur (voir Figure 2.3 et Équation 2.3).

Afin d'offrir à l'utilisateur une indication visuelle sur l'atome pointé, une représentation par ruban (appelé "new rubban" dans VMD) de la molécule est utilisée. La représentation par ruban n'affiche que l'ossature de la molécule sous forme de ruban, il est ainsi aisé de distinguer un atome mis en surbrillance (voir 2.4). Les représentations CPK (Corey, Pauling, Koltun) ou "Ball-and-stick" sont souvent utilisées mais elles représentent tous les atomes de la molécule avec un code couleur associé à chaque élément atomique (voir 2.2). Ces représentations décrivent la molécule plus précisément mais elles sont aussi moins lisibles. De plus le code couleur utilisé pour identifier les éléments atomiques rend l'identification visuelle de la cible pointée plus difficile.

Une méthode similaire a été utilisée par [Ullah et al. \(2008\)](#) pour simplifier la sélection d'éléments grâce à un guidage conique visio-haptique. Toutefois, le guide conique proposé par [Ullah et al. \(2008\)](#) est prévu pour guider l'utilisateur vers l'objet visé. Dans notre contexte, c'est le partenaire de l'utilisateur désignant qui est attiré sur la cible.

Un modèle d'assistance haptique fonctionnant avec la désignation à distance a également été élaboré. Ce modèle d'assistance attire le curseur sur toutes les molécules projetées dans le plan écran et augmente donc considérablement le nombre de points d'attraction. Dans le cas où la molécule manipulée est composée d'un grand nombre d'atomes, l'assistance haptique devient beaucoup trop contraignante pour l'utilisateur car il est en permanence attiré par la molécule. De plus, la finesse du retour haptique (liée aux caractéristiques du bras haptique employé) est insuffisante pour supporter la densité des points d'attraction présent à l'écran. Dans ces conditions, il devient très difficile pour l'utilisateur de savoir par quel atome il est attiré. Cette fonctionnalité a donc été abandonnée.

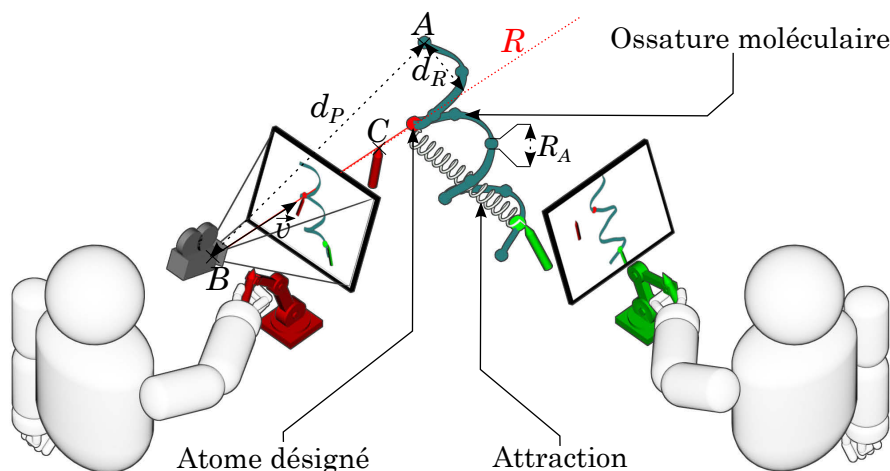


FIGURE 2.3: Désignation à distance par la technique de l'image-plan

$$d_R(A, R) = \frac{\|\vec{AB} \times \vec{v}\|}{\|\vec{v}\|} \quad (2.3)$$

Avec :

- $d_R(A, R)$: distance entre un atome A et le rayon R .
- \vec{v} : vecteur directeur de R passant par les points B et C .
- B : point de vue utilisateur.
- C : position du curseur de l'utilisateur.

2.2.2 Notification de désignation

Afin de notifier les utilisateurs des désignations qui leurs sont affectées deux types de retours sensoriels leurs sont transmis. Un signal visuel et un signal haptique sont transmis aux utilisateurs. Le signal visuel consiste en un clignotement du curseur qui le fait passer alternativement de sa couleur initiale vers une couleur blanche. Le signal haptique est une vibration de type sinusoïdal d'une durée de 0.4s, d'une période de 0.1s, d'amplitude 2N et dirigé vers la cible désignée.

[Tappeiner et al. \(2009\)](#) ont montré que les vibrations directionnelles permettent d'indiquer une direction avec une précision de 9 à 25° selon les sujets. En revanche, l'étude de [Tappeiner et al. \(2009\)](#) montre que les vibrations directionnelles ne permettent pas d'indiquer efficacement le sens de la direction. Dans notre cas, la vibration directionnelle permet de donner une première indication sur la position de la cible désignée. Le retour visuel permet de lever l'ambiguïté sur le sens de la direction. La fonction de notification est illustrée dans la Figure 2.4(c). Cette notification est surtout utile pour préparer l'utilisateur au guidage haptique qui va suivre. Sans cette notification, le guidage sur cible peut être mal interprété par certains utilisateurs qui vont avoir pour première réaction de s'opposer à la force de guidage.

2.2.3 Guidage sur cible

Une fois la notification terminée, une mise en surbrillance de l'atome désigné couplée à une force d'attraction sont employées pour guider l'utilisateur vers la cible désignée. Le modèle de force employé (voir Équation 2.4) est basé sur une force ressort qui augmente progressivement dans

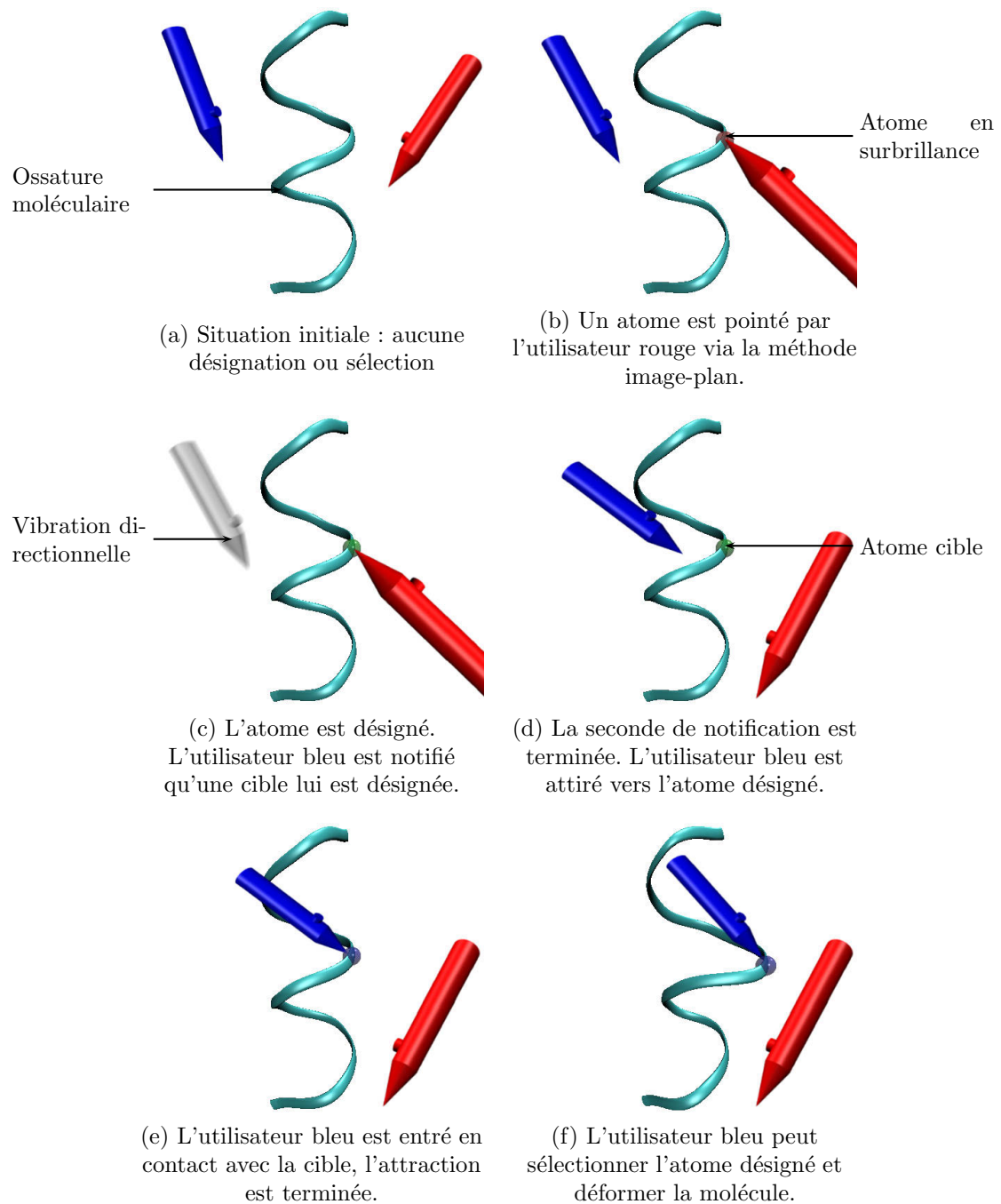


FIGURE 2.4: Procédure de désignation

le temps. L'augmentation de l'intensité de la force avec le temps est essentielle car elle empêche l'apparition brutale de forces et elle permet un guidage progressif vers la cible. Sans la variable de temps et dans le cas où l'utilisateur se trouve à une grande distance, le guidage sur cible engendrerait l'apparition brutale et subite d'une force. Cette force soudaine est susceptible de perturber les utilisateurs voire même de leur faire perdre l'effecteur du bras haptique. Le guidage haptique se termine lorsque l'utilisateur entre en contact avec la cible désignée.

$$\vec{F} = \begin{cases} t/t_{max}.k.(A - C) & , \text{ if } t < t_{max} \\ k.(A - C) & , \text{ if } t \geq t_{max} \end{cases} \quad (2.4)$$

Avec :

- \vec{F} force de guidage (N).
- t variable temps.
- t_{max} temps pour atteindre la raideur de ressort maximum (Fixé à = 3s).
- k constante de raideur(N.m⁻¹).
- A position de la cible désignée .
- C position du curseur de l'utilisateur.

2.3 Expérience 1 : Assistance Haptique

Afin d'évaluer l'outil de désignation proposé, deux expériences avec deux objectifs distincts ont été menées. La première expérience étudie l'influence de la composante haptique au sein de la fonction de désignation. La deuxième expérience évalue les avantages d'une collaboration coordonnée par l'outil de désignation proposé face à une collaboration en gestion libre.

2.3.1 Hypothèses et conditions

Comme expliqué précédemment, l'objectif de cette première expérience est d'évaluer l'apport de la composante haptique pour la désignation de cible dans un contexte de manipulation moléculaire. La présence du guidage haptique au sein de la désignation a pour objectif de remédier au problème de perception de profondeur et d'améliorer la communication inter-utilisateurs.

Les hypothèses formulées sont donc :

- **H1** Le guidage haptique réduit le temps d'exécution de la tâche de déformation.
- **H2** Le guidage haptique facilite la sélection de la cible désignée.
- **H3** Le guidage haptique simplifie la coordination entre les utilisateurs.

Les deux conditions évaluées sont donc :

- **Guidage visuel** : Manipulation avec outil de désignation purement visuelle. La composante haptique des fonctionnalités : "notification de désignation" et "guidage sur cible" est désactivée.
- **Guidage visio-haptique** : Manipulation avec outil de désignation visio-haptique. L'intégralité des fonctionnalités proposées est offerte aux utilisateurs.

2.3.2 Dispositif

La plateforme de manipulation collaborative de molécules est basée sur la plateforme Shaddock mise au point par [Simard \(2012\)](#).

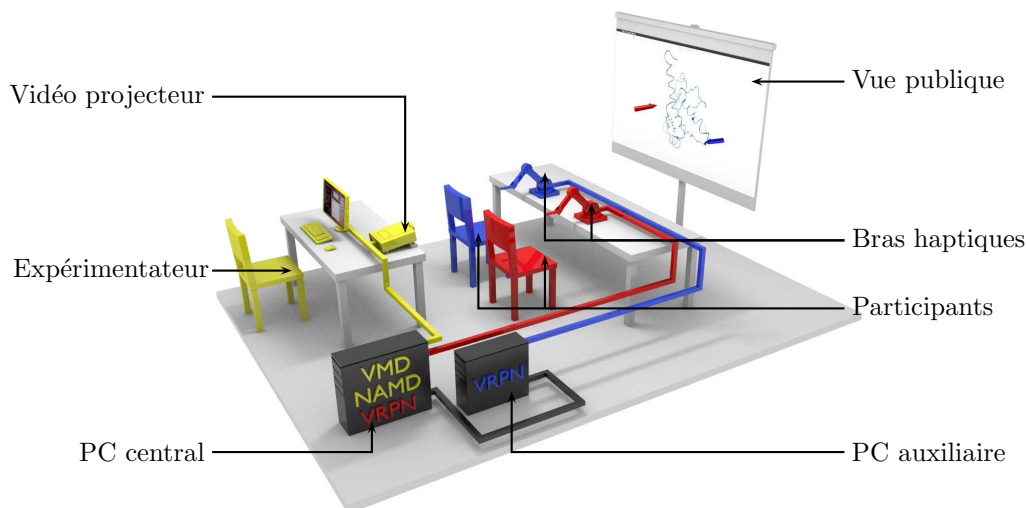


FIGURE 2.5: Dispositif de l'expérience à 2 personnes.

Le dispositif expérimental est composé de deux ordinateurs et autant de bras haptiques Touch de chez Geomagic (voir Figure 2.5). Les ordinateurs sont connectés entre eux via un réseaux local pour limiter les problèmes de latence. Un vidéo projecteur est branché à l'ordinateur central pour afficher la vue publique et un écran est connecté à un des ordinateurs auxiliaires pour fournir une vue privée à l'utilisateur coordinateur.

Les logiciels et programmes utilisés sont VMD pour la visualisation moléculaire, NAMD pour la simulation moléculaire, et Interactive Molecular Dynamics (IMD) [Stone et al. \(2001\)](#) pour la manipulation interactive de la molécule et Virtual-Reality Peripheral Network (VRPN) pour connecter le interface haptiques avec le pc serveur. Les sources de VMD ont été modifiées pour intégrer les fonctionnalités de désignation présentées.

2.3.3 Protocole

Afin d'évaluer le rôle de l'outil de désignation dans une application de manipulation moléculaire, le scénario employé sera un contexte expert-assistant. L'expert connaît les déformations à effectuer et il indique à son assistant quel atome manipuler via l'outil de désignation. Lorsque l'expert pointe un atome, la position attendue de l'atome apparaît (voir Figure 2.6). L'assistant ne bénéficie pas de cette fonctionnalité afin de le rendre dépendant de l'utilisateur expert. Comme l'affichage est commun aux deux utilisateurs, l'assistant peut voir les informations qui sont offertes à l'expert, mais ces informations sont difficilement exploitables car temporaires. L'assistant peut essayer de mémoriser les indications de déformations fournies à l'expert, mais il est extrêmement difficile d'estimer la profondeur de la déformation à effectuer sans repère visuel. Lorsque l'expert désigne un atome, la position attendue de l'atome désigné devient permanente pour que l'assistant puisse effectuer la déformation.

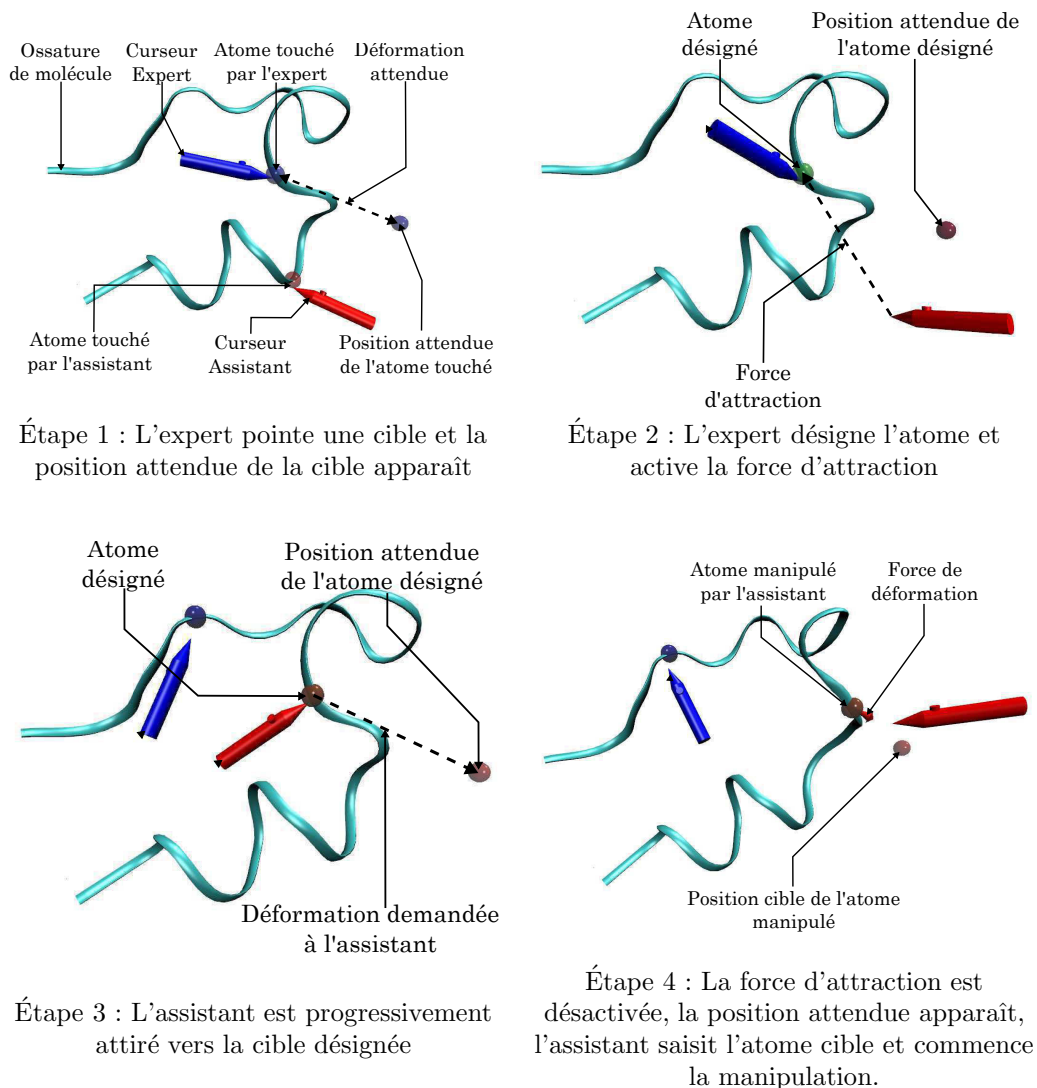


FIGURE 2.6: Indication de déformation et désignation de cible.

Trois tâches de déformation moléculaire sont présentées aux participants. Chaque tâche de déformation présente une molécule différente en taille et en quantité de déformation à effectuer. Voici les caractéristiques des déformations attendues pour chacune des molécules :

- Trp-Cage : une molécule de 305 atomes avec une seule région déformable qui inclut 90 atomes à manipuler.
- Prion : une molécule de 1777 atomes avec deux régions à déformer. Une région de 85 atomes et une autre de 110 atomes.
- Ubiquitine : une molécule de 1231 atomes avec quatre régions manipulables, de 55, 56, 56, et 77 atomes.

Les caractéristiques des ces molécules et des déformations que les utilisateurs doivent réaliser sont résumées dans le tableau 2.1 et la figure 2.7.

La racine de l'erreur quadratique moyenne ou Root Mean Square Deviation (RMSD) est une technique de mesure utilisée en bio-informatique pour évaluer les similitudes de conformation

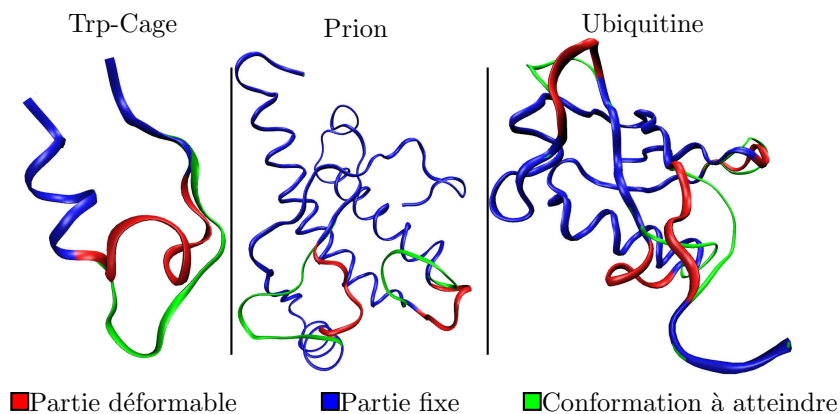


FIGURE 2.7: Tâches de déformations moléculaires

Les trois molécules sont présentées dans leurs conformations initiales (en bleu et rouge) et dans leurs conformations finales (en bleu et vert).

| Molécule | Atomes total | Atomes libres | Régions libres | RMSD initial | RMSD objectif |
|------------|--------------|---------------|----------------|--------------|---------------|
| Trp-Cage | 305 | 90 | 1 | 4.2 | 2.4 |
| Prion | 1777 | 195 | 2 | 3.2 | 1.6 |
| Ubiquitine | 1231 | 244 | 4 | 2.9 | 1.7 |

TABLEAU 2.1: Caractéristique des molécules.

La mesure Root Mean Square Deviation (RMSD) indique la quantité de déformation à effectuer pour chaque molécule.

entre une molécule de référence et une molécule manipulée (voir Équation 2.5). Cette mesure est affichée en permanence à l'écran pour que les utilisateurs puissent savoir s'ils se rapprochent de leur objectif de déformation ou s'ils s'en éloignent.

$$\text{RMSD}(\mathbf{v}, \mathbf{w}) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|v_i - w_i\|^2} \quad (2.5)$$

Avec :

- v_i position de l'atome i dans la molécule de référence
- w_i position de l'atome i dans la molécule étudiée.
- N nombre d'atomes dans la molécule.

Chaque condition commence avec une phase d'entraînement sur la molécule Trp-Zipper. La difficulté de la tâche d'entraînement est comparable à celle de la molécule Trp-Cage.

2.3.3.1 Mesures

Les mesures collectées sont les suivantes :

- **M_o1** Temps d'exécution : temps pour terminer la déformation requise.
- **M_o2** Temps pour rejoindre : temps mis par l'assistant pour rejoindre la cible désignée.
- **M_o3** Distance parcourue : distance parcourue par l'assistant pour rejoindre la cible désignée.
- **M_o4** Vitesse de déplacement : vitesse de l'assistant pour rejoindre la cible désignée.
- **M_o5** Nombre de désignation : nombre de désignation réalisé par l'utilisateur expert.
- **M_o6** Nombre d'instructions de l'expert : nombre d'instructions verbales émises par l'expert.

- **M_o7** Nombre d'instructions de l'assistant : nombre d'instructions verbales émises par l'assistant.

Voir Section B.1.3 pour plus détail.

En plus des mesures objectives, un questionnaire était présenté aux participants afin d'évaluer les points suivants :

- **M_s1** Efficacité du groupe : Le guidage haptique améliore l'efficacité du groupe.
- **M_s2** Réactivité de l'assistant : Le guidage haptique améliore la réactivité de l'assistant.
- **M_s3** Quantité de communication verbale : Le guidage haptique augmente la communication verbale.

Les participants indiquent leur accord ou désaccord avec ces affirmations. Pour plus de détail sur les mesures subjectives voir la Section B.1.4.

2.3.4 Résultats

Le test de [Shapiro et Wilk \(1965\)](#) montre qu'aucune de nos données ne respecte une distribution normale. Une analyse statistique de non paramétrique est donc effectuée. Les résultats de l'expérience étant appareillés, les données sont comparées via un test de somme des rangs signés de [Wilcoxon \(1945\)](#). Pour chaque test de [Wilcoxon](#) trois valeurs sont présentées.

- N_r : nombre de paires comparées (les paires aux résultats identiques sont exclues de la population).
- V : valeur basse de la somme des rangs signés.
- p – *value* : probabilité statistique du résultat de la somme des rangs signés.

Le seuil de significativité est fixé à 0.05. Si la p – *value* est inférieure a cette valeur, la différence moyenne entre les deux mesures est significative. Dans chaque diagramme en barres, les écarts-types sont représentés par les lignes verticales en pointillés.

2.3.4.1 Performance

La Figure 2.8 présente les temps d'exécution pour chaque molécule et le temps d'exécution global. On peut constater une réduction du temps d'exécution quelque soit la molécule manipulée. Toutefois cette réduction n'est pas significative ($N_r = 34, V = 234, p$ – *value* > 0.05). La mesure subjectifs **M_s1** sur l'efficacité du groupe (voir Figure 2.9) vient confirmer ce résultat. Les utilisateurs experts n'ont perçu qu'une légère amélioration de l'efficacité avec le guidage haptique. Les utilisateurs assistants sont eux plus influencés par la présence du guidage haptique puisqu'ils perçoivent une amélioration de l'efficacité plus importante que les utilisateurs experts. L'hypothèse **H1** n'est donc pas vérifiée : le guidage haptique ne réduit pas le temps d'exécution global.

2.3.4.2 Efficacité de désignation et de sélection de cible

Les figures 2.10 et 2.11 présentent les temps **M_o2** et les distances parcourues **M_o3** par les utilisateurs assistants pour rejoindre une cible. De manière globale, le temps (**M_o2**) est significativement ($N_r = 36, V = 163, p$ – *value* < 0.05) réduit par le guidage haptique. Dans le cas de la molécule

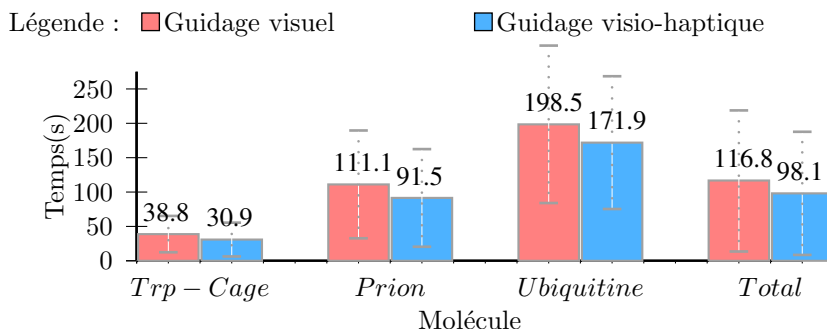


FIGURE 2.8: Temps d'exécution (\mathbf{M}_01) en fonction de la méthode de désignation et de la molécule manipulée.

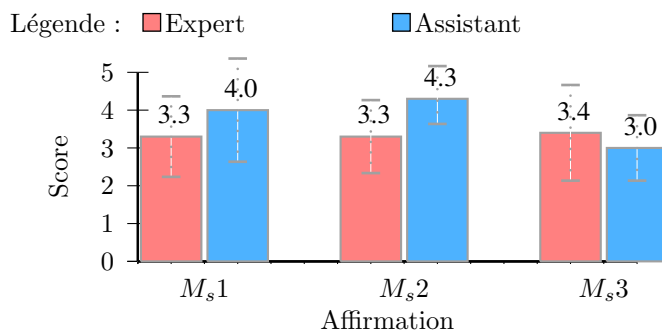


FIGURE 2.9: Résultat des mesures subjectives en fonction du rôle de l'utilisateur.

Trp-Cage, la mesure \mathbf{M}_02 est également significativement ($N_r = 12, V = 12, p\text{-value} < 0.05$) réduite par le guidage haptique. Concernant les deux autres molécules, bien que le temps soit en moyen réduit, la différence n'est pas significative ($N_r = 12, V = 16, p\text{-value} > 0.05$) ($N_r = 12, V = 25, p\text{-value} > 0.05$). La distance parcourue (\mathbf{M}_03) est elle aussi globalement réduite grâce au guidage haptique ($N_r = 36, V = 141, p\text{-value} < 0.05$). Dans le cas de la molécule Trp-Cage, la distance parcourue est elle aussi significativement réduite alors que la réduction n'est pas significative pour les deux autres molécules.

La mesure \mathbf{M}_04 indique que la vitesse de déplacement est légèrement supérieure lorsque le guidage haptique est présent : 1.14 dm.s^{-1} pour la condition sans guidage haptique et 1.37 dm.s^{-1} pour la condition avec guidage haptique. Il n'y a toutefois pas de différence significative en termes de vitesse entre les deux conditions ($N_r = 36, V = 290, p\text{-value} > 0.05$). Ces résultats montrent que le guidage haptique n'augmente pas la vitesse de déplacement des utilisateurs. Le guidage haptique amène les utilisateurs de manière plus directe vers les cibles désignées. Le temps nécessaire pour atteindre une cible est ainsi réduit.

En plus de l'assistance gestuelle qu'apporte le guidage haptique, la modalité haptique permet aussi de notifier plus efficacement un utilisateur lorsqu'une cible lui a été assignée. Le temps de réaction est probablement aussi réduit, mais cette mesure n'a pas été réalisée car trop complexe à évaluer. Le temps de réaction est donc intégré dans la mesure du temps \mathbf{M}_02 sans être directement mesuré. Par contre, une mesure subjective du temps de réaction a été réalisée. La mesure subjective \mathbf{M}_s2 (voir Figure 2.9) montre très clairement que les assistants se sont trouvés plus réactifs grâce au guidage haptique. En revanche, les utilisateurs experts n'ont absolument pas remarqué d'amélioration dans le temps de réaction de leur assistant. Après avoir désigné une cible, l'utilisateur expert surveille rarement l'activité de son assistant. L'expert ayant lui aussi

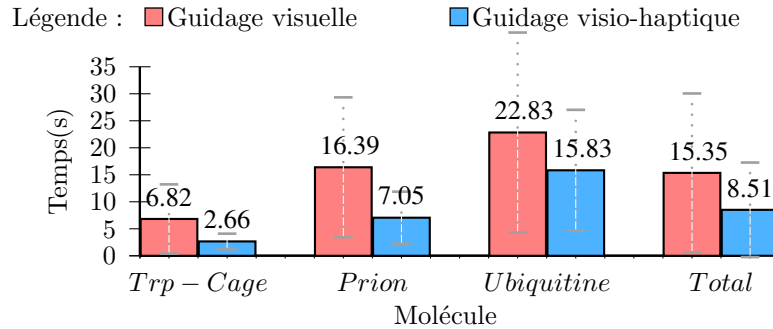


FIGURE 2.10: Temps pour rejoindre un cible (M_{02}) en fonction de la méthode de désignation et de la molécule manipulée.

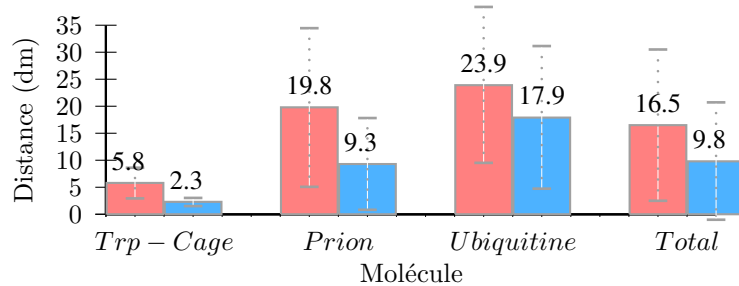


FIGURE 2.11: Distance parcourue (M_{03}) en fonction de la méthode de désignation et de la molécule manipulée.

à se concentrer sur sa propre tâche de déformation. Ce détail peut expliquer la différence de perception entre expert et assistant.

L'hypothèse **H2** est donc vérifiée, le guidage haptique facilite la sélection de la cible désignée.

2.3.4.3 Communication verbale

La figure 2.12 présente le nombre moyen de désignations effectuées par l'utilisateur expert. De manière globale, le guidage haptique permet de réduire significativement le nombre de désignations ($N_r = 36$, $V = 156.5$, $p\text{-value} < 0.05$), le nombre de désignation est également significativement réduit dans le cas de la molécule Trp-Cage ($N_r = 10$, $V = 6$, $p\text{-value} < 0.05$).

Les mesures de communication verbale (M_{06} et M_{07}) (voir Tableau 2.2) montrent une réduction du nombre d'échanges verbaux moyen entre les utilisateurs lorsque le guidage haptique est activé. L'utilisateur expert réduit davantage sa communication que l'utilisateur assistant; toutefois, aucune des deux mesures de communication verbale n'est significative.

La mesure subjective M_{s3} (voir Figure 2.9) est conforme aux résultats objectifs. Les utilisateurs experts perçoivent une légère réduction de leur communication verbale grâce au guidage haptique alors que les utilisateurs assistants ne perçoivent aucune différence de communication verbale.

Il est fréquent qu'après une désignation, l'expert indique verbalement à son assistant qu'il lui a affecté une cible. Régulièrement, l'assistant confirme qu'il a bien compris l'instruction de l'expert. Par la communication verbale, l'expert s'assure que sa désignation ait bien été comprise. En revanche, il se désintéresse de la manière avec laquelle l'assistant va atteindre la cible et donc de la présence ou de l'absence du guidage haptique. Il est probable que la faible réduction des

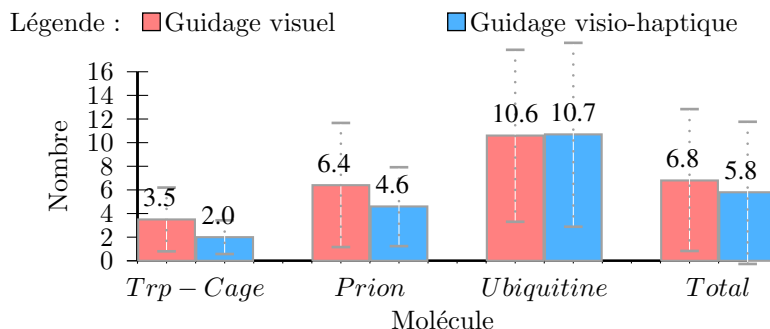


FIGURE 2.12: Nombre de désignation (M_o5) en fonction de la méthode de désignation et de la molécule manipulée.

| | Communication verbale | |
|----------------|-----------------------|----------------------|
| | (M_o6) Expert | (M_o7) Assistant |
| Condition V | 10.6 | 5.58 |
| Condition V+H | 8.75 | 5.25 |
| <i>p-value</i> | $p > 0.05$ | $p > 0.05$ |
| N_r | 12 | 10 |
| V | 33.5 | 25.5 |

TABLEAU 2.2: Communication verbale (M_o6 et M_o7) en fonction de la méthode de désignation

échange verbaux ait pour origine la réduction du nombre de désignation, elle-même induite par la présence du guidage haptique.

Même si la communication verbale n'est pas réduite par le guidage haptique, ce dernier permet au moins de réduire le nombre de désignations réalisées. L'hypothèse **H3** sur l'amélioration de coordination grâce au guidage haptique est donc vérifiée.

2.3.5 Discussion

Les bénéfices du guidage haptique sur l'assistance à la sélection de cible apparaissent très clairement, en revanche l'intérêt du guidage haptique sur les performances globales est plus discutable. L'absence d'amélioration du temps d'exécution peut s'expliquer par le fait que le guidage haptique n'intervient que pendant les phases de sélection qui ne constituent en moyenne que 9% du temps total dans une tâche de manipulation moléculaire. L'influence du guidage haptique sur la performance finale est complètement dépendante de la nature de la tâche. Plus les tâches de désignation et de sélection constituent une part importante du travail, plus l'influence du guidage haptique sera importante.

La présence du guidage haptique n'a pas eu d'incidence significative sur la communication verbale. Les utilisateurs utilisent la communication verbale en plus de la communication visio-haptique pour s'assurer que leurs instructions soient transmises. Afin de réduire les échanges verbaux, il serait utile de retourner une notification de prise en compte ou de refus d'assignation à l'utilisateur désignant une cible. Cette notification pourrait prendre la forme d'un signal haptique. Ainsi la communication haptique serait à double sens de l'expert vers l'assistant et de l'assistant vers l'expert. La réduction du nombre de désignations suggère que les instructions de l'expert ont été mieux suivies par l'assistant. La coordination entre les utilisateurs semble donc légèrement améliorée lorsque le guidage haptique est présent.

2.4 Expérience 2 : Coordination des sélections

La première expérience portait sur l'apport de la composante haptique dans le processus de désignation. Cette seconde expérience a pour objectif de montrer qu'une stratégie de travail collaborative basée sur l'outil de désignation proposé augmente l'efficacité de travail en groupe en réduisant les effets de la paresse sociale et en améliorant la coordination des actions. Afin d'augmenter la difficulté de coordination et le risque de paresse sociale, un utilisateur supplémentaire a été rajouté pour porter le nombre de partenaires à trois.

Cette seconde expérience met en opposition deux stratégies de travail. Dans la première stratégie de travail, les utilisateurs sont libres d'opérer comme ils le souhaitent mais sont privés de tout moyen de communication. Dans la seconde stratégie de travail, une personne chargée de coordonner l'ensemble du groupe devra désigner les cibles à chacun de ses partenaires avec pour seul outil de communication la méthode de désignation proposée, la communication verbale étant interdite.

La seconde stratégie de travail proposée prend en compte trois recommandations énoncées par [Piezon et Donaldson \(2005\)](#) pour limiter la paresse sociale. La spécialisation des rôles (coordinateur, opérateurs) permet d'augmenter l'interdépendance des utilisateurs. Le rôle de coordinateur permet d'augmenter la visibilité du travail de chacun en assignant des objectifs individuels. La meilleure répartition du travail entre utilisateurs permet de réduire la perception de la paresse chez les partenaires.

2.4.1 Hypothèses et conditions

Les hypothèses étudiées dans cette expérience sont les suivantes :

- **H1** Le travail collaboratif coordonné augmente les performances du groupe.
- **H2** Le travail collaboratif coordonné augmente l'efficacité du groupe.
- **H3** Le travail collaboratif coordonné permet de distribuer le travail plus équitablement.

Pour plus de détails sur les hypothèses voir la Section B.2.1.

Les deux conditions comparées sont :

- **Travail Coopératif Coordonné (TCC)** : Un utilisateur est désigné comme coordinateur, il a pour tâche de définir les atomes que ses deux partenaires doivent manipuler grâce à l'outil de désignation proposé. Les utilisateurs à qui le coordinateur désigne des cibles sont appelés opérateur. Afin de rendre les opérateurs dépendant du coordinateur, seul le coordinateur connaît la forme de la molécule que le groupe doit atteindre. Réciproquement, afin de rendre le coordinateur dépendant des opérateurs, seuls les opérateurs peuvent effectuer les opérations de déformations. Le coordinateur ne peut pas déformer la molécule, il ne peut que demander aux opérateurs d'effectuer la déformation qu'il a spécifiée.
- **Travail Coopératif Autonome (TCA)** : Les trois participants ont tous le même rôle d'opérateur. Tous les utilisateurs connaissent la forme de molécule attendue et tous sont capables de déformer la molécule de manière autonome. L'outil de désignation proposé n'est donc pas utilisé dans cette condition.

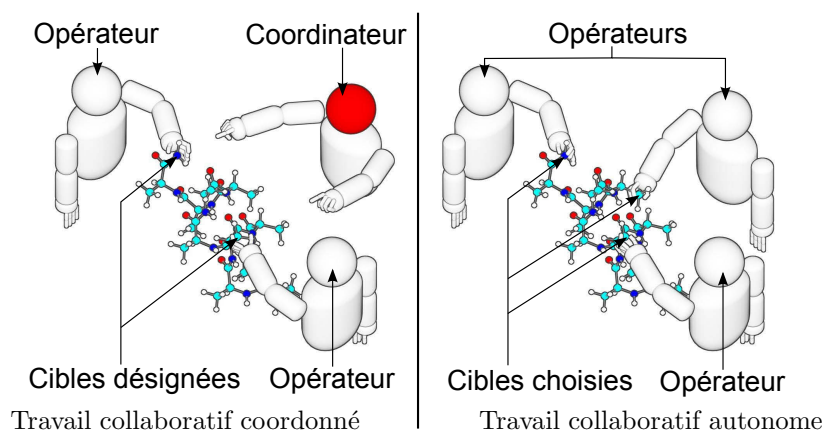


FIGURE 2.13: Stratégies de travail comparées

2.4.2 Dispositif

Le dispositif employé est basé sur la plateforme utilisée dans l'expérience précédente. Cette expérience emploie un utilisateur supplémentaire, un ordinateur supplémentaire est donc également ajouté à la plateforme (voir Figures 2.15 et 2.14). La différence majeure avec l'expérience précédente vient du dispositif d'affichage. Un vidéo projecteur est connecté à l'ordinateur central pour afficher la vue publique et un écran est connecté à un des ordinateurs auxiliaires pour fournir une vue privée à l'utilisateur coordinateur. Cette vue privée n'est pas nécessaire dans la condition TCA.



FIGURE 2.14: Photographies du dispositif expérimental.

2.4.3 Protocole

Les participants ont les mêmes objectifs que dans l'expérience précédente, à savoir déformer des molécules pour leur conférer une nouvelle forme prédéfinie. Les molécules et les objectifs de déformation sont également les mêmes que dans l'expérience précédente (voir Figure 2.7). Dans la condition TCC, seul le coordinateur peut voir la molécule de référence que le groupe doit obtenir. Afin que les opérateurs ne connaissent pas la forme de la molécule de référence, le coordinateur dispose d'une vue privée qui lui permet de savoir quelles déformations sont

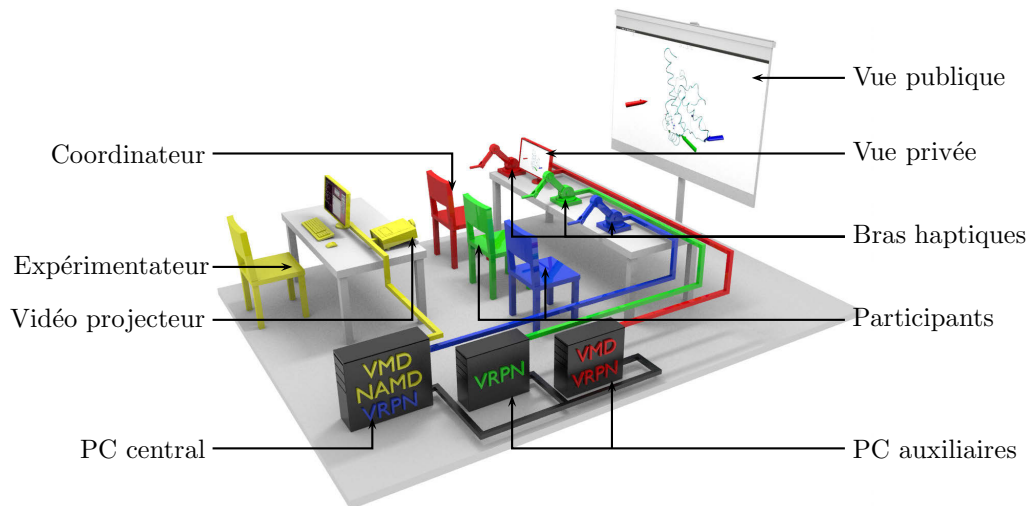


FIGURE 2.15: Dispositif de l'expérience en version 3 utilisateurs.

à effectuer. Le coordinateur affecte une cible à un opérateur différent en fonction du bouton pressé. Chaque bouton du bras haptique est associé à un opérateur différent grâce à un code couleur. Lorsque le coordinateur désigne un atome à un opérateur, deux indications visuelles apparaissent : une pour désigner l'atome à manipuler et une autre pour indiquer la position attendue de l'atome. Ce procédé était déjà utilisé dans l'expérience précédente comme illustré sur la Figure 2.6. Dans le cas présent, il s'agit d'une version avec deux assistants (appelé ici opérateur). La progression du travail de déformation est en permanence indiquée à l'ensemble des participants grâce à l'affichage du score RMSD.

2.4.3.1 Mesures objectives

Pour chacune des deux conditions, les mesures suivantes ont été réalisées :

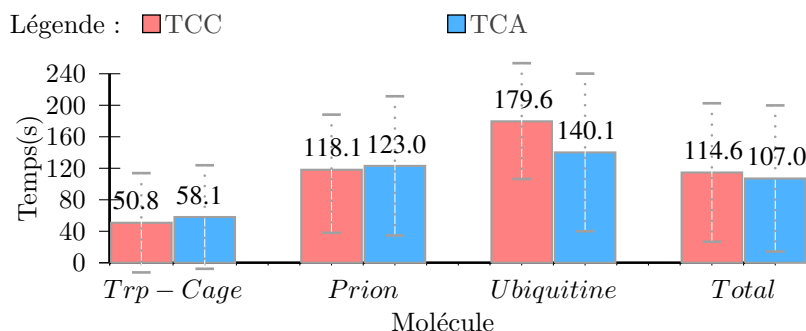
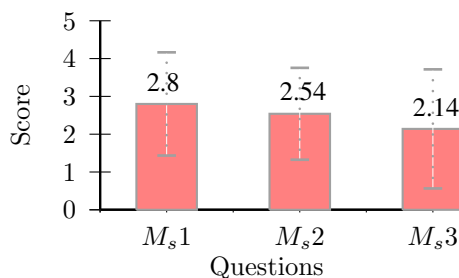
- M_o1 Temps d'exécution (sec).
- M_o2 Distance de manipulation (dm)
- M_o3 Temps de manipulation (sec).
- M_o4 Temps d'inactivité (sec).
- M_o5 Fréquence de manipulation (manipulation par seconde).

2.4.3.2 Mesures subjectives

À la fin de l'expérience, des questions sur les points suivants ont été soumises aux participants :

- M_s1 Efficacité
- M_s2 Situation conflictuelle
- M_s3 Communication

Pour chaque point abordé, les participants doivent indiquer la méthode de travail qu'ils ont préférée.


 FIGURE 2.16: Temps d'exécution ($\mathbf{M_o1}$) en fonction de la stratégie de travail et de la molécule.

 FIGURE 2.17: Mesures subjectives Efficacité ($\mathbf{M_s1}$), Situation conflictuelle ($\mathbf{M_s2}$), Communication ($\mathbf{M_s3}$).

2.4.4 Résultats

Comme dans l'expérience précédente (voir Section 2.3.4), le test des rangs signés de [Wilcoxon](#) est utilisé pour comparer les résultats des deux conditions.

2.4.4.1 Performances

Les temps d'exécution sont présentés dans la Figure 2.16. On constate que globalement les temps d'exécution sont très proches entre les deux conditions et qu'il n'y pas de différences significatives ($N_r = 27, V = 163, p\text{-value} > 0.05$) entre les deux conditions. Si on étudie séparément le cas de chaque manipulation moléculaire, on peut voir que le TCC a un léger avantage avec les molécules Trp-Cage et Prion. La molécule Ubiquitine se prête mieux au TCA. Toutefois quelque soit la molécule, aucun écart significatif n'est obtenu entre les deux conditions. L'hypothèse $\mathbf{H1}$ est donc rejetée, le TCC n'est pas plus performant que le TCA.

2.4.4.2 Efficacité de déformation

Les figures 2.18 et 2.19 présentent respectivement la distance parcourue ($\mathbf{M_o2}$) et le temps écoulé ($\mathbf{M_o3}$) durant les phases de manipulations.

De manière globale et dans la condition TCC, on observe une importante réduction de la distance de manipulation de 42% et de 32 % pour le temps de manipulation. Dans le cas de la molécule Prion, la réduction de la distance de manipulation et du temps de manipulation est encore plus importante puisque les réductions respectives sont de 57% et de 43% entre le TCA et le TCC. Toutefois aucune de ces réductions de manipulation n'est significative ($(\mathbf{M_o2}) : N_r = 30, V = 171, p\text{-value} > 0.05$; $(\mathbf{M_o3}) : N_r = 30, V = 164, p\text{-value} > 0.05$). Cette absence d'écart

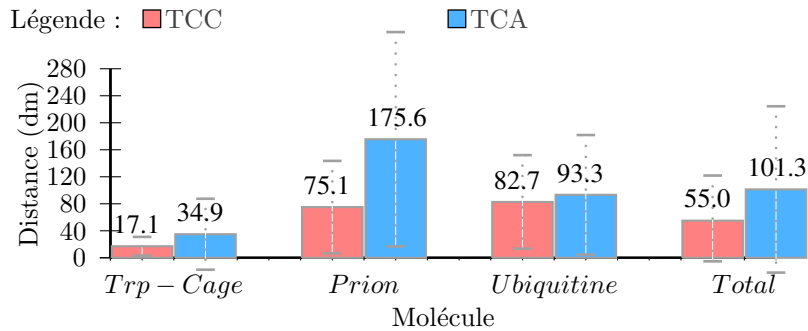


FIGURE 2.18: Distance de manipulation (M_{o2}) en fonction de la stratégie de travail et de la molécule.

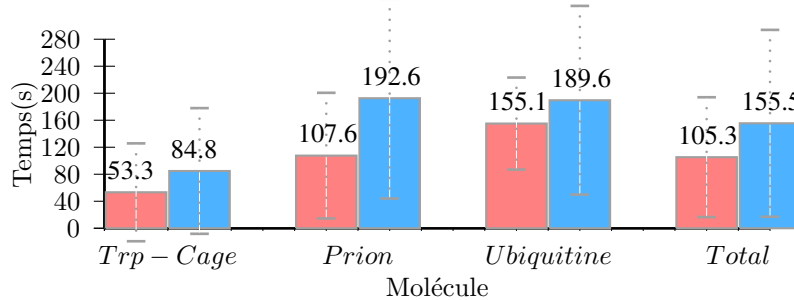


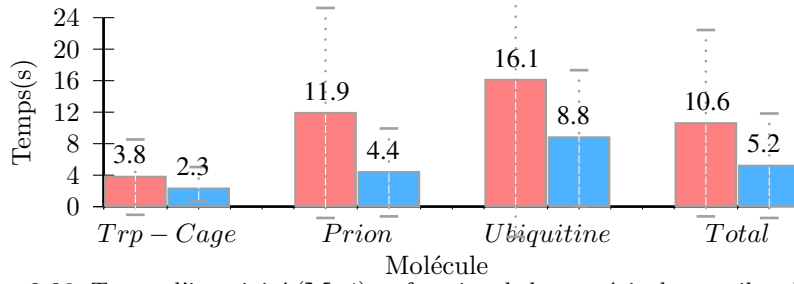
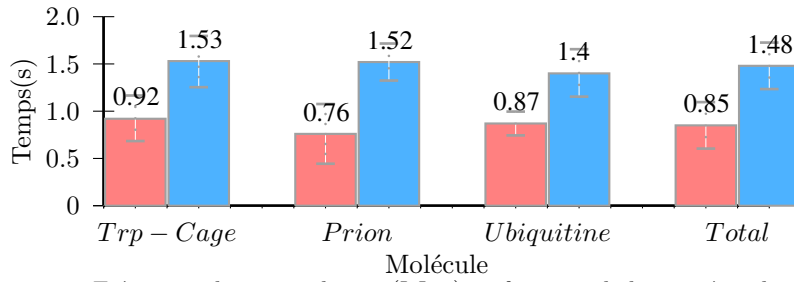
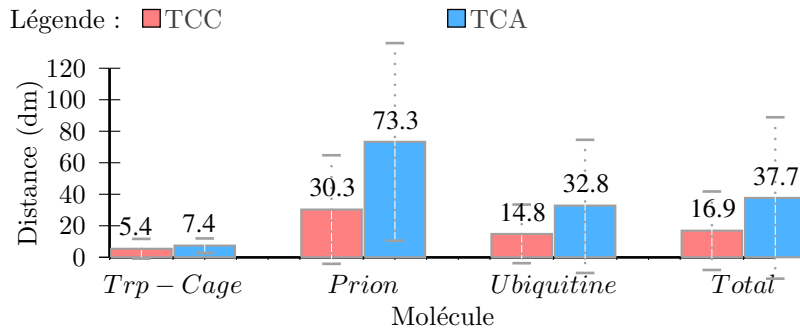
FIGURE 2.19: Temps de manipulation (M_{o3}) en fonction de la stratégie de travail et de la molécule.

significatif malgré des moyennes très éloignées témoigne de la grande variabilité de comportement des groupes. Les écart-types affichés sur les figures 2.18 et 2.19 mettent en évidence de cette forte variabilité de résultat entre les groupes.

Le score de la question M_s1 sur l'efficacité de travail (voir Figure 2.17) est très proche de la valeur neutre (3) ce qui indique que les utilisateurs n'ont pas de conditions préférées en matière d'efficacité.

Les figures 2.20 et 2.21 présentent l'intensité de l'activité des utilisateurs. Elles montrent le temps d'inactivité cumulés par les utilisateurs (M_{o4}) et la fréquence à laquelle les utilisateurs apportent des modifications à la structure moléculaire (M_{o5}). Le temps d'inactivité globale (M_{o4}) est clairement supérieur dans la condition TCC ($N_r = 30$, $V = 113$, $p\text{-value} < 0.05$). La mesure M_{o5} montre elle aussi une différence globale très significative ($N_r = 30$, $V = 6$, $p\text{-value} < 0.05$) entre TCA et TCC. Ces deux mesures indiquent que l'activité des utilisateurs est bien moindre lorsque un coordinateur désigne les objectifs de chacun. L'augmentation du temps d'inactivité (M_{o4}) et la réduction de la fréquence de sélection (M_{o5}) montrent bien que l'activité des participants est réduite par le TCC. Cette inactivité représente un potentiel de travail non exploité pour la condition TCC.

Les quantités de manipulation sont donc comparables d'une condition à l'autre mais on peut voir que les utilisateurs sont bien plus actifs avec le TCA. Pourtant, le temps d'exécution n'est pas impacté négativement par cette réduction d'activité. L'hypothèse **H2** est donc validée, la condition en TCC est plus efficace que le TCA.


 FIGURE 2.20: Temps d'inactivité (M_o4) en fonction de la stratégie de travail et de la molécule.

 FIGURE 2.21: Fréquence de manipulation (M_o5) en fonction de la stratégie de travail et de la molécule.

 FIGURE 2.22: Différence de Distance de manipulation (M_o2) entre l'utilisateur le plus actif et le moins actif en fonction de la stratégie de travail et de la molécule.

2.4.4.3 Répartition du travail

Les figures 2.22 et 2.23 présentent les différences de travail de manipulation (mesures : M_o2 et M_o3) entre les utilisateurs les plus actifs et les utilisateur les plus passifs. Les résultats globaux montrent que le TCA engendre en moyenne une plus grande différence de manipulation entre les utilisateurs. La distance de manipulation globale est réduite significativement de 55% entre les deux conditions ($N_r = 30, W = 125, p\text{-value} < 0.05$). La différence de temps de manipulation diffère de 24% sans être significative ($N_r = 30, W = 175, p\text{-value} > 0.05$).

La mesure subjective M_s2 (voir Figure 2.17) montre que le TCA est considéré comme légèrement plus conflictuel que le TCC, toutefois les avis divergent.

L'hypothèse **H3** est donc validée : le TCC permet de distribuer le travail de manipulation de manière plus équilibrée entre les utilisateurs.

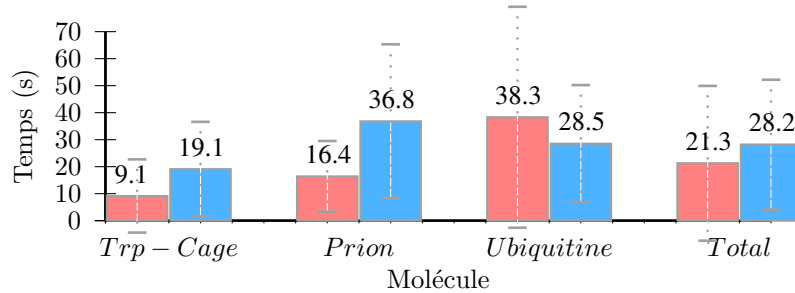


FIGURE 2.23: Différence de Temps de manipulation (M_o3) entre l'utilisateur le plus actif et le moins actif en fonction de la stratégie de travail et de la molécule.

2.4.5 Discussion

Cette expérience révèle que la stratégie de travail coordonné n'apporte pas d'amélioration en matière de temps d'exécution. Toutefois, le TCC présente des performances de travail équivalente au TCA et ce malgré le nombre d'opérateurs réduit et l'absence de communication verbale. Ce résultat montre bien que le coordinateur a réussi à coordonner avec succès le travail des opérateurs uniquement via l'outil de désignation proposé.

Les quantités de manipulation sont également équivalentes entre les deux conditions. Par contre, le travail de manipulation est distribué de manière plus équilibrée entre les partenaires quand le travail est coordonné. Si l'écart d'investissement au sein d'un même groupe est réduit, on remarque qu'à l'inverse, les utilisateurs sont globalement moins actifs lorsque le travail est coordonné. Ce résultat suggère que la paresse sociale serait plus importante dans le cadre du TCC. Toutefois, il est possible que la procédure de coordination soit responsable de ce résultat. Les phases d'inactivité s'expliquent par l'attente des utilisateurs, les opérateurs attendent que le coordinateur leur désigne une cible et l'opérateur attend que les opérateurs aient fini leur déformation. La déformation moins fréquente de la molécule par les opérateurs suggère que les choix de cible sont mieux réfléchis lorsque le travail est coordonné. L'ensemble de ces résultats montrent que l'outil de désignation est à même de supporter l'ensemble de la coordination au sein d'un groupe sans que les performances ne s'en trouvent réduites.

2.5 Conclusion et perspectives

L'approche de désignation proposée combine : un système de pointage simplifié, une notification multimodale des désignations et une assistance haptique pour la sélection de cible désigné. La première expérience a permis de révéler l'intérêt de la modalité haptique pour aider les utilisateurs à atteindre les cibles qui leur sont désignées et à être plus réactifs aux instructions de leurs partenaires. La deuxième expérience montre que l'outil de désignation permet de supporter la coordination des sélections, et qu'il contribue à la bonne répartition du travail au sein d'un groupe.

De nombreuses améliorations peuvent être encore apportées comme la possibilité d'accepter ou de refuser une cible assignée. Si un utilisateur considère que sa sélection actuelle est plus importante que celle qu'on lui a proposée, il peut être judicieux de décliner l'assignation proposée. Cette fonction a été mise en place avec succès par [Simard et Ammi \(2012b\)](#). Une assistance haptique au pointage spécialement conçu pour être utilisée avec la méthode de désignation par

image-plan, pourrait également apporter une aide utile pour l'action de désignation. Un guidage haptique pour rejoindre la sélection d'un de ses partenaires tel que l'a proposé [Oakley et al. \(2001\)](#) serait utile pour apporter une aide spontanée à un utilisateur rencontrant une difficulté. Enfin l'utilisation de la modalité audio pourrait également rendre la notification de cible plus efficace.

La désignation de cible constitue une première étape dans un processus de manipulation collaboratif. Une fois que les cibles de chacun ont été définies et qu'elles sont à portée de sélection, il convient de déterminer avec quel mode les sélectionner. Dans de nombreux domaines, il existe plusieurs manières différentes de sélectionner, chaque mode de sélection va produire un ensemble de sélection et engendrer une manipulation différente. La délibération collaborative du choix du mode de sélection est l'objet du chapitre suivant.

Paramétrage de sélection collaboratif

3.1 Introduction

Après avoir abordé la coordination de sélections, ce chapitre portera sur la tâche fondamentale de contrôle de système en collaboratif. Le contrôle de système permet aux utilisateurs de changer de mode d'interaction. Il existe des modes d'interactions pour la navigation, la sélection, la manipulation ou la modélisation. Ce chapitre s'intéressera exclusivement au mode d'interaction pour la sélection. En fonction du contexte applicatif, il existe différents modes de sélection qui correspondent à des échelles de manipulation différentes. Dans le cas de la manipulation moléculaire, il est par exemple possible de sélectionner et de manipuler un atome, un résidu, un fragment ou l'ensemble de la molécule (voir Figure 3.1). Dans le cas de la manipulation polygonale, les éléments manipulables sont les sommets, les arêtes, les faces, ou l'ensemble du maillage. Dans le cas de l'assemblage mécanique, il est possible de sélectionner pièce par pièce ou par ensemble de pièces qui peuvent être elles-mêmes constituées de sous-ensembles. En plus du mode de sélection, il est possible de contrôler la taille de sélection. Cette dernière définit l'ensemble et le nombre d'éléments sélectionnés simultanément. Il est possible de sélectionner des ensembles d'éléments selon des critères de proximité par rapport au curseur ou de connexité avec les éléments pointés. Les paramètres de mode et de taille de sélection sont au cœur de ce chapitre.

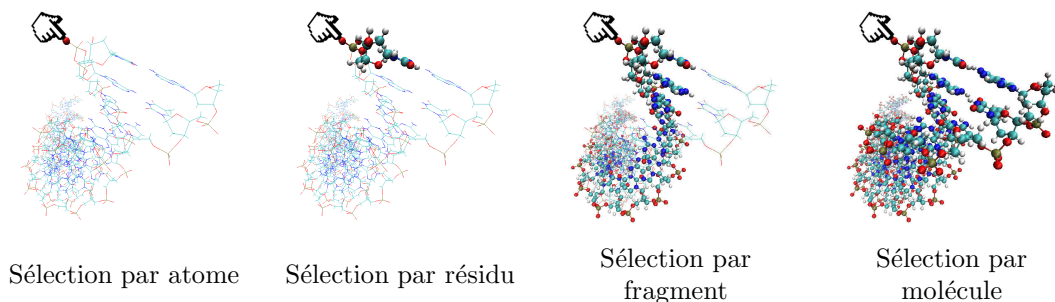


FIGURE 3.1: Échelles de sélection en manipulation moléculaire.

Si la fonctionnalité de paramétrage de sélection est très répandue dans les applications collaboratives, elle reste néanmoins une fonctionnalité individuelle (Nishino et al., 1999; Gunn, 2006). Le contrôle individuel des paramètres de sélection ne permet pas de coordonner les échelles de sélection entre les utilisateurs. Travailler à des échelles de sélection différentes présente des intérêts certains. Les utilisateurs peuvent ainsi se spécialiser sur une échelle de manipulation et éviter de devoir changer les paramètres de sélection régulièrement. Toutefois, cette spécialisation présente des risques de conflits de sélection lorsque les différences d'échelles sont très importantes. L'utilisateur qui réalise une sélection très étendue peut englober la sélection de son partenaire sans s'en rendre compte. Cette situation peut conduire à des résultats de manipulations indésirables. Le paramétrage individuelle des échelles de sélection présente des risques de conflit d'interaction lorsque deux utilisateurs tentent d'agir simultanément sur un même espace de travail.

Le paramétrage individuelle permet aux utilisateurs de travailler de manière indépendante et séparée. Les utilisateurs peuvent ainsi travailler sur des objets différents sans prêter attention au travail de leurs partenaires. Le travail devient alors coopératif et non plus collaboratif. Or, Gunn (2006) a montré, dans le cadre de la sculpture virtuelle collaborative, que les utilisateurs ressentent une augmentation de leurs créativité grâce à l'observation des actions de leurs partenaires. Ce phénomène s'apparente à une forme de facilitation sociale. Dans le cas d'un travail coopératif sans aucun retour sur l'activité de son partenaire ce phénomène disparaît. La CSP est également réduite quand les utilisateurs travaillent de manière coopérative. Or, maintenir une bonne CSP entre utilisateurs est un élément important pour permettre une bonne performance et efficacité de travail. De plus et comme souligné par Piezon et Donaldson (2005), l'absence de retour sur l'activité des partenaires est source de paresse sociale.

L'objectif de ce chapitre est de proposer une méthode collaboratives de paramétrage de sélection qui maintient un travail collaboratif fortement couplé entre les utilisateurs afin d'augmenter la Conscience Situationnelle Partagée (CSP), de coordonner les échelles de sélection, de limiter la paresse sociale et ainsi d'améliorer la performance et l'efficacité du travail.

3.1.1 État de l'art

Plusieurs travaux ont proposé différents moyens pour maintenir une bonne CSP dans les EVC. Comme présenté dans le chapitre 1, la CSP est le degré de similarité entre les CS des utilisateurs (Bolstad et al., 2005). La Conscience Situationnelle (CS) est la capacité d'un utilisateur à percevoir les éléments, à comprendre leurs significations, et à projeter leurs statuts dans un futur proche.

Gutwin et Greenberg (1999) ont proposé un système de vue radar pour que les utilisateurs puissent connaître en permanence la position et le champ de vision de leurs partenaires. Gutwin et Greenberg ont évalué ce système dans le cadre d'une tâche de construction de réseaux de tuyauterie en 2D. La présence du système radar a permis aux utilisateurs d'effectuer la tâche plus rapidement et de réduire la communication verbale.

Nova et al. (2006), Pinho et al. (2008) et García et al. (2008) ont proposé des outils visuels pour supporter la coordination et la CSP dans les EVC 3D. L'outil d'affichage proposé par Nova et al. est appelé "*awareness tool*". Il a pour objectif de transmettre des informations sur la position et

le point de vue du partenaire. L'outil proposé est évalué dans le cadre d'un jeu collaboratif (voir Section 1.2.3.2 pour plus de détail). Les résultats montrent que la présence de l'outil augmente les performances (score de jeu) des utilisateurs.

[Pinho et al. \(2008\)](#) se placent dans un contexte de manipulation collaborative d'objet avec 6 DdL. Ils proposent une méthode de manipulation collaborative basée sur la séparation du contrôle des différents DdL entre les utilisateurs. Différents indicateurs visuels sont également employés pour indiquer aux utilisateurs qu'elles sont les DdL contrôlées par chacun. La représentation d'un avatar virtuel permet d'indiquer la position et l'orientation du regard des utilisateurs. Cette méthode de manipulation est comparée à une méthode de manipulation individuelle. L'expérience de [Pinho et al.](#) montre que la manipulation collaborative permet aux utilisateurs d'être plus rapides pour manipuler et positionner des objets dans l'espace.

[García et al. \(2008\)](#) se placent également dans un contexte de manipulation collaborative d'objets avec 6 DdL. [García et al.](#) cherchent à assister les utilisateurs lorsqu'ils manipulent conjointement un même objet. Ils proposent deux types d'indicateurs visuels : une flèche 3D pour communiquer le mouvement du partenaire et un point d'exclamation pour prévenir d'un risque de rupture de sélection quand les sens de déplacements divergent. Les indicateurs visuels proposés sont évalués dans une expérience de construction de cabane en bois. Les résultats montrent que la présence des indicateurs permet de réduire le nombre de rupture de sélection.

Les études précédentes utilisent exclusivement la modalité visuelle pour augmenter la CSP. La problématique abordée par [Ullah](#) est similaire à celle de [García et al.](#), seule la modalité exploitée change. [Ullah \(2011\)](#) a proposé plusieurs outils haptiques pour améliorer la coordination durant les tâches de manipulation collaborative avec 3 DdL. Ces outils haptiques assistent les utilisateurs en les aidant à rester en contact avec l'objet collaborativement manipulé. Les résultats de l'expérience montrent que les outils haptiques améliorent les performances (temps d'exécution et erreur de manipulation) des utilisateurs.

L'ensemble des travaux précédents ont mesuré les performances des utilisateurs pour évaluer de manière implicite l'efficacité de leurs outils collaboratifs sur la CSP. Seuls deux des études présentées ont réalisé des mesures explicites de la CSP. [Ullah](#) a mesuré la CSP de manière subjective. Via l'utilisation de questionnaire, [Ullah](#) montre que les utilisateurs perçoivent mieux les actions et les intentions de leurs partenaires grâce à son outil collaboratif. Toutefois, il existe des techniques d'évaluation de la CSP plus précise que les mesures subjectives. La méthode SAGAT ([Bolstad et al., 2005](#)) permet de faire des mesures objectives et explicites de CS et de CSP. Cette technique a été utilisée par [Nova et al.](#) Les résultats de [Nova et al.](#) n'ont pas montré d'amélioration de la CSP mais l'outil mis en place a tout de même permis d'améliorer les performances du binôme.

En effet, l'ajout d'informations visuelles supplémentaires sur son partenaire ne constitue pas une garantie d'amélioration de la CSP. [Endsley \(2000\)](#) met en garde sur le fait qu'il ne faut pas confondre : fournir plus de données et fournir plus d'informations. Un tri dans les données transmises aux utilisateurs doit être opéré sinon l'utilisateur se retrouve noyé dans une masse de données. Faire le tri entre données et informations est une opération complexe, elle varie en fonction de la situation et des objectifs des utilisateurs. Les conclusions des travaux de [Endsley \(2000\)](#) et [Nova et al. \(2006\)](#) nous conduisent donc à proposer une approche qui augmente l'attention de l'utilisateur sur son partenaire sans augmenter la quantité d'information transmise

aux utilisateurs. C'est pourquoi il a été choisi de développer une méthode de paramétrage de sélection collaborative qui engage simultanément les deux partenaires dans le processus de paramétrage de sélection. L'objectif étant d'encourager les utilisateurs à travailler ensemble et à être attentifs aux actions de leurs partenaires pour augmenter la CSP. De plus et comme suggéré par [Piezon et Donaldson \(2005\)](#) et par l'expérience de [Pinho et al. \(2008\)](#), l'interdépendance des utilisateurs devrait permettre de limiter les effets de la paresse sociale. L'idée proposée est donc un système de paramétrage de sélection qui encourage la collaboration en imposant une même échelle de sélection aux utilisateurs. Pour paramétrer cette échelle commune de sélection, un critère de distance relative entre les utilisateurs est proposé. Cette méthode de paramétrage collaboratif de sélection se devra d'être rapide et simple pour ne pas nuire aux performances des utilisateurs. Via l'amélioration de la CSP et la réduction de la paresse sociale une augmentation de l'efficacité est attendue.

3.1.2 Contexte : Manipulation polygonale

Le paramétrage de sélection est une tâche qui demande plus de réflexion que les tâches de sélection ou de désignation de cible. Pour régler les paramètres de sélection de manière efficace, il est important d'être capable de se projeter dans le futur. Visualiser les étapes successives de sélection qui vont conduire aux résultats escomptés permet aux utilisateurs de déterminer quels paramètres de sélection employer. Afin d'étudier la méthode de paramétrage proposée sans complexifier davantage la tâche des utilisateurs avec des environnements complexes, un contexte de manipulation polygonale est proposé. La manipulation polygonale offre une grande diversité de mode de sélection. Elle permet aussi de créer des objectifs de manipulation suffisamment simple pour que les utilisateurs puissent se concentrer sur la tâche de paramétrage de sélection.

La manipulation polygonale est souvent associée à la modélisation polygonale. La modélisation permet de construire la structure du maillage polygonal. La manipulation des éléments constituant le maillage permet de déformer cette structure. Comme indiqué précédemment, il existe différents modes de sélection qui permettent différentes échelles de manipulation. Dans les applications standards de modélisation polygonale comme [3ds Max \(2014\)](#) ou [Blender \(2014\)](#), les méthodes pour changer de mode de manipulation exploitent des interfaces graphiques et des raccourcis claviers. Pour paramétrer la taille de sélection et sélectionner un ensemble d'éléments simultanément, il existe des modes dit de "sélection adoucie" ([3ds Max, 2014](#)) ou d'"édition proportionnelle" ([Blender, 2014](#)). Ces fonctionnalités permettent de manipuler des ensembles d'éléments avec une influence de manipulation variable en fonction de la distance euclidienne ou de la distance connexe. Il est possible de paramétrer la zone d'influence selon différents profils (linéaire, constant, gaussien, parabolique). Dans [3ds Max \(2014\)](#) la distance d'influence se règle via des champs de sélection numérique ou "*spinbox*", dans [Blender \(2014\)](#) elle se règle via la molette de la souris. Ces méthodes de paramétrage sont prévues pour une utilisation individuelle et elles pourraient être directement intégrées dans une application collaborative où chaque utilisateur paramètrerait sa sélection de manière autonome et indépendante de son partenaire. Un système de paramétrage de sélection basé sur une interface graphique a par exemple, été utilisé par [Gunn \(2006\)](#) dans le cadre de sculpture virtuelle collaborative.

Cette solution de paramétrage individuel est parfaitement fonctionnelle. Cependant comme expliqué dans l'introduction, cette solution présente des risques de :

- Conflit de sélection via le recouvrement involontaire des surfaces des sélections.
- Réduction de la CSP par la séparation des objectifs de chaque utilisateur (travail coopératif).
- Augmentation de la paresse sociale à cause du manque de visibilité sur l'activité des partenaires et de l'autonomie des utilisateurs.

3.2 Contributions

Afin de répondre aux problématiques précédemment soulevées, une méthode de paramétrage de sélection collaborative est proposée. Cette méthode de sélection adapte automatiquement la taille et le mode de sélection des utilisateurs en fonction de leurs positions relatives et des éléments qui les séparent. Elle force ainsi les utilisateurs à travailler constamment ensemble et donc à être attentif aux activités de leurs partenaires. Cette solution doit également contribuer à mieux répartir le travail entre les utilisateurs. Ainsi la perception de la paresse chez les partenaires est réduite et la visibilité du travail des partenaires est augmentée. Ces deux caractéristiques permettent de limiter l'apparition du phénomène de paresse sociale (Piezon et Donaldson, 2005). Des outils haptiques pour l'assistance à la sélection des éléments et pour la communication du paramétrage de sélection sont également proposés.

Les trois sections suivantes présentent :

- Le paramétrage collaboratif du mode de sélection (sélection par sommet, arête ou face).
- Le paramétrage collaboratif de la taille de sélection (sélection par ensemble de faces).
- Les outils haptiques pour l'assistance à la sélection et la communication entre utilisateurs.

3.2.1 Paramétrage collaboratif du mode de sélection

Afin de proposer un paramétrage sans interface graphique et permettant d'augmenter l'interdépendance entre les deux partenaires un critère de distance relative aux positions des deux partenaires a été utilisé. Le critère de distance n'est pas euclidien, il se base sur le nombre et la nature des éléments (sommet, arête ou face) qui séparent les curseurs des deux partenaires. Il est donc nécessaire que les deux utilisateurs soient en contact avec le maillage polygonal pour que le paramétrage collaboratif de sélection soit actif. Trois configurations caractéristiques ont été établies afin d'accéder aux trois modes de sélection existants.

- Mode sommet : Les curseurs des deux utilisateurs sont placés sur les deux extrémités d'une même arête (voir Figure 3.2(a)). Dans ce mode de sélection, chaque utilisateur contrôle la position du sommet le plus proche de son curseur et ensemble le binôme contrôle la géométrie de l'arête partagée.
- Mode arête : Les curseurs des deux utilisateurs sont placés sur deux arêtes opposées mais appartenant à une même face (voir Figure 3.2(b)). Dans ce mode de sélection, chaque utilisateur contrôle la position de l'arête la plus proche de son curseur et ensemble le binôme contrôle la forme de la face partagée.
- Mode face : Les curseurs des deux utilisateurs sont placés sur deux faces séparées par au moins une face (voir Figure 3.2(c)). Dans ce mode de sélection, chaque partenaire contrôle la position de la face la plus proche de son curseur et ensemble le binôme contrôle la forme de la face qui les sépare.

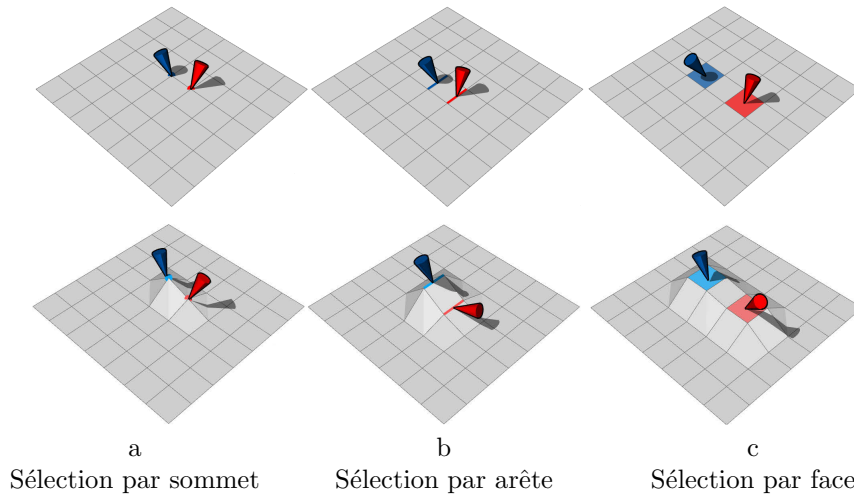


FIGURE 3.2: Modes de sélection en fonction de la configuration des participants. La première ligne montre le positionnement requis pour avoir le mode de sélection, et la deuxième ligne montre un exemple de manipulation associé au même mode de sélection.

Ces trois configurations ont été testées et validées par des participants. Elles ont été choisies de manière à être facile à mémoriser, cohérentes entre elles et à permettre une transition naturelle d'un mode de sélection vers un autre (voir Figure 3.3).

Les différents cas de transition d'un mode de sélection vers un autre sont détaillés sur la Figure 3.3. Pour passer d'un mode de sélection à un autre, l'un des utilisateurs doit initier le changement de mode et son partenaire donne ensuite son approbation. Par la suite nous appellerons donc les deux utilisateurs initiateur et approuvateur en fonction de leur rôle. L'initiateur s'éloigne de l'élément qu'il pointait jusqu'à ce qu'il pointe sur un autre élément du même type. Tous les déplacements de l'utilisateur rouge sur la Figure 3.3 illustre cette étape. Une fois le nouvelle élément pointé par l'initiateur, l'approuvateur montre que, lui aussi, désire changer de mode de sélection. Pour cela, il se rapproche du nouveau type d'élément qu'il souhaite sélectionner. Les zones d'approbation de l'utilisateur bleu sur la Figure 3.3 correspondent à cette étape. Une fois, l'initiation du changement effectuée et l'approbation obtenue, le mode de sélection est changé.

Dans la classification des systèmes de contrôle définie par [Bowman et al. \(2005\)](#), la méthode proposée s'apparente à un système de commande gestuelle. Toutefois le système de contrôle présenté comprend une différence majeure. Contrairement aux systèmes de commande gestuelle standards, la commande gestuelle proposée est relative à la position du partenaire.

Par exemple, dans le cas où les utilisateurs souhaitent passer du mode de sélection par face vers le mode arête (voir Figure 3.3 de Face vers Arête). Tout d'abord, l'initiateur se rapproche de son partenaire jusqu'à entrer en contact avec la face qui les sépare. À partir de l'instant où la face séparant les deux utilisateurs est pointée par le curseur de l'initiateur, l'approuvateur peut donner son accord. Si l'approuvateur se trouve déjà à proximité de la face qui le sépare de l'initiateur (appelé zone d'approbation) le passage en mode arête est immédiat. Si l'approuvateur se trouve éloigné de la face qui le sépare de l'initiateur (zone de désapprobation) le mode de sélection par face est maintenu. L'approuvateur peut confirmer le changement de mode en se rapprochant de l'initiateur ou maintenir sa position pour indiquer son refus de changement de mode de sélection.

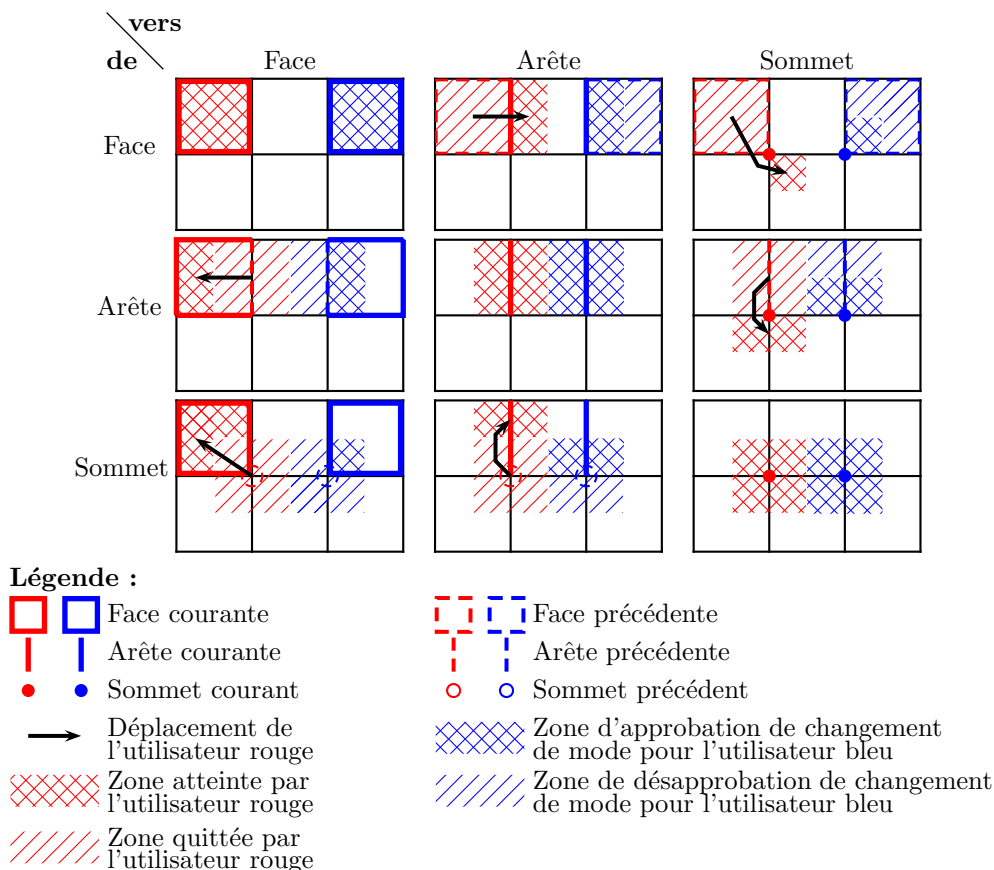


FIGURE 3.3: Critères définissant le passage d'un mode de sélection vers un autre. L'utilisateur rouge est l'initiateur du changement de mode de sélection. L'utilisateur bleu donne son approbation au changement de mode de sélection en se rapprochant du nouveau élément ciblé.

Afin d'indiquer aux utilisateurs le mode de sélection courant, un système de mise en surbrillance est proposé. En fonction du mode de sélection actif, cet indicateur visuel met en surbrillance les éléments pouvant être sélectionnés par les utilisateurs (voir Figure 3.2). Ce système indique également lorsqu'un utilisateur valide sa sélection pour pouvoir ensuite la manipuler via un changement de saturation couleur (voir Figure 3.2). En complément avec l'indicateur visuel présenté, un indicateur haptique du mode de sélection est également proposé dans la Section 3.2.3.2.

3.2.2 Paramétrage collaboratif de la taille de sélection

En complémentarité avec la fonction précédente, une méthode de paramétrage de la taille de la sélection est proposée. La taille de la sélection définit le nombre d'éléments sélectionnables simultanément par un même utilisateur. Afin d'étendre de manière logique la fonction de paramétrage du mode de sélection, cette fonctionnalité est limitée à la sélection d'ensemble de faces. Le critère déterminant la taille de sélection est le nombre de faces séparant les curseurs des deux utilisateurs (voir Figure 3.4). En se rapprochant ou en s'éloignant de leurs partenaires, les utilisateurs contrôlent la taille de leurs sélections. Comme pour le paramétrage de mode de sélection, cette fonctionnalité nécessite que les deux utilisateurs soient en contact avec le maillage polygone.

Le calcul de la taille de sélection est basé sur un système de propagation instantané et transparent pour les utilisateurs. La sélection d'un utilisateur se propage depuis la face en contact

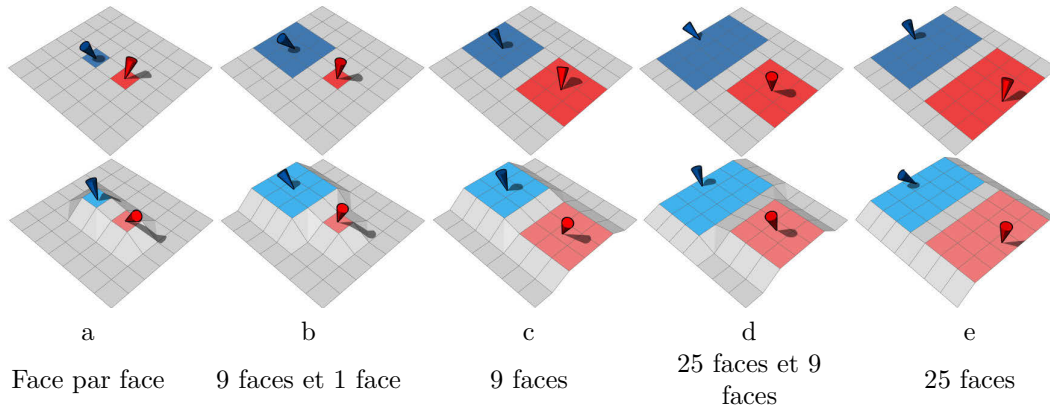


FIGURE 3.4: Tailles des sélections en fonction du nombre de faces séparant les curseurs. La première ligne montre la distance requise pour avoir le taille de sélection indiquée, et la deuxième ligne montre un exemple de manipulation avec cette même taille de sélection. Il est à noter que la taille de sélection 25 faces ne fait que 15 faces sur l'illustration car la taille de la sélection étant limitée par la taille du maillage.

avec son curseur vers toutes les autres faces connexes. La propagation de la sélection s'arrête avant d'atteindre la zone de propagation du partenaire. Ainsi, les zones de sélection sont toujours séparées par une face d'écart afin d'éviter tout recouvrement de sélection entre les deux partenaires. Selon ces critères, la taille de sélection des deux utilisateurs est identique ou diffère au maximum d'un seul niveau de taille. Les Sous-figures 3.4.b et 3.4.d sont deux exemples de niveaux de taille différents. Dans ces exemples, l'utilisateur bleu bénéficie d'un niveaux de propagation supplémentaire sur l'utilisateur rouge. L'utilisateur bénéficiant d'une taille de sélection plus grande est toujours le même.

Sur une surface plane avec une distribution uniforme de face rectangulaire, le nombre de faces sélectionnables est défini par les relations suivantes :

- $F_1 = (N + 1 - N(\text{mod } 2))^2$
- $F_2 = (N - 1 + N(\text{mod } 2))^2$

Où N est le nombre de faces séparant les utilisateurs et F_i est le nombre de faces sélectionnables par l'utilisateur i . L'opérateur modulo de a par b est écrit $a(\text{mod } b)$. Si le nombre de faces séparant les deux curseurs est impair alors la taille de sélection est la même pour les deux utilisateurs. Si le nombre de faces est pair les tailles de sélection diffèrent d'un niveau.

Afin d'éviter tout changement dans le paramétrage de la sélection (mode et taille de sélection) durant la phase de manipulation, les utilisateurs sont bloqués sur leur sélection courante à partir du moment où l'un d'entre eux a validé sa sélection et commence à la manipuler. L'utilisateur qui n'a pas validé sa sélection a deux possibilités. Soit il valide sa propre sélection et la manipule en parallèle à la manipulation de son partenaire. Cette possibilité est présentée dans les Figures 3.4 et 3.2. Soit il attend que son partenaire ait fini de manipuler pour changer sa sélection.

3.2.3 Outils haptiques

Afin de faciliter le paramétrage collaboratif des sélections, quatre outils haptiques sont proposés aux utilisateurs. Ces outils assistent les utilisateurs en leur indiquant les éléments sélectionnables et ceux qui ne le sont pas. Ces outils sont également utilisés pour simplifier la communication

$$\vec{F} = k \cdot \left(\overrightarrow{(p - p')} \cdot e^{-4\left(\frac{h}{H}\right)^2} \right) \quad (3.1)$$

Avec :

- \vec{F} : vecteur de force en Newton.
- k : constante en kg/s^2 .
- p : position du curseur.
- p' : projection du point p sur la face f selon le vecteur normal \vec{n} (voir Figure 3.5.a).
- H : hauteur limite. Au delà de cette limite l'utilisateur n'est plus attiré sur la surface du maillage.
- h : distance entre le curseur et la face la plus proche.

entre les partenaires. Les sections suivantes présentent les caractéristiques de chacun des outils haptiques suivants :

- Assistance au maintien de contact avec la surface du maillage polygonal.
- Indication du mode de sélection actif et assistance au positionnement sur les éléments.
- Indication des éléments interdits.
- Communication de la taille de sélection.

3.2.3.1 Assistance au maintien de contact

Cet outil haptique attire les utilisateurs sur la face la plus proche de leur curseur. Il est utile pour pallier aux problèmes de perception de profondeur. Il facilite les déplacements d'un élément à un autre sans perdre le contact avec la surface du maillage. Ce dernier point est important car pour fonctionner, les méthodes de paramétrage proposées requièrent le contact simultané des deux partenaires avec le maillage. Le modèle de force employé est présenté dans l'équation 3.1 et la Figure 3.5.

3.2.3.2 Indication du mode de sélection

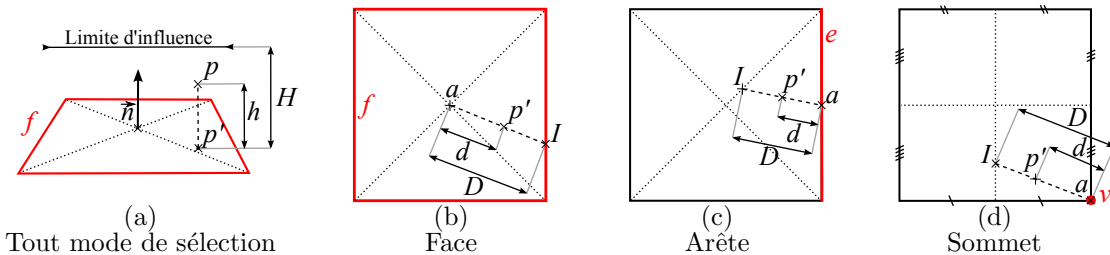
Plusieurs travaux ont déjà proposé des modèles de force destinés à faciliter la sélection en CAO (Yamada et al., 2002; Picon et al., 2008; Simard et al., 2009). Ces modèles de forces sont destinés à une utilisation individuelle, ils ne sont donc pas adaptés au mode de sélection collaboratif proposé.

Le modèle d'attraction proposé attire les utilisateurs sur le barycentre de l'élément (face arête ou sommet) le plus proche de leur curseur (voir Équation 3.2). Ainsi cette fonction haptique indique le mode de sélection courant et positionne les curseurs sur les éléments sélectionnables. Le modèle de force est conçu de telle manière que les transitions entre les différents modes de sélection soient les plus fluides possibles en termes de sensations haptiques. Pour l'initiateur du changement de mode, la différence de force d'attraction lors du passage d'un mode vers un autre est faible étant donné que la force d'attraction vers l'élément précédent est quasiment nulle et que son curseur se trouve souvent très proche du barycentre du nouvel élément sélectionnable. En revanche, pour l'utilisateur approuvateur, la différence de force lors de la transition est plus prononcée. Ce dernier se trouve souvent plus loin du barycentre du nouvel élément sélectionnable.

$$\vec{F} = k \cdot \overrightarrow{(a - p')} \cdot e^{-4\left(\frac{d}{D}\right)^2} \quad (3.2)$$

Avec :

- \vec{F} : vecteur de force en Newton.
- k : constante en kg/s^2 .
- a : point sur lequel l'utilisateur est attiré. En fonction du mode de sélection, le point a peut être le barycentre de la face f , de l'arête e , ou su sommet v (voir Figure 3.5).
- p' : projection du point p sur la face f selon le vecteur normal \vec{n} (voir Figure 3.5.a).
- I : intersection entre $\overrightarrow{ap'}$ et un second segment qui dépend du mode de sélection. Ce second segment peut être soit un des cotés de la faces (mode face), une diagonale de la face (mode arête) ou une médiane de face (voir Figure 3.5).
- d : distance entre a et p' .
- D : distance entre a et I .



Tout mode de sélection

Légende :

- \vec{n} : vecteur normal de la face f
- f : face la plus proche du point p parmi le maillage entier
- e : arête la plus proche du point p sur la face f
- v : sommet le plus proche du point p sur la face f

FIGURE 3.5: Définition des variables des équations 3.1 et 3.2 selon le mode de sélection.

$$\vec{F} = k \cdot \overrightarrow{(a - p')} \cdot e^{-4\left(2 - \frac{d}{D}\right)^2} \quad (3.3)$$

Les variables de l'Équation 3.3 sont identiques à celles définies dans l'Équation 3.2.

3.2.3.3 Indication des éléments interdits

Le paramétrage collaboratif du mode de sélection fonctionne de telle sorte que l'élément sélectionnable soit toujours le plus proche du curseur de l'utilisateur. Toutefois, certaines configurations ne permettent pas de respecter cette règle parce qu'elle mène à des recouvrements de sélection. Dans ce cas, une force de répulsion est appliquée à l'utilisateur pour l'empêcher d'atteindre la zone conflictuelle.

Trois configurations conflictuelles ont été identifiées (voir Figure 3.6) : la sélection de deux faces attenantes, la sélection d'une même arête, ou d'un même sommet. Le modèle de force de répulsion est une version modifiée du même modèle de force employée pour attirer les utilisateurs sur les éléments (voir Équation 3.3) car contrairement à l'équation 3.2 dans le cas d'une répulsion la valeur de d est supérieure à D . Cette force de répulsion apparaît lorsqu'une mésentente entre les utilisateurs survient.

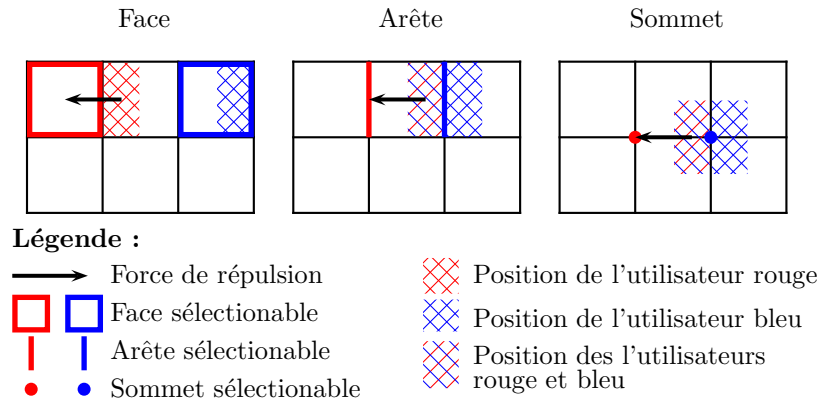


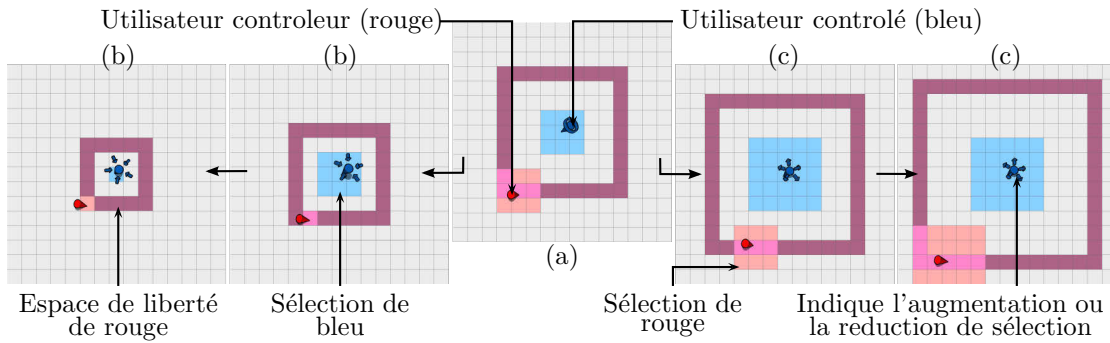
FIGURE 3.6: Positions de curseur interdites

3.2.3.4 Communication de la taille de sélection

Le paramétrage collaboratif de la taille de sélection permet aux utilisateurs de manipuler différentes échelles de sélection. Pour cela, les partenaires doivent coordonner leurs positions relatives afin d'obtenir la taille de sélection voulue. Lorsqu'un utilisateur a déterminé la sélection qu'il souhaite, il doit la communiquer à son partenaire afin que ce dernier se positionne correctement. Pour simplifier cette étape de coordination, un outil permettant de suggérer une taille de sélection à son partenaire a été proposé. Nous appellerons suggesseur l'utilisateur qui active l'outil de communication et approbateur l'utilisateur à qui une taille de sélection est suggérée. Cet outil permet au suggesseur de restreindre la liberté de mouvement de l'approbateur à un ensemble de faces précis. Cet ensemble de faces respecte la distance de séparation entre les deux utilisateurs qui permet d'obtenir la taille de sélection souhaitée. Un retour visuel (voir Figure 3.7) et un retour haptique (voir Équation 3.4 et Figure 3.8) sont employés pour indiquer l'ensemble de faces qui correspond à la distance de séparation souhaitée. La liberté de déplacements de l'approbateur est limitée à cet ensemble de faces nous appellerons espace de liberté. L'approbateur peut à tout moment valider ou refuser la taille de sélection proposée par simple pression d'un bouton.

Le suggesseur peut augmenter ou réduire le nombre de faces séparant son curseur et celui de son partenaire pour agrandir ou réduire la taille de sa sélection et celle de son partenaire (voir Figure 3.7). Pour faire varier la taille de sa sélection un contrôle gestuel est proposé. Le suggesseur presse ou tire physiquement sur la face en contact avec son curseur. Chaque pression ou traction sur cette face augmente ou réduit la taille de la sélection. Un retour haptique est employé pour créer un effet de bouton poussoir afin que l'utilisateur ressente les changements. Des indications visuelles sont également prévues pour indiquer l'augmentation et la réduction de taille (voir Figure 3.7). Dans le cas d'un maillage simple, c'est à dire une surface plane constituée de faces rectangulaires distribuées de façon homogène, les espaces de travail restreint de l'utilisateur contrôlé prennent une forme rectangulaire qui englobe la sélection de l'utilisateur contrôleur (voir Figure 3.7).

Cet outil ne permet pas de communiquer un mode de sélection. Les critères du paramétrage du mode de sélection sont différents des critères de paramétrage de la taille de sélection. Le comportement de l'outil devrait donc être modifié pour permettre la communication du mode



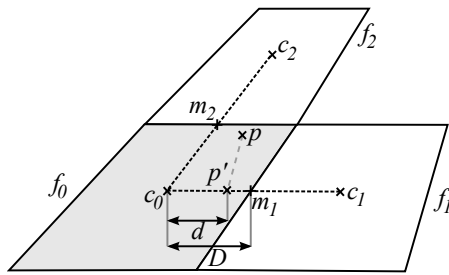
(a) Situation initiale. La taille de sélection est suggérée par l'utilisateur bleu. Les faces violettes sont les seules faces sur lesquelles l'approbateur (utilisateur rouge) peut se déplacer. L'utilisateur suggesteur ne peut pas s'éloigner de la face qu'il a sélectionnée.

(b) L'utilisateur bleu réduit sa taille de sélection en rapprochant son partenaire de sa position.

(c) L'utilisateur bleu augmente sa taille de sélection en éloignant son partenaire de sa position.

FIGURE 3.7: Communication de taille de sélection.

$$\vec{F} = k \cdot (\overrightarrow{c_0 - p'}) e^{-4(\frac{d}{D})^2} \quad (3.4)$$



Avec :

- \vec{F} : Vecteur de force en Newton
- k : constante en kg/s^2
- f_i : l'utilisateur peut se déplacer des faces 0 à 2 mais la face f_3 lui est interdite
- f_0 : face la plus proche du point p
- p : position du curseur
- p' : point le plus proche de p sur c_0m_i
- m_i : Milieu de l'arête entre f_0 et f_i
- c_i : Barycentre of f_i

FIGURE 3.8: Définition des variables de l'Équation 3.4 pour la limitation de l'espace de liberté.

de sélection. La communication du mode de sélection n'a pas été implémentée suite aux retours défavorables des utilisateurs (voir Section 3.3.4.5 pour plus de détail).

3.3 Expérience 3 : Paramétrage de la taille de sélection

Afin d'évaluer les différentes composantes du paramétrage collaboratif de sélection proposés, deux expériences distinctes ont été menées. L'objectif de la première expérience est d'évaluer l'efficacité du paramétrage collaboratif de la taille sélection seule. L'objectif de la deuxième expérience est d'évaluer l'efficacité du paramétrage collaboratif du mode et de la taille sélection. Ces deux expériences étudient l'impact du paramétrage collaboratif de sélection sur : la performance, l'efficacité, la répartition de la charge de travail et la CSP.

3.3.1 Hypothèses et conditions

Le Paramétrage Collaboratif de Sélection (PCS) à pour objectifs directs d'augmenter la CSP, d'équilibrer les efforts entre les utilisateurs et de coordonner le travail collaboratif. Via ces

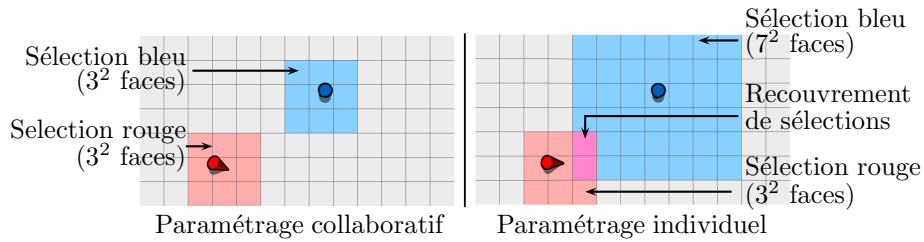


FIGURE 3.9: Différence entre la condition PCS et la condition PIS. La situation obtenue dans la condition PCS (image de gauche) est également réalisable avec la condition PIS, il suffit que l'utilisateur bleu règle sa sélection en 3^2 faces. La situation montrée dans la condition PIS (image de droite) n'est pas reproductible avec la condition PCS.

améliorations, une augmentation de l'efficacité du travail et une réduction la paresse sociale sont escomptés. Les hypothèses posées sont donc les suivantes :

- **H1** Le PCS améliore l'efficacité du travail.
- **H2** Le PCS équilibre la distribution du travail entre les utilisateurs.
- **H3** Le PCS augmente la CSP.
- **H4** Le PCS équilibre CS et CSP.

voir Section B.3.1 pour plus de détail.

Le PCS est comparé à une méthode individuelle de paramétrage de taille de sélection. Les deux conditions présentées aux participants sont les suivantes :

- **Paramétrage Collaboratif de Sélection (PCS)** En plus du paramétrage collaboratif de la taille sélection, les utilisateurs disposent des outils haptiques suivants : assistance au maintien de contact, communication de la taille de sélection. et indication du mode de sélection (outil partiel). Étant donné que le seul mode de sélection disponible dans cette expérience est la sélection par face, l'outil d'indication du mode de sélection se limite à l'attraction sur le barycentre des faces. L'utilisation de l'outil de communication est imposé avant chaque validation de sélection afin que les deux utilisateurs donnent leur accord avant de s'engager dans une manipulation.
- **Paramétrage Individuel de Sélection (PIS)** Cette condition utilise un système individuel de réglage de sélection tel qu'on peut en trouver dans les logiciels d'édition polygonale. La tâche de manipulation reste collaborative, seul le paramétrage de sélection est individuel. Les utilisateurs disposent des outils haptiques suivants : assistance au maintien de contact et indication du mode de sélection (outil partiel comme dans la condition PCS. L'outil de communication de la taille de sélection n'est pas fournit aux participant étant donnée que le paramétrage individuel de la taille ne nécessite pas de communication avec le partenaire. Cependant afin de minimiser les différences d'interactions et d'utiliser le même matériel dans les deux conditions (bras haptique uniquement), le même contrôle gestuelle utilisé par l'outil de communication de taille de sélection est employé pour augmenter ou réduire la taille de sélection. Les utilisateurs appliquent une pression ou une traction sur la face en contact avec leur curseur pour augmenter ou réduire la taille de leur sélection.* À la différence du PCS, la condition PIS ne contraint pas l'espace de travail du partenaire et autorise le recouvrement de sélections (voir Figure 3.9).

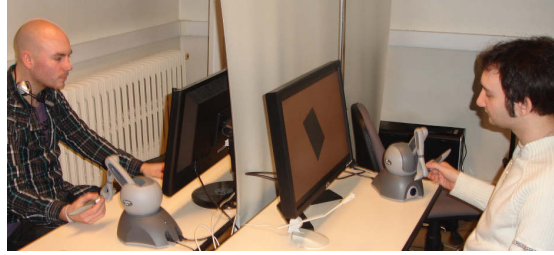


FIGURE 3.10: Dispositif expérimental

3.3.2 Dispositif

La plateforme expérimentale est composée de deux bras haptiques Touch de chez Geomagic et de deux écrans 23 pouces tous connectés à un ordinateur. Les utilisateurs sont séparés par un rideau et ils disposent chacun d'un bras haptique et d'un écran (voir Figure 3.10). Les utilisateurs sont libres de communiquer verbalement, seul le contact visuel est empêché par le rideau.

3.3.3 Protocoles

L'objectif de manipulation de cette expérience est de déformer une surface plane pour lui conférer une forme simple prédéfinie à l'avance. Trois exercices de manipulation sont présentés aux participants. Ils demandent de former : une pyramide, un escalier et un canyon (voir Figure 3.11). La déformation attendue est indiquée aux utilisateurs via un maillage filaire vert. Chaque exercice demande une succession de 5 à 6 paires de déformations pour obtenir la forme demandée. Deux ensembles de faces sont affichés en vert pour indiquer quelles sont les deux sélections qui doivent être réalisées. Seul un utilisateur peut voir ses indications de sélection, il doit ensuite les communiquer à son partenaire. Cette asymétrie dans la distribution des informations est importante pour créer un déséquilibre de connaissance entre les utilisateurs et ainsi encourager la communication entre partenaires. Les indications de déformations (les faces vertes) sont présentées par paire pour encourager le travail parallèle. Afin de simplifier le travail de déformation, un seul degré de liberté de manipulation est contrôlable. Les faces sélectionnées ne peuvent être déplacées que selon l'axe normal à la face en contact avec le curseur.

Avant de commencer les trois exercices proposés, les participants suivent un tutoriel qui leur présente le fonctionnement des outils de paramétrage de sélection. Ce tutoriel est effectué dans les deux conditions PCS et PIS. Les binômes de participants passent tous les deux conditions. L'ordre des conditions ainsi que l'ordre des exercices de déformation sont changés après chaque groupe afin de contrebalancer l'effet d'apprentissage.

3.3.3.1 Mesures objectives

Les mesures suivantes concernent la performance et l'efficacité.

- M_{o1} Score (%).
- M_{o2} Temps d'exécution (s).
- M_{o3} Distance parcourue (dm).
- M_{o4} Distance de déformation (dm).

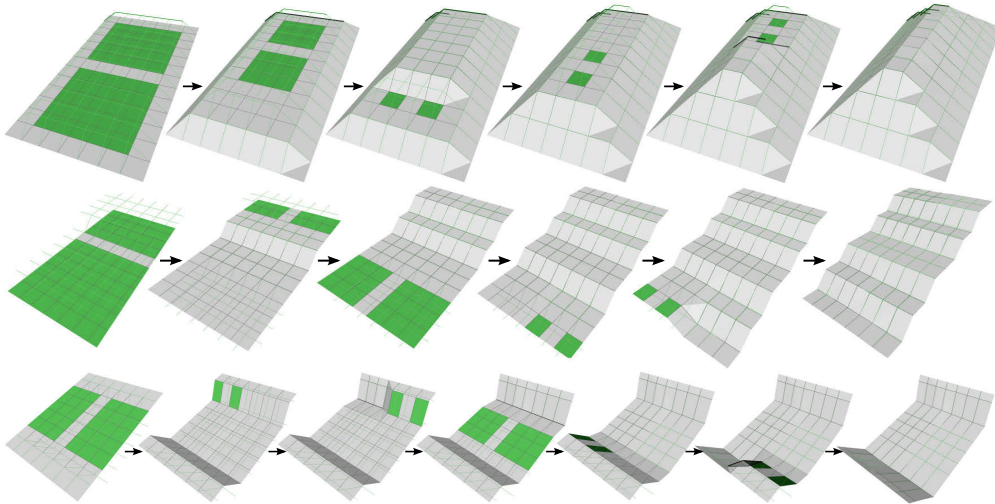


FIGURE 3.11: Exercice de déformation avec guide à la sélection. Les maillages initiaux (un plan) sont situés à gauche. Les deux ensembles de faces vertes indiquent les faces que les utilisateurs doivent sélectionner puis manipuler. La grille verte au dessus du maillage indique la forme à atteindre. Les maillages finaux (situés à droite) sont obtenus après 5 à 6 paires de déformations séquentielles correctement effectuées.

- **M_o5** Changement de sélection (nombre).

Les mesures suivantes concernent la distribution du travail au sein du binôme.

- **M_o6** Différence de distance parcourue(dm).
- **M_o7** Différence de déformation effectué(dm).

Les mesures de performance d'efficacité et de distribution du travail sont expliquées plus en détail à la Section B.3.3.

La dernière série de mesures concerne la CSP. Ces mesures s'intéressent à la capacité des utilisateurs à projeter leurs situations et celles de leurs partenaires dans un futur proche. Pendant chaque exercice de déformation, à un moment choisi au hasard, la manipulation du maillage est bloquée. Le curseur et la sélection du partenaire sont enlevés de l'affichage puis les questions suivantes sont posées aux utilisateurs.

- **M_c1** Sélection suivante : Quelle va être votre prochaine sélection ?
- **M_c2** Sélection suivante du partenaire : Quelle va être la prochaine sélection de votre partenaire ?

Le détail du protocole de mesure de la CSP est présenté à la Section B.3.3.1.

3.3.3.2 Mesures subjectives

Un questionnaire composé de 6 affirmations est présenté à chaque participant après chaque condition. Les participants indiquent s'il sont en désaccord (1) ou en accord (5) avec l'affirmation proposée. Les affirmations portent sur les points suivants :

- **M_s1** Utilité du tutoriel : J'aurai pu me passer du tutoriel.
- **M_s2** Déformation équitable : J'ai effectué autant de déformations que mon partenaire.
- **M_s3** Travail équitable : Le travail a été équitablement distribué entre moi et mon partenaire.
- **M_s4** Compréhension du partenaire : Je comprenais facilement ce que mon partenaire faisait.

| | M_o1 (%) Score | M_o2 (s) Temps exécution | M_o3 (dm) Distance parcourue | M_o4 (dm) Distance déformation | M_o5 (Nb) Changement sélection |
|----------------|------------------------------------|---|---|---|---|
| PIS | 69.9 | 125 | 372 | 21.4 | 86.1 |
| PCS | 77.4 | 113 | 284 | 19.1 | 39.8 |
| <i>p-value</i> | $p > 0.05$ | $p > 0.05$ | $p < 0.05$ | $p > 0.05$ | $p < 0.05$ |
| N_r | 21 | 28 | 36 | 36 | 36 |
| V | 146 | 121 | 131 | 304 | 17 |

TABLEAU 3.1: Performance et efficacité (**M_o1-M_o5**) en fonction de la méthode de sélection.

| | M_s1 Tutoriel | M_s2 Déformation équitable | M_s3 Travail équitable | M_s4 Compré. partenaire | M_s5 Compré. attente | M_s6 Parole |
|----------------|-----------------------------------|---|---|--|---|---------------------------------|
| PIS | 2.16 | 3.83 | 4.04 | 4.45 | 4.17 | 4.21 |
| PCS | 1.75 | 4.45 | 4.46 | 4.25 | 4.25 | 4.29 |
| <i>p-value</i> | $p < 0.05$ | $p < 0.05$ | $p > 0.05$ | $p > 0.05$ | $p > 0.05$ | $p > 0.05$ |
| N_r | 10 | 14 | 12 | 11 | 13 | 16 |
| V | 7 | 10 | 16 | 18 | 39 | 61 |

TABLEAU 3.2: Mesures subjectives (**M_s1** à **M_s5**) en fonction de la méthode de sélection.

- **M_s5** Compréhension des attentes : Je comprenais facilement ce que mon partenaire attendait de moi.
- **M_s6** Parole : J'ai beaucoup parlé pour me coordonner avec mon partenaire.

3.3.4 Résultats

Les outils statistiques employés pour comparer les conditions sont identiques à ceux utilisés dans le chapitre 1. Un test de somme des rangs signés de [Wilcoxon](#) est donc appliqué pour comparer les résultats (voir Section 2.3.4 pour plus de détails).

3.3.4.1 Performance

Le tableau 3.1 présente les résultats des mesures de performance (**M_o1** et **M_o2**) et des mesures d'efforts (**M_o3**, **M_o4** et **M_o5**). La mesure de score (**M_o1**) moyenne est améliorée de 10% avec le PCS, toutefois la différence n'est pas significative. Le temps d'exécution (**M_o2**) moyen est également réduit de 10% avec le PCS. Encore une fois, aucune différence significative entre les deux conditions n'est relevée. Nous pouvons donc considérer que les performances sont équivalentes entre les deux conditions.

La mesure subjective **M_s1** sur la nécessité du tutoriel (Figure 3.2) indique que la condition PIS est plus facile à prendre en main que la condition PCS. La facilité de prise en main du PIS a sûrement accéléré la vitesse d'apprentissage ce qui a pu conférer un léger avantage à cette condition.

| | M_o6 (dm) Différence distance | M_o7 (dm) Différence déformation |
|----------------|---------------------------------------|--|
| PIS | 55.55 | 7.99 |
| PCS | 51.32 | 3.78 |
| <i>p-value</i> | $p > 0.05$ | $p < 0.05$ |
| N_r | 36 | 36 |
| V | 263 | 199 |

TABLEAU 3.3: Répartition de l'effort (M_o6 et M_o7) en fonction de la méthode de sélection.

3.3.4.2 Efficacité

La mesure M_o3 montre que le PCS nécessite significativement ($p - value < 0.05$) moins de distance parcourue que le PIS. La mesure de changement de sélection (M_o5) montre une réduction significativement ($p - value < 0.05$) en faveur du PCS. En revanche, la mesure de distance de déformation (M_o4) indique que l'effort de déformation est le même dans les deux conditions. Les performances sont donc équivalentes mais l'effort fourni est moindre avec le PCS. L'hypothèse **H1** est donc bien vérifiée, la condition PCS est plus efficace que la condition PIS.

Avec le PCS, les utilisateurs doivent être plus prudents dans leur mouvements puisque chacune de leurs actions à une conséquence sur la sélection de leurs partenaires. Chaque mouvement de curseur est soigneusement considéré par les utilisateurs ainsi la distance parcourue s'en trouve réduite et les changements de taille de sélection inutiles sont eux aussi diminués.

3.3.4.3 Distribution du travail

Le tableaux 3.3 présente les résultats des mesures de différence de distance parcourue (M_o6) et de différence de distance de déformation (M_o7). Aucune différence significative n'apparaît dans la distribution des efforts de déplacement. Ils sont aussi bien distribués avec le PCS qu'avec le PIS. Le travail de déformation est lui significativement ($p - value < 0.05$) mieux réparti entre les utilisateurs avec le PCS. Les mesures subjective M_s2 et M_s3 concernent respectivement la perception de la distribution des déformations et de la distribution du travail de manière générale. La mesure M_s2 confirme que les utilisateurs perçoivent significativement ($p - value < 0.05$) une meilleure répartition des déformations entre elles dans la condition PCS. Les utilisateurs tendent également à percevoir le travail comme mieux distribué ($p - value < 0.1$) avec le PCS.

Dans la condition PIS, les utilisateurs peuvent travailler indépendamment les uns des autres et de manière séquentielle, l'utilisateur le plus efficace peut donc être amené à réaliser plus de déformations que son partenaire. Dans la condition PCS, les utilisateurs sont fortement encouragés à travailler en parallèle, le travail de déformation est donc mieux distribué entre les utilisateurs.

L'hypothèse **H2** est donc validée, le PCS répartie mieux l'effort de déformation entre les deux utilisateurs que le PIS et les utilisateurs perçoivent ce gain d'équilibre.

| | M_{c1} Sélection suivante | M_{c2} Sélection du partenaire | p -value | N_r | V |
|------------|-----------------------------|----------------------------------|------------|-------|------|
| PIS | 0.69 | 0.44 | $p < 0.05$ | 13 | 14 |
| PCS | 0.61 | 0.55 | $p > 0.05$ | 8 | 13.5 |
| p -value | $p > 0.05$ | $p > 0.05$ | | | |
| N_r | 11 | 14 | | | |
| V | 24 | 37.5 | | | |

TABLEAU 3.4: Conscience Situationnelle Partagée (M_{c1} et M_{c2}) en fonction de la méthode de sélection.

3.3.4.4 Conscience situationnelle

Le tableaux 3.4 compare les mesures de CS (M_{c1}) et de CSP (M_{c2}) en fonction de la condition. On constate qu'il n'y pas de différence significative entre les deux conditions quelque soit la mesure étudiée. Le PCS n'améliore donc ni la CSP ni la CS. L'hypothèse **H3** est donc rejetée.

En revanche, si on compare les mesures de conscience entre elles, il apparaît que dans la condition PIS, le score de la mesure "Sélection suivante" (M_{c1}) est significativement supérieur au score de la mesure "Sélection suivante du partenaire" (M_{c2}). Cette différence ne se retrouve pas avec le PCS. Cela signifie que dans la condition PIS les utilisateurs sont plus à même de prévoir ce qu'il vont faire plutôt que de prévoir ce que leur partenaire va faire. Leur CS est meilleure que leur CSP. Alors que avec le PCS les capacités de prévision de ses propres actions ou de celles de son partenaire sont équivalentes. Leur CS et leur CSP sont donc mieux équilibrées.

L'hypothèse **H4** est validée, les capacités d'attention des utilisateurs sont mieux distribuées entre lui-même et son partenaire.

3.3.4.5 Discussion

Le paramétrage collaboratif de la taille de sélection présente de bons résultats en matière d'efficacité. Il s'avère aussi être un moyen efficace pour distribuer le travail entre les partenaires. Cependant étant donné que ni les performances, ni la somme des efforts collectif n'ont augmenté, il n'est pas possible de déterminer si la paresse sociale a été réduite. En revanche, la réduction des efforts sans perte de performance indique que la coordination des utilisateurs est améliorée par le PCS.

L'amélioration de la CSP attendue n'a pas été obtenue. Bien que la méthode utilisée pour augmenter l'attention entre partenaire soit différente de celle employée par Nova et al. (2006) le constat d'échec est le même. Toutefois, le meilleur équilibre entre CS et CSP est un résultat intéressant, puisqu'il suggère que les capacités d'attention sont limitées et qu'elles ne peuvent pas toujours être augmentées mais seulement redistribuées.

Plusieurs remarques concernant l'outil haptique de communication de la taille de sélection ont été émises. Certains utilisateurs étaient gênés d'utiliser cet outil car ils le trouvaient trop intrusif et contraignant pour leur partenaire. L'impression d'exercer une domination sur leur partenaire les dérangeait. Ils préféreraient donc se mettre d'accord oralement sur les tailles de sélection plutôt que d'avoir recours à l'outil proposé. Cet outil a donc été abandonné par la suite.

Le PCS a été évalué ici dans des exercices très dirigés et spécialement pensés pour être facilement parallélisables. La prochaine expérience va évaluer le PCS dans sa version complète et dans un contexte beaucoup plus libre pour les utilisateurs.

3.4 Expérience 4 : Paramétrage de la taille et du mode de sélection

L'objectif de cette seconde expérience est d'évaluer la méthode de paramétrage collaboratif de sélection dans son intégralité. Le paramétrage collaboratif de taille et de mode de sélection sont donc étudiés.

Dans l'expérience précédente, l'emplacement et la taille des sélections à réaliser étaient indiquées aux utilisateurs. Il est fort probable que ces indications de sélections aient été utilisées par les participants pour augmenter leurs CSP. La présence de ces indications dans les deux conditions précédemment comparées peut expliquer l'absence d'amélioration de la CSP. Afin de confirmer l'efficacité du paramétrage collaboratif et d'évaluer son influence sur la CSP, il convient de l'étudier dans un contexte où les participants ne sont pas guidés dans leurs choix de sélection.

3.4.1 Hypothèses et conditions

Le PCS a pour objectif d'augmenter l'efficacité du travail et de réduire la paresse sociale. Pour atteindre ces objectifs, le PCS cherche à : augmenter la CSP, équilibrer les efforts fournis par les utilisateurs, augmenter la communication verbale inter-utilisateurs et coordonner le travail collaboratif.

Les hypothèses posées sont donc les suivantes :

- **H1** Le PCS améliore l'efficacité du travail.
- **H2** Le PCS équilibre la répartition de travail entre les utilisateurs.
- **H3** Le PCS augmente la conscience situationnelle partagée.
- **H4** Le PCS augmente la communication verbale entre utilisateurs.

Voir le détail des hypothèses à la Section B.3.1.

Comme dans l'expérience précédente, le paramétrage collaboratif de sélection est comparé à un paramétrage individuel. Les deux conditions présentées aux participants sont les suivantes :

- **Paramétrage Collaboratif de Sélection (PCS)** Les utilisateurs disposent du paramétrage collaboratif de la taille et du mode de sélection. Les outils haptiques fournis sont : l'assistance au maintien de contact, l'indication du mode de sélection et l'indication des éléments interdits. Comme expliqué dans la discussion précédente, la communication de la taille de sélection n'a pas été conservée dans cette expérience.
- **Paramétrage Individuel de Sélection (PIS)** Les utilisateurs paramètrent leurs sélections via une interface graphique pour se rapprocher des conditions d'interaction des logiciels de modélisation 3D. Toutefois la contrainte d'utilisation exclusive du bras haptique est conservée. L'interface graphique proposée est constituée d'un menu 2D qui s'affiche autour du curseur 3D (voir Figure 3.13). Le mode de sélection est paramétré grâce aux icônes : sommet, arête, et face. La taille de sélection est paramétrée via les icônes + et - (voir Figure 3.14). La

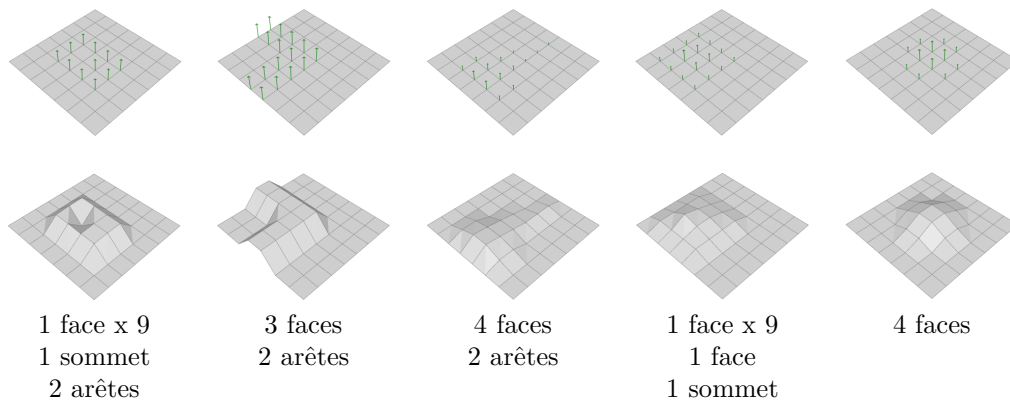


FIGURE 3.12: Exercices de déformation. La première ligne de cette figure présente l'état initial du maillage ainsi que la déformation attendue indiquée par les flèches vertes. La deuxième ligne présente le résultat final après exécution des déformations. Le nombre minimal de sélections nécessaires pour effectuer l'exercice est indiqué sur la dernière ligne.

navigation dans ce menu s'effectue par la rotation du curseur selon l'axe de symétrie du cône. Une mise en surbrillance des icônes indique quel icône est actuellement pointé et quel icône est actuellement activé. Comme dans l'expérience précédente, les utilisateurs opèrent en binôme mais sont indépendants l'un de l'autre.

Le dispositif expérimental employé est identique à celui utilisé dans l'expérience précédente (voir 3.3.2).

3.4.2 Protocole

L'objectif des participants est de déformer un plan composé de 7^2 faces afin de lui conférer une nouvelle forme prédéfinie. Afin de simplifier la tâche, le déplacement des éléments manipulés n'est possible que le long du vecteur normal au plan.

La déformation attendue est affichée via un ensemble de flèches vertes qui indiquent la position attendue de chaque sommet (voir Figure 3.12). Plus un sommet est proche de son point attendu plus la longueur de la flèche est réduite. Contrairement à l'expérience précédente, seul un objectif de déformation est indiqué aux participants. Les utilisateurs ne bénéficient d'aucune indication sur les sélections à réaliser pour obtenir la déformation requise.

Le point de vue des utilisateurs est fixe mais parfaitement adapté à la tâche. De plus, le point de vue des utilisateurs sur le maillage est différent de 90 degrés, donc même si suite à une déformation une partie du maillage est occultée pour un des utilisateurs, son partenaire conserve un point de vue dessus. Chaque condition commence par un tutoriel qui présente toutes les possibilités de sélections et finit avec un exercice d'entraînement. Ensuite, les participants disposent de 2 minutes pour effectuer chacun des cinq exercices de déformation qui leur sont présentés.

3.4.2.1 Mesures objectives

Les mesures suivantes concernent la performance et l'efficacité (voir Section B.4.3 pour plus de détail).

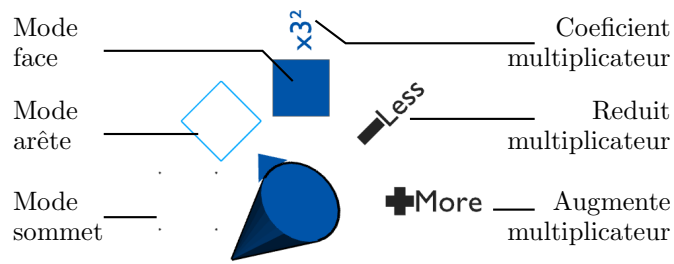


FIGURE 3.13: Interface graphique pour le paramétrage du mode et de la taille de sélection. Dans cet exemple, le mode de sélection courant est la face avec une taille de sélection de 3^2 . Le mode de sélection pointé par le curseur est l'arête, si l'utilisateur presse le bouton de sélection, le mode de sélection courant passera à arête.

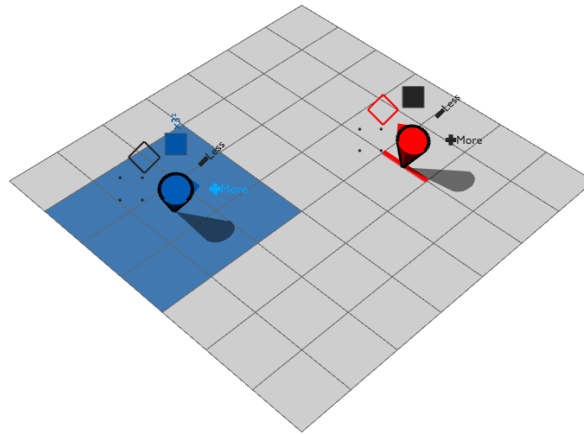


FIGURE 3.14: Interface graphique de sélection avec mise en situation. Dans cet exemple, l'utilisateur bleu a choisi la sélection par face avec une taille de 3^2 . L'utilisateur rouge utilise un mode de sélection par arête.

- M_o1 Score.
- M_o2 Temps d'exécution(s) Le temps maximum est de 120 secondes.
- M_o3 Distance parcourue(m).
- M_o4 Distance de déformation (m).
- M_o5 Nombre de déformation.

Les mesures suivantes concernent la communication verbale entre les partenaires.

- M_o7 Temps de communication verbale.
- M_o8 Nombre d'instructions verbales.
- M_o9 Nombre de déclarations verbales.

Les mesures suivantes concernent la CSP et la CS (voir Section B.4.3.1) pour plus de détail). Au cours de chaque exercice les questions suivantes sont posées aux participants :

- M_c1 Sélection du partenaire : Quelle était la dernière la sélection de votre partenaire ?
- M_c2 Sélection suivante du partenaire : Quelle sera la prochaine sélection de votre partenaire ?
- M_c3 Sélection suivante : Quelle sera votre prochaine sélection ?

Les mesures M_c3 , M_c2 et M_c1 sont notées entre 0 et 2. Un point est donné par utilisateur qui désigne l'élément qui a ou qui sera effectivement sélectionné par le partenaire.

3.4.2.2 Mesures subjectives

À la fin de l'étude, un questionnaire composé de 6 affirmations est présenté à chaque participant. Les participants indiquent si leur choix se porte plutôt pour le PIS (1) ou plutôt pour le PCS (5). Voici la liste des points abordés par le questionnaire :

- **M_s1** Facilité d'utilisation.
- **M_s2** Efficacité.
- **M_s3** Importance de la communication verbale.
- **M_s4** Attention du partenaire.
- **M_s5** Préférence générale.

Le détail des questions est présenté à la Section B.4.4.

3.4.3 Résultats

Comme dans l'expérience précédente, le test des rangs signés de [Wilcoxon](#) est utilisé pour comparer les résultats des deux conditions.

3.4.3.1 Performance et efficacité

Le tableau 3.5 présente les résultats en matière de performance et d'efficacité pour les deux conditions PCS et PIS. On constate que le score des utilisateurs est très proche entre les deux conditions. En revanche le temps d'exécution (**M_o2**) ainsi que la distance parcourue (**M_o3**) sont significativement supérieurs dans la condition PCS.

Les mesures subjectives (voir 3.16) ne corroborent que partiellement les résultats objectifs. Les questions sur la facilité d'utilisation (**M_s1**) est en faveur de la condition PIS. En revanche, la question portant sur l'efficacité (**M_s2**) penche en faveur de la condition PCS. Cependant, les faibles scores et les écart types importants de ces deux questions indiquent que les avis ne sont pas unanimes.

La figure 3.6 présente le nombre de déformations effectuées en fonction du mode et taille de sélection. Le nombre total de déformation est significativement supérieur dans la condition PCS ce qui indique que les choix de sélection réalisés dans la condition PCS sont moins judicieux que ceux réalisés dans la condition PIS. Les choix de sélection réalisés dans le PIS ne sont pas non plus parfaits puisque le nombre moyen optimal de déformations est de 4.4 par exercice. Quelque soit la condition, on peut remarquer que les utilisateurs ont tendance à trop utiliser la sélection par sommet et par arête au détriment de la sélection par face.

On remarque que les utilisateurs privilégient la sélection par sommets et par arêtes. Ces modes de sélection demandent moins de réflexion car ils permettent de se concentrer sur une partie précise du maillage et évitent ainsi de faire des erreurs de manipulation. L'utilisation de taille de sélection plus étendue demande plus de réflexion pour être utilisée de manière optimale.

L'ensemble de ses résultats montrent que le PIS est plus performant et plus efficace que le PCS. L'hypothèse **H1** est donc rejetée et l'hypothèse inverse est vérifiée.

| | M _o 1 Score | M _o 2 Temps | M _o 3 Distance | M _o 4 Déformation |
|----------------|---------------------------|---------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| PIS | 98.9 | 35.6 | 50.3 | 1.9 |
| PCS | 98.4 | 56.6 | 80.5 | 2.6 |
| <i>p-value</i> | $p > 0.05$ | $p < 0.05$ | $p < 0.05$ | $p < 0.05$ |
| N_r | 3 | 59 | 60 | 60 |
| V | 0 | 224 | 339 | 397 |

TABLEAU 3.5: Performance et efficacité (M_o1 à M_o4) en fonction de la méthode de sélection.

| | Sommet | Arête | Face | Faces x 9 | Total |
|----------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| PIS | 1.9 | 3.0 | 2.4 | 0.3 | 7.5 |
| PCS | 3.7 | 3.9 | 2.1 | 1.6 | 11.3 |
| <i>p-value</i> | $p > 0.05$ | $p < 0.05$ | $p < 0.05$ | $p > 0.05$ | $p > 0.05$ |
| N_r | 47 | 50 | 47 | 42 | 52 |
| V | 289.5 | 476.5 | 442 | 67.5 | 247.5 |

TABLEAU 3.6: Nombre de déformation (M_o5) en fonction de la méthode de sélection et de la taille de sélection. Seules les tailles 1 face et 9 faces sont présentées les autres n'ont pas été utilisées.

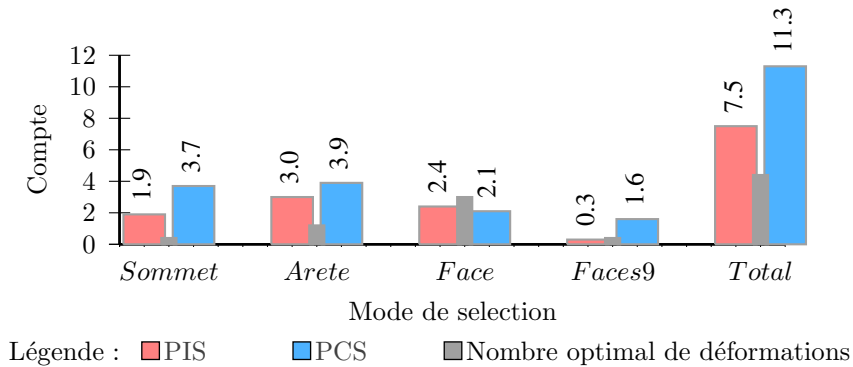


FIGURE 3.15: Nombre de déformation (M_o5) en fonction du mode, de la taille et de la méthode de sélection.

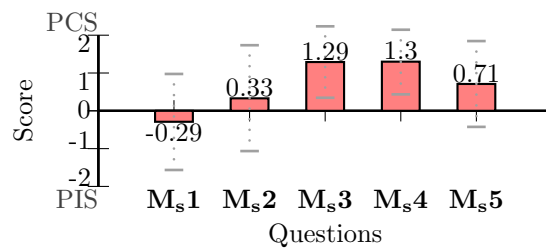


FIGURE 3.16: Résultats subjectifs.

| | M_{o4} Distance de déformation | | <i>p</i> - value | N_r | V |
|------------------|---|---------------|------------------|-------|------|
| | Utilisateur 1 | Utilisateur 2 | | | |
| PIS | 1.23 | 0.79 | $p < 0.05$ | 60 | 33.5 |
| PCS | 1.30 | 1.20 | $p > 0.05$ | 60 | 766 |
| <i>p</i> - value | $p > 0.05$ | $p < 0.05$ | | | |
| N_r | 59 | 60 | | | |
| V | 749.5 | 417.5 | | | |

TABLEAU 3.7: Distance moyenne de déformations **M_{o4}** en fonction de l'utilisateur et de la méthode de sélection. L'utilisateur 1 correspond au sujet le plus actif en termes de distance de déformations parcourue. L'utilisateur 2 est le sujet qui a parcouru le moins de distance de déformations.

| | M_{o5} Nombre de déformations | | <i>p</i> - value | N_r | V |
|------------------|--|---------------|------------------|-------|------|
| | Utilisateur 1 | Utilisateur 2 | | | |
| PIS | 4.85 | 3.27 | $p < 0.05$ | 51 | 13.5 |
| PCS | 5.43 | 5.05 | $p > 0.05$ | 40 | 338 |
| <i>p</i> - value | $p > 0.05$ | $p < 0.05$ | | | |
| N_r | 51 | 57 | | | |
| V | 526 | 398 | | | |

TABLEAU 3.8: Résultat de la mesure Nombre de déformations (**M_{o5}**) en fonction de l'utilisateur de la condition. L'utilisateur 1 correspond au sujet le plus actif en termes de nombre de déformations. L'utilisateur 2 est le sujet qui a effectué le moins de déformations.

3.4.3.2 Répartition du travail

Les tableaux 3.7 et 3.8 présentent la distance moyenne de déformation (**M_{o4}**) et le nombre de déformation effectuée (**M_{o5}**) en fonction du niveau d'activité des utilisateurs (le plus actif et le moins actif).

Dans la condition PIS, les mesures (**M_{o4}** et **M_{o5}**) montrent qu'il existe une différence significative en matière de quantité de déformation entre l'utilisateur le plus actif et le moins actif. En revanche dans la condition PCS, cette différence d'investissement entre les partenaires de n'existe pas. Ce résultat montre bien que le travail de déformation est mieux réparti entre les utilisateurs et que l'hypothèse **H2** est donc validée.

Toutefois, les tableaux 3.7 et 3.8 montrent aussi que la quantité de déformation effectuée par l'utilisateur le plus actif ne varie pas entre les conditions PIS et PCS. À l'inverse, la quantité de déformation fournie par l'utilisateur le moins actif augmente entre PCS et PIS. Ce résultat vient appuyer les conclusions de la section précédente (voir Section 3.4.3.1) et montre que le PCS est moins efficace que le PIS.

3.4.3.3 Conscience situationnelle

Le tableau 3.9 résume les résultats de CS (mesure **M_{c3}**) et CSP (mesures **M_{c1}** et **M_{c2}**). La mesure **M_{c1}** (Sélection du partenaire) est significativement supérieure avec le PCS. À l'inverse, la mesure **M_{c3}** (Sélection suivante) est significativement supérieure avec le PIS. La dernière mesure "sélection suivante du partenaire" **M_{c2}** est légèrement supérieure dans la condition PCS sans être significative. Il apparaît clairement que le PCS augmente l'attention portée au partenaire.

| | M_{c1} Sélection du partenaire | M_{c2} Sélection suivante du partenaire | M_{c3} Sélection suivante | <i>p-value</i> entre M_{c2} et M_{c3} | N_r | V |
|----------------|---|--|--|---|-------|-----|
| PIS | 0.43 | 0.22 | 0.57 | $p < 0.05$ | 24 | 24 |
| PCS | 1.28 | 0.28 | 0.33 | $p > 0.05$ | 11 | 24 |
| <i>p-value</i> | $p < 0.05$ | $p > 0.05$ | $p < 0.05$ | | | |
| N_r | 41 | 21 | 26 | | | |
| V | 57.5 | 95 | 97 | | | |

 TABLEAU 3.9: Conscience Situationnelle (**M_{c1}**, **M_{c2}** et **M_{c3}**) en fonction de la méthode de sélection.

| | M_{o7} Temps de communication | M_{o8} Nombre d' instructions | M_{o9} Nombre d' déclarations |
|----------------|--|--|--|
| PIS | 9.8 | 1.2 | 1.2 |
| PCS | 19.6 | 3.7 | 2.3 |
| <i>p-value</i> | $p < 0.05$ | $p < 0.05$ | $p < 0.05$ |
| N_r | 12 | 12 | 12 |
| V | 6 | 0 | 6 |

 TABLEAU 3.10: Communication verbale (**M_{o7}**, **M_{o8}** et **M_{o9}**) en fonction de la méthode de sélection.

La mesure subjective sur l'attention apportée au partenaire (**M_{s4}**) indique de manière unanime que les utilisateurs se sont eux-même trouvé plus attentifs à leur partenaire avec le PCS.

La CSP est donc améliorée grâce au PCS, l'hypothèse **H3** est validée. En revanche, la capacité à projeter sa propre situation dans le futur est meilleure avec le PIS. On remarque également que l'équilibre entre CSP et CS est meilleur avec le PCS.

3.4.3.4 Communication verbale

La tableau 3.10 présente les mesures de communication verbale. Ces mesures montrent que le temps de communication (**M_{o7}**) est significativement doublé avec le PCS. Le nombre d'instructions (**M_{o8}**) et le nombre de déclarations communiquées (**M_{o9}**) sont tous deux significativement supérieurs dans la condition PCS. La question **M_{s3}** montre que les utilisateurs sont conscients que leur communication verbale augmente avec le PCS. L'augmentation de communication est donc clairement supérieure dans la condition PCS, l'hypothèse **H4** est vérifiée.

3.4.3.5 Discussion

La faible efficacité des binômes avec le PCS peut s'expliquer par le fait qu'un processus de travail fortement couplé demande plus d'effort de coordination qu'un travail collaboratif où les utilisateurs sont indépendants. Il faut que la tâche nécessite une réelle réflexion commune ou une manipulation complexe pour que la collaboration fortement couplée apporte un avantage en matière de performance.

De plus, comme en témoigne la figure 3.6, les choix de sélection réalisés avec le PCS sont moins judicieux que ceux réalisés avec le PIS. Les utilisateurs ont tendance à sur-exploiter la sélection

par ensemble de 9 faces, là où deux ou trois sélections par faces auraient été suffisantes. Ces trop grandes tailles de sélections doivent nécessairement être compensées par des petites sélections de sommets ou d'arêtes pour corriger les éléments déplacés inutilement.

Une seconde explication à ces mauvaises performances est la simplicité de la tâche expérimentée. Les exercices de déformation étudiés impliquent des échelles de sélection trop petites et des formes de maillage trop simples pour pouvoir provoquer des conflits de sélection avec le PIS. En effet, aucune situation de recouvrement des sélections entre utilisateurs n'a été observée dans la condition PIS. L'augmentation de la complexité du maillage et des échelles de sélection permettrait d'augmenter les risques de conflit de sélections.

Malgré ces mauvaises performances, la mesure subjective M_{s5} montre que le PCS est considéré comme la méthode de sélection préférée des participants. D'ailleurs, les mauvaises performances du PCS sont à peine perçues par les utilisateurs alors que les résultats objectifs sont formels. Le fait que les utilisateurs préfèrent le PCS a pu influencer leurs perceptions de l'efficacité du travail collectif.

Les mesures concernant la répartition de la charge de travail montrent bien que le PCS contribue à équilibrer le travail de déformation. Toutefois, l'équilibre de la répartition se fait en augmentant l'effort de l'utilisateur le plus passif sans réduire la charge de travail gérée par l'utilisateur le plus actif.

Concernant la CSP, les résultats montrent que la stratégie de paramétrage collaboratif de sélection a bien permis d'augmenter l'attention des utilisateurs sur leur partenaire. Les utilisateurs sont bien plus attentifs aux activités de leurs partenaires avec le PCS. En revanche, la capacité des utilisateurs à percevoir les activités futures de leurs partenaires n'est pas améliorée. Cette absence d'amélioration dans la capacité de projection peut avoir pour origine le fait que toutes les actions sont décidées conjointement. Même en étant plus attentif aux actions de son partenaire, il est plus difficile de prévoir une action future quand elle est soumise aux décisions de deux personnes à la fois.

L'augmentation de la communication verbale avec le PCS est représentatif du plus grand besoin des utilisateurs à se coordonner. Ce résultat est la conséquence directe de la collaboration fortement couplée imposée par le PCS.

3.5 Conclusion et perspectives

Dans un contexte de manipulation où les utilisateurs sont guidés dans leurs choix de sélections, le CSP s'est avéré intéressant en matière d'efficacité et de répartition du travail dans le groupe. En revanche, aucune amélioration de la CSP n'a été mesurée. De plus, l'outil de communication de taille de sélection proposé a été mal accepté par certains utilisateurs. Cet outil a été perçu comme un moyen de contrôler son partenaire alors qu'il est présenté comme un moyen de communication.

Dans la seconde expérience, les utilisateurs étaient laissés libres de leurs actions. Les résultats du PCS ont révélé la faible efficacité et performance de cette méthode et à l'inverse, la CSP a été améliorée avec succès. L'objectif initial était d'améliorer l'efficacité du travail collaboratif en améliorant la CSP mais c'est le résultat inverse qui a été obtenu. Il est possible que la méthode

choisie pour augmenter la CSP soit trop contraignante pour les utilisateurs et que les bénéfices liés à cette meilleure attention mutuelle soient annulés par les contraintes d'interdépendances imposées par cette méthode. Malgré ces mauvais résultats objectifs, les résultats subjectives montrent une préférence pour le CSP. Les utilisateurs ont apprécié l'aspect ludique et fortement collaboratif apporté par la méthode de sélection.

Pour améliorer la méthode de paramétrage de sélection et la rendre plus performante, il faudrait simplifier les critères de paramétrage collaboratif et utiliser un environnement plus adapté. Un contexte tel que la sculpture collaborative virtuelle comme celui étudié par [Gunn \(2006\)](#) serait probablement plus approprié. Dans ce contexte, un critère de distance euclidienne pour régler la taille de l'outil de sculpture permettrait d'améliorer la vitesse de prise en main et il est possible que l'amélioration de la performance et de la CSP soient conciliées.

Manipulation collaborative

4.1 Introduction

Après avoir abordé les tâches de coordination de sélection et de paramétrage collaboratif de sélection, nous proposons d'aborder la manipulation collaborative. La tâche de manipulation permet de contrôler la position et l'orientation d'un objet. Elle est impliquée dans de nombreux domaines comme l'amarrage moléculaire ou l'assemblage mécanique. L'assemblage mécanique permet de déterminer les séquences de translations et de rotations qui doivent être appliquées à un objet pour le déplacer d'un point à un autre en prenant en compte les éventuels obstacles physiques. Les problématiques rencontrées sont à la fois complexes à résoudre car elles impliquent le contrôle de six Degrés de Liberté (DdL) et faciles à comprendre car elles s'apparentent à des situations de la vie courante. Le déménagement d'un piano où l'insertion d'un siège dans l'habitacle d'une voiture sont des exemples de problématiques d'assemblage.

Plusieurs entreprises du secteur industriel se sont équipées de plateforme de RV afin d'étudier ces problématiques en simulation. Ces plateformes permettent de planifier et de préparer la manipulation des objets trop lourds ou trop fragiles pour être manipulés dans la réalité sans entraînements préalables. Ces simulation impliquent souvent une manipulation collaborative, car pour des raisons pratiques évidentes, les objets lourds ou encombrants sont manipulés par deux personnes simultanément. Disposer d'un système d'assemblage virtuel collaboratif intéresse donc particulièrement les industriels. Pour ces raisons, nous proposons d'étudier de la manipulation collaborative dans un contexte d'assemblage mécanique.

La manipulation d'objet comporte deux composantes aux problématiques différentes : la translation et la rotation. Le Tableaux 4.1) montre que de nombreuses études se sont déjà intéressées à la translation collaborative d'objet 3D. En revanche, les problématiques liées à la rotation collaborative d'objet par l'intermédiaire d'interfaces haptiques sont moins étudiées. Pourtant, la rotation d'objet en 3D demande plus de réflexions que la translation en 3D ([Shepard et Metzler, 1971](#)). De nombreuses études montrent que les capacités de rotation mentale humaines sont faillibles ([Pietsch et Jansen, 2012](#)). Une manipulation à six DdL nécessite donc une bonne représentation mentale de l'espace. Dans le cadre d'une collaboration, il est important que chaque utilisateur dispose d'un contrôle sur l'orientation de l'objet afin de mutualiser les capacités de réflexion. Pour cela, il est nécessaire de mettre au point une méthode de couplage des actions utilisateurs permettant une coordination simple, efficace et précise de la manipulation.

Dans ce contexte, les caractéristiques du bras haptique employé sont également déterminantes. Un bras haptique à trois DdL ne permet pas de reproduire les mêmes interactions qu'un bras haptique à six DdL. Dans notre cas les bras haptiques employés disposent de six DdL en entrées mais que de trois Degrés de Retour (DdR) haptique en sorties (différents modèles de bras haptique correspondent à cette configuration : les Touch et Touch X de Geomatic, le Virtuose 3D Desktop de Haption ou encore le Mirage F3D-35 de Quanser). Cette classe de bras haptiques sont plus répandus que les bras à six DdR car économiquement plus accessibles. L'absence de retour de couple, supprime une partie importante des informations haptiques présentent dans la réalité. Toutefois, des méthodes d'interactions spécifiques peuvent être mises en place pour convertir le retour de couple en retour de force. L'utilisation de différents effets mécaniques comme l'effet de levier par exemple permet de retranscrire une collision survenant pendant un mouvement de rotation.

L'objectif de cette étude est de proposer de nouvelles méthodes de manipulation collaboratives pour :

- contrôler simultanément la rotation d'un objet.
- impliquer en permanence les utilisateurs dans le processus de manipulation.
- simplifier la coordination des actions entre partenaires.
- faciliter la représentation mentale des séquences de manipulations.
- compenser l'absence de retour de couple.

En améliorant ces composantes, les résultats attendus sont une augmentation de la précision et de la vitesse de manipulation. Une augmentation de la CSP et une répartition plus équilibrée des efforts entre utilisateurs sont également escomptées.

4.1.1 État de l'art

De nombreuses études portent sur la manipulation collaborative d'objets avec retour haptique. Cependant la majorité de ces travaux se limitent au déplacement d'objets en translation uniquement (voir Tableau 4.1). De plus, ces études s'intéressent particulièrement à la collaboration distante avec une connexion réseaux de qualité variable. ([Sankaranarayanan et Hannaford, 2007](#); [Huang et al., 2009](#); [Fotoohi et al., 2007](#); [Allison et al., 2004](#)). Elles proposent des solutions pour surmonter les problèmes de connexion réseaux, mais elles ne s'intéressent pas aux performances des utilisateurs. Leur objectif est de maintenir la qualité et la stabilité du retour haptique malgré une qualité de communication réseaux variable.

Les travaux de [Başdoğan et al. \(2000\)](#), [Sallnäs et al. \(2000\)](#), [Groten et al. \(2009\)](#), [Ullah et al. \(2010\)](#) et [Simard et Ammi \(2012a\)](#) ont étudié l'influence du retour haptique sur la coordination et les performances de manipulation. Ces études mettent en évidence l'importance du retour haptique dans les tâches de manipulation collaborative. Les travaux [Ullah et al.](#) et [Simard et Ammi](#) proposent également des outils haptiques pour aider les utilisateurs à coordonner leurs actions durant les phases de manipulation.

Les travaux précédemment cités limitent leurs études à la manipulation en translation. Les travaux de [Iglesias et al. \(2008\)](#), de [McNeely et al. \(2005\)](#) de [Gautier et al. \(2008\)](#) et de [Weller et Zachmann \(2012\)](#) s'intéressent à la manipulation à 6 DdL en EVC. L'étude de [Iglesias et al.](#) se place dans les mêmes conditions de manipulation que celles abordées dans ce chapitre : une

| Publication | Manipulation DdL en | | Interface haptique | |
|--|---------------------|----------|--------------------|--------------|
| | Position | Rotation | DdL (entrée) | DdR (sortie) |
| Sankaranarayanan et al. (2007) | 1 | 0 | 6 | 3 |
| Huang et al. (2009) | 3 | 0 | 6 | 3 |
| Fotoohi et al. (2007) | 2 | 1 | 3 | 3 |
| Allison et al. (2004) | 3 | 0 | 6 | 3 |
| Kim et al. (2004) | 3 | 0 | 6 | 3 |
| Başdoğan et al. (2000) | 3 | 0 | 6 | 3 |
| Sallnäs et al. (2000) | 3 | 0 | 6 | 3 |
| Lambeth et al. (2009) | 3 | 0 | 6 | 3 |
| Groten et al. (2009) | 1 | 0 | 1 | 1 |
| Ullah et al. (2010) | 3 | 0 | 3 | 3 |
| Weller et Zachmann (2012) | 3 | 3 | 6 | 6 |
| McNeely et al. (2005) | 3 | 3 | 6 | 6 |
| Gautier et al. (2008) | 3 | 3 | 6 | 6 |
| Iglesias et al. (2008) | 3 | 3 | 6 | 3 |

TABLEAU 4.1: Récapitulatif des DdL en manipulation et des DdL des interfaces utilisées dans diverses expériences.

manipulation à 6 DdL via des interface haptiques à 6 DdL et 3 DdR. Toutefois, il est impossible aux utilisateurs de manipuler simultanément un même objet. Les expériences menées par [McNeely et al.](#) et [Gautier et al.](#) autorisent la manipulation simultanée d'objet. Ce deux études proposent des méthodes de couplage des actions des utilisateurs. Les méthodes de couplage proposées cherchent à reproduire le comportement physique d'une manipulation collaborative réelle. Elles ne cherchent pas à proposer des méthodes de couplage améliorant la coordination entre utilisateurs. De plus, ces études sont centrées sur les performances de leurs plateformes collaboratives en matière de résistance aux aléas des connexions réseaux. Elles ne s'intéressent pas aux performances des utilisateurs.

Les études de [Ruddle et al. \(2002\)](#) et [Pinho et al. \(2008\)](#) se sont intéressés au couplage des actions des utilisateurs avec 6 DdL et sans utiliser d'interface haptique. [Ruddle et al.](#) ont comparé un couplage synchronisé des actions avec un couplage asynchrone des actions (moyenne des actions de chacun). Le couplage synchronisé nécessite que les deux utilisateurs effectuent le même mouvement de manipulation simultanément pour appliquer ce mouvement à l'objet partagé. L'expérience de [Ruddle et al.](#) montre que quelle que soit la condition, les utilisateurs rencontrent beaucoup de difficultés pour coordonner la manipulation. En comparant leurs résultats avec les expériences faisant usage du retour haptique, [Ruddle et al.](#) concluent que la présence du retour haptique est essentielle à la coordination dans les tâches de manipulation. [Pinho et al.](#) ont proposé une séparation du contrôle des différents DdL entre les utilisateurs. [Pinho et al.](#) montrent que cette méthode de manipulation est plus performante (temps d'exécution) qu'une méthode de manipulation individuelle.

L'expérience menée par [Weller et Zachmann \(2012\)](#) s'intéresse également aux performances des utilisateurs dans le cadre d'une manipulation collaborative bi-manuelle avec retour haptique. Les deux participants ne disposent pas des mêmes interfaces haptiques (6DdL Vs 3 DdL) et contrairement aux expériences précédentes, les utilisateurs sont concurrents et non partenaires. Chaque utilisateur doit collecter plus d'objets que son concurrent. Même si cette étude ne s'intéresse pas à la manipulation collaborative, elle montre que la vitesse de prise en main est plus rapide avec les interfaces haptiques à 6 DdL qu'avec des interfaces à 3 DdL. La distance parcourue par les

interfaces haptiques à 6 DdL est également plus courte. En revanche, la mesure de performances (nombre d'objets collectés) ne révèle pas de différence significative entre les interfaces employées.

Plusieurs travaux ont étudié l'influence du retour de couple en environnement virtuel non-collaboratif. Wang et Srinivasan (2003) ont étudié la perception d'objets virtuels en l'absence de retour visuel. Dans cette expérience, les participants doivent estimer la position d'un objet selon trois conditions : avec retour de force, avec retour de couple et avec retour de force et de couple à la fois. Les résultats montrent que les utilisateurs sont plus précis dans la condition combinant retour de force et de couple. La condition avec retour de force uniquement apparaît comme la condition la moins précise.

Verner et Okamura (2009) et Santos-Carreras et al. (2010) ont respectivement étudié des tâches individuelles de reproduction de dessin et d'opération chirurgicale. Verner et Okamura mesurent le temps de reproduction du dessin et l'enfoncement du stylo virtuel dans le support virtuel. Ces mesures montrent que la condition avec retour de force et retour de couple présente des performances équivalentes à la condition retour de force seul. En revanche, le retour de couple seul engendre des enfoncements significativement supérieurs aux conditions avec retour de force. Santos-Carreras et al. montrent également que le retour de couple ajouté au retour de force ne permet pas d'améliorer de manière significative la dextérité des utilisateurs dans une tâche de pose de point de suture virtuelle.

Une problématique liée au contrôle de rotation par application de couple est relevée par Gautier et al. En effet, les utilisateurs ont indiqué qu'ils percevaient clairement les mouvements de translations induits par leurs partenaires. En revanche, les rotations effectuées par application de couple ne sont pas clairement perçues par les partenaires. Gautier et al. suggèrent que si les points d'accroche sur l'objet virtuel sont trop éloignés, l'utilisateur distant au centre de rotation va bénéficier d'un effet de levier qui va atténuer la force de couple et donc rendre difficilement perceptible la rotation appliquée par son partenaire. En conséquence, l'utilisateur qui initie un mouvement de rotation se retrouve bloqué dans sa manœuvre par son partenaire sans que ce dernier ne s'en rende compte.

Cet état de l'art montre que très peu de recherches se sont intéressées aux méthodes de couplage de rotation via des interfaces haptiques. Les méthodes existantes cherchent à imiter la réalité et non à améliorer les performances de manipulation en EVC. Gautier et al. montrent que ces méthodes de couplage présentent des problèmes de coordination entre les utilisateurs. Les résultats des études évaluant le rôle du retour de couple ne sont pas unanimes. Il semble que l'influence du retour de couple soit variable en fonction de la tâche abordée. De plus, aucune étude n'a évalué le rôle du retour de couple dans le cadre d'une manipulation collaborative. Il n'est donc pas possible de se prononcer sur l'importance du retour de couple dans notre contexte. Les méthodes proposées dans la section suivante chercheront néanmoins à compenser l'absence du retour de couple.

4.2 Contributions

Afin de pallier l'absence du retour de couple, de réduire la complexité d'une manipulation à 6 DdL et d'améliorer la coordination des actions des partenaires plusieurs méthodes de manipulation

collaborative sont proposées.

Le retour de couple est important quand le contrôle de la rotation s'effectue par application d'un couple (rotation de l'effecteur terminal du bras haptique). Or, il est également possible de contrôler la rotation d'un objet par application de force uniquement (déplacement de l'effecteur terminal du bras haptique). Pour contrôler la rotation d'un objet par application d'une force, il suffit de bénéficier d'un centre de rotation différent du point par lequel est saisi l'objet. Plus le centre de rotation est éloigné du point d'accroche par lequel l'objet est manipulé, plus le contrôle de rotation sera lent et précis. Dans ce cas, le retour de force est suffisant pour notifier toutes collisions faisant obstacle au mouvement de rotation appliqué à l'objet. La sensibilité du retour haptique est ainsi améliorée.

Afin de rendre cette méthode de contrôle collaborative, nous proposons de définir chaque point d'accroche appliqué par les utilisateurs sur l'objet comme un centre de rotation pour leurs partenaires. Cette méthode de manipulation, correspond à une manipulation via une double liaison rotule dans laquelle chaque utilisateur contrôle la position d'une liaison rotule. Ainsi, l'orientation de l'objet est déterminée par la position relative des utilisateurs par rapport au point d'accroche de leurs partenaires. Le couplage des actions de chacun est ainsi très naturel car, similaire à une manipulation collaborative réelle. De plus, une interdépendance totale est créée entre les deux utilisateurs afin d'augmenter leurs CSP et de réduire la paresse sociale.

Nous proposons une seconde méthode de manipulation basée sur la liaison pivot afin de réduire la complexité de la manipulation à 6 DdL, Cette méthode de manipulation fonctionne sur le même principe que la manipulation par rotule. La seule différence est l'utilisation d'un axe de rotation (liaison pivot) à la place d'un centre de rotation (liaison rotule). Chaque utilisateur contrôle la position de l'axe de rotation autour duquel son partenaire peut faire pivoter l'objet manipulé. Ainsi, les utilisateurs concentrent leur attention sur un unique degré de rotation : le contrôle est simplifié et la charge cognitive est réduite.

Afin d'étudier ces deux méthodes de manipulation et d'évaluer l'avantage du contrôle de rotation par force, il convient de les comparer à des méthodes de manipulation basées sur un contrôle de rotation par couple. Deux méthodes de manipulation supplémentaires ont donc été proposées. Afin de permettre une comparaison optimale avec la manipulation par liaisons pivots, une méthode de contrôle par couple permettant la manipulation d'un seul degré de rotation à la fois est proposée. La dernière méthode s'inspire des méthodes individuelles de manipulation à 6 DdL utilisées dans la littérature. Ce type de manipulation repose sur une liaison complète (appelé aussi encastrement) entre les curseurs des utilisateurs et l'objet manipulé. Une méthode de manipulation par encastrement adaptée à la collaboration est donc proposée.

Ces méthodes de manipulation s'inspirent donc des liaisons mécaniques telles que la liaison rotule, la liaison pivot et la liaison complète. Les utilisateurs sélectionnent et manipulent les objets en créant des liaisons mécaniques entre leurs curseurs et l'objet. Les méthodes de contrôle collaboratif de rotation proposées sont les suivantes :

- manipulation par rotule : contrôle simultané de deux degrés de rotation par application de force.
- manipulation par pivot : contrôle séquentiel des degrés de rotation par application de force.
- manipulation par clé : contrôle séquentiel des degrés de rotation par application de couple.

- manipulation par encastrement : contrôle simultané des trois degrés de rotation par application de couple.

Certaines tâches d'assemblage requièrent des mouvements qui combinent rotation et translation en même temps. Les modèles de manipulation proposés seraient incomplets sans la possibilité de contrôler la position des objets. Une méthode pour contrôler collaborativement la position des objets est donc également proposée.

4.2.1 Manipulation par rotule

Comme son nom l'indique, cette méthode définit tout point d'accroche comme une liaison rotule aussi appelé liaison sphérique. Une liaison rotule transmet les contraintes en translation mais laisse les 3 degrés de rotation libre. Une fois que les deux utilisateurs ont saisi l'objet, chaque utilisateur représente un centre de rotation pour son partenaire (Voir Figure 4.1). L'orientation de l'objet conjointement manipulé est déterminée par la position relative des deux curseurs. Le déplacement de l'utilisateur autour du point d'accroche de son partenaire permet d'appliquer une rotation à l'objet. La méthode liaison rotule ne permet que de contrôler 2 degrés de rotation. Le troisième degré de rotation est libre de toute contrainte. Il a pour axe central la droite qui passe par les deux points d'accroche des utilisateurs. L'objet manipulé tourne donc librement autour de cet axe en fonction de l'inertie des mouvements et des collisions avec l'environnement.

Cette méthode de manipulation a déjà été proposée dans des contextes de manipulation collaborative sans la présence du retour haptique. [Cutler et al. \(1997\)](#) ont présenté une technique appelée "*grab-and-carry*" destinée à la manipulation bi-manuelle avec gants sensitifs 3d ("*data-glove*"). Une seconde technique appelée "*skewer*", a été proposée par [Duval et al. \(2006\)](#) dans un contexte de manipulation collaborative avec traqueur 3d. Ces deux techniques de manipulation sont identiques à celle présentée dans cette section, la différence majeure étant l'utilisation d'interface haptique. En revanche, aucun de ces deux travaux n'a réalisé d'étude expérimentale pour comparer cette méthode de manipulation à une autre.

La précision de la rotation dépend de la distance entre les points d'accroche choisis par les utilisateurs. Plus les points d'accroche sont espacés plus la rotation sera précise. L'éloignement des points d'accroche limitent également les effets de leviers et permet ainsi un retour de force plus efficace pour signaler les collisions. Dans toutes les situations, au moins un des deux utilisateurs ressentira un blocage dans son déplacement. À l'inverse, plus les points d'accroche sont rapprochés plus la vitesse de rotation sera grande et imprécise. Afin de forcer les utilisateurs à choisir des points d'accroche espacés, une force de répulsion dissuade les utilisateurs de placer leur points d'accroche de manière rapprochée (Voir Équation 4.1).

$$F = k.e^{-4.(\frac{d}{7})^2}.\overrightarrow{P_2P_1} \quad (4.1)$$

Avec :

- F : Retour d'effort en Newton.
- k : constant en $kg.s^{-2}$
- P_1 : position de l'utilisateur ayant saisi l'objet en premier.
- P_2 : position de l'utilisateur souhaitant saisir l'objet en deuxième.
- d : $\|\overrightarrow{P_2P_1}\|$ distance entre P_1 et P_2 en mètre.

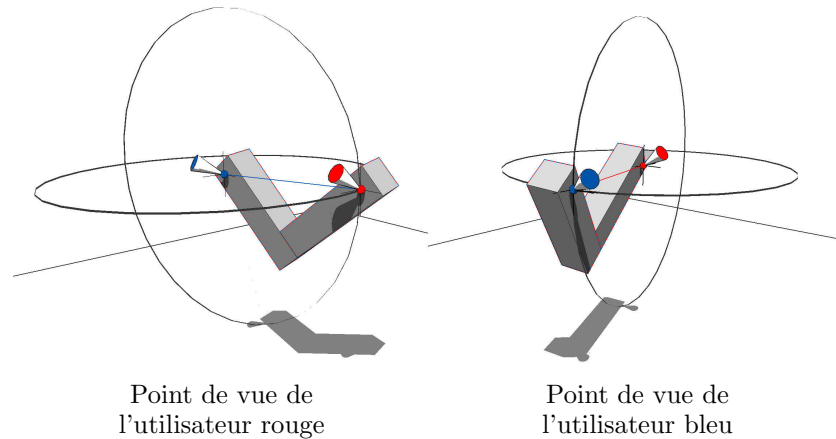


FIGURE 4.1: Interface graphique de l'application en mode liaison rotule. Chaque cercle noir représente un axe de rotation contrôlable. Ces cercles sont centrés sur la position du partenaire qui représente aussi le centre de la rotation. Le segment qui relie les deux curseurs entre eux (de couleur rouge ou bleu en fonction du point of vue) indique la position relative du partenaire et l'axe libre de rotation.

– t : seuil de répulsion.

4.2.2 Manipulation par pivot

Le fonctionnement de la manipulation par liaison pivot est comparable au fonctionnement de la manipulation par liaison rotule : le contrôle de la rotation se fait aussi par application de force (déplacement des curseurs). Cependant, seul un degré de rotation est contrôlé par les utilisateurs (voir Figure 4.3). Les deux autres degrés de rotation sont automatiquement bloqués. Cette méthode force les utilisateurs à décomposer les étapes de manipulation, et réduit à 4 le nombre de DdL à gérer en même temps. L'objectif visé est ainsi de simplifier la coordination et réduire la charge cognitive.

Les utilisateurs doivent donc définir un axe de rotation avant de pouvoir manipuler un objet. Pour définir un axe de rotation, il suffit de rentrer en contact avec l'objet. Le vecteur normal à la surface du curseur au niveau du point de contact avec l'objet définit l'axe de rotation (voir Figure 4.2). Seul le premier utilisateur qui sélectionne l'objet valide l'axe de rotation. L'utilisateur qui sélectionne l'objet en second est relié à l'objet avec un axe de pivot qui à la même direction que l'axe pivot du partenaire. Seule la position de l'axe de rotation diffère entre les deux utilisateurs.

Comme pour la manipulation par liaison rotule, la distance entre les axes de pivot détermine la précision de rotation. Afin d'encourager une manipulation précise, une force de répulsion est chargée d'éviter les axes de rotation trop proches. Le modèle de force est similaire à celui utilisé pour la manipulation par liaison rotule (voir Équation 4.2). La force de répulsion est d'autant plus importante dans le cas de la manipulation par pivot que l'éloignement des points d'accroche n'est pas une condition suffisante pour garantir un contrôle précis. Les utilisateurs doivent s'éloigner de l'axe de rotation de leur partenaire pour augmenter la précision de rotation et la sensibilité du retour haptique.

$$F = k.e^{-4.\left(\frac{d}{r}\right)^2}.\overrightarrow{P'P_1} \quad (4.2)$$

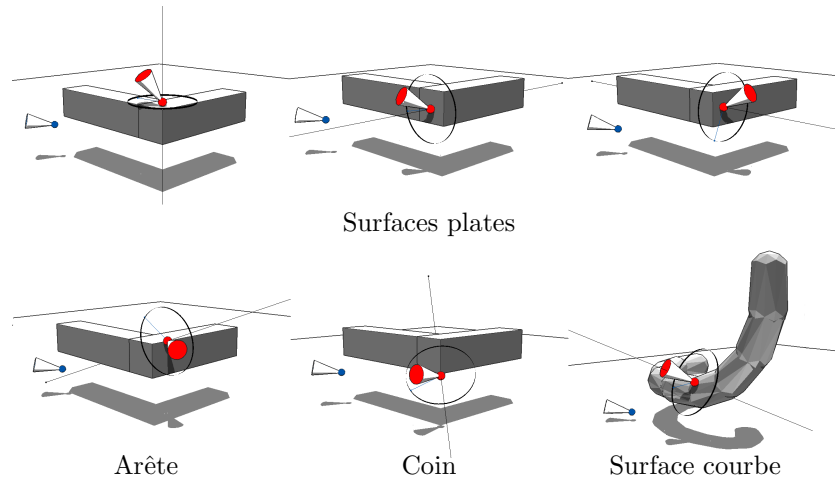


FIGURE 4.2: Différents exemples d'axe de pivot en fonction de la surface touchée.

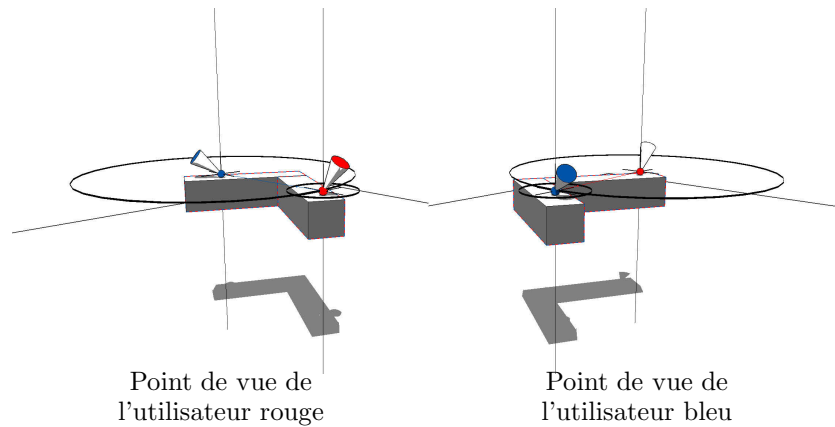


FIGURE 4.3: Interface graphique de l'application en mode liaison pivot. Chaque grand cercle noir représente le degré de rotation contrôlable. Ces cercles sont centrés sur le point d'accroche du partenaire. Les petits cercles et les segments noirs indiquent la direction de l'axe pivot.

Avec :

- F : Retour d'effort en Newton.
- k : constant en $kg.s^{-2}$
- P_1 : position de l'utilisateur ayant saisi l'objet en premier et point de passage de l'axe pivot.
- P_2 : position de l'utilisateur souhaitant saisir l'objet en deuxième.
- \vec{a} : direction de l'axe de rotation du pivot.
- P' : projection de P_2 sur le plan de normale \vec{a} et contenant le point P_1 soit $P' = P_2 - (\vec{a} \cdot \overrightarrow{P_2O} - \vec{a} \cdot \overrightarrow{P_1O}) \cdot \vec{a}$
- $d = \|\overrightarrow{P'P_1}\|$ distance entre P_1 et P' en mètre.
- t : seuil de répulsion.

4.2.3 Manipulation par clé

Cette méthode de manipulation diffère de la manipulation par pivot sur un point : le contrôle de rotation par couple. Comme la méthode de manipulation par pivot, elle repose sur une rotation

autour d'un axe pivot. Elle requiert également la définition d'un axe de rotation par les utilisateurs et la méthode pour définir cet axe est identique à celle utilisée dans la manipulation par pivot (voir Figure 4.2)

Par contre, la manipulation par clé de pivot utilise un contrôle de rotation par couple (voir Figure 4.4). Cette méthode de contrôle pose de nouvelles problématiques : tous les bras haptiques ont un espace de rotation limité. Afin de permettre des rotations à 360 degrés sur tous les axes, un bouton d'«embayage» qui active ou désactive le contrôle de rotation par couple est proposé aux utilisateurs. Lorsque ce bouton est pressé, tous mouvements de l'effecteur (rotation et translation) sont transmis à l'objet manipulé. Lorsque ce bouton est relâché, seuls les mouvements de translation sont transmis et tous les DdL en rotation sont bloqués. Quand les deux utilisateurs appliquent simultanément un couple : le produit des deux rotations effectuées est appliqué à l'objet manipulé.

Le fait de limiter la rotation à une seul degré de rotation permet d'utiliser différentes méthodes d'interaction pour appliquer le couple. Ainsi deux possibilités de rotations s'offrent aux utilisateurs pour faire pivoter l'objet :

- Garder le curseur orthogonal à l'axe de rotation et tourner le curseur comme une clé plate.
- Garder le curseur colinéaire à l'axe de rotation et tourner le curseur comme un tournevis.

Ces deux possibilités sont proposées pour offrir un meilleur confort d'utilisation aux utilisateurs.

La deuxième différence est la position de l'axe de rotation. Avec la manipulation par pivot l'axe de rotation est centré sur la position du partenaire. Dans la case de la manipulation par clé, la position de l'axe de rotation dépend de la fermeté avec laquelle les utilisateurs maintiennent leurs positions. Si l'utilisateur qui effectue une rotation tient fermement sa position et que son partenaire se laisse guider, alors l'axe de rotation sera centré sur la position du premier utilisateur (voir Figure 4.4). Si les deux utilisateurs tiennent aussi fermement leurs positions l'un que l'autre alors l'axe de rotation sera placé sur la position moyenne des deux points d'accorche.

4.2.4 Manipulation par encastrement

La méthode standard pour orienter un objet de manière individuelle est de lier les 3 degrés de rotation de l'objet avec les 3 degrés de rotation de l'effecteur. En mécanique, ce type de liaison est appelé encastrement ou liaison complète. Cette méthode de rotation a été utilisée par [Iglesias et al. \(2008\)](#) dans un environnement virtuel collaboratif où la manipulation partagée d'un objet est impossible. La manipulation collaborative avec 6 DdL consiste en une transposition de la méthode de manipulation individuelle. Un couplage virtuel ressort-amortisseur entre les deux dispositifs haptiques est souvent utilisé afin de transmettre les efforts appliqués par chaque utilisateurs mais aussi pour améliorer la stabilité du système. Il existe de nombreuses variantes de couplage comme celle présentées par [McNeely et al. \(2005\)](#) et [Gautier et al. \(2008\)](#). L'avantage de cette manipulation par encastrement est d'offrir un contrôle total de l'objet manipulé.

Dans notre cas, nous ne pouvons pas utiliser la même technique de couplage que [McNeely et al.](#) ou [Gautier et al.](#) étant donné l'absence de retour de couple. La solution employée consiste à calculer le produit des rotations de chaque utilisateur pour déterminer la rotation à appliquer sur l'objet partagé (voir Équation 4.3 et Figure 4.5). Cependant, quand un utilisateur exerce un couple sur un objet, il n'est pas toujours possible de lui fournir un retour de force pour lui notifier une

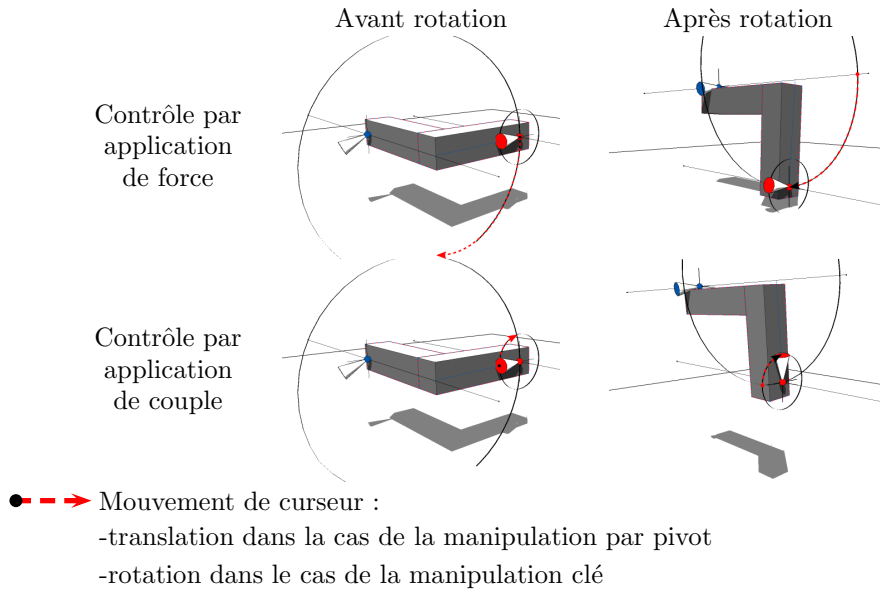


FIGURE 4.4: Différence de contrôle de rotation entre manipulation par pivot et par clé. Dans les deux cas une rotation de 90 degré est effectuée par l'utilisateur rouge. La rotation est la même dans les deux méthodes mais la position résultante de l'objet manipulé est différente parce que la position de l'axe de rotation est différente

collision. Dans le cas où le point de collision est assez éloigné du centre de rotation, la collision entrainera un déplacement du point d'accroche et l'interface haptique sera capable de transmettre un retour de force à l'utilisateur (voir Figure 4.6.a). En revanche, dans le cas où deux collisions simultanées bloquent l'effet de levier, aucun retour haptique ne sera transmis à l'utilisateur (voir Figure 4.6.b). Cette problématique existe aussi dans le cas de la manipulation par clé. Comme cette dernière, la manipulation par encastrement permet aux utilisateurs d'activer ou désactiver le contrôle par couple via l'utilisation d'un bouton d'embrayage.

$$R_t = R_{(t-1)} \times M_{1(t)} \times M_{1(t-1)}^{-1} \times M_{2(t)} \times M_{2(t-1)}^{-1} \quad (4.3)$$

Avec :

- R_t : Matrice d'orientation de l'objet partagé au temps t
- $M_{i(t)}$: Matrice d'orientation de l'effecteur i au temps t

4.2.5 Contrôle de position de l'objet

Une méthode de contrôle de position collaborative basée sur les travaux existants a été implémentée. La méthode la plus communément employée pour déplacer collaborativement un objet consiste à calculer la position moyenne des deux curseurs et à placer l'objet partagé sur cette position moyenne. Cette méthode de manipulation collaborative est par exemple utilisée par [Ruddle et al. \(2002\)](#) et [Başdoğan et al. \(2000\)](#). Dans notre cas, la position finale de l'objet manipulé est une moyenne de la position des utilisateurs plus un décalage en translation défini par la position des points d'accroche (voir Figure 4.7 et l'équation 4.4). Afin de garder les utilisateurs en contact avec l'objet manipulé, un effet de ressort amortie est utilisé pour les attirer en permanence sur leurs points d'accroche.

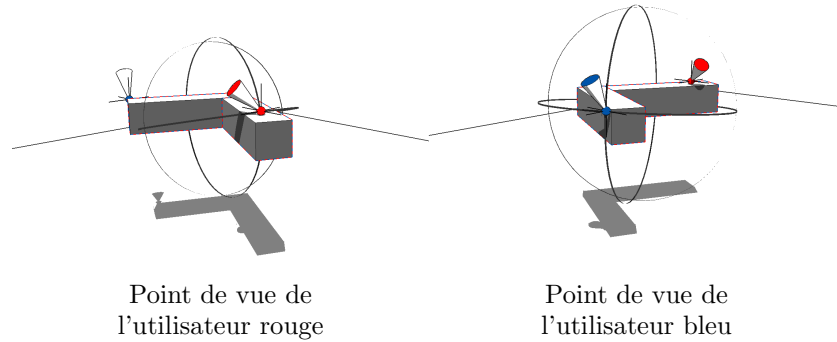
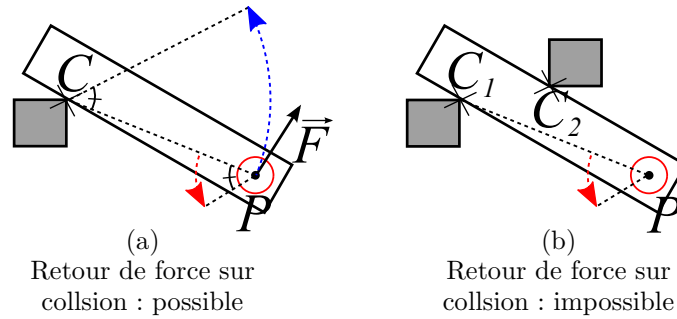


FIGURE 4.5: Interface graphique de l'application en mode encastrement. Chaque cercle noir représente un axe de rotation contrôlable. Le centre de ces trois cercles correspond au centre de gravité de l'objet manipulé.



Avec :

- \vec{F} : Retour de force.
- C_i : Point de collision avec un obstacle fixe.
- P : Position de l'utilisateur.
- \curvearrowright : Couple appliqué par l'utilisateur.
- \curvearrowright : Rotation appliquée à l'objet.

FIGURE 4.6: Cas de retour de force suite à l'application d'un couple.

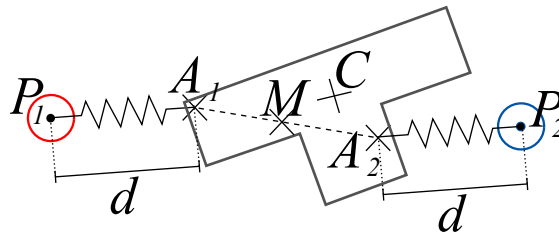


FIGURE 4.7: Contrôle collaboratif de la position

$$C = \frac{P_1 + P_2}{2} + \overrightarrow{MC} \quad (4.4)$$

Avec :

- C : Centre de gravité de l'objet manipulé
- A_i : Point d'accroche de l'utilisateur i
- P_i : Position du curseur de l'utilisateur i
- M : Milieu du segment A_1A_2

| Méthode de rotation | Degré de rotation | | | Contrôle de rotation par |
|---------------------|-------------------|------|-------|--------------------------|
| | contrôlé | fixe | libre | |
| Rotule | 2 | 0 | 1 | force |
| Pivot | 1 | 2 | 0 | force |
| Clé | 1 | 2 | 0 | couple |
| Encastrement | 3 | 0 | 0 | couple |

TABLEAU 4.2: Caractéristiques des différentes méthodes de rotation.

4.3 Expérience 5 : Rotation collaborative d'objet

L'objectif de cette expérience est double :

- Évaluer l'avantage des méthodes de rotation par application de force (manipulation par rotule et par pivot) comparées aux méthodes de rotation par application de couple (manipulation par clé et par encastrement).
- Évaluer l'avantage des méthodes de contrôle par axe de rotation (manipulation par pivot et par clé) comparées aux méthodes de contrôle par centre de rotation (manipulation par rotule et par encastrement).

L'objectif du contrôle par force est d'offrir : une meilleure coordination des actions, une meilleure répartition des efforts entre partenaires et une meilleure précision de manipulation en substituant le retour de couple par un retour de force. Le contrôle par axe de rotation a pour objectif de réduire la complexité de la tâche en forçant les utilisateurs à décomposer les étapes de manipulation. Le couplage de ces deux composantes doit également permettre d'augmenter la CSP via la forte interdépendance des utilisateurs et l'établissement d'un axe de rotation commun. Les caractéristiques principales de chaque méthode de manipulation sont résumées dans le Tableau 4.2.

4.3.1 Hypothèses et conditions

Comme expliqué précédemment, la manipulation par Pivot comporte les caractéristiques de contrôle par force et de manipulation par axe de rotation. Elle est donc considérée comme la méthode de manipulation principale. La manipulation par Rotule utilise un contrôle de rotation par force. Cette caractéristique est considérée comme plus avantageuse que le contrôle par axe de rotation. La manipulation par Rotule doit donc présenter des performances supérieures à la manipulation par Clé. Enfin, la manipulation par Clé doit montrer l'avantage de l'axe de rotation sur la manipulation par Encastrement.

Le hypothèses formulées sont donc les suivantes :

- **H1** les manipulations par Pivot et Rotule sont les plus précises.
- **H2** les manipulations par Pivot et Rotule sont les plus efficaces.
- **H3** les manipulations par Pivot et Rotule répartissent mieux l'effort entre les partenaires.
- **H4** les manipulations par Pivot et Clé nécessitent le moins de manipulation.
- **H5** la manipulation par Pivot offre la meilleure CSP.

Les hypothèses sont présentées plus en détail à la Section B.5.1. Les conditions évaluées correspondent donc aux 4 méthodes de manipulation présentées, à savoir : Pivot, Rotule, Clé et Encastrement.



FIGURE 4.8: Dispositif expérimental

4.3.2 Dispositif

La plateforme expérimentale se compose d'un unique ordinateur sur lequel 2 écrans et 2 bras haptiques (modèle Touch de chez Geomagic) sont connectés. Les problèmes de latence réseaux sont ainsi contournés. Le moteur physique Bullet Engine est utilisé pour gérer toutes les liaisons mécaniques précédemment citées. La manipulation par rotule est supportée par la classe `btPoint2PointConstraint`. Les trois autres méthodes de manipulation sont des combinaisons de contraintes entre les classes `btPoint2PointConstraint` et `btGeneric6DofConstraint`. La détection de collisions est également prise en charge par Bullet Engine. Le lien entre bras haptique et moteur physique se fait par un système de couplage virtuel comme présenté par [He et Choi \(2013\)](#). Les participants sont placés dans la même pièce mais sont séparés par un rideau (voire Figure 4.8).

4.3.3 Protocoles

La tâche de manipulation étudiée est connue sous le nom de : problème du déménageur de piano ([Ruddle et al., 2002](#)). Dans cet exercice, un binôme de participants a pour objectif de faire passer un objet à travers des obstacles. Dans notre contexte, l'obstacle sera un mur avec une ou deux cavités en son milieu (voire Figure 4.9). Les participants ont pour instruction d'être les plus précis possibles afin d'éviter les collisions entre l'objet manipulé et l'environnement. Exécuter le plus rapidement possible la tâche est un objectif secondaire. L'objet à manipuler apparaît d'un côté du mur et l'exercice se termine quand il est intégralement passé de l'autre côté du mur.

L'exercice est collaboratif, l'objet ne peut donc pas être manipulé par un utilisateur seul. Tant que les deux utilisateurs n'ont pas sélectionné l'objet, ce dernier reste immobile. Quand un utilisateur entre en contact avec l'objet et le sélectionne, il est bloqué sur le point d'accroche qu'il vient de créer. L'utilisateur peut soit attendre que son partenaire sélectionne l'objet, soit relâcher l'objet. Une fois que les deux utilisateurs ont sélectionné l'objet, ils peuvent commencer à le manipuler. Dès qu'un des deux utilisateurs relâche l'objet, ce dernier redevient immobile.

Chaque binôme de participants effectue 4 différents problèmes du déménageur de piano (voir Figure 4.9 et Tableau 4.3) avec les 4 différentes méthodes de manipulation. Chaque méthode de manipulation commence par une phase d'entraînement de 3 problèmes de manipulation simple. Les 4 problèmes du déménageur de piano proposés sont les suivants :

| | Coudes | U | Serpent | Clef |
|--|----------|----------|----------|-------|
| Espace de manœuvre minimal (mm) | 0.744 | 1.544 | 2 | 3 |
| Quantité minimum de rotation requise (rad) | 1.5π | 1.5π | 1.5π | π |
| Nombre minimum d'axe de rotation | 2 | 1 | 2 | 2 |

TABLEAU 4.3: Difficultés des scénarios

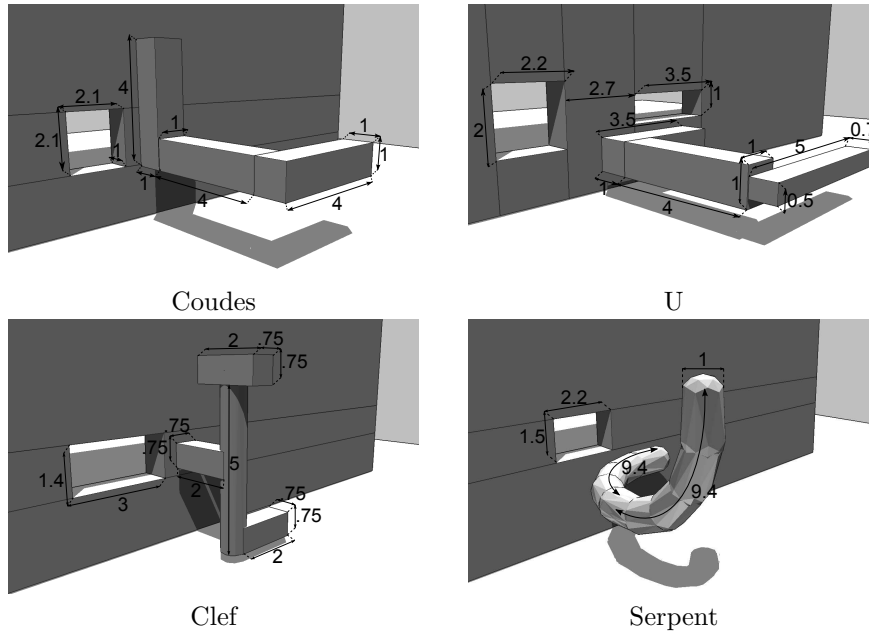
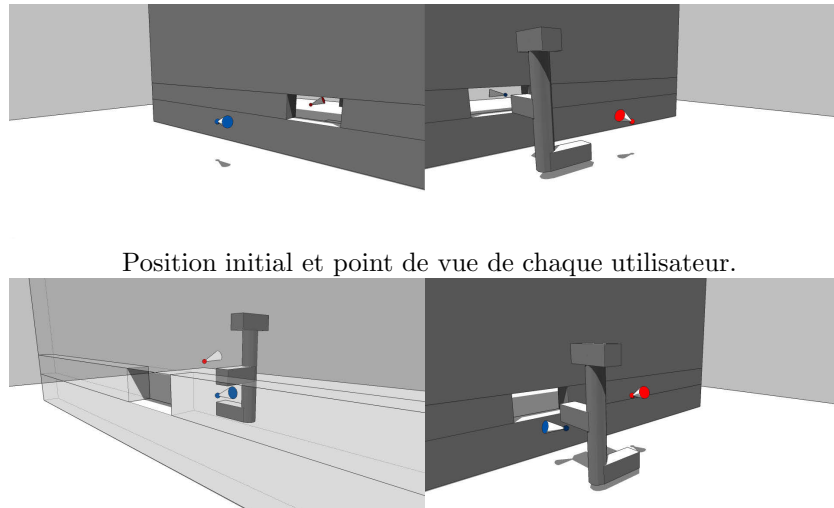


FIGURE 4.9: Descriptif des 4 problèmes du déménageur de piano.

- **Coudes** : La forme de l'objet manipulé est inspirée par les exercices de rotation mentale étudiés par [Shepard et Metzler \(1971\)](#). Le scénario requiert des manœuvres de rotation et de translation simultanées.
- **'U'** : L'objet manipulé a la forme de la lettre 'U'. Le scénario requiert des manœuvres de rotation et de translation simultanées. Le mur a deux cavités, l'objet manipulé doit être inséré dans les deux cavités à la manière d'une prise électrique avant de pouvoir le faire pivoter à travers la cavité la plus grande.
- **Serpent** : Ce scénario est comparable à l'exercice qui consiste à déplacer un anneau le long d'un fils de cuivre ([Başdoğan et al., 2000](#)). Dans notre cas l'exercice est inversé : le fils de cuivre qui est manipulé et l'anneau est statique. Ce scénario nécessite également des manipulations de translation et rotation simultanées mais avec une précision bien plus faible que les autres scénarios (voir Tableau 4.3).
- **Serpent** : Ce scénario imite l'insertion d'une clef dans une serrure. Les rotations et les translations doivent être effectuées de manière séquentielle.

L'ordre des 4 scénarios et des 4 méthodes de rotation est changé après chaque passage de participants afin de contrebalancer l'ordre de passage de chaque condition.

Le point de vue des utilisateurs est lié à la position de leur curseur. Le curseur est resté en permanence au centre de l'écran et la distance entre le curseur et la caméra est constante. La différence de point de vue entre les deux utilisateurs est de 90 degrés selon un axe de rotation



Affichage du mur en transparence lorsque un utilisateur (le bleu en l'occurrence) franchit le mur.

FIGURE 4.10: Point de vue et affichage en fonction de la position des curseurs

orthogonal au sol. Chaque utilisateur démarre d'un côté différent du mur (voir Figure 4.10). L'intérêt du point de vue opposé pour une tâche de manipulation a été montré par [Takemura et Kishino \(1992\)](#). L'utilisation de points de vue différents permet de garantir qu'au moins un des utilisateurs bénéficie d'un retour visuel correct sur la situation de manipulation. Les utilisateurs peuvent voir à travers le mur grâce à un effet de transparence qui s'active quand un utilisateur passe de l'autre côté du mur.

4.3.4 Participants

24 participants (12 binômes), âgés entre 20 et 35 ans ont participé à l'expérience (21 hommes et 3 femmes). Les participants ont été recrutés au sein du laboratoire LIMSI et de l'Université Paris-Sud.

4.3.5 Mesures objectives

Les mesures M1 à M3 concernent la performance de manipulation.

- Distance de collision (M_o1) (mm)
- Temps de collision (M_o2) (sec)
- Temps d'exécution (M_o3) (sec)

Les mesures M4 à M7 concernent l'effort fourni et sa répartition entre les membres du binôme.

- Translation utilisateur (M_o4) (mm)
- Rotation utilisateur (M_o5) (rad)
- Différence de translation (M_o6) (mm)
- Différence de rotation (M_o7) (rad)

Les mesures M8 et M9 indiquent la quantité de manipulation appliquée à l'objet.

- Translation de l'objet (M_o8) (mm)
- Rotation de l'objet (M_o9) (rad)

Voir section B.5.3 pour plus de détail.

La dernière série de mesures concerne la CSP. Afin d'évaluer la CSP, la capacité de projections dans le future des utilisateurs est évaluée durant une interruption de tâche (Voir section B.5.4 pour plus de détail).

- Erreur de projection en translation (\mathbf{M}_c1) (mm)
- Erreur de projection en rotation (\mathbf{M}_c2) (rad)

4.3.6 Mesures subjectives

Un questionnaire NASA Task Load Index a été utilisé pour mesurer l'efficacité et la charge travail perçue de chaque condition. Une question concernant la coordination des actions entre partenaires a été ajoutée au questionnaire. Les mesures subjectives suivantes sont évaluées :

- \mathbf{M}_s1 La performance (Mauvaise - Bonne)
- \mathbf{M}_s2 L'exigence mentale (Faible - Élevée)
- \mathbf{M}_s3 L'exigence physique (Faible - Élevée)
- \mathbf{M}_s4 La frustration (Faible - Élevée)
- \mathbf{M}_s5 La coordination (Mauvaise - Bonne)

Le détail du questionnaire soumis aux participants se trouve à la Section-B.5.5.

4.3.7 Résultats

Les résultats de chaque condition sont comparés par un test de somme des rangs signés de [Wilcoxon](#) suivi d'une correction des *p-values* par la méthode de Holm-Bonferroni ([Holm, 1979](#)). Les écarts significatifs sont signalés par des astérisques sur les figures.

4.3.7.1 Performance de manipulation

Les Figures 4.11 4.12 et 4.13 présentent les performances de chaque méthode de manipulation ainsi que les différences de performances qui se révèlent significatives. À l'exception des scénarios Coudes et 'U' qui sont similaires, les scénarios de manipulation sont très différents les uns des autres. Ils sont donc étudiés et analysés au cas par cas.

Dans le cas de la tâche Coudes, les méthodes de rotation par application de force (Rotule et Pivot) se montrent plus précises que la manipulation par Encastrement. La manipulation par Rotule est également la plus rapide pour effectuer la tâche.

Aucune différence significative ne se dégage du scénario 'U'. Les scénarios Coudes et 'U' présentent des difficultés de manipulation comparables puisque dans les deux cas la tâche consiste à faire passer des coudes à angle droite au travers une encoche. En réalisant une analyse statistique regroupée des scénarios Coudes et 'U', il apparaît que la manipulation par Pivot réduit significativement ($p < 0.05$) la distance de collision (\mathbf{M}_o1) comparée aux manipulations par Rotule et par Encastrement. La manipulation par Pivot s'avère donc particulièrement précise pour les manipulations requérant des rotations et des translation simultanées.

Légende : ■ Rotule ■ Pivot ■ Clé ■ Encastrement
 ** : $p - value < 0.05$ différence significative * : $p - value < 0.1$ tendance

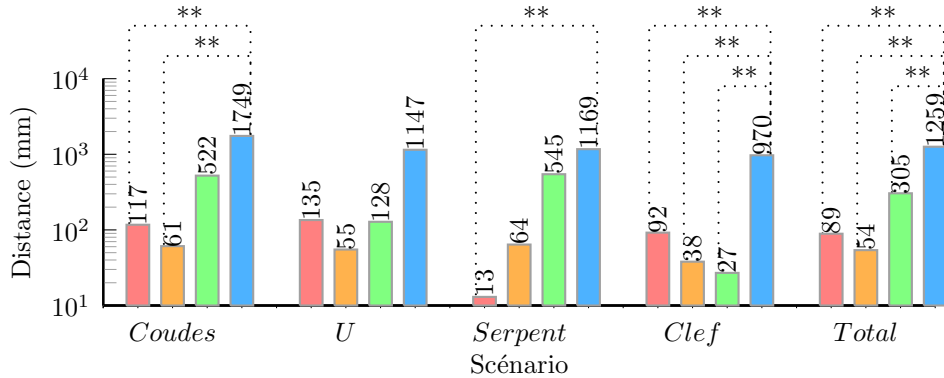


FIGURE 4.11: Distance de collision (M_o1) en fonction de la méthode de manipulation et du scénario.

Dans le scénario Serpent, la manipulation par Rotule se montre plus précise que la manipulation par Encastrement que ce soit en matière de distance de collision (M_o1) ou de temps de collision (M_o2). Les méthodes de manipulation par axes de rotation (Pivot et Clé) présentent des temps d'exécution significativement plus long que la manipulation par Rotule.

Le dernier scénario Clef montre que la manipulation par Encastrement est la plus imprécise des méthodes de manipulation en termes de distance de collision (M_o1). La deuxième mesure de précision montre que dans le cas des méthodes de rotation par axe, le contrôle par couple est plus précis puisque la manipulation par Clé présente un temps de collision (M_o2) significativement inférieur à la manipulation par Pivot. Aucune différence significative ne se dégage de du temps d'exécution (M_o3) pour le scénario Clef.

Enfin les résultats globaux montrent que la manipulation par Encastrement est la méthode de manipulation la plus imprécise que ce soit en matière de distance de collision (M_o1) ou de temps de collision (M_o2) (voir Figure 4.11 et 4.12). La manipulation par Rotule apparaît très clairement comme la méthode de manipulation la plus rapide (voir Figure 4.13). La mesure subjective de performance (M_s1) ne corrobore que partiellement ces résultats puisque seule la manipulation par Clé est perçue comme significativement supérieure à la manipulation par Encastrement (voir Figure 4.14). La manipulation par Pivot tend à être perçue comme plus performante que l'Encastrement. En revanche, les performances de la manipulation par Rotulesont clairement sous-estimées par les utilisateurs.

Les manipulations par Rotule et par Pivot sont en effet plus précises que la manipulation par Encastrement. En revanche, la manipulation par Clé s'avère de précision globalement équivalente à la manipulation par Rotule ou par Pivot. L'hypothèse **H1** n'est donc que partiellement validée.

4.3.7.2 Efficacité de manipulation

Les Figures 4.15 et 4.16 présentent les résultats des mesures d'effort : M_o4 et M_o5 . Les différences significatives sont également indiquées sur les mêmes Figures 4.15 et 4.16.

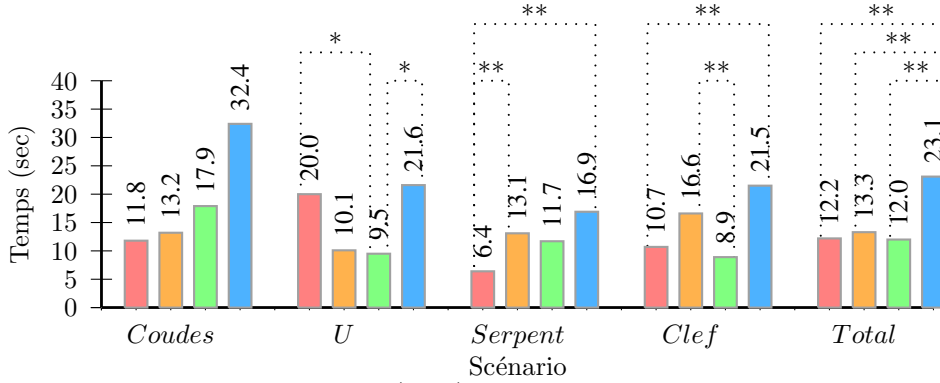


FIGURE 4.12: Temps de collision (**M_o2**) en fonction de la méthode de manipulation et du scénario.

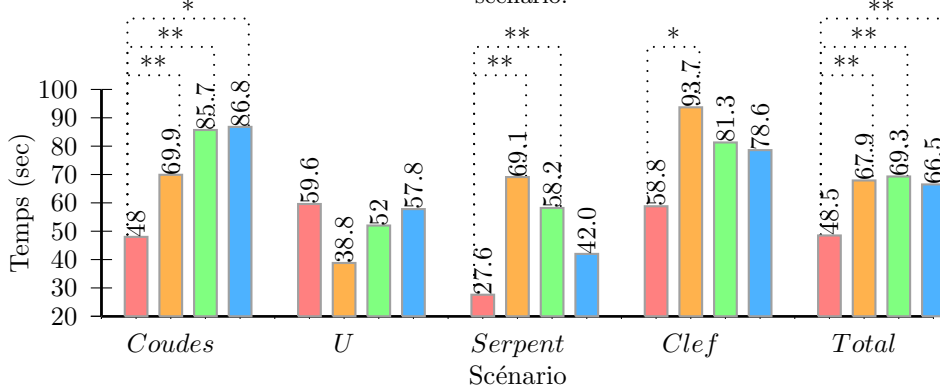


FIGURE 4.13: Temps d'exécution (**M_o3**) en fonction de la méthode de manipulation et du scénario.

Légende : ■ Rotule ■ Pivot ■ Clé ■ Encastrement
 **: $p - value < 0.05$ différence significative * : $p - value < 0.1$ tendance

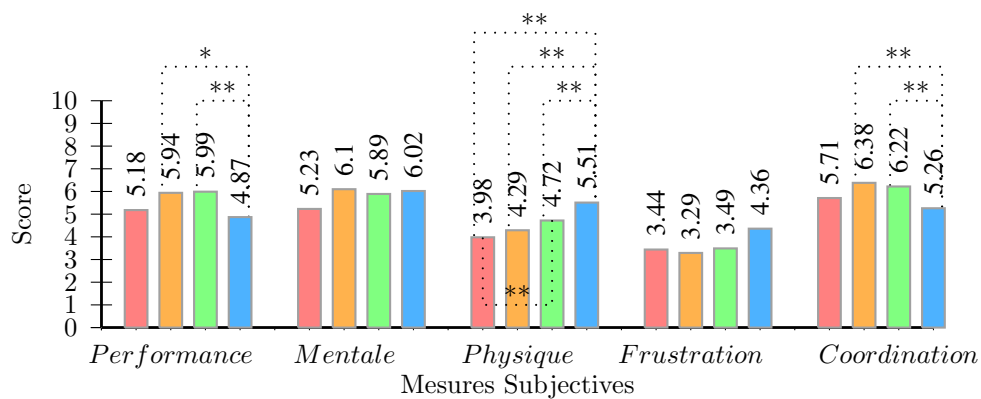


FIGURE 4.14: Résultats subjectif (**M_s1** à **M_s5**) en fonction des méthodes de manipulation.

Les résultats globaux montrent que la manipulation par Rotule est de loin celle qui demande le moins d'effort physique quelque soit la mesure d'effort prise en compte (**M_o4** ou **M_o5**). La manipulation par Rotule se montre particulièrement efficace dans les scénarios Coude et Serpent, la quantité de rotation utilisateur (**M_o5**) est également bien minimisée dans le scénario Clef.

De manière générale, la manipulation par Pivot ne présente aucun avantage en matière de translation utilisateur (**M_o4**). En revanche la mesure (**M_o5**) révèle que cette méthode de manipulation demande moins de rotation du poignet que les manipulations basées sur une rotation par couple (Clé et Encastrement). Dans le cas des scénarios Coudes et 'U', la manipulation par Pivot se montre moins exigeante en terme de rotation utilisateur (**M_o5**) que la manipulation par Clé.

Légende : ■ Rotule ■ Pivot ■ Clé ■ Encastrement
 ** : $p - value < 0.05$ différence significative * : $p - value < 0.1$ tendance

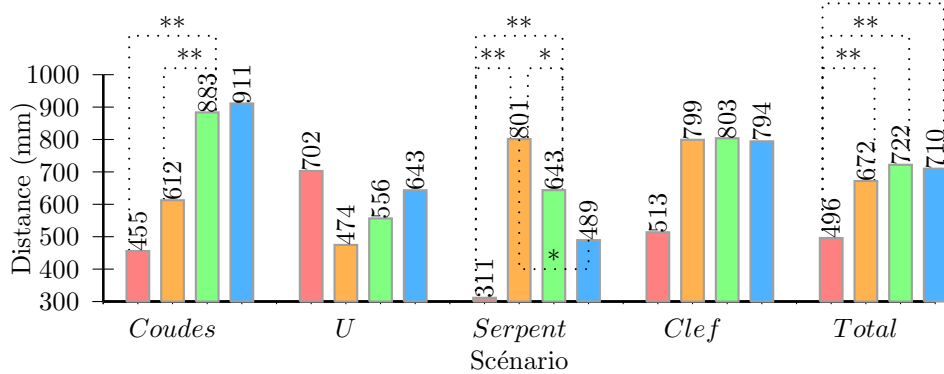


FIGURE 4.15: Translation utilisateur (M_o4) en fonction de la méthode de manipulation et du scénario.

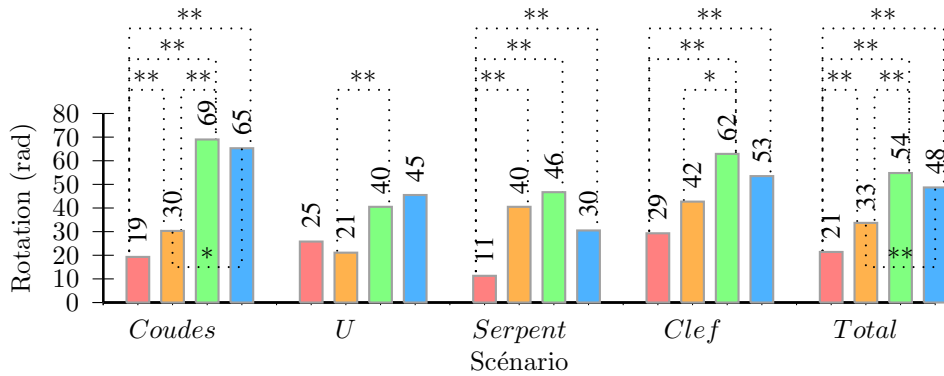


FIGURE 4.16: Rotation utilisateur (M_o5) en fonction de la méthode de manipulation et du scénario.

À l'inverse, les résultats de cette méthode en matière de translation utilisateur (M_o4) sont particulièrement mauvais dans le scénario Serpent.

De manière générale et quelque soit les scénarios étudiés, les manipulations par Clé et Encastrement ne présentent aucun avantage en termes de réduction de l'effort fourni par les utilisateurs. La mesure subjective sur l'exigence physique (M_s3) est formelle, la manipulation par Encastrement est significativement perçue comme la méthode qui demande le plus d'effort physique (voir Figure 4.14).

L'hypothèse **H2** est validée. Les manipulations par Rotule et par Pivot sont celles qui demandent le moins d'effort aux utilisateurs. Ces deux méthodes requièrent moins d'effort que les méthodes Clé et Encastrement tout en étant au moins aussi performantes, elles sont donc plus efficaces.

4.3.7.3 Répartition du travail

Les Figures 4.17 et 4.18 présentent les différences d'effort fournis par les utilisateurs (Différence de translation (M_o6) et Différence de rotation (M_o7)).

La Figure 4.17 ne révèle qu'une seule amélioration significative dans la répartition de l'effort de déplacement (Différence de translation (M_o6)). La manipulation par Rotule répartie mieux les déplacements entre les utilisateur que la manipulation par Encastrement.

En revanche la Figure 4.18 montre clairement que la manipulation par Rotule est la méthode qui distribue le mieux l'effort de rotation entre les deux partenaires. La manipulation par Pivot répartit mieux le travail de rotation (Différence de rotation (M_o7)) que la manipulation par Clé et par Encastrement.

L'hypothèse **H3** est donc vérifiée, les manipulations par Rotule et par Pivot repartissent mieux l'effort entre les utilisateurs que les manipulations par Clé et par Encastrement. En effet, il est très difficile pour les utilisateurs de partager les efforts de rotation avec les méthodes de contrôle de rotation par couple (Clé et Encastrement). Une stratégie souvent adoptée par les binômes consistait à laisser un seul utilisateur (souvent le plus efficace du binôme) effectuer toutes les manœuvres de rotation .

Légende : ■ Rotule ■ Pivot ■ Clé ■ Encastrement
 ** : p - value < 0.05 différence significative * : p - value < 0.1 tendance

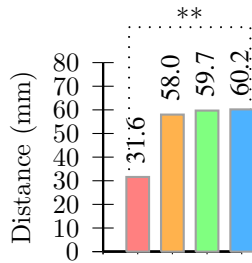


FIGURE 4.17: Différence de translation (M_o6) entre les deux utilisateurs en fonction de la méthode de manipulation.

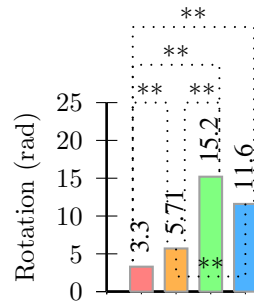


FIGURE 4.18: Différence de rotation (M_o7) entre les deux utilisateurs en fonction de la méthode de manipulation.

4.3.7.4 Quantité de manipulations

Les Figures 4.19 et 4.20 présentent les résultats des mesures de translation de l'objet (M_o8) et de rotation de l'objet (M_o9) et les différences significatives associées.

La manipulation par Rotule produit globalement moins de déplacements (M_o8) que la manipulation par Encastrement. En revanche et de manière générale, la manipulation par Rotule engendre plus de rotation de l'objet (M_o9) que toutes les autres méthodes de manipulation. Ce résultat apparaît également clairement dans le cas du scénario 'U'.

La manipulation par Pivot présente quelques avantages : elle produit moins de translation (M_o8) que la manipulation par Clé dans le scénario Coude et elle produit moins de rotation que la manipulation par Rotule dans le scénario 'U'. Globalement, la manipulation par Pivot produit moins de rotation que la manipulation par Rotule.

Tous scénarios confondus, la manipulation par Clé est la méthode qui applique le moins de rotation sur l'objet partagé. Ce résultat est particulièrement vérifié dans les scénarios 'U' et Clé.

L'hypothèse **H4** est validée. Les manipulations par Clé et par Pivot sont les plus optimisées en matière de quantité de manipulations. Décomposer la manipulation en séquence de rotation autour d'un axe permet de limiter les mouvements de manipulation inutiles.

Légende : ■ Rotule ■ Pivot ■ Clé ■ Encastrement
 ** : $p - value < 0.05$ différence significative * : $p - value < 0.1$ tendance

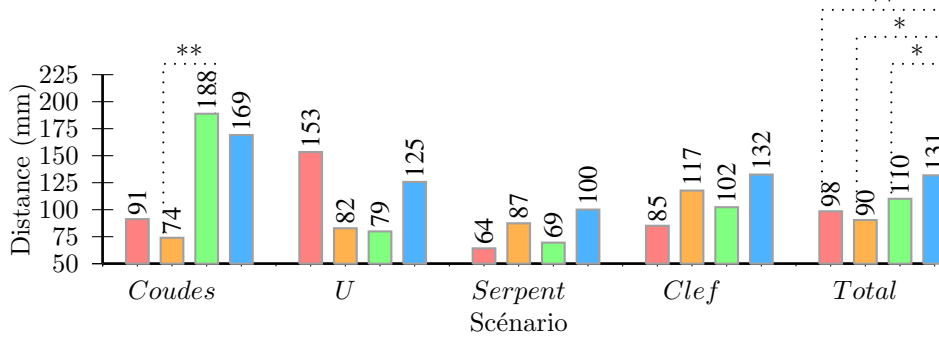


FIGURE 4.19: Translation de l'objet (M_o8) en fonction de la méthode de manipulation et du scénario.

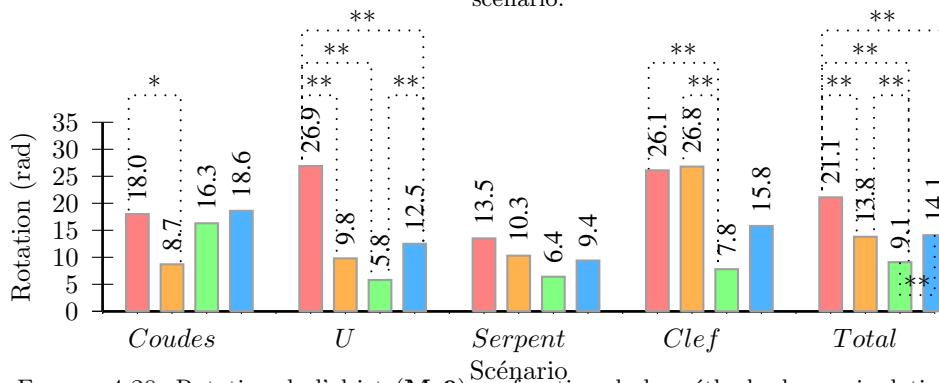


FIGURE 4.20: Rotation de l'objet (M_o9) en fonction de la méthode de manipulation et du scénario.

4.3.7.5 Conscience situationnelle partagée

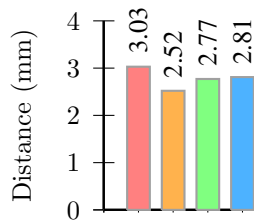


FIGURE 4.21: Erreur de projection en translation (M_c1) en fonction de la méthode de manipulation.

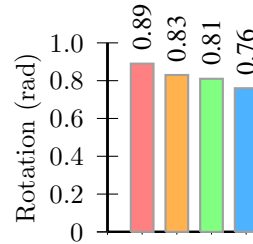


FIGURE 4.22: Erreur de projection en rotation (M_c2) en fonction de la méthode de manipulation.

Les figures 4.21 et 4.22 présentent les résultats des mesures de projection en translation (M_c1) et en rotation (M_c2). La figure 4.21 ne révèle aucune différence ou tendance notable. Les méthodes de manipulation étudiées ne présente pas de différence dans leur manière d'appliquer un déplacement. Il est donc possible que l'influence des méthodes de manipulation sur la trajectoire de déplacement soit négligeable.

La figure 4.22 semble montrer que l'erreur de projection en rotation (M_c2) décroît avec l'augmentation du contrôle des utilisateurs. Le manipulation par Encastrement présente la moyenne la plus faible, la manipulation par Rotule présente l'erreur moyenne la plus élevée et les deux autres méthodes de manipulation ont des valeurs d'erreurs moyennes intermédiaires. Un plus

grand contrôle sur la manipulation de l'objet permettrait aux utilisateurs d'accomplir avec plus de précision les mouvements qu'ils avaient imaginés auparavant. Toutefois l'analyse statistique ne révèle aucune différence significative quelque soit la mesure de projection étudiée.

L'hypothèse **H5** est rejetée. Aucune méthode de manipulation ne présente d'amélioration de la CSP significativement supérieur à une autre.

4.3.8 Discussion

On constate que la nature du scénario de manipulation a une influence majeure sur l'efficacité des méthodes de manipulation. La manipulation par Pivot est bien adaptée au scénario qui requiert des mouvements de rotation et de translation simultanés et précis comme les scénarios Coudes et 'U'. La manipulation par Rotule est efficace pour les scénarios qui ne nécessitent pas de séquence de mouvements compliqués et précis comme le scénario Serpent. La manipulation par Clé donne de bons résultats lorsque la manipulation requiert des translations et de rotations séparées et séquentielles comme pour le scénario Clef.

Le degré de rotation laissé libre dans la manipulation par Rotule simplifie clairement la tâche des utilisateurs. Cette méthode de manipulation est très naturelle, les utilisateurs n'ont que 5 DdL à gérer. Le 6ème DdL réagit aux obstacles auxquels il est exposé par simple collision et sans intervention de la part des utilisateurs. Le franchissement des obstacles s'en trouve ainsi simplifié et le temps de manipulation réduit. En revanche, la manipulation par Rotule est la moins optimisée en matière de quantité de mouvements effectués par l'objet car le degré de rotation libre engendre beaucoup de rotations inutiles. Cette particularité a clairement été pénalisante sur la scène 'U' qui ne demande qu'un seul axe de rotation et où tout manque de contrôle entraîne d'importante collision. La manipulation par Rotule reste très efficace dans les scénarios demandant une faible précision de manœuvres, ou dans le cas où la vitesse d'exécution prime sur la précision. Une possibilité pour améliorer cette méthode de manipulation serait d'introduire un troisième point d'accroche non aligné avec les deux autres points d'accroche. Cette solution est également suggérée par [Duval et al. \(2006\)](#). Le troisième point d'accroche peut être géré par un troisième utilisateur soit par un utilisateur opérant en bi-manuel.

La manipulation par Pivot et par Clé demande plus de réflexion car les utilisateurs doivent déterminer les axes de rotation avant de manipuler l'objet. Ces méthodes forcent les utilisateurs à décomposer la manipulation en séquence de rotation et les laissent se focaliser sur 4 DdL uniquement. En raison de cette manière de procéder, ces deux méthodes ont des temps d'exécution plus longs que la manipulation par Rotule et équivalents à la manipulation par Encastrement. En revanche, grâce à cette approche, les manipulations par Pivot et par Clé sont les méthodes les plus optimisées en matière de quantités de manipulation. Cela est particulièrement vrai pour la manipulation par Clé qui est la méthode minimisant au maximum la quantité de manipulation. Le fait de disposer d'un bouton pour activer ou non le contrôle en rotation permet d'éviter un grand nombre de rotations involontaires. Cette particularité permet à la manipulation par Clé d'être précise dans les phases de translation (Scénario Clef). À l'inverse, la manipulation par Clé demande plus d'effort à l'utilisateur que la manipulation par Pivot. Comparé au contrôle en position de la manipulation par Pivot, le contrôle par couple de la manipulation par Clé demande plus de rotation sur l'effecteur à l'utilisateur sans pour autant réduire la quantité de

déplacement de l'effecteur. De plus le contrôle en position de la manipulation par Pivot a tendance à être légèrement plus précis que le contrôle en orientation de la manipulation par Clé. Les mauvaises performances en précisions de ces deux méthodes de manipulation dans le scénario Serpent s'expliquent par la difficulté de certains utilisateurs à déterminer les axes de rotation à utiliser. Cette scène est également la seule à présenter une surface cylindrique. Dans ce cas, la définition d'un axe de rotation demande plus de finesse et de précision que sur les autres scènes.

Pour finir, la manipulation par Encastrement détient les plus mauvais résultats dans tous les points étudiés : précision, temps d'exécution, effort et quantité de manipulation. La manipulation par Encastrement requiert un contrôle de 6 DdL en même temps ce qui demande une bonne capacité en représentation mentale de l'espace. De plus, comme la manipulation par Clé, la manipulation par Encastrement utilise un contrôle de rotation par couple ce qui réduit la sensibilité du retour haptique et donc la précision. Ces deux caractéristiques font de la manipulation par Encastrement une méthode de manipulation collaborative à éviter lorsqu'on ne dispose que de bras haptique.

4.4 Conclusion et perspectives

Les deux méthodes de contrôle de rotation par application de force proposées ici s'imposent comme étant nettement plus efficaces que la méthode de manipulation classique. D'autant que des améliorations peuvent être apportées aux manipulations par Rotule et par Pivot. Il serait par exemple utile de proposer un outil pour bloquer ou libérer les mouvements de rotation comme les manipulations par Clé et par Encastrement en sont équipées. Cela permettrait d'éviter les rotations involontaires lorsque seul un mouvement de translation est nécessaire. Dans le cas de la manipulation par Rotule la présence d'un troisième utilisateur permettrait de contrôler le degré de rotation libre. La coordination s'en trouverait par contre complexifiée. Il serait également intéressant de rééditer une expérience similaire, mais avec des bras haptiques avec 6 degrés de retour de force. Aucune étude ne s'est encore intéressée à la substitution du retour de couple par un retour de force.

Conclusion et perspectives

À travers ces travaux de thèse, j'ai proposé et évalué différents outils visio-haptiques pour répondre à trois différentes problématiques posées par les EVC. L'outil de désignation pour la sélection répond aux problèmes de perception de profondeur et aux difficultés de communication à distance. L'outil de paramétrage collaboratif des sélections répond aux problèmes de conflit de sélection et de maintien de l'attention mutuelle (CSP). Les méthodes de manipulation collaborative répondent aux problèmes de coordination des actions inter-utilisateurs et aux difficultés liées à la représentation mentale des rotations dans l'espace.

Les cinq expériences menées montrent que certains outils proposés, comme la désignation avec assistance haptique (voir Chapitre 2) ou la manipulation par pivot (voir Chapitre 4), sont pertinents et efficaces. Ces outils proposent des fonctionnalités qui pourraient s'avérer utiles dans différentes applications collaboratives. En revanche, l'outil de paramétrage collaboratif de sélection (voir Chapitre 3) n'est pas encore fonctionnel. L'efficacité des outils proposés est variable, néanmoins tous les outils présentés ont une influence positive sur la répartition des efforts entre utilisateurs. Les expériences et les mesures réalisées ne permettent pas de déterminer si l'équilibrage des efforts a permis de réduire le phénomène de paresse sociale décrit par [Latane et al.](#). Dans les chapitres 2 et 4, les mesures d'efforts sont réduites sans engendrer de perte de performance. Ces résultats indiquent une amélioration de la coordination, mais cela n'exclut pas une possible réduction de la paresse sociale. À l'inverse, dans le chapitre 3 l'effort collectif se trouve augmenté par la méthode d'interaction proposée. Il est donc probable que seule la réduction de la paresse sociale ait contribué à augmenter l'effort de travail.

L'outil de désignation proposé pour améliorer la coordination de sélection apparaît comme une solution efficace pour réduire l'effort fourni par les partenaires tout en maintenant le niveau de performance du travail collaboratif. De plus, cet outil est polyvalent et facilement transposable dans d'autres contextes. Dans un contexte d'assemblage mécanique comme celui expérimenté dans le chapitre 4, un outil de désignation serait pertinent pour aider les utilisateurs à positionner leurs points d'accroche plus judicieusement. Dans les expériences menées, l'utilisation de l'outil de désignation était imposée par un scénario coordinateur-opérateur. Cependant, pour rendre l'outil de désignation avec assistance haptique plus adapté à tout type de scénario, il convient de le coupler avec un système de validation d'objectif. Cela peut être réalisé de manière très simple via une interface utilisateur pour accepter ou refuser le guidage vers la cible désignée comme l'ont fait [Simard et Ammi](#). Des approches plus implicites et intuitives peuvent être également proposées pour détecter l'intérêt d'un utilisateur pour une cible désignée. Par exemple, en analysant la trajectoire des curseurs, il serait possible d'interpréter les intentions des utilisateurs et de leur assigner les cibles concernées.

L'outil de paramétrage collaboratif de sélection proposé est certainement le plus original. Comparé aux techniques de paramétrage individuel, le paramétrage collaboratif de sélection se montre moins performant et moins efficace. Néanmoins, les résultats subjectifs indiquent que cette méthode de paramétrage est appréciée par les utilisateurs. Les résultats relatifs à la Conscience Situationnelle Partagée montrent une augmentation significative de l'attention mutuelle. Très peu de travaux se sont aussi intéressés à la CSP en EVC 3D. [Nova et al.](#) n'ont pas réussi à obtenir d'amélioration significative de la CSP, et [Ullah](#) a mesuré cette composante de manière succincte et subjective. Cependant, face aux faibles performances de cette méthode, il apparaît clairement que chercher à soutenir en permanence la CSP ne doit pas constituer un objectif prioritaire. La méthode de paramétrage collaboratif n'est pas totalement dépourvue d'intérêt mais elle nécessite de nombreuses modifications pour ne plus influencer négativement les performances collaboratives. Une première possibilité d'amélioration serait de simplifier le système de fonctionnement en utilisant des critères de changement d'échelle plus facile à comprendre. Un critère de distance euclidienne serait par exemple pertinent dans un contexte de sculpture virtuelle et permettrait de faciliter la prise en main. Il est également possible d'étendre le modèle de sélection proposé à une utilisation pour plus de deux partenaires. Pour cela, il suffit de propager simultanément les zones de sélections de chaque utilisateur jusqu'à atteindre la zone de sélection d'un autre utilisateur.

Les outils de manipulation basés sur les contraintes mécaniques présentent de nombreux avantages que ce soit en termes de performance ou d'efficacité. En revanche, l'utilisation de ces outils de manipulation dans un contexte applicatif autre que celui de l'assemblage mécanique semble difficile. La manipulation par liaison rotule pourrait être pertinente dans le cadre d'application vidéoludique car elle est très intuitive et présente un bon rapport entre vitesse et précision de manipulation. La méthode de manipulation par liaison pivot ne permet pas une interaction aussi rapide que la manipulation par liaison rotule. Elle reste pertinente dans les cas où la précision de manipulation est prioritaire sur la vitesse manipulation. La collaboration avec plus de deux utilisateurs n'a pas été abordée, cependant elle présente des possibilités d'interactions intéressantes. Dans le cas de la manipulation collaborative par liaison rotule, la présence de 3 utilisateurs permettrait de contrôler simultanément les 6 DdL de l'objet. Cette méthode de manipulation à trois a déjà été étudiée par [Fleury et al. \(2012\)](#) mais sans la présence du retour haptique. Dans le cas de la manipulation collaborative par liaison pivot, l'ajout d'un troisième utilisateur nécessiterait la refonte du modèle de manipulation. Un système de contrainte composé de trois pivots avec des axes de rotation orthogonaux les uns les autres et contrôlés par un utilisateur pour chaque axe pourrait être une solution. La collaboration de 4 utilisateurs me semble en revanche peu pertinente dans le cadre d'une simple tâche de manipulation car trois utilisateurs sont suffisants pour contrôler 6 DdL.

Enfin, il serait également intéressant de faire une utilisation mono-utilisateur et bi-manuelle de certaines méthodes d'interactions proposées. Cette possibilité d'interaction sort du contexte collaboratif et du sujet initial de cette thèse. Toutefois, des essais préliminaires suggèrent que les méthodes de paramétrage de sélection et de manipulation par liaison mécanique se prêtent assez naturellement à une utilisation individuelle et bi-manuelle. Dans le cas de la manipulation par liaison mécanique, une méthode individuelle passant d'une liaison par encastrement à une double liaison de pivot, quand l'utilisateur passe d'une manipulation mono-manuelle à une manipulation bi-manuelle serait très intuitive. Toutes ces possibilités constituent des pistes d'exploration

potentielles pour de futures thématiques de recherche.

Acronymes

| | | |
|---------------|---|----|
| AMMP | Another Molecular Modeling Program | 32 |
| CAO | Conception Assistée par Ordinateur | 15 |
| Coot | Crystallographic Object-Oriented Toolkit | 32 |
| CS | Conscience Situationnelle | 8 |
| CSCW | Computer Supported Cooperative Work | 13 |
| CSP | Conscience Situationnelle Partagée | 3 |
| CSE | Conscience Situationnelle d'Équipe | 9 |
| DARPA | Defense Advanced Research Projects Agency | 14 |
| DdL | Degrés de Liberté | 19 |
| DdR | Degrés de Retour | 84 |
| EVC | Environnement Virtuel Collaboratif | 3 |
| NAMD | Not Another (scalable) Molecular Dynamic | 32 |
| IMD | Interactive Molecular Dynamics | 40 |
| PCS | Paramétrage Collaboratif de Sélection | 66 |
| PIS | Paramétrage Individuel de Sélection | 67 |
| RMSD | Root Mean Square Deviation | 42 |
| RV | Réalité Virtuelle | 15 |
| SAGAT | Situation Awareness Global Assessment Technique | 9 |
| SAVER | Situation Aware Vigilant Emergency Reasoner | 12 |
| SIMNET | SIMulator NETworking | 14 |
| SPIDAR | SPace Interface Device for Artificial Reality | 17 |
| TCA | Travail Coopératif Autonome | 47 |
| TCAO | Travail Coopératif Assisté par Ordinateur | 3 |
| TCC | Travail Coopératif Coordonné | 47 |
| VMD | Visual Molecular Dynamics | 32 |
| VRMMS | Virtual Reality Molecular Modeling System | 32 |
| VRPN | Virtual-Reality Peripheral Network | 40 |

Bibliographie

- 3ds Max. Autodesk media and entertainment, 2014. URL <http://www.autodesk.com/products/autodesk-3ds-max>. visité le : 11-03-2014.
- M.Osama Alhalabi, Susumu Horiguchi, et Susumu Kunifuji. An experimental study on the effects of network delay in cooperative shared haptic virtual environment. *Computers & Graphics*, 27 (2) :205 – 213, 2003. ISSN 0097-8493. doi : [http://dx.doi.org/10.1016/S0097-8493\(02\)00277-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0097-8493(02)00277-7). URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0097849302002777>.
- Robert S. Allison, James E. Zacher, David Wang, et Joseph Shu. Effects of network delay on a collaborative motor task with telehaptic and televisual feedback. Dans : *Proceedings of the 2004 ACM SIGGRAPH international conference on Virtual Reality continuum and its applications in industry*, VRCAI '04, pages 375–381, New York, NY, USA, 2004. ACM. ISBN 1-58113-884-9. doi : 10.1145/1044588.1044670. URL <http://doi.acm.org/10.1145/1044588.1044670>.
- Floyd Henry Allport. *Social Psychology*. Johnson Reprint Corporation, 1924.
- Gordon W. Allport. The historical background of social psychology. Dans : Lindzey G., editeur, *Handbook of social psychology*, volume 1, page 3–56. Addison-Wesley, 1954.
- Omar Alnuaimi, Lionel Robert, Jr., et Likoebe Maruping. Team size, dispersion, and social loafing in technology-supported teams : A perspective on the theory of moral disengagement. *J. Manage. Inf. Syst.*, 27(1) :203–230, July 2010. ISSN 0742-1222. doi : 10.2753/MIS0742-1222270109. URL <http://dx.doi.org/10.2753/MIS0742-1222270109>.
- Cay Anderson-Hanley, Amanda L. Snyder, Joseph P. Nimon, et Arciero Paul J. Social facilitation in virtual reality-enhanced exercise : competitiveness moderates exercise effort of older adults. *Clinical Interventions in Aging*, 2011 :6 :275–280, 10 2011. doi : 10.2147/CIA.S25337.
- Mark H. Anshel. Examining social loafing among elite female rowers as a function of task duration and mood. *Journal of Sport Behavior*, 56(2), 03 1995.
- Çağatay Başdoğan, Chih-Hao Ho, Mandayam A. Srinivasan, et Mel Slater. An experimental study on the role of touch in shared virtual environments. *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.*, 7(4) :443–460, December 2000. ISSN 1073-0516. doi : 10.1145/365058.365082. URL <http://doi.acm.org/10.1145/365058.365082>.
- R.M. Baecker. *Readings in Human-Computer Interaction : Toward the Year 2000*. The Morgan Kaufmann Series in Interactive Technologies Series. Morgan Kaufmann, 1995. ISBN 9781558602465.

- M. Bergamasco, B. Allotta, L. Bosio, L. Ferretti, G. Parrini, G.M. Prisco, F. Salsedo, et G. Sarti. An arm exoskeleton system for teleoperation and virtual environments applications. Dans : *Robotics and Automation, 1994. Proceedings., 1994 IEEE International Conference on*, pages 1449–1454 vol.2, 1994. doi : 10.1109/ROBOT.1994.351286.
- Milind Bhandarkar, Gila Budescu, William F. Humphrey, Jesus A. Izaguirre, Sergei Izrailev, Laxmikant V. Kale, Dorina Kosztin, Ferenc Molnar, James C. Phillips, et Klaus Schulten. Biocore : A collaboratory for structural biology. Dans : *Proceedings of the SCS International Conference on Web-Based Modeling and Simulation*, page 242–251, 1999.
- J. Blake et H.B. Gurocak. Haptic glove with mr brakes for virtual reality. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, 14(5) :606–615, 2009. ISSN 1083-4435. doi : 10.1109/TMECH.2008.2010934.
- Blender. Blender foundation, 2014. URL <http://www.blender.org>. visité le : 11-03-2014.
- C.A. Bolstad, H. Cuevas, C. Gonzalez, et M. Schneider. Modeling shared situation awareness. Dans : *Proceedings of the 14th Conference on Behavior Representation in Modeling and Simulation (BRIMS)*, Los Angeles, 2005. ISBN 7705659859.
- Cheryl A. Bolstad et Mica R. Endsley. The effect of task load and shared displays on team situation awareness. Dans : *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, number 44 in Human Factors and Ergonomics Society, pages 189–192, 2000. doi : 10.1177/154193120004400150. URL <http://pro.sagepub.com/content/44/1/189.abstract>.
- G.L. Bon. *Psychologie des foules*. Bibliothèque de philosophie contemporaine. F. Alcan, 1896. URL <http://books.google.fr/books?id=yKrZAAAAMAAJ>.
- Charles F. Bond et Linda J. Titus. Social facilitation : A meta-analysis of 241 studies. *Psychological Bulletin*, 94(2) :265–292, 9 1983. doi : 10.1037/0033-2909.94.2.265.
- A. Boukerche, S. Shirmohammadi, et A. Hossein. The effect of prediction on collaborative haptic applications. Dans : *Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2006 14th Symposium on*, pages 515–516, 2006. doi : 10.1109/HAPTIC.2006.1627096. URL <http://dx.doi.org/10.1109/HAPTIC.2006.1627096>.
- Doug A. Bowman, Ernst Kruijff, Joseph J. LaViola, et Ivan Poupyrev. *3D user interfaces : theory and practice*. Pearson Education. Addison-Wesley, 2005. ISBN 9780201758672.
- Frederick P. Brooks, Jr., Ming Ouh-Young, James J. Batter, et P. Jerome Kilpatrick. Project gropehaptic displays for scientific visualization. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 24 (4) :177–185, September 1990. ISSN 0097-8930. doi : 10.1145/97880.97899. URL <http://doi.acm.org/10.1145/97880.97899>.
- R. Brown. *Social psychology*. Free Press, 1965. URL <http://books.google.fr/books?id=HKq3AAAIAAJ>.
- BSTC. Rapport d'enquête sur un événement aéronautique / situation dangereuse - irrégularité d'exploitation du service atc. Technical report, Bureau de la sécurité des transports du Canada, 2000. URL <http://www.tsb-bst.gc.ca/fra/rapports-reports/aviation/2000/a00p0199/a00p0199.pdf>.

- Laroussi Buoguila, Masahiro Ishii, et Makoto Sato. Scaleable spidar : a haptic interface for human-scale virtual environments. Dans : Stephen Brewster et Roderick Murray-Smith, éditeurs, *Haptic Human-Computer Interaction*, volume 2058 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 182–193. Springer Berlin Heidelberg, 2001. ISBN 978-3-540-42356-0. doi : 10.1007/3-540-44589-7_20. URL http://dx.doi.org/10.1007/3-540-44589-7_20.
- Pietro Buttolo, Roberto Oboe, et Blake Hannaford. Architectures for shared haptic virtual environments. *Computers & Graphics*, 21(4) :421 – 429, 1997. ISSN 0097-8493. doi : [http://dx.doi.org/10.1016/S0097-8493\(97\)00019-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0097-8493(97)00019-8). URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0097849397000198>. Haptic Displays in Virtual Environments and Computer Graphics in Korea.
- Andrew Chan, Karon MacLean, et Joanna McGrenere. Designing haptic icons to support collaborative turn-taking. *Int. J. Hum.-Comput. Stud.*, 66(5) :333–355, May 2008. ISSN 1071-5819. doi : 10.1016/j.ijhcs.2007.11.002. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhcs.2007.11.002>.
- Jeffrey W. Chastine, Jeremy C. Brooks, Ying Zhu, G. Scott Owen, Robert W. Harrison, et Irene T. Weber. Ammp-vis : a collaborative virtual environment for molecular modeling. Dans : *Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology*, VRST '05, pages 8–15, New York, NY, USA, 2005. ACM. ISBN 1-59593-098-1. doi : 10.1145/1101616.1101620. URL <http://doi.acm.org/10.1145/1101616.1101620>.
- Amine Chellali, Cédric Dumas, et Isabelle Milleville. Haptic communication to enhance collaboration in virtual environments. Dans : *Proceedings of the 28th Annual European Conference on Cognitive Ergonomics*, ECCE '10, pages 83–90, New York, NY, USA, 2010. ACM. ISBN 978-1-60558-946-6. doi : 10.1145/1962300.1962319. URL <http://doi.acm.org/10.1145/1962300.1962319>.
- Laku Chidambaram et Lai Lai Tung. Is out of sight, out of mind? an empirical study of social loafing in technology-supported groups. *Info. Sys. Research*, 16(2) :149–168, June 2005. ISSN 1526-5536. doi : 10.1287/isre.1050.0051. URL <http://dx.doi.org/10.1287/isre.1050.0051>.
- Seth Cooper, Adrien Treuille, Janos Barbero, Andrew Leaver-Fay, Kathleen Tuite, Firas Khatib, Alex Cho Snyder, Michael Beenen, David Salesin, David Baker, et Zoran Popović. The challenge of designing scientific discovery games. Dans : *Proceedings of the Fifth International Conference on the Foundations of Digital Games*, FDG '10, pages 40–47, New York, NY, USA, 2010. ACM. ISBN 978-1-60558-937-4. doi : 10.1145/1822348.1822354. URL <http://doi.acm.org/10.1145/1822348.1822354>.
- April H. Crusco et Christopher G. Wetzal. The midas touch : The effects of interpersonal touch on restaurant tipping. *Personality and Social Psychology Bulletin*, 10(4) :512–517, 1984. doi : 10.1177/0146167284104003. URL <http://psp.sagepub.com/content/10/4/512.abstract>.
- Lawrence D. Cutler, Bernd Fröhlich, et Pat Hanrahan. Two-handed direct manipulation on the responsive workbench. Dans : *Proceedings of the 1997 Symposium on Interactive 3D Graphics*, I3D '97, pages 107–114, New York, NY, USA, 1997. ACM. ISBN 0-89791-884-3. doi : 10.1145/253284.253315. URL <http://doi.acm.org.gate6.inist.fr/10.1145/253284.253315>.

- Michael Diehl et Wolfgang Stroebe. Productivity loss in idea-generating groups : Tracking down the blocking effect. *Journal of Personality and Social Psychology*, 61(3), 1991. doi : 10.1037/0022-3514.61.3.392. URL <http://dx.doi.org/10.1037/0022-3514.61.3.392>.
- T. Duval, A. Lecuyer, et S. Thomas. Skewer : a 3d interaction technique for 2-user collaborative manipulation of objects in virtual environments. Dans : *3D User Interfaces, 2006. 3DUI 2006. IEEE Symposium on*, pages 69–72, 2006. doi : 10.1109/VR.2006.119.
- R.E. Ellis, O.M. Ismaeil, et M.G. Lipsett. Design and evaluation of a high-performance haptic interface. *Robotica*, 14 :321–327, 5 1996. ISSN 1469-8668. doi : 10.1017/S0263574700019639. URL http://journals.cambridge.org/article_S0263574700019639.
- Mica R. Endsley. Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. *Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 37(1) :32–64, 1995. doi : 10.1518/001872095779049543. URL <http://hfs.sagepub.com/content/37/1/32.abstract>.
- Mica R. Endsley. Theoretical underpinnings of situation awareness : a critical review. Dans : M. R. Endsley et D. J. Garland, éditeurs, *Situation Awareness Analysis and Measurement*. Lawrence Erlbaum Associates, Mahwah, NJ, USA, 2000.
- M.R. Endsley. Situation awareness global assessment technique (sagat). Dans : *Aerospace and Electronics Conference, 1988. NAECON 1988., Proceedings of the IEEE 1988 National*, pages 789–795 vol.3, 1988. doi : 10.1109/NAECON.1988.195097.
- Damien Erceau et Nicolas Guéguen. Tactile contact and evaluation of the toucher. *The Journal of Social Psychology*, 147(4) :441–444, 2007. doi : 10.3200/SOCP.147.4.441-444. URL <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.3200/SOCP.147.4.441-444>. PMID : 17955753.
- Cédric Fleury, Thierry Duval, Valérie Gouranton, et Anthony Steed. Evaluation of remote collaborative manipulation for scientific data analysis. Dans : *Proceedings of the 18th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, VRST '12*, pages 129–136, New York, NY, USA, 2012. ACM. ISBN 978-1-4503-1469-5. doi : 10.1145/2407336.2407361. URL <http://doi.acm.org.gate6.inist.fr/10.1145/2407336.2407361>.
- Mahyar Fotoohi, Shahin Sirouspour, et David Capson. Stability and performance analysis of centralized and distributed multi-rate control architectures for multi-user haptic interaction. *Int. J. Rob. Res.*, 26(9) :977–994, September 2007. ISSN 0278-3649. doi : 10.1177/0278364907082049. URL <http://dx.doi.org/10.1177/0278364907082049>.
- Alberto Gallace et Charles Spence. The science of interpersonal touch : An overview. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 34(2) :246 – 259, 2010. ISSN 0149-7634. doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.neubiorev.2008.10.004>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0149763408001723>. Touch, Temperature, Pain/Itch and Pleasure.
- Arturo S. García, José P. Molina, Diego Martínez, et Pascual González. Enhancing collaborative manipulation through the use of feedback and awareness in cves. Dans : *Proceedings of The 7th ACM SIGGRAPH International Conference on Virtual-Reality Continuum and Its Applications in Industry, VRCAI '08*, pages 32 :1–32 :5, New York, NY, USA, 2008. ACM. ISBN 978-1-60558-335-8. doi : 10.1145/1477862.1477904. URL <http://doi.acm.org/10.1145/1477862.1477904>.

- Mathieu Gautier, Claude Andriot, et Pierre Ehanno. 6dof haptic cooperative virtual prototyping over high latency networks. Dans : Manuel Ferre, editeur, *Haptics : Perception, Devices and Scenarios*, volume 5024 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 876–885. Springer Berlin Heidelberg, 2008. ISBN 978-3-540-69056-6. doi : 10.1007/978-3-540-69057-3_110. URL http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-69057-3_110.
- Tom Gross. Supporting effortless coordination : 25 years of awareness research. *Computer Supported Cooperative Work (CSCW)*, pages 1–50, 2013. ISSN 0925-9724.
- Raphaela Groten, Daniela Feth, Roberta Klatzky, Angelika Peer, et Martin Buss. Efficiency analysis in a collaborative task with reciprocal haptic feedback. Dans : *Proceedings of the 2009 IEEE/RSJ international conference on Intelligent robots and systems, IROS'09*, pages 461–466, Piscataway, NJ, USA, 2009. IEEE Press. ISBN 978-1-4244-3803-7. URL <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1733343.1733448>.
- Jonathan Grudin. Computer-supported cooperative work : History and focus. *Computer*, 27(5) :19–26, May 1994. ISSN 0018-9162. doi : 10.1109/2.291294. URL <http://dx.doi.org/10.1109/2.291294>.
- Nicolas Guéguen. Nonverbal encouragement of participation in a course : the effect of touching. *Social Psychology of Education*, 7(1) :89–98, 2004. ISSN 1381-2890. doi : 10.1023/B:SPOE.0000010691.30834.14. URL <http://dx.doi.org/10.1023/B%3ASPOE.0000010691.30834.14>.
- Chris Gunn. Collaborative virtual sculpting with haptic feedback. *Virtual Reality*, 10(2) :73–83, September 2006. ISSN 1359-4338. doi : 10.1007/s10055-006-0044-4.
- Carl Gutwin et Saul Greenberg. Design for individuals, design for groups : Tradeoffs between power and workspace awareness. Dans : *Proceedings of the 1998 ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work, CSCW '98*, pages 207–216, New York, NY, USA, 1998. ACM. ISBN 1-58113-009-0. doi : 10.1145/289444.289495. URL <http://doi.acm.org.gate6.inist.fr/10.1145/289444.289495>.
- Carl Gutwin et Saul Greenberg. The effects of workspace awareness support on the usability of real-time distributed groupware. *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.*, 6(3) :243–281, September 1999. ISSN 1073-0516. doi : 10.1145/329693.329696. URL <http://doi.acm.org/10.1145/329693.329696>.
- Carl Gutwin et Saul Greenberg. A descriptive framework of workspace awareness for real-time groupware. *Computer Supported Cooperative Work (CSCW)*, 11(3-4) :411–446, 2002. ISSN 0925-9724.
- Olivier Hannes et Pinkwart Niels. Collaborative virtual environments - hype or hope for cscw ? Technical report, Technische Universität Clausthal, 2007.
- J. Harrauld et T. Jefferson. Shared situational awareness in emergency management mitigation and response. Dans : *System Sciences, 2007. HICSS 2007. 40th Annual Hawaii International Conference on*, pages 23–23, 2007. doi : 10.1109/HICSS.2007.481.
- Xue-Jian He et Kup-Sze Choi. Stable Haptic Rendering for Physics Engines Using Inter-Process Communication and Remote Virtual Coupling. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 4(1) :15–24, 2013.

- Ken Hinckley, Randy Pausch, John C. Goble, et Neal F. Kassell. A survey of design issues in spatial input. Dans : *Proceedings of the 7th annual ACM symposium on User interface software and technology*, UIST '94, pages 213–222, New York, NY, USA, 1994. ACM. ISBN 0-89791-657-3. doi : 10.1145/192426.192501. URL <http://doi.acm.org/10.1145/192426.192501>.
- C. Ho, C. Başdoğan, M. Slater, N. Durlach, et M. A. Srinivasan. An experiment on the influence of haptic communication on the sense of being together. Dans : *In Proceedings of the British Telecom Workshop on Presence in Shared Virtual Environments*, pages 525–532. ACM Press, 1998.
- Sture Holm. A simple sequentially rejective multiple test procedure. *Scandinavian Journal of Statistics*, 6(2) :pp. 65–70, 1979. ISSN 03036898. URL <http://www.jstor.org/stable/4615733>.
- I.P. Howard et B.J. Rogers. *Perceiving in Depth, Volume 1 : Basic Mechanisms*. Oxford Psychology Series. Oxford University Press, USA, 2012. ISBN 9780199764143.
- Pingguo Huang, Yutaka Ishibashi, Norishige Fukushima, et Shinji Sugawara. Collaborative haptic play with building blocks. Dans : *Proceedings of the International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology*, ACE '09, pages 277–280, New York, NY, USA, 2009. ACM. ISBN 978-1-60558-864-3. doi : 10.1145/1690388.1690435. URL <http://doi.acm.org/10.1145/1690388.1690435>.
- Pingguo Huang, Yutaka Ishibashi, Norishige Fukushima, et Shinji Sugawara. Interactivity improvement of group synchronization control in collaborative haptic play with building blocks. Dans : *Proceedings of the 9th Annual Workshop on Network and Systems Support for Games*, NetGames '10, pages 2 :1–2 :6, Piscataway, NJ, USA, 2010. IEEE Press. ISBN 978-1-4244-8355-6. URL <http://dl.acm.org.gate6.inist.fr/citation.cfm?id=1944796.1944798>.
- William Humphrey, Andrew Dalke, et Klaus Schulten. Vmd : Visual molecular dynamics. *Journal of Molecular Graphics*, 14(1) :33 – 38, 1996. ISSN 0263-7855. doi : [http://dx.doi.org/10.1016/0263-7855\(96\)00018-5](http://dx.doi.org/10.1016/0263-7855(96)00018-5). URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0263785596000185>.
- Matthew A. Hutchins, Duncan R. Stevenson, Chris Gunn, Alexander Krumpholz, Tony Adriaansen, Brian Pyman, et Stephen O'Leary. Communication in a networked haptic virtual environment for temporal bone surgery training. *Virtual Reality*, 9(2-3) :97–107, 2006. ISSN 1359-4338. doi : 10.1007/s10055-005-0015-1. URL <http://dx.doi.org/10.1007/s10055-005-0015-1>.
- Rosa Iglesias, Sara Casado, Teresa Gutiérrez, Alejandro García-Alonso, Wai Yu, et Alan Marshall. Simultaneous remote haptic collaboration for assembling tasks. *Multimedia Systems*, 13(4) :263–274, 2008. ISSN 0942-4962. doi : 10.1007/s00530-007-0108-7. URL <http://dx.doi.org/10.1007/s00530-007-0108-7>.
- Alan G Ingham, George Levinger, James Graves, et Vaughn Peckham. The ringelmann effect : Studies of group size and group performance. *Journal of Experimental Social Psychology*, 10 (4) :371 – 384, 1974. ISSN 0022-1031. doi : [http://dx.doi.org/10.1016/0022-1031\(74\)90033-X](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1031(74)90033-X). URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/002210317490033X>.
- M. Ishii et M. Sato. 3d spatial interface device using tensed strings. *PRESENCE-Teleoperators and Virtual Environments*, 3(1) :81–86, 1994.

- Masahiro Ishii, Masanori Nakata, et Makoto Sato. Networked spidar : A networked virtual environment with visual, auditory, and haptic interactions. *Presence, Teleoperators and Virtual Environments*, 3(4) :351–359, 1994.
- Hiroo Iwata. Artificial reality with force-feedback : Development of desktop virtual space with compact master manipulator. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 24(4) : 165–170, September 1990. ISSN 0097-8930. doi : 10.1145/97880.97897. URL <http://doi.acm.org/10.1145/97880.97897>.
- J. M. Jackson et K. D. Williams. Social loafing on difficult task : Working collectively can improve performance. *Journal of Personality and Social Psychology*, 49(4) :937–942, 10 1985.
- Randolph L. Jackson et Eileen Fagan. Collaboration and learning within immersive virtual reality. Dans : *Proceedings of the Third International Conference on Collaborative Virtual Environments*, CVE '00, pages 83–92, New York, NY, USA, 2000. ACM. ISBN 1-58113-303-0. doi : 10.1145/351006.351018. URL <http://doi.acm.org/10.1145/351006.351018>.
- Yasir Javed, Tony Norris, et David Johnston. Measuring shared and team situation awareness of emergency decision makers. *International Journal of Information Systems for Crisis Response and Management (IJISCRAM)*, 4(4) :1–15, 2012. doi : 10.4018/jiscrm.2012100101.
- Caroline Jay, Mashhuda Glencross, et Roger Hubbard. Modeling the effects of delayed haptic and visual feedback in a collaborative virtual environment. *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.*, 14(2), August 2007. ISSN 1073-0516. doi : 10.1145/1275511.1275514. URL <http://doi.acm.org/10.1145/1275511.1275514>.
- Robert Johansen. *GroupWare : Computer Support for Business Teams*. The Free Press, New York, NY, USA, 1988. ISBN 0029164915.
- L.V. Kalé, M. Bhandarkar, R. Brunner, N. Krawetz, J. Phillips, et A. Shinozaki. Namd : A case study in multilingual parallel programming. Dans : Zhiyuan Li, Pen-Chung Yew, Siddharta Chatterjee, Chua-Huang Huang, P. Sadayappan, et David Sehr, éditeurs, *Languages and Compilers for Parallel Computing*, volume 1366 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 367–381. Springer Berlin Heidelberg, 1998. ISBN 978-3-540-64472-9. doi : 10.1007/BFb0032705. URL <http://dx.doi.org/10.1007/BFb0032705>.
- Beth Kapes. *The Gale Encyclopedia of Medicine*, page Sensory Integration Disorder. Cengage Gale, 3rd edition, 2006. ISBN 9781414403687.
- Steven J. Karau et Kipling D. Williams. Social loafing : A meta-analytic review and theoretical integration. *Journal of Personality and Social Psychology*, 65(4), 1993.
- Steven J. Karau et Kipling D. Williams. The effects of group cohesiveness on social loafing and social compensation. *Group Dynamics : Theory, Research, and Practice*, 1(2), 1997. doi : 10.1037/1089-2699.1.2.156. URL <http://dx.doi.org/10.1037/1089-2699.1.2.156>.
- Jung Kim, Hyun Kim, Boon K. Tay, Manivannan Muniyandi, Mandayam A. Srinivasan, Joel Jordan, Jesper Mortensen, Manuel Oliveira, et Mel Slater. Transatlantic touch : a study of haptic collaboration over long distance. *Presence : Teleoper. Virtual Environ.*, 13(3) :328–337, July 2004. ISSN 1054-7460. doi : 10.1162/1054746041422370. URL <http://dx.doi.org/10.1162/1054746041422370>.

- S. Kim, S. Hasegawa, Y. Koike, et M. Sato. Tension based 7-dof force feedback device : Spidar-g. Dans : *Virtual Reality, 2002. Proceedings. IEEE*, pages 283–284, 2002. doi : 10.1109/VR.2002.996540.
- T. Koyama, I. Yamano, K. Takemura, et T. Maeno. Multi-fingered exoskeleton haptic device using passive force feedback for dexterous teleoperation. Dans : *Intelligent Robots and Systems, 2002. IEEE/RSJ International Conference on*, volume 3, pages 2905–2910 vol.3, 2002. doi : 10.1109/IRDS.2002.1041713.
- Benjamin M. Lambeth, James LaPlant, Elena Clapan, et Felix G. Hamza-Lup. The effects of network delay on task performance in a visual-haptic collaborative environment. Dans : *Proceedings of the 47th Annual Southeast Regional Conference, ACM-SE 47*, pages 61 :1–61 :5, New York, NY, USA, 2009. ACM. ISBN 978-1-60558-421-8. doi : 10.1145/1566445.1566527. URL <http://doi.acm.org/10.1145/1566445.1566527>.
- Bibb Latane, Kipling Williams, et Stephen Harkins. Many hands make light the work : The causes and consequences of social loafing. *Journal of Personality and Social Psychology*, 37 (6) :822–832, jun 1979.
- Christopher D. Lee, Dale A. Lawrence, et Lucy Y. Pao. A high-bandwidth force-controlled haptic interface. Dans : *Proceedings of Symposium on Haptic Interfaces for Teleoperation and Virtual Reality*, November 2000.
- Jun Lee, Jee-In Kim, et Kang Lin-Woo. A collaborative molecular modeling environment using a virtual tunneling service. *Journal of Biomedicine and Biotechnology*, 2012(2) :146–157, 2012. ISSN 1573-4099. doi : 10.1155/2012/546521.
- Timothy Lenoir. Programming theatres of war : Gamemakers as soldiers. *Latham, R. Bombs and Bandwidth : The emerging relationship between information technology and security*, 14 : 2006, 2003.
- Shiyong Lin, Roger J. Narayan, et Yuan-Shin Lee. Hybrid client–server architecture and control techniques for collaborative product development using haptic interfaces. *Computers in Industry*, 61(1) :83 – 96, 2010. ISSN 0166-3615. doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.compind.2009.07.004>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361509001389>.
- G.L. Long et C.L. Collins. A pantograph linkage parallel platform master hand controller for force-reflection. Dans : *Robotics and Automation, 1992. Proceedings., 1992 IEEE International Conference on*, volume 1, pages 390–395 vol.1, 1992. doi : 10.1109/ROBOT.1992.220308.
- K. J. Lynch, J. M. Snyder, D. R. Vogel, et W. K. McHenry. The arizona analyst information system : Supporting collaborative research on international technological trends. Dans : S. Gibbs et A. A. Verrijn-Stuart, éditeurs, *Multi-User Interfaces and Applications : Proceedings of the IFIP WG 8.4 Conference*, pages 159–174. North-Holland, Amsterdam, 1990.
- Sato Makoto, Hirata Yukihiro, et Hiroshi Kawarada. Space interface device for artificial reality - spidar. *Systems and Computers in Japan*, 23(12) :44–54, 1992. doi : 10.1002/scj.4690231204. URL <http://dx.doi.org/10.1002/scj.4690231204>.

- James Marsh, Mashhuda Glencross, Steve Pettifer, et Roger Hubbard. A network architecture supporting consistent rich behavior in collaborative interactive applications. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 12(3) :405–416, May 2006. ISSN 1077-2626. doi : 10.1109/TVCG.2006.40. URL <http://dx.doi.org/10.1109/TVCG.2006.40>.
- William A. McNeely, Kevin D. Puterbaugh, et James J. Troy. Advances in voxel-based 6-dof haptic rendering. Dans : *ACM SIGGRAPH 2005 Courses*, SIGGRAPH '05, New York, NY, USA, 2005. ACM. doi : 10.1145/1198555.1198606. URL <http://doi.acm.org/10.1145/1198555.1198606>.
- Xuan-Yu Meng, Hong-Xing Zhang, Mihaly Mezei, et Meng Cui. Molecular docking : A powerful approach for structure-based drug discovery. *Current Computer Aided-Drug Design*, 7(2) : 146–157, 2011. ISSN 1573-4099. doi : 10.2174/157340911795677602.
- Peter R. Meudell, Graham J. Hitch, et Petty Kirby. Are two heads better than one? experimental investigations of the social facilitation of memory. *Applied Cognitive Psychology*, 6(6) :525–543, 1992. ISSN 1099-0720. doi : 10.1002/acp.2350060606. URL <http://dx.doi.org/10.1002/acp.2350060606>.
- Jeffrey A. Miles et Jerald Greenberg. Using punishment threats to attenuate social loafing effects among swimmers. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 56(2) : 246 – 265, 1993. ISSN 0749-5978. doi : <http://dx.doi.org/10.1006/obhd.1993.1054>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S074959788371054X>.
- Margaret Minsky, Ouh-young Ming, Oliver Steele, Frederick P. Brooks, Jr., et Max Behensky. Feeling and seeing : issues in force display. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 24(2) :235–241, February 1990. ISSN 0097-8930. doi : 10.1145/91394.91451. URL <http://doi.acm.org.gate6.inist.fr/10.1145/91394.91451>.
- Jonas Moll et Eva-Lotta Sallnäs. Communicative functions of haptic feedback. Dans : M.Ercan Altinsoy, Ute Jekosch, et Stephen Brewster, éditeurs, *Haptic and Audio Interaction Design*, volume 5763 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 1–10. Springer Berlin Heidelberg, 2009. ISBN 978-3-642-04075-7. doi : 10.1007/978-3-642-04076-4_1. URL http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-04076-4_1.
- Ashley Montagu. The skin, touch, and human development. *Clinics in Dermatology*, 2(4) :17 – 26, 1984. ISSN 0738-081X. doi : [http://dx.doi.org/10.1016/0738-081X\(84\)90043-9](http://dx.doi.org/10.1016/0738-081X(84)90043-9). URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0738081X84900439>.
- G. Moser. *Psychologie environnementale : Les relations homme-environnement*. Ouvrages psychologiques : LMD. De Boeck Supérieur, 2009. ISBN 9782804117535. URL <http://books.google.fr/books?id=OHTdldgMIIQC>.
- Hiroaki Nishino, Kouichi Utsumiya, Kazuyoshi Korida, Atsunori Sakamoto, et Kazuyuki Yoshida. A method for sharing interactive deformations in collaborative 3d modeling. Dans : *Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, VRST '99, pages 116–123, New York, NY, USA, 1999. ACM. ISBN 1-58113-141-0. doi : 10.1145/323663.323682. URL <http://doi.acm.org/10.1145/323663.323682>.
- Albert A Nofi. Defining and measuring shared situational awareness. Technical Report November, Center for Naval Analyses, 2000.

- J. Norman et F.G. Hamza-Lup. Challenges in the deployment of visuo-haptic virtual environments on the internet. Dans : *Computer and Network Technology (ICCNT), 2010 Second International Conference on*, pages 33–37, 2010. doi : 10.1109/ICCNT.2010.88. URL <http://dx.doi.org/10.1109/ICCNT.2010.88>.
- N. Nova, T. Wehrle, J. Goslin, Y. Bourquin, et P. Dillenbourg. Collaboration in a multi-user game : impacts of an awareness tool on mutual modeling. *Multimedia Tools and Applications*, 32(2) :161–183, November 2006. ISSN 1380-7501.
- Ian Oakley, Stephen Brewster, et Philip Gray. Can You Feel the Force? An Investigation of Haptic Collaboration in Shared Editors. Dans : *The proceedings of EuroHaptics*, pages 54–59, 2001.
- Jong-Seok Oh, Young-Min Han, Sang-Rock Lee, et Seung-Bok Choi. A 4-dof haptic master using er fluid for minimally invasive surgery system application. *Smart Materials and Structures*, 22(4) :045004, 2013. URL <http://stacks.iop.org/0964-1726/22/i=4/a=045004>.
- Alex Olwal et Steven Feiner. The flexible pointer : An interaction technique for augmented and virtual reality. Dans : *Proceedings of ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pages 81–82, 2003.
- Michael Ortega et Sabine Coquillart. Prop-Based Haptic Interaction with Co-location and Immersion : an Automotive Application. Dans : *HAVE 2005 - IEEE International Workshop on Haptic Audio Visual Environments and their Applications*, Ottawa, Ontario, Canada, October 2005. URL <http://hal.inria.fr/inria-00000962>.
- Elaine Ou et Çağatay Başdoğan. Network Considerations for a Dynamic Shared Haptic Environment. Dans : *Proceeding of The National Conference on Undergraduate Research (NCUR) 2002*, 2002.
- M. Ouh-young, M. Pique, J. Hughes, N. Srinivasan, et Jr. Brooks, F.P. Using a manipulator for force display in molecular docking. Dans : *Robotics and Automation, 1988. Proceedings., 1988 IEEE International Conference on*, pages 1824–1829 vol.3, 1988. doi : 10.1109/ROBOT.1988.12330.
- Sung Park et Richard Catrambon. Social facilitation effects of virtual humans. Dans : *Proceedings of 29th Annual Cognitive Science Society*, pages 557–562, 2007. ISBN 0-9768318-3.
- A.U. Pehlivan, O. Celik, et M.K. O’Malley. Mechanical design of a distal arm exoskeleton for stroke and spinal cord injury rehabilitation. Dans : *Rehabilitation Robotics (ICORR), 2011 IEEE International Conference on*, pages 1–5, 2011. doi : 10.1109/ICORR.2011.5975428.
- P.Peter Perla, Michael Markowitz, Albert A Nofi, et Christopher Weuve. Gaming and Shared Situation Awareness. Technical Report November, Center for Naval Analyses, 2000.
- J. Perret et L. Dominjon. The inca 6d : a commercial stringed haptic system suitable for industrial applications. Dans : *Joint Virtual Reality Conference*, Springer Tracts in Advanced Robotics, 2009.
- Berkelman Peter J., Butler Zack J., et Hollis Ralph L. Design of a hemispherical magnetic levitation haptic interface device. Dans : *in Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting*,

- Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pages 17–22, 1996.
- Jan Pečiva. *Active Transactions in Collaborative Virtual Environments*. PhD thesis, Brno University of Technology, 2007.
- F. Picon, M. Ammi, et P. Bourdot. Case study of haptic methods for selection on cad models. Dans : *Virtual Reality Conference, 2008. VR '08. IEEE*, pages 209–212, 2008. doi : 10.1109/VR.2008.4480775.
- Martin Pielot, Oliver Krull, et Susanne Boll. Where is my team : Supporting situation awareness with tactile displays. Dans : *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '10, pages 1705–1714, New York, NY, USA, 2010. ACM. ISBN 978-1-60558-929-9. doi : 10.1145/1753326.1753581. URL <http://doi.acm.org/10.1145/1753326.1753581>.
- J. Pierce, Andrew S. Forsberg, Matthew J. Conway, Seung Hong, Robert C. Zeleznik, et Mark R. Mine. Image plane interaction techniques in 3D immersive environments. Dans : *Proceedings of the 1997 symposium on Interactive 3D graphics*, I3D '97, page 39ff., New York, 1997. ACM. ISBN 0-89791-884-3. doi : 10.1145/253284.253303. URL <http://doi.acm.org/10.1145/253284.253303>.
- Stefanie Pietsch et Petra Jansen. Different mental rotation performance in students of music, sport and education. *Learning and Individual Differences*, 22(1) :159 – 163, 2012. ISSN 1041-6080. doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.lindif.2011.11.012>.
- Sherry L. Piezon et Robin L. Donaldson. Online groups and social loafing : Understanding student-group interactions. *Online Journal of Distance Learning Administration*, 8(4), 1 2005.
- MarcioS. Pinho, DougA. Bowman, et CarlaM.DalSasso Freitas. Cooperative object manipulation in collaborative virtual environments. *Journal of the Brazilian Computer Society*, 14(2) :53–67, 2008. ISSN 0104-6500. doi : 10.1007/BF03192559. URL <http://dx.doi.org/10.1007/BF03192559>.
- I. Poupyrev, T. Ichikawa, S. Weghorst, et M. Billinghurst. Egocentric object manipulation in virtual environments : Empirical evaluation of interaction techniques. *Computer Graphics Forum*, 17(3) :41–52, 1998. ISSN 1467-8659. doi : 10.1111/1467-8659.00252. URL <http://dx.doi.org/10.1111/1467-8659.00252>.
- K.B. Reed et M.A. Peshkin. Physical collaboration of human-human and human-robot teams. *Haptics, IEEE Transactions on*, 1(2) :108–120, July 2008. ISSN 1939-1412. doi : 10.1109/TOH.2008.13.
- Philippe Renevier. *Systèmes Mixtes Collaboratifs sur Supports Mobiles : Conception et Réalisation*. PhD thesis, Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2005. URL <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00008264>.
- Maximilien Ringelmann. Recherche sur les moteurs animés travail de l'homme. *Annales de l'Institut national agronomique : administration, enseignement et recherche*, 1913. ISSN 03730816. URL <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k54409695>.

- Jeremy Roschelle et Stephanie D. Teasley. The construction of shared knowledge in collaborative problem solving. Dans : Claire O'Malley, editeur, *Computer Supported Collaborative Learning*, volume 128 de *NATO ASI Series*, pages 69–97. Springer Berlin Heidelberg, 1995. ISBN 978-3-642-85100-1. doi : 10.1007/978-3-642-85098-1_5. URL http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-85098-1_5.
- Roy A. Ruddle, Justin C. D. Savage, et Dylan M. Jones. Symmetric and asymmetric action integration during cooperative object manipulation in virtual environments. *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.*, 9(4) :285–308, December 2002. ISSN 1073-0516. doi : 10.1145/586081.586084. URL <http://doi.acm.org/10.1145/586081.586084>.
- José María Sabater, Rafael Aracil, Roque J. Saltaren, et Luis Payá. A novel parallel haptic interface for telerobotic systems. Dans : Manuel Ferre, Martin Buss, Rafael Aracil, Claudio Melchiorri, et Carlos Balaguer, editeurs, *Advances in Telerobotics*, volume 31 de *Springer Tracts in Advanced Robotics*, pages 45–59. Springer Berlin Heidelberg, 2007. ISBN 978-3-540-71363-0. doi : 10.1007/978-3-540-71364-7_4. URL http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-71364-7_4.
- Eva-Lotta Sallnäs et Shumin Zhai. Collaboration meets fitts' law : Passing virtual objects with and without haptic force feedback. Dans : *Proceedings of INTERACT 2003*, pages 97–104. IOS Press, 2003. QC 20100630.
- Eva-Lotta Sallnäs, Kirsten Rasmussen-Gröhn, et Calle Sjöström. Supporting presence in collaborative environments by haptic force feedback. *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.*, 7(4) :461–476, December 2000. ISSN 1073-0516. doi : 10.1145/365058.365086. URL <http://doi.acm.org/10.1145/365058.365086>.
- Lelyn D. Saner, Cheryl A. Bolstad, Cleotilde Gonzalez, et Haydee M. Cuevas. Measuring and predicting shared situation awareness in teams. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 3(3) :280–308, 2009. doi : 10.1518/155534309X474497. URL <http://edm.sagepub.com/content/3/3/280.abstract>.
- Ganesh Sankaranarayanan et Blake Hannaford. Comparison of performance of virtual coupling schemes for haptic collaboration using real and emulated internet connections. Dans : *Proceedings of the 1st international conference on Robot communication and coordination*, RoboComm '07, pages 31 :1–31 :8, Piscataway, NJ, USA, 2007. IEEE Press. ISBN 978-963-9799-08-0. URL <http://dl.acm.org.gate6.inist.fr/citation.cfm?id=1377868.1377907>.
- Laura Santos-Carreras, Ricardo Beira, Ali Sengül, Roger Gassert, et Hannes Bleuler. Influence of force and torque feedback on operator performance in a VR-based suturing task. *Applied Bionics and Biomechanics*, 7(3) :217 – 230, 2010. ISSN 1176-2322. doi : 10.1080/11762322.2010.503110. URL <http://www.informaworld.com/smpp/content-db=all~content=a926631649~frm=titlelink>.
- Hannes Seppänen, Jaana Mäkelä, Pekka Luukkala, et Kirsi Virrantaus. Developing shared situational awareness for emergency management. *Safety Science*, 55(0) :1 – 9, 2013. ISSN 0925-7535. doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2012.12.009>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925753513000027>.

- S. S. Shapiro et M. B. Wilk. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52(3/4) :pp. 591–611, 1965. ISSN 00063444. URL <http://www.jstor.org/stable/2333709>.
- Roger N Shepard et Jacqueline Metzler. Mental Rotation of Three-Dimensional Objects. *Science*, 171(3972) :701–703, 1971. doi : 10.2307/1731476.
- Jean Simard. *Collaboration haptique étroitement couplée pour la déformation moléculaire interactive*. PhD thesis, Université Paris-Sud, 2012.
- Jean Simard et Mehdi Ammi. Haptic interpersonal communication : improvement of actions coordination in collaborative virtual environments. *Virtual Reality*, 16(3) :173–186, 2012a. ISSN 1359-4338. doi : 10.1007/s10055-011-0201-2. URL <http://dx.doi.org/10.1007/s10055-011-0201-2>.
- Jean Simard et Mehdi Ammi. Haptic communication tools for collaborative deformation of molecules. Dans : *Proceedings of the 2012 international conference on Haptics : perception, devices, mobility, and communication - Volume Part I*, EuroHaptics'12, pages 517–527, Berlin, Heidelberg, 2012b. Springer-Verlag. ISBN 978-3-642-31400-1. doi : 10.1007/978-3-642-31401-8_46. URL http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-31401-8_46.
- Jean Simard, Mehdi Ammi, Flavien Picon, et Patrick Bourdot. Potential field approach for haptic selection. Dans : *Proceedings of Graphics Interface 2009*, GI '09, pages 203–206, Toronto, Ont., Canada, Canada, 2009. Canadian Information Processing Society. ISBN 978-1-56881-470-4. URL <http://dl.acm.org.gate6.inist.fr/citation.cfm?id=1555880.1555925>.
- Michael J. Singer et John Barnett. Military training in virtual environments : User interface evaluations. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 54(28) :2403–2407, 2010. doi : 10.1177/154193121005402809. URL <http://pro.sagepub.com/content/54/28/2403.abstract>.
- A. Sledd et M.K. O'Malley. Performance enhancement of a haptic arm exoskeleton. Dans : *Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2006 14th Symposium on*, pages 375–381, 2006. doi : 10.1109/HAPTIC.2006.1627127.
- Lilly Spirkovska et Suresh K. Lodha. Audio-visual situational awareness for general aviation pilots. Dans : *Proc. SPIE*, volume 5009, pages 193–202, 2003. doi : 10.1117/12.473908. URL <http://dx.doi.org/10.1117/12.473908>.
- Jaime L. Stark et Robert Powers. Application of nmr and molecular docking in structure-based drug discovery. Dans : Guang Zhu, editeur, *NMR of Proteins and Small Biomolecules*, volume 326 de *Topics in Current Chemistry*, pages 1–34. Springer Berlin Heidelberg, 2012. ISBN 978-3-642-28916-3. doi : 10.1007/128_2011_213. URL http://dx.doi.org/10.1007/128_2011_213.
- Jonathan Steuer. Defining virtual reality : Dimensions determining telepresence. *Journal of Communication*, 42(4) :73–93, 1992. ISSN 1460-2466. doi : 10.1111/j.1460-2466.1992.tb00812.x. URL <http://dx.doi.org/10.1111/j.1460-2466.1992.tb00812.x>.
- John E. Stone, Justin Gullingsrud, et Klaus Schulten. A system for interactive molecular dynamics simulation. Dans : *Proceedings of the 2001 symposium on Interactive 3D graphics*, I3D '01, pages 191–194, New York, NY, USA, 2001. ACM. ISBN 1-58113-292-1. doi : 10.1145/364338.364398. URL <http://doi.acm.org.gate6.inist.fr/10.1145/364338.364398>.

- L.D. Strater. *Measures of platoon leader situation awareness in virtual decision-making exercises*. Research report (U.S. Army Research Institute for the Behavioral and Social Sciences). U.S. Army Research Institute for the Behavioral and Social Sciences, 2001.
- Bernd Strauss. Social facilitation in motor tasks : a review of research and theory. *Psychology of Sport and Exercise*, 3(3) :237 – 256, 2002. ISSN 1469-0292. doi : [http://dx.doi.org/10.1016/S1469-0292\(01\)00019-X](http://dx.doi.org/10.1016/S1469-0292(01)00019-X).
- Michael J. Strube. What did triplett really find ? a contemporary analysis of the first experiment in social psychology. *The American Journal of Psychology*, 118(2) :271–286, 4 2005.
- James Suleiman et Richard T. Watson. Social loafing in technology-supported teams. *Computer Supported Cooperative Work (CSCW)*, 17(4) :291–309, 2008. ISSN 0925-9724. doi : 10.1007/s10606-008-9075-6. URL <http://dx.doi.org/10.1007/s10606-008-9075-6>.
- K. Suleman, K. Andersson, et J. Wikander. A design approach for a new 6-dof haptic device based on parallel kinematics. Dans : *Mechatronics, 2009. ICM 2009. IEEE International Conference on*, pages 1–6, 2009. doi : 10.1109/ICMECH.2009.4957200.
- Haruo Takemura et Fumio Kishino. Cooperative work environment using virtual workspace. Dans : *Proceedings of the 1992 ACM Conference on Computer-supported Cooperative Work, CSCW '92*, pages 226–232, New York, NY, USA, 1992. ACM. ISBN 0-89791-542-9. doi : 10.1145/143457.269747. URL <http://doi.acm.org.gate6.inist.fr/10.1145/143457.269747>.
- H.W. Tappeiner, R.L. Klatzky, B. Unger, et R. Hollis. Good vibrations : Asymmetric vibrations for directional haptic cues. Dans : *EuroHaptics conference, 2009 and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. World Haptics 2009. Third Joint*, pages 285–289, March 2009. doi : 10.1109/WHC.2009.4810863.
- Francis Eng Hock Tay et Avijit Roy. Cybercad : A collaborative approach in 3d-cad technology in a multimedia-supported environment. *Comput. Ind.*, 52(2) :127–145, October 2003. ISSN 0166-3615. doi : 10.1016/S0166-3615(03)00100-3. URL [http://dx.doi.org/10.1016/S0166-3615\(03\)00100-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0166-3615(03)00100-3).
- Norman Triplett. The dynamogenic factors in pacemaking and competition. *The American Journal of Psychology*, 9 :397–403, 06 1898.
- Marc Ueberle et Martin Bus. Control of kinesthetic haptic interfaces. Dans : *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Workshop Touch Haptics*, pages 147–151, October 2004.
- Sehat Ullah. *Multi-modal Assistance for Collaborative 3D Interaction : Study and analysis of performance in collaborative work*. PhD thesis, Université d'Evry-Val d'Essonne, 2011.
- Sehat Ullah, Nassima Ouramdane, Samir Otmane, Paul Richard, Frédéric Davesne, et Malik Malle. Augmenting 3d interactions with haptic guide in a large scale virtual environment. Dans : *Proceedings of The 7th ACM SIGGRAPH International Conference on Virtual-Reality Continuum and Its Applications in Industry, VRCAI '08*, pages 22 :1–22 :6, New York, NY, USA, 2008. ACM. ISBN 978-1-60558-335-8. doi : 10.1145/1477862.1477891. URL <http://doi.acm.org/10.1145/1477862.1477891>.

- Sehat Ullah, Paul Richard, Samir Otmane, Mickael Naud, et Malik Mallem. Haptic guides in cooperative virtual environments : Design and human performance evaluation. Dans : *Proceedings of the 2010 IEEE Haptics Symposium, HAPTIC '10*, pages 457–462, Washington, DC, USA, 2010. IEEE Computer Society. ISBN 978-1-4244-6821-8. doi : 10.1109/HAPTIC.2010.5444616. URL <http://dx.doi.org/10.1109/HAPTIC.2010.5444616>.
- Lawton N. Verner et A.M. Okamura. Force & torque feedback vs force only feedback. Dans : *EuroHaptics conference, 2009 and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. World Haptics 2009. Third Joint*, pages 406–410, 2009. doi : 10.1109/WHC.2009.4810880.
- Kim-PhuongL. Vu, Katsumi Minakata, Jimmy Nguyen, Josh Kraut, Hamzah Raza, Ver-nol Battiste, et ThomasZ. Strybel. Situation awareness and performance of student versus experienced air traffic controllers. Dans : Gavriel Salvendy et MichaelJ. Smith, edi-teurs, *Human Interface and the Management of Information. Information and Interac-tion*, volume 5618 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 865–874. Springer Ber-lin Heidelberg, 2009. ISBN 978-3-642-02558-7. doi : 10.1007/978-3-642-02559-4_93. URL http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-02559-4_93.
- S. Wang et M.A. Srinivasan. The role of torque in haptic perception of object location in virtual environments. Dans : *Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2003. HAPTICS 2003. Proceedings. 11th Symposium on*, pages 302–309, 2003. doi : 10.1109/HAPTIC.2003.1191299.
- R. Weller et G. Zachmann. User performance in complex bi-manual haptic manipulation with 3 dofs vs. 6 dofs. Dans : *Haptics Symposium (HAPTICS), 2012 IEEE*, pages 315–322, 2012. doi : 10.1109/HAPTIC.2012.6183808.
- B. Wigert, G. de Vreede, I. Boughzala, et I. Bououd. Collaboration in virtual worlds : The role of the facilitator. Dans : *System Science (HICSS), 2012 45th Hawaii In-ternational Conference on*, pages 973–982, 2012. doi : 10.1109/HICSS.2012.158. URL <http://dx.doi.org/10.1109/HICSS.2012.158>.
- Frank Wilcoxon. Individual comparisons by ranking methods. *Biometrics Bulletin*, 1(6) :pp. 80–83, 1945. ISSN 00994987. URL <http://www.jstor.org/stable/3001968>.
- Nelson Wong et Carl Gutwin. Where are you pointing? : the accuracy of deic-tic pointing in cves. Dans : *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '10*, pages 1029–1038, New York, NY, USA, 2010. ACM. ISBN 978-1-60558-929-9. doi : 10.1145/1753326.1753480. URL <http://doi.acm.org.gate6.inist.fr/10.1145/1753326.1753480>.
- T. Yamada, D. Tsubouchi, T. Ogi, et M. Hirose. Desk-sized immersive workplace using force feedback grid interface. Dans : *Virtual Reality, 2002. Proceedings. IEEE*, pages 135–142, 2002. doi : 10.1109/VR.2002.996516.
- Nick Yee, Jeremy N Bailenson, et Kathryn Rickertsen. A meta-analysis of the impact of the inclusion and realism of human-like faces on user experiences in interfaces. Dans : *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '07*, pages 1–10, New York, NY, USA, 2007. ACM. ISBN 978-1-59593-593-9. doi : 10.1145/1240624.1240626. URL <http://doi.acm.org/10.1145/1240624.1240626>.

Robert B. Zajonc. Social facilitation. *Science*, 149 :269–274, 07 1965.

Interfaces haptiques

L'objectif des interfaces haptiques est de reproduire les sensations de toucher et de proprioception aussi appelé kinesthésie. La proprioception est définie comme la perception de la posture, du mouvement et du changement dans l'équilibre, la connaissance de la position, du poids et de la résistance des objets relativement à son corps (Kapes, 2006). La perception cutanée est très répandue en EVC notamment dans le domaine du jeu-vidéo. Les vibreurs sont en effet les interfaces haptiques de loin les plus utilisées puisque la quasi totalité des manettes de jeu vidéo et des téléphones portables en sont maintenant équipés. En revanche, les études expérimentales faisant usage de ce type de dispositif dans un contexte d'EVC sont plus rares, seuls quelques travaux de recherche comme ceux de Chan et al. (2008) ou de Pielot et al. (2010) s'y sont intéressés. Les possibilités d'interactions offertes par la perception cutanée sont plus limitées, ou du moins, moins naturelles que les possibilités permises par les capacités de perception kinesthésique. Contrairement aux interfaces tactiles cutanées qui sont passives, les interfaces proprioceptives sont des dispositifs d'interaction : les utilisateurs perçoivent et interagissent avec leurs environnements au travers du même dispositif. Les interfaces haptiques sont évaluées selon différents critères Ellis et al. (1996). Les caractéristiques technique comme l'espace de travail, la force maximum, la fréquence de rafraichissement, la rigidité, la résolution et la rétro-contrôlabilité ("*backdrivability*") doivent être maximisés. A l'inverse les frictions, le jeu mécanique, l'encombrement, la masse et l'inertie apparente de l'effecteur doivent être minimisés. Les singularités mécaniques doivent être inexistantes.

Les interfaces présentées ci-dessous sont dédiées exclusivement au retour haptique pour les bras et les mains. Parmi ces interfaces, on peut distinguer 3 grands types de dispositifs à retour kinesthésique :

- les systèmes électromécaniques classiques (bras, volant, joystick robotisé).
- les systèmes à câbles tendus.
- les exosquelettes.

D'autres dispositifs basés sur des technologies différentes comme la lévitation magnétique (Peter J. et al., 1996) ou les fluides électrorhéologiques (Oh et al., 2013) existent aussi mais sont plus anecdotiques.

A.1 Systèmes électromécaniques

Les systèmes électromécaniques sont les dispositifs à retour kinesthésique les plus répandus mais aussi les plus variés. Le développement des premiers dispositifs haptiques électromécaniques remonte à 1967 dans le cadre du projet GROPE [Brooks et al. \(1990\)](#). Le premier modèle de bras haptique à 6 DdL a été mis au point et testé par [Ouh-young et al. \(1988\)](#). Ces dispositifs sont tous composés d'un effecteur terminal (stylet, poignée, manche, volant) reliés à un ou plusieurs moteurs (souvent électrique parfois pneumatique) par une structure rigide et articulée. Pour interagir avec ce type d'interface, l'utilisateur doit simplement se saisir de l'effecteur terminal. Ces dispositifs sont les plus courants et les moins contraignants à l'installation et à l'utilisation. Les interfaces haptiques avec 1 ou 2 DdR sont accessibles au grand public et trouvent facilement une application ludique dans les jeux vidéos type simulation de conduite automobile ou de pilotage d'avion. Les interfaces haptiques plus complexes (3 à 7 DdR) sont développées et commercialisées par des entreprises spécialisées et de nombreux prototypes ont aussi été réalisés par des laboratoires en robotique. Une liste non exhaustive des produits commercialisés est présentée dans le tableau A.1. Ces produits sont surtout destinés aux professionnels toutefois certains dispositifs à 3 DdR comme le Novint Falcon sont vendus à des prix abordables et tendent à démocratiser ces interfaces. Comme présenté dans le tableau A.1, deux modèles de conception sont à distinguer : les structures en série utilisant une cinématique séquentielle et les structures parallèles basées sur une cinématique parallèle. Les structures en série sont plus légères, offrent des espaces de travail plus grands, et des cinématiques plus simples (sans risques de singularité mécanique) que les structures parallèles ([Sabater et al., 2007](#)). En revanche, les structures parallèles sont considérées comme plus rigides/puissantes, plus précises, et avec moins d'inertie ([Suleman et al., 2009](#)).

La majorité des recherches en EVC avec retour haptique emploie des dispositifs commercialisés par ces entreprises spécialisées. Cependant, certaines équipes de recherche choisissent de réaliser leur propre interface haptique ([Allison et al., 2004](#); [Groten et al., 2009](#)) ou encore de modifier des interfaces haptique existantes pour les adapter à leurs besoins ([Fotoohi et al., 2007](#)). Dans le domaine de la robotique, de la RV et de la téléopération, de nombreuses études développent et proposent leurs propres dispositifs haptiques ([Iwata, 1990](#); [Long et Collins, 1992](#); [Lee et al., 2000](#); [Ueberle et Bus, 2004](#); [Sabater et al., 2007](#)).

A.2 Systèmes à câbles tendus

Les systèmes à câbles tendus sont également connus sous le nom de SPace Interface Device for Artificial Reality (SPIDAR), nom donné par ses inventeurs [Makoto et al. \(1992\)](#). Les systèmes électromécaniques précédents abordés présentent une grande variété de modèles de conception, à l'inverse les systèmes à câbles tendus reposent tous sur le même modèle. La conception de ce type d'interface est simple : un effecteur est relié par des câbles tendus à des moteurs enrouleurs fixés à un cadre rigide souvent de forme cubique. De nombreuses versions de ces interfaces ont été mises au point par Makoto Sato (voir Tableau A.2). La première version (SPIDAR I de [Makoto et al. \(1992\)](#)) utilisait un système avec 4 câbles pour contrôler la position du doigt de l'utilisateur en modifiant la longueur des câbles. La seconde version (SPIDAR II de [Ishii et Sato \(1994\)](#)) disposait de 8 câbles permettant le contrôle sur deux doigts et autorisant ainsi un retour

| Nombre de degrés de retour (DdR) | Type de chaîne cinématique | |
|--|---|---|
| | cinématique séquentiel | cinématique parallèle |
| 1 DdL : Retour de couple (rotation) |  Trustmaster T100Force Feedback Racing Wheel | |
| 2 DdL : retour de couple pour le Joystick, retour de force en position pour le Pantograph |  Trustmaster Force Feedback Joystick |  Quanser 2DOF Planar Pantograph |
| | 3 DdL : retour de force en position uniquement. Les structures en série (bras unique) disposent de 6 DdL. |  Geomagic Touch X |
|  Haption Virtuose 3D Desktop | |  Force Dimension Omega 3 |
| 6 DdL : retour de force en position et rotation (retour de couple) |  MPB Technologies Freedom 6S |  Force Dimension Delta 6 |
| |  Haption Virtuose 6D |  Quanser HD ² High Definition |
| 7 DdL : retour de force en position, rotation et préhension |  Geomagic Phantom Premium 1.5 6DOF + 7 DOF Option |  Force Dimension Sigma 7 |

FIGURE A.1: Exemple d'interfaces haptiques électromécaniques.

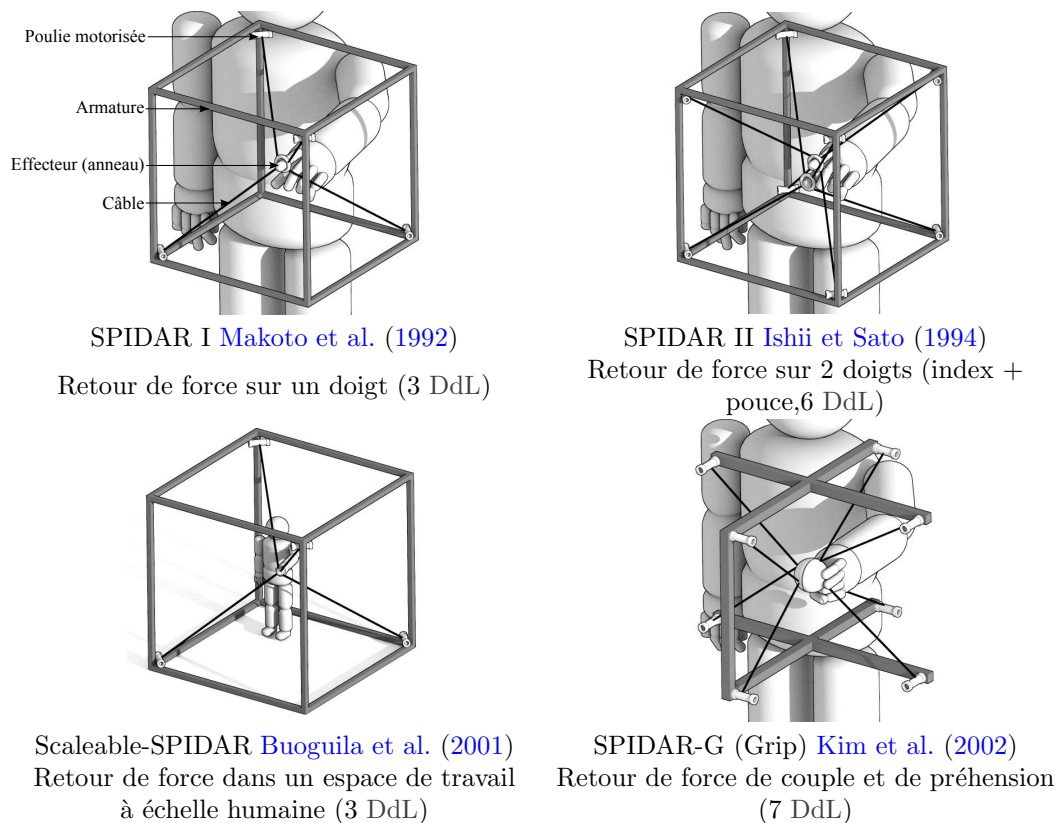


FIGURE A.2: Exemple d'interfaces haptiques à câble tendu.

haptique en préhension. En utilisant 8 câbles reliés au même effecteur, un retour de couple est possible (SPIDAR-G de [Kim et al. \(2002\)](#)).

Comparé aux systèmes électromécaniques, ces dispositifs ont l'avantage d'être très facilement reconfigurables pour s'adapter à des volumes d'espace de travail très variables. L'encombrement visuel est des plus réduits puisque seuls quelques câbles viennent obstruer la vue de l'utilisateur. A l'inverse la précision du suivi de position et la capacité du retour de force varient en fonction de la position de l'effecteur. Le système de câble limite l'espace de rotation à 45 degrés. Les dispositifs haptiques à câbles tendus restent essentiellement des prototypes ([Makoto et al., 1992](#); [Ishii et Sato, 1994](#); [Buoguila et al., 2001](#); [Ortega et Coquillart, 2005](#)) créés par des équipes de recherches à l'exception du Inca6D ([Perret et Dominjon, 2009](#)) commercialisé par l'entreprise Haption.

A.3 Exosquelette

Les exosquelettes sont des systèmes électromécaniques dans lesquels l'utilisateur vient s'insérer, certains dispositifs sont intégralement portés par l'utilisateur comme le CyberGrasp de CyberGlove ou l'exosquelette à bras de [Bergamasco et al. \(1994\)](#). D'autres sont fixés au sol comme le ABLE de Haption ou l'exosquelette de [Sledd et O'Malley \(2006\)](#). La plupart de ces systèmes sont soit dédiés au retour haptique pour la main et plus particulièrement les doigts ([Koyama et al., 2002](#); [Blake et Gurocak, 2009](#)) soit dédiés au retour haptique pour le bras, coude, épaule et poignet ([Sledd et O'Malley, 2006](#); [Pehlivan et al., 2011](#)) (voir Figure A.3). Ces dispositifs


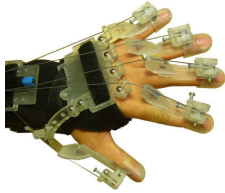

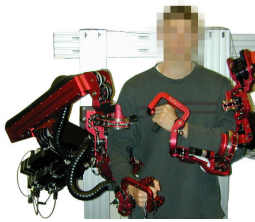
| Type d'exosquelette | Produit commercialisé | Prototype |
|---------------------|--|--|
| Porté pour main |  <p>CyberGlove CyberGrasp</p> |  <p>Stanford University ExoHand</p> |
| Fixe pour bras |  <p>Haption ABLE</p> |  <p>Microsoft EXO-UL7</p> |

FIGURE A.3: Exemple d'interfaces haptiques de type exosquelette.

ont l'avantage de permettre de contraindre les mouvements des utilisateurs sur chacune de leurs articulations indépendamment et d'offrir ainsi un retour haptique très précis. En revanche ces dispositifs sont particulièrement encombrants et lourds. L'utilité des ces systèmes dépassent le cadre de la RV car ils peuvent aussi être employés pour la rééducation physique (Sledd et O'Malley, 2006; Pehlivan et al., 2011).

Protocoles expérimentaux

B.1 Expériences 1 : Guidage Haptique

B.1.1 Hypothèses

- **H1** La désignation visio-haptique permet un temps d'exécution de la tâche de déformation moléculaire plus court que la désignation visuelle.
- **H2** La désignation visio-haptique permet une sélection de la cible désignée plus rapide que la désignation visuelle.
- **H3** La désignation visio-haptique permet une meilleure coordination entre les utilisateurs que la désignation visuelle.

B.1.2 Participants

24 participants (12 binômes, 18 hommes et 6 femmes) âgés de 22 à 30 ans ont passé l'expérience. Ils ont tous été recrutés au sein du laboratoire LIMSI. Pour chaque binôme, le rôle des participants a été défini à l'avance en fonction du niveau d'expérience des participants. Les participants qui avaient déjà une expérience en manipulation moléculaire avec interfaces haptiques ont été choisis comme expert.

B.1.3 Mesures objectives

Mesure de performance globale :

- **M_o1** Temps d'exécution : temps moyen pour effectuer la déformation requise.

Mesures de performance en désignation et sélection :

- **M_o2** Temps pour rejoindre : temps moyen entre le moment où l'expert désigne une cible (Figure 2.6 étape-2) et où l'assistant rejoint la cible désignée (Figure 2.6 étape-4).
- **M_o3** Distance parcourue : distance moyenne parcourue par l'assistant entre le moment où l'expert désigne une cible et où l'assistant la rejoint.
- **M_o4** Vitesse de déplacement : vitesse moyenne de l'assistant entre le moment où l'expert désigne une cible et où l'assistant la rejoint.

- **M_o5** Nombre de désignations : nombre moyen de désignation effectuée par l'expert durant une tâche de manipulation moléculaire.

Mesures de communication :

- **M_o6** Nombre d'interventions de l'expert : nombre moyen d'interventions verbales réalisées par l'utilisateur expert adressé à l'assistant.
- **M_o7** Nombre d'interventions de l'assistant : nombre moyen d'interventions verbales réalisées par l'utilisateur assistant adressé à l'expert.

B.1.4 Mesures subjectives

A la fin de l'expérience les affirmations suivantes étaient soumises aux participants :

- **M_s1** : La présence du guidage haptique a amélioré l'efficacité du groupe.
- **M_s2** : La présence du guidage haptique a amélioré la réactivité de mon partenaire (pour l'utilisateur expert) / ma réactivité (pour l'utilisateur l'assistant).
- **M_s3** : La présence du guidage haptique a réduit la communication verbale entre vous et votre partenaire.

Les réponses sont mesurées sur une échelle de 5 points (Échelle de Likert), où 1 signifie en total désaccord avec l'affirmation et 5 signifie en accord total avec l'affirmation.

B.2 Expériences 2 : Coordination

B.2.1 Hypothèses

- H1** Le travail collaboratif coordonné par l'outil de désignation permet un temps d'exécution de la tâche de déformation moléculaire plus rapide que le travail collaboratif laissé en gestion libre.
- H2** Le travail collaboratif coordonné par l'outil de désignation est plus efficace que le travail collaboratif laissé en gestion libre.
- H3** Le travail collaboratif coordonné par l'outil de désignation permet de distribuer le travail plus équitablement entre les participants que le travail collaboratif laissé en gestion libre.

B.2.2 Participants

L'expérience a été conduite sur 30 participants (10 groupes de 3 personnes, 3 femmes et 27 hommes) âgés entre 20 et 31 ans qui ont tous été recrutés au laboratoire LIMSI. Chaque groupe était composé d'un participant avec au moins une expérience en manipulation moléculaire et d'un participant sans aucune expérience en manipulation moléculaire. Le participant le plus expérimenté est systématiquement assigné au rôle de coordinateur.

B.2.3 Mesures objectives

- **M_o1** Temps d'exécution (sec) : temps moyen pour achever une tâche de déformation moléculaire

- **M_o2** Distance de manipulation (dm) : distance moyenne parcourue par l'ensemble des participants durant les phases de manipulation moléculaire.
- **M_o3** Temps de manipulation (sec) : temps moyen passé à déformer la molécule.
- **M_o4** Temps d'inactivité (sec) : temps moyen sans aucune activité ni mouvement ni clic.
- **M_o5** Fréquence de manipulation (manipulation par sec) : fréquence de manipulation moyenne par utilisateur (coordinateur exclu).

B.2.4 Mesures subjectives

A la fin de l'expérience, les questions suivantes ont été soumises aux participants :

- **M_s1** Efficacité : Dans quelle configuration votre équipe a-t-elle été la plus efficace ?
- **M_s2** Situation conflictuelle : Dans quelle configuration avez-vous rencontré le plus de situation conflictuelle ?
- **M_s3** Communication : Dans quelle configuration avez-vous ressenti le plus le besoin de parler ?

Les réponses des participants sont notées sur une échelle de 1 à 5, 1 signifiant une nette préférence pour le travail autonome et 5 signifiant une forte préférence pour le travail coordonné.

B.3 Expérience 3 : Taille de sélection

B.3.1 Hypothèses

- **H1** Le paramétrage collaboratif de sélection est plus efficace que le paramétrage individuel de sélection.
- **H2** Le paramétrage collaboratif de sélection répartie le travail entre les utilisateurs de manière plus équitable que le paramétrage individuel de sélection.
- **H3** Le paramétrage collaboratif de sélection augmente la CSP.
- **H4** Le paramétrage collaboratif de sélection équilibre CS et CSP alors que le paramétrage individuel de sélection privilégie la CS.

B.3.2 Participants

24 personnes (12 binôme, 21 hommes et 3 femmes) âgés entre 22 et 34 ans, ont participé à l'expérience. Tous les participants ont été recrutés au sein du laboratoire LIMSI et de l'université Paris-Sud.

B.3.3 Mesures objectives

Mesures de performances :

- **M_o1** Score (%) : pourcentage de la tâches réussies.
- **M_o2** Temps d'exécution (s) : temps moyen pour effectuer toutes les déformations requises. Le temps maximum est de 150 secondes, au delà de cette durée la tâche est considérée comme inachevée.

Mesures d'effort/activité :

- **M_{o3}** Distance parcourue (dm) : distance moyenne parcourue par les deux utilisateurs.
- **M_{o4}** Distance de déformation (dm) : distance moyenne parcourue par les deux utilisateurs durant les phases de déformations.
- **M_{o5}** Changement de sélection (compte) : nombre moyen de changement de taille de sélection effectué par les utilisateurs.

Mesures de répartition de l'effort/travail :

- **M_{o6}** Différence de distance (dm) : différence moyenne de distance parcourue entre les deux utilisateurs ($|\mathbf{M}_{o3}$ de l'utilisateur 1 - \mathbf{M}_{o3} de l'utilisateur 2|).
- **M_{o7}** Différence de déformation (dm) : différence moyenne de distance parcourue entre les deux utilisateurs durant les phases de déformations ($|\mathbf{M}_{o4}$ de l'utilisateur 1 - \mathbf{M}_{o4} de l'utilisateur 2|).

Mesures de communication verbale :

- **M_{o7}** Temps de communication verbale : Temps moyen de communication verbale pendant une tâche.
- **M_{o8}** Nombre d'instructions verbales : Nombre moyen d'instructions échangées entre utilisateur. Une instruction est un ordre donné, par exemple, "Va sur cette arête." ou "On utilise la sélection par sommet pour celui là."
- **M_{o9}** Nombre de déclarations verbales : Nombre moyen de déclarations échangées entre utilisateur. Une déclaration communique une information sans donner d'objectif lié, par exemple, "Je m'occupe de ces faces là." ou "Le temps est presque expiré."

B.3.3.1 Mesures de conscience situationnelle partagée

Les mesures d'attentions sont collectées pendant une interruption de tâche. À un moment choisi aléatoirement les interactions avec le maillage sont gelées et le curseur du partenaire est enlevé de l'affichage. Ensuite les questions suivantes sont posées aux participants :

- **M_{c1}** Sélection suivante : Quelle va être votre prochaine sélection ? Les participants doivent indiquer la prochaine sélection qu'ils comptent accomplir en cliquant sur la face correspondante. Cette mesure est notée entre 0 et 2. Chaque utilisateur marque 1 point s'il a correctement identifié sa prochaine sélection.
- **M_{c2}** Sélection suivante du partenaire : Quelle va être la prochaine sélection de votre partenaire ? Les participants doivent indiquer la prochaine sélection de leur partenaire en cliquant sur la face correspondante. La mesure **M_{c2}** utilise le même système de notation que la mesure **M_{c1}**.

B.3.4 Mesures subjectives

Un questionnaire composé de 6 affirmations est présenté à chaque participant après chaque condition. Les participants indiquent sur une échelle de 1 à 5 s'il sont en désaccord (1) ou en accord (5) avec l'affirmation proposée. Les affirmations suivantes sont soumises aux participants :

- **M_{s1}** Tutoriel : J'aurai pu me passer du tutoriel.
- **M_{s2}** Déformation équitable : J'ai effectué autant de déformations que mon partenaire.

- **M_s3** Travail équitable : Le travail a été équitablement distribué entre moi et mon partenaire.
- **M_s4** Compréhension du partenaire : Je comprenais facilement ce que mon partenaire faisait.
- **M_s5** Compréhension des attentes : Je comprenais facilement ce que mon partenaire attendait de moi.
- **M_s6** Parole : J'ai beaucoup parlé pour me coordonner avec mon partenaire.

B.4 Expérience 4 : Mode de sélection

B.4.1 Hypothèses

- **H1** Le paramétrage collaboratif de sélection est plus efficace que le paramétrage individuel de sélection.
- **H2** Le paramétrage collaboratif de sélection répartie le travail entre les utilisateurs de manière plus équitable que le paramétrage individuel de sélection.
- **H3** Le paramétrage collaboratif de sélection augmente la CSP.
- **H4** Le paramétrage collaboratif de sélection augmente la communication verbale.

B.4.2 Participants

24 participants (12 paires, 18 hommes et 6 femmes) âgés entre 21 et 35 ans, ont effectués l'expérience. Tous les participants ont été recrutés au sein du laboratoire LIMSI et de l'université Paris-Sud.

B.4.3 Mesures objectives

- **M_o1** Score : pourcentage moyen de déformations réussites par tâche.
- **M_o2** Temps d'exécution(s) : temps moyen pour effectuer une tâche. Le temps maximum est de 120 secondes, après cette période la tâche est arrêtée.
- **M_o3** Distance parcourue (m) : distance moyenne parcourue par les deux utilisateurs durant une tâche.
- **M_o4** Distance de déformation (m) : distance moyenne parcourue par les deux utilisateurs durant les phases de déformation.
- **M_o5** Nombre de déformation : nombre moyen de déformations effectuées par tâche.

B.4.3.1 Mesures de conscience situationnelle partagée

Au milieu de chaque tâche de manipulation polygonale les questions suivantes sont posées aux participants :

- **M_c1** Sélection du partenaire : Quelle était la dernière la sélection de votre partenaire? Les participants doivent indiquer la sélection actuelle de leur partenaire en sélectionnant le ou les bons éléments avec le bon mode et la bonne taille de sélection.

- **M_c2** Sélection suivante du partenaire : Quelle sera la prochaine sélection de votre partenaire ? Comme pour la précédente mesure les participants doivent indiquer la prochaine de leur partenaire avec le bon mode et la bonne taille.
- **M_c3** Sélection suivante : Quelle sera votre prochaine sélection ? Les participants doivent désigner leur prochaine sélection avec la même exactitude que les mesures précédentes.

Les mesures **M_c3**, **M_c2** et **M_c1** sont notées entre 0 et 2. Un point est donné par utilisateur qui désigne l'élément qui a ou qui sera effectivement sélectionné par le partenaire.

B.4.4 Mesures subjectives

Chaque question est notée sur une échelle de 1 à 5. Un score de 1 indique que le choix se porte clairement en faveur du paramétrage individuel de sélection. Un score de 5 indique un choix clairement en faveur du paramétrage collaboratif de sélection.

- **M_s1** Quelle condition avez-vous trouvée la plus facile à utiliser ?
- **M_s2** Quelle condition avez-vous trouvée la plus efficace ?
- **M_s3** Dans quelle condition avez-vous le plus parlé ?
- **M_s4** Dans quelle condition avez-vous été le plus attentif à votre partenaire ?
- **M_s5** Quelle condition avez-vous préférée de manière générale ?

B.5 Expérience 5 : Manipulation collaborative

B.5.1 Hypothèses

- **H1** Les méthodes de contrôle de rotation par application de force (Pivot et Rotule) sont plus précises que les méthodes de contrôle de rotation par application de couple (Clé et Encastrement).
- **H2** Les méthodes de contrôle de rotation par application de force (Pivot et Rotule) sont plus efficaces que les méthodes de contrôle de rotation par application de couple (Clé et Encastrement).
- **H3** Les méthodes de contrôle de rotation par application de force (Pivot et Rotule) répartissent mieux l'effort entre partenaires que les méthodes de contrôle de rotation par orientation du curseur (Clé et Encastrement).
- **H4** Les méthodes de manipulation par axe de rotation (Pivot et Clé) réduisent plus la quantité de manipulations que les méthodes de manipulation par centre de rotation (Rotule et Encastrement).
- **H5** La manipulation par Pivot présente une meilleure CSP que les manipulations par Rotule Clé et Encastrement.

B.5.2 Participants

24 personnes (12 binômes, 21 hommes et 3 femmes) âgés entre 20 et 35 ans ont participé à l'expérience. Tous les participants ont été recrutés au sein du laboratoire LIMSI et de l'université Paris-Sud.

B.5.3 Mesures objectives

- Distance de collision (M_o1) (mm) : distance cumulée d'enfoncement entre l'objet manipulé et l'environnement.
- Temps de collision (M_o2) (sec) : temps de collision entre l'objet manipulé et l'environnement.
- Temps d'exécution (M_o3) (sec) : temps écoulé pour faire passer l'objet manipulé à travers le mur.
- Translation utilisateur (M_o4) (mm) : distance parcourue par les deux curseurs.
- Rotation utilisateur (M_o5) (rad) : rotation effectuée par les deux curseurs.
- Différence de translation (M_o6) (mm) : différence de distance parcourue (Translation utilisateur (M_o4)) entre les deux utilisateurs .
- Différence de rotation (M_o7) (rad) : différence de rotation effectuée (Rotation utilisateur (M_o5)) entre les deux utilisateurs.
- Translation de l'objet (M_o8) (mm) : distance parcourue par l'objet manipulé.
- Rotation de l'objet (M_o9) (rad) : rotation effectuée par l'objet manipulé.

B.5.4 Mesure de conscience situationnelle partagée

Afin d'évaluer la CSP, la capacité de projections dans le future proche est évaluée durant une interruption de tâche. À l'aide d'une manipulation par encastrement individuelle, chaque utilisateur doit montrer ce que sera selon lui la suite de la manipulation durant les 5 prochaines secondes. Les trajectoires et rotations prédites par chaque utilisateur sont comparées avec la trajectoire et la rotation réellement réalisée par les utilisateurs en manipulation collaborative.

- Erreur de projection en translation (M_c1) (mm) : indique l'erreur sur la distance moyenne entre les trajectoires prédites et la trajectoire réelle.
- Erreur de projection en rotation (M_c2) (rad) : indique l'erreur d'angle moyenne entre les axes de rotation prédits et l'axe de la rotation réellement opérée.

B.5.5 Mesures subjectives

Chaque question est notée entre 1 et 10. Un score de 1 correspond à la réponse "Mauvaise" ou "Faible". Un score de 10 correspond à la réponse "Bonne" ou "Élevée".

- M_s1 Performance : Comment qualifieriez-vous votre performance ? (Mauvaise - Bonne)
- M_s2 Exigence mentale : Quelle a été l'importance de votre activité mentale et intellectuelle ? (Faible - Élevée)
- M_s3 Exigence physique : Quelle a été l'importance de votre activité physique ? (Faible - Élevée)

- **M_s4** Frustration : Pendant l'exécution du travail vous êtes-vous senti satisfait, relaxé, sûr de vous (faible niveau de frustration), ou plutôt découragé, irrité, stressé, sans assurance (élevé niveau de frustration) ? (Faible - Élevée)
- **M_s5** Coordination : Comment qualifieriez-vous votre coordination avec votre partenaire ? (Mauvaise - Bonne)