

Travail collaboratif assisté par haptique

Sommaire

6.1	Introduction	134
6.2	Assistance haptique pour la communication	134
6.2.1	Travaux existants	134
6.2.2	Outils haptiques pour la collaboration	135
6.2.3	Objectifs	136
6.3	Présentation de l'expérimentation	137
6.3.1	Description de la tâche	137
6.3.2	Spécificités du protocole expérimental	138
6.4	Résultats	143
6.4.1	Amélioration des performances	143
6.4.2	Amélioration de la communication	149
6.4.3	Évaluation qualitative	153
6.5	Conclusion	155
6.5.1	Résumé des résultats	155
6.5.2	Synthèse et perspectives	156

6.1 Introduction

Sur la base des résultats obtenus dans les trois études précédentes, nous avons développé des outils haptiques afin d'améliorer la collaboration entre les utilisateurs dans la réalisation d'un *docking* moléculaire. Nous avons également identifié un certain nombre de paramètres permettant d'améliorer les performances d'un groupe (identification des rôles, *brainstorming*, présence d'un meneur, etc.) afin de les intégrer dans cette dernière expérimentation. Ce chapitre a pour but de tester et d'évaluer les outils proposés et les méthodologies de travail dans un contexte de déformation moléculaire.

Ce dernier chapitre sera également l'occasion de confronter la plateforme Shaddock à des experts en biologie moléculaire. En effet, il est nécessaire pour cette dernière étape d'avoir l'avis de spécialistes afin d'évaluer l'utilisabilité de la plateforme et de confirmer la validité de ce processus de travail.

6.2 Assistance haptique pour la communication

Dans cette section, nous commencerons par présenter les travaux existants en terme de communication haptique. Puis nous exposerons les choix qui ont guidés le développement des outils haptiques proposés. Enfin, nous présenterons les objectifs de cette quatrième et dernière expérimentation.

6.2.1 Travaux existants

Le concept de communication haptique a été initié par les travaux de SALLNÄS *et al.* [2000] avec une étude sur la manipulation synchrone d'objets 3D dans un environnement virtuel. Les utilisateurs disposent d'un outil haptique leur permettant d'exercer une pression sur les objets 3D virtuels ; il faut alors deux utilisateurs pour soulever un objet en exerçant une pression de chaque côté de l'objet. Sur le même principe de manipulation synchrone, BAŞDOĞAN *et al.* [2000] proposent le déplacement d'un anneau par une manipulation en binôme coordonnée ; l'anneau doit passer autour d'un fil sans le toucher. Les résultats de ces deux études montrent clairement que l'utilisation de la modalité haptique permet des améliorations significatives pour la coordination entre les partenaires.

Sur la base de ces résultats, OAKLEY *et al.* [2001] propose de créer des outils haptiques pour la création de diagrammes UML en environnement 2D.

Il fournit aux utilisateurs différents outils haptiques permettant d'interagir avec le partenaire :

- ressentir le curseur du partenaire avec la possibilité de le pousser ;
- attraper et guider le curseur du partenaire vers une position choisie ;
- activer à distance un guidage du partenaire vers son propre curseur ;
- activer à distance un guidage de son propre curseur vers celui de son partenaire ;
- ressentir une viscosité plus importante par la proximité du curseur du partenaire.

Dans la continuité de OAKLEY *et al.* [2001], MOLL et SALLNÄS [2009] expérimentent des outils haptiques similaires dans un environnement virtuel de construction par bloc en 3D. Ces deux dernières études prouvent que la communication entre deux partenaires par l'intermédiaire de la modalité haptique est possible. D'ailleurs, MOLL et SALLNÄS [2009] soulignent la pertinence des retours haptiques pour la désignation de cibles en environnement virtuel.

Le terme *communication haptique* a pris tout son sens avec les premières tentatives de *langages haptiques*. Tout d'abord, CHANG *et al.* [2002] proposent d'augmenter l'information d'une communication par *talkies-walkies* avec différents types de vibrations. Puis, ENRIQUEZ *et al.* [2006] crée une liste de phonèmes haptiques permettant la communication. Il constate cependant qu'une telle solution nécessite un fort apprentissage (≈ 45 mn) pour une utilisation persistente. CHAN *et al.* [2008] utilise également des mots haptiques pour aider et assister la prise de contrôle d'un système lors de la réalisation d'une tâche collaborative.

Récemment, ULLAH [2011] s'est intéressé à l'influence de la communication haptique sur le sentiment de présence et sur la conscience périphérique (voir ?? page ??). Tout d'abord avec une étude sur la manipulation collaborative d'un bras articulé en environnement virtuel, il montre une amélioration de la conscience périphérique [NAUD *et al.* 2009]. Puis, en proposant une tâche de déplacement d'objet virtuel coordonné (une cheville à déplacer dans un trou), ULLAH *et al.* [2010] montre une amélioration significative du sentiment de présence et de la conscience périphérique.

6.2.2 Outils haptiques pour la collaboration

Sur la base de cet état de l'art et des conclusions obtenues au fil des trois études précédentes, plusieurs propositions s'imposent pour le développement d'outils haptiques de collaboration.

Pour commencer, la présence d'un meneur répond à deux contraintes identifiées lors de la troisième expérimentation : l'identification des rôles et la coordination des tâches. Afin de forcer une identification des rôles, nous allons proposer un outil spécifique destiné seulement au meneur et des outils de déformations pour les suiveurs. De plus, nous avons vu que le meneur élabore une stratégie en explorant l'environnement virtuel ; c'est lui qui aura accès aux outils d'orientation et de manipulation de la molécule.

Le meneur aura à sa disposition une période de *brainstorming* durant laquelle il pourra manipuler la molécule afin de discuter avec ces collaborateurs de la meilleure stratégie à adopter. Durant cette phase de travail, seul l'outil d'orientation, détenu par le meneur, sera activée.

Étant donné qu'il détermine les tâches à effectuer par les suiveurs, il faut également qu'il ait la possibilité d'indiquer des cibles durant la tâche de déformation. Nous avons souligné ce point lors de la première expérimentation et MOLL et SALLNÄS [2009] met en avant la pertinence de la modalité haptique pour effectuer une désignation.

Cette première expérimentation avait également permis d'identifier une stratégie offrant un bon compromis entre la collaboration et les conflits de coordination : l'interaction en champs voisins. Pour mémoire, les interactions en champs voisins correspondent à la manipulation de deux zones distantes d'environ un résidu. Afin de favoriser ce type de stratégie, les outils proposés agiront de préférence à l'échelle des résidus en laissant la possibilité le cas échéant, de manipuler au niveau atomique afin d'avoir accès à un niveau de déformation fin..

Pour finir, la seconde expérimentation a mis en avant la difficulté d'utiliser deux outils de déformation en configuration bimanuelle. C'est pourquoi, les opérateurs qui seront chargés d'effectuer la déformation seront en configuration monomanuelle avec à leur disposition un unique outil de déformation. Le meneur, qui aura à sa disposition des outils moins complexes à utiliser, manipulera en configuration bimanuelle.

6.2.3 Objectifs

Dans cette expérimentation, nous proposons des outils haptiques pour assister la communication entre les partenaires et souhaitons les tester dans le cadre d'une tâche de déformation collaborative de molécule.

MOLL et SALLNÄS [2009] ont montré la pertinence de la modalité haptique pour la communication et en particulier pour le processus de désignation. Sur

la base de la configuration collaborative détaillée précédemment (voir section 6.2.2 page 135), nous souhaitons étudier la contribution des outils haptiques proposés pour l'amélioration des performances puis de la communication dans le groupe.

De plus, cette dernière expérimentation est l'occasion de confronter la plateforme et les méthodes de travail proposées à des experts susceptibles d'utiliser un tel environnement de travail. C'est pourquoi une partie des sujets évalués sera constituée de biologistes œuvrant dans le domaine de la biologie moléculaire et sensibilisés aux plateformes d'interaction avec les environnements moléculaires virtuels. Ces sujets permettront d'obtenir des avis pertinents sur l'utilité des outils proposés et sur les évolutions possibles.

6.3 Présentation de l'expérimentation

6.3.1 Description de la tâche

La tâche proposée est de nature similaire à celle exposée dans la seconde expérimentation et la troisième expérimentation, il faut modifier la conformation initiale d'une molécule pour atteindre une conformation stable (voir section 4.3.1 page 84). Pour la première fois, ils seront soumis à une tâche de *docking* moléculaire faisant intervenir deux molécules.

La tâche est proposée à des groupes de trois sujets : les trinômes. Dans ces trinômes, un « coordinateur » et deux « opérateurs » ont à leur disposition différents outils pour l'orientation, la déformation, la désignation ou la manipulation. Le coordinateur jouera le rôle du meneur. Les sujets ont la possibilité de communiquer sans restriction par différents canaux : oral, gestuel ou virtuel.

Durant cette expérimentation, nous présentons aux sujets cinq molécules ; trois d'entre elles sont utilisées pour l'entraînement. Chaque molécule est présentée dans la section A.2.1 page 203. Les cinq molécules sont utilisés pour les différents scénarios décrits ci-dessous.

Entraînement 1 Le premier entraînement est destiné à familiariser les sujets avec l'outil de désignation ainsi qu'avec la structure du groupe. Cet entraînement se déroule sur la molécule TRP-CAGE. La tâche est volontairement peu complexe. Elle est destinée à enseigner aux sujets les étapes du processus de désignation (voir section 2.4.3 page 51).

Entraînement 2 La seconde phase d'entraînement s'effectue sur la molécule Prion qui est de taille plus importante. C'est dans cette phase que

sont introduits les outils de communication haptique pour les phases de désignation. Cet entraînement permet de renforcer l'apprentissage du processus de désignation sur une tâche plus complexe en ajoutant la modalité haptique.

Entraînement 3 La dernière phase d'entraînement s'adresse au coordinateur puisqu'elle introduit l'outil de manipulation qui jusqu'à présent n'a pas été utilisé. La molécule TRP-ZIPPER, de petite taille, a été choisie. La molécule est rendue solidaire de l'outil de manipulation pour que le coordinateur puisse découvrir ce nouvel outil.

Scénario 1 La première tâche à réaliser est la déformation de la molécule Ubiquitin. La déformation proposée est identique à la déformation proposée dans la troisième expérimentation. En effet, cette tâche s'est révélée très intéressante pour stimuler une collaboration étroite. Dans cette tâche, seuls les outils de désignation, de déformation et d'orientation sont activés ; la molécule Ubiquitin est ancrée dans l'environnement virtuel à l'aide d'atomes fixes.

Scénario 2 La seconde tâche consiste à reconstituer le complexe de molécules NUSE:NUSG. La molécule NUSG est laissée libre de mouvement (pas d'atome fixes) et doit être amarrée à la molécule NUSE : c'est une tâche de *docking* moléculaire simplifiée. On distingue deux phases dans cette tâche ; il faut approcher la molécule NUSG ; puis il faut affiner l'amarrage par une déformation interne de NUSG. Tous les outils (désignation, déformation, orientation et manipulation) sont activés dans ce scénario ; la molécule NUSG est solidaire de l'outil de manipulation. La molécule NUSE est ancrée dans l'environnement virtuel à l'aide d'atome fixes (sa chaîne carbonée).

Durant l'expérimentation, les sujets disposent de deux informations calculées en temps-réel. La première mesure est le score *RMSD*, déjà décrit dans la section 4.3.1 page 84. La seconde mesure est l'énergie totale du système, valeur calculée par *NAMD* et représentant la synthèse des énergies électriques et des énergies de *VAN DER WAALS*.

6.3.2 Spécificités du protocole expérimental

Les sections suivantes décrivent l'ensemble des modifications apportées à la plateforme de base (voir chapitre A page 201) et principalement aux outils d'interaction. La méthode expérimentale est exposée dans la section B.4 page 217. Un résumé de cette méthode se trouve dans la table 6.1 page 144.

Matériel utilisé

Dans cette expérimentation, nous introduisons de nouveaux outils destinés à améliorer les interactions entre les membres d'un trinôme. Les deux opérateurs auront à leur disposition deux outils de déformation matérialisés par des PHANTOM Omni®. Le coordinateur aura à sa disposition trois outils :

- une souris USB pour l'outil d'orientation ;
- un PHANTOM Omni® pour l'outil de désignation (lié à un serveur VRPN) ;
- un PHANTOM Desktop® pour l'outil de manipulation (lié à un serveur VRPN).

De la même manière que dans la troisième expérimentation, une caméra vidéo SONY® (HDR-CX550) a été installée derrière les sujets afin de filmer à la fois les sujets et l'écran de vidéoprojection. Le son est également enregistré. Là encore, les vidéos sont exportées et séquencées *a fortiori* à l'aide des logiciels iMovie et ffmpeg.

La figure 6.1 illustre le dispositif expérimental par un schéma. La figure 6.2 page suivante est une photographie de la salle d'expérimentation.

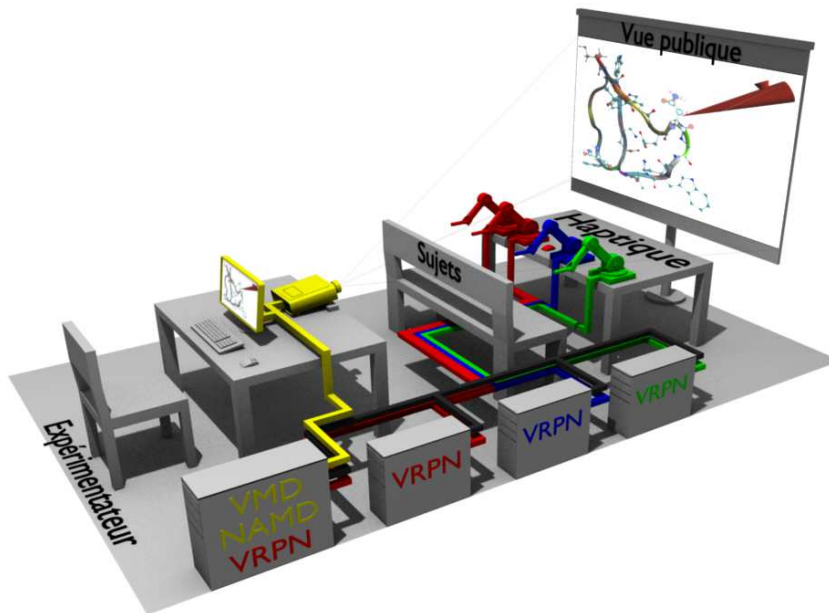


Figure 6.1 – Schéma du dispositif expérimental

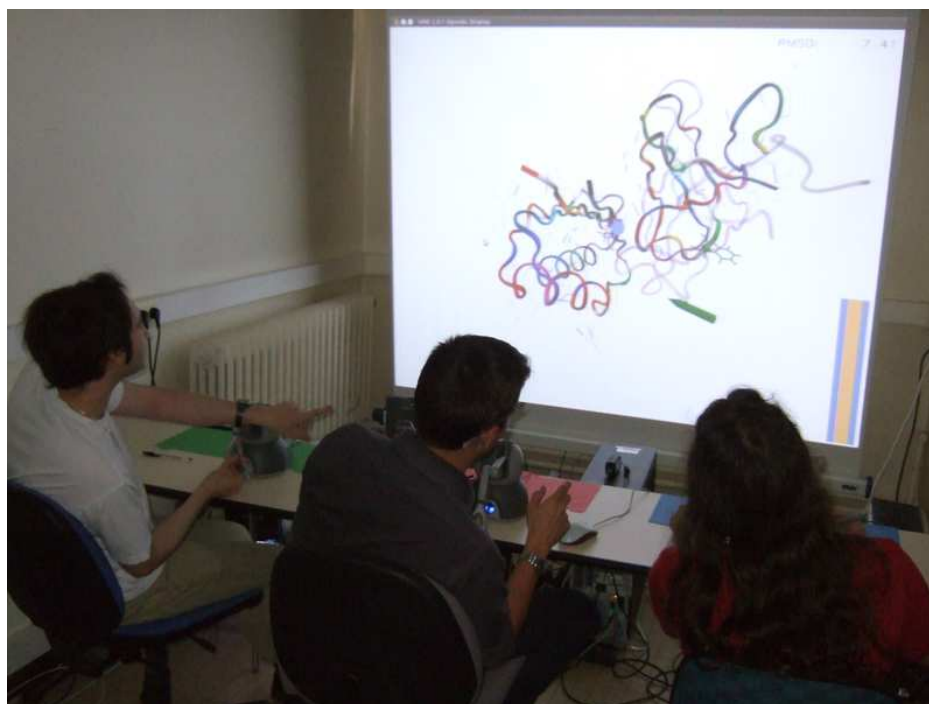


Figure 6.2 – Photographie du dispositif expérimental

Visualisation et représentation

L'affichage des molécules est similaire à celui de la troisième expérimentation présenté dans la section 5.3.2 page 117 : la molécule déformable est représentée en CPK et *NewRibbon* alors que la molécule cible est en *NewRibbon* transparent. Cependant, les molécules étant de taille importante, nous avons décidé de représenter les atomes en transparence et sans couleur afin d'éviter une surcharge visuelle, surtout dans le cas du complexe de molécules NUSE:NUSG. Cependant, nous verrons dans la section suivante que l'outil de désignation permet de mettre en évidence les atomes des résidus désignés par une mise en couleur.

La figure 6.3 page suivante représente la molécule Ubiquitin et la figure 6.4 page ci-contre représente le complexe de molécules NUSE:NUSG.

Outils d'interaction

Pour cette expérimentation, nous avons développé de nouveaux outils héritant des outils de base proposés par VMD. En effet, nous souhaitons apporter une assistance haptique afin d'augmenter la communication sensorielle entre

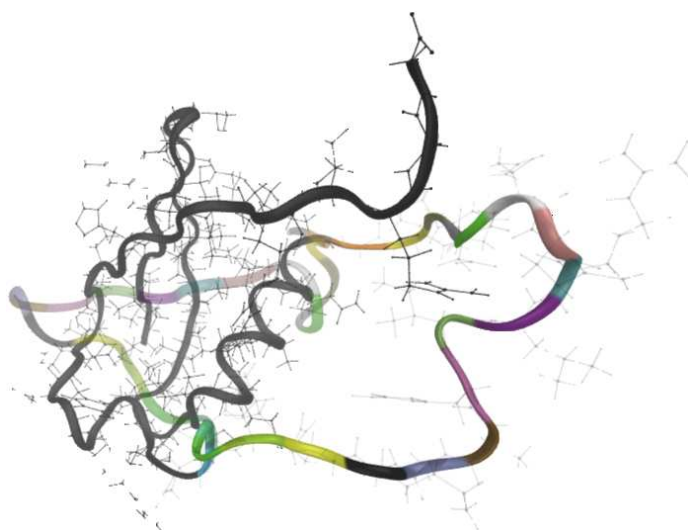


Figure 6.3 – Représentation de la molécule Ubiquitin pour le scénario 1

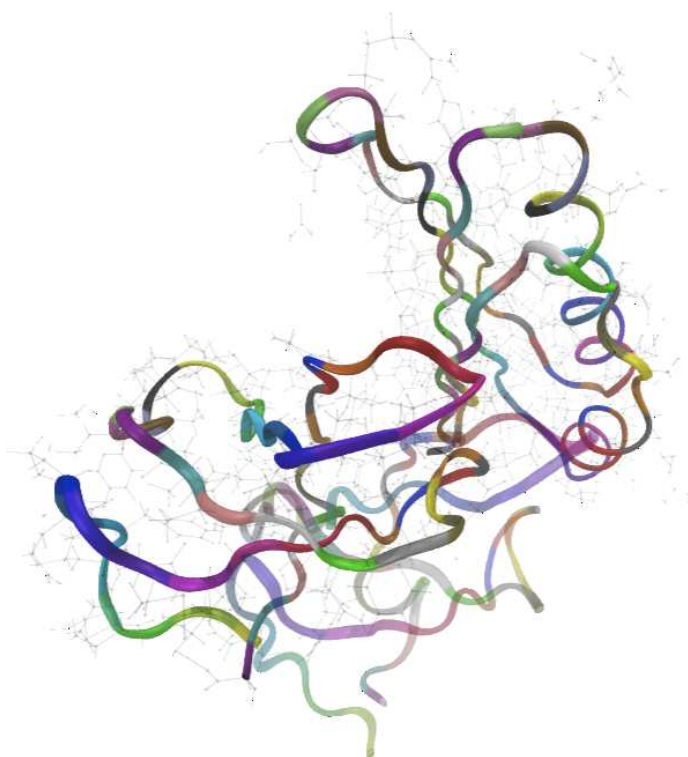


Figure 6.4 – Représentation de la molécule NusE:NusG pour le scénario 2

les sujets. Quatre outils sont proposés dont les fonctionnalités sont résumées ci-après. Pour une description technique détaillée de ces outils, se reporter à la section 2.4.3 page 49.

Outil de désignation

Utilisateur Coordinateur.

Matériel PHANTOM Omni®.

Fonction Permet de désigner un résidu aux opérateurs.

Fonctionnement Un des rôles du coordinateur est de désigner des structures (des résidus) à déformer aux opérateurs. L'opérateur pourra accepter ou non cette désignation. Tant que la cible désignée par le coordinateur n'aura pas été acceptée, le coordinateur pourra modifier la cible courante.

Rendu haptique Lorsque le coordinateur effectue une désignation, une vibration est générée sur son outil. Cette vibration sinusoïdale s'arrête dès qu'un opérateur a accepté la désignation ce qui permet au coordinateur d'être informé que la désignation a été acceptée.

Outil de déformation

Utilisateur Opérateur.

Matériel PHANTOM Omni®.

Fonction Permet de déformer un ou plusieurs atomes.

Fonctionnement Le rôle principal de l'opérateur est déformer un ou plusieurs atomes dans la molécule. Il a la possibilité de déformer des atomes seuls de manière autonome. S'il accepte une désignation proposée par le coordinateur, il a alors la possibilité de déformer un résidu avec une force de déformation plus importante, l'objectif étant de favoriser l'utilisation de cet outil.

Rendu haptique Lorsque le coordinateur effectue une désignation, l'opérateur est soumis à une vibration sinusoïdale sauf si ce dernier est déjà en train de déformer. S'il décide d'accepter la désignation, la vibration s'arrête et l'opérateur est alors attiré directement vers la cible par une attraction de type masse-ressort.

Outil de manipulation

Utilisateur Coordinateur.

Matériel PHANTOM Desktop®.

Fonction Permet de déplacer l'ensemble des atomes d'une molécule.

Fonctionnement Cet outil est attaché à une molécule défini pour chaque scénario. Tout mouvement de cet outil permet de déplacer l'ensemble des atomes de la molécule attachée.

Rendu haptique Le retour haptique est un système masse-ressort qui contraint le coordinateur à rester au centre de la molécule attachée. De plus, toute déformation effectuée par un opérateur est reportée, dans une proportion relativement faible, sur cet outil qui influe ainsi le déplacement global de la molécule.

Outil d'orientation

Utilisateur Coordinateur.

Matériel Souris USB.

Fonction Permet de modifier le point de vue de la scène.

Fonctionnement Cet outil remplace la souris 3D utilisée dans la seconde expérimentation qui s'est montrée trop peu intuitive pour les utilisateurs. Il permet de modifier l'orientation de la scène. Cet outil modifie l'ensemble de la perception de la scène ce qui peut perturber les opérateurs. C'est pourquoi il est proposé comme un troisième outil afin qu'il ne soit utilisé que lorsque c'est vraiment nécessaire.

Rendu haptique Cet outil ne permet de retour haptique.

6.4 Résultats

Cette section présente et analyse l'ensemble des mesures expérimentales de cette quatrième étude. Les données, qui sont appareillées et en faible nombre, ont été analysées par le test des rangs signés de WILCOXON [1945].

6.4.1 Amélioration des performances

Données et tests statistiques

La figure 6.5 page suivante présente le score RMSD minimum atteint \mathcal{V}_{d1} en fonction de la présence de l'assistance haptique \mathcal{V}_{i1} . L'analyse montre qu'il n'y a pas d'effet significatif de l'assistance haptique \mathcal{V}_{i1} sur le score RMSD minimum atteint \mathcal{V}_{d1} ($W = 87$, $p = 0.348$).

Table 6.1 – Synthèse de la procédure expérimentale

Tâche	Déformation de molécule ou de complexe de molécule		
Hypothèses	\mathcal{H}_1 Performances améliorées par l'assistance haptique \mathcal{H}_2 L'assistance haptique améliore la communication \mathcal{H}_3 La plateforme est appréciée des experts		
Variables indépendantes	\mathcal{V}_{i1} Présence de l'assistance \mathcal{V}_{i2} Molécules à déformer		
Variables dépendantes	\mathcal{V}_{d1} Score RMSD minimum \mathcal{V}_{d2} Temps du score RMSD minimum \mathcal{V}_{d3} Nombre de sélections \mathcal{V}_{d4} Temps moyen d'une sélection \mathcal{V}_{d5} Temps moyen pour accepter une cible \mathcal{V}_{d6} Temps moyen pour atteindre une cible acceptée \mathcal{V}_{d7} Nombre de désignations acceptées \mathcal{V}_{d8} Vitesse moyenne \mathcal{V}_{d9} Temps des communication verbale par sujet \mathcal{V}_{d10} Questionnaire d'utilisabilité et sur la conscience		
Condition \mathcal{C}_1	Condition \mathcal{C}_2	Condition \mathcal{C}_3	Condition \mathcal{C}_4
Sans assistance	Avec assistance	Sans assistance	Avec assistance
Ubiquitin	Ubiquitin	NusE:NusG	NusE:NusG

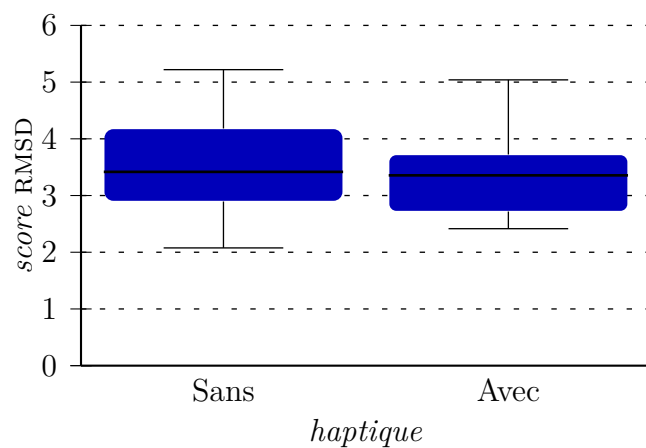


Figure 6.5 – Score RMSD minimum atteint avec et sans haptique

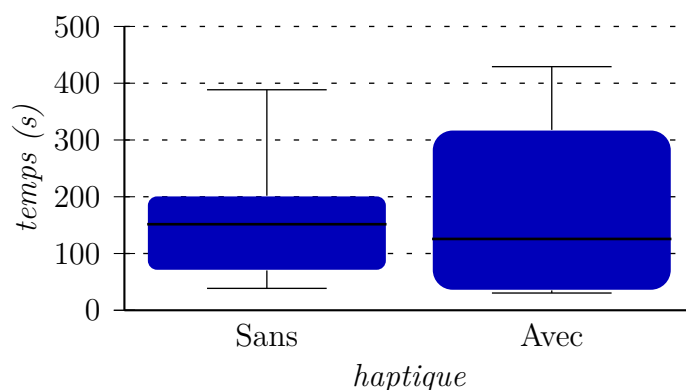


Figure 6.6 – Temps pour atteindre le score RMSD minimum avec et sans haptique

La figure 6.6 présente le temps du score RMSD minimum atteint \mathcal{V}_{d2} en fonction de la présence de l'assistance haptique \mathcal{V}_{i1} . L'analyse montre qu'il n'y a pas d'effet significatif de l'assistance haptique \mathcal{V}_{i1} sur le temps du score RMSD minimum atteint \mathcal{V}_{d2} ($W = 81$, $p = 0.528$).

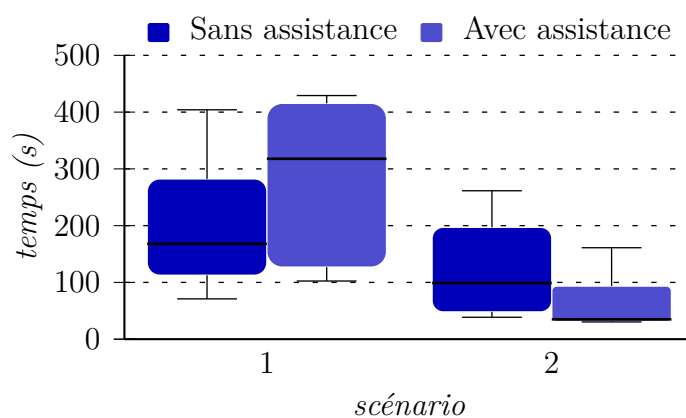


Figure 6.7 – Temps pour atteindre le score RMSD minimum avec et sans haptique pour chaque scénario

La figure 6.7 présente le temps du score RMSD minimum atteint \mathcal{V}_{d2} en fonction de la présence de l'assistance haptique \mathcal{V}_{i1} et des scénarios \mathcal{V}_{i2} . L'analyse montre qu'il n'y a pas d'effet significatif de l'assistance haptique \mathcal{V}_{i1} sur le temps du score RMSD minimum atteint \mathcal{V}_{d2} pour la molécule Ubiquitin ($W = 13$, $p = 0.547$). L'analyse montre un effet significatif de l'assistance haptique \mathcal{V}_{i1} sur le temps du score RMSD minimum atteint \mathcal{V}_{d2} pour le complexe de molécules NUSE:NUSG ($W = 36$, $p = 0.008$) inférieur de **-48.3 %**.

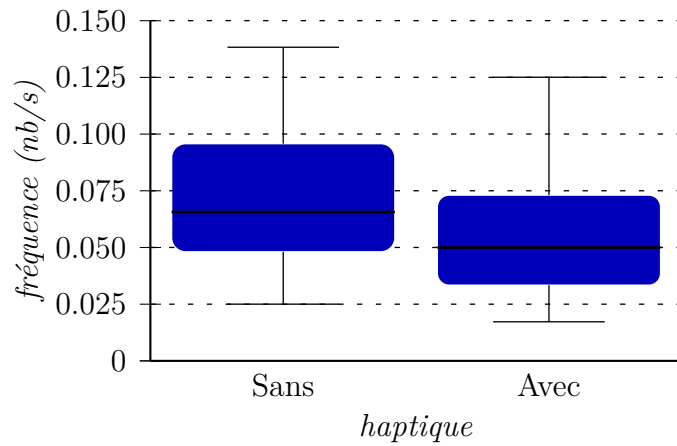


Figure 6.8 – Nombre de sélections par seconde effectuées par un opérateur pour la déformation avec et sans haptique

La figure 6.8 présente le nombre de sélections par seconde effectuées par les opérateurs pour une déformation \mathcal{V}_{d3} en fonction de la présence de l'assistance haptique \mathcal{V}_{i1} . L'analyse montre un effet significatif de l'assistance haptique \mathcal{V}_{i1} sur le nombre de sélections \mathcal{V}_{d3} ($W = 401$, $p = 0.009$) inférieur de -12.8% .

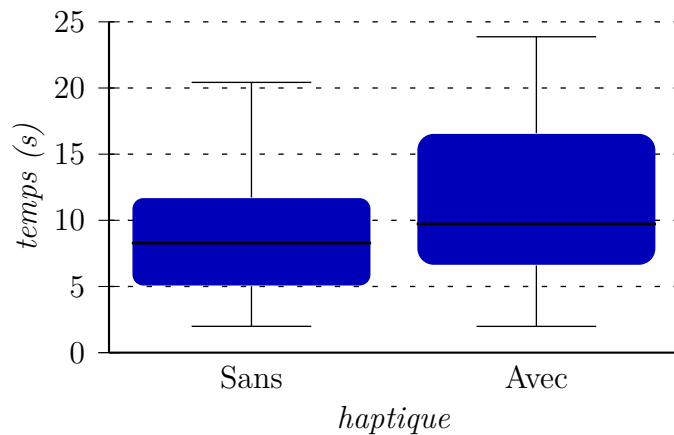


Figure 6.9 – Temps moyen d'une sélection effectuée par un opérateur pour la déformation avec et sans haptique

La figure 6.9 présente le temps moyen d'une sélection effectuée par un opérateur pour une déformation \mathcal{V}_{d4} en fonction de la présence de l'assistance haptique \mathcal{V}_{i1} . L'analyse montre un effet significatif de l'assistance haptique \mathcal{V}_{i1} sur le temps moyen d'une sélection \mathcal{V}_{d4} ($W = 140$, $p = 0.019$) supérieur de 28.1% .

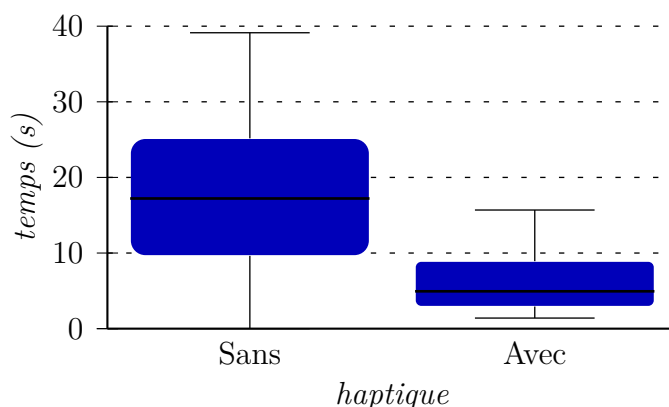


Figure 6.10 – Temps moyen pour atteindre une cible désignée lors d’une désignation avec et sans haptique

La figure 6.10 présente le temps moyen mis par un opérateur pour atteindre une cible acceptée lors du processus de désignation \mathcal{V}_{d6} en fonction de la présence de l’assistance haptique \mathcal{V}_{i1} . L’analyse montre un effet significatif de l’assistance haptique \mathcal{V}_{i1} sur ce temps moyen \mathcal{V}_{d6} ($W = 473$, $p \ll 0.05$) inférieur de -64.3% .

Analyse et discussion

En observant le meilleur score RMSD obtenu par les participants avec et sans assistance haptique, on constate qu’il n’y a pas d’amélioration significative des performances (voir figure 6.5 page 144). L’assistance haptique proposée ne semble pas permettre d’améliorer les performances et ne confirme pas l’hypothèse \mathcal{H}_1 . D’ailleurs, la figure 6.6 page 145 montre que le temps mis pour atteindre ce score n’est également pas amélioré.

Cependant, une analyse en fonction des scénarios montre que les outils d’assistance haptique permettent une amélioration sur le complexe de molécules NUSE:NUSG (scénario 2) mais pas sur la molécule Ubiquitin (scénario 1). Le complexe de molécules NUSE:NUSG est la tâche la plus complexe à réaliser notamment à cause du nombre importants de résidus à déformer. D’ailleurs, les annotations vidéos ont permis de constater à plusieurs reprises que les groupes abandonnaient avant la fin des 8 mn face à la complexité de cette tâche : « On ne fera pas mieux », « On n’arrivera jamais à améliorer le score », « Cette molécule est trop difficile », *etc.* Confrontés à ces difficultés, les sujets ont été plus performants lorsqu’ils étaient assistés par les outils d’assistance haptique.

Le coordinateur est le seul sujet qui ne peut pas effectuer de déformation. Il se consacre à la planification des tâches à réaliser. Grâce aux outils d'assistance haptique mis à sa disposition, il peut communiquer plus facilement et plus rapidement ces directives comme expliqué dans la section 6.4.2 page ci-contre. Ces outils permettent d'augmenter l'attention des opérateurs qui vont effectuer moins d'actions autonomes. Une action autonome est une action que l'opérateur décide de réaliser sans concertation avec les autres membres du groupe et potentiellement, en désaccord avec la stratégie globale adoptée par ses partenaires. Elles sont en général relativement brèves dans le temps par rapport aux actions proposées et désignées par le coordinateur car elle peut être interrompue à tout moment par une requête du coordinateur. Ces actions peuvent ainsi être relativement improductives.

La figure 6.8 page 146 et la figure 6.9 page 146 montrent que ces actions autonomes diminuent avec la présence des outils d'assistance haptique. En effet, on constate sur la figure 6.8 page 146 que la fréquence des sélections effectuées par les opérateurs diminue avec la présence d'une assistance haptique. Cependant, cette diminution peut être due à deux raisons différentes. Soit les opérateurs ont une tendance à travailler moins ce qui diminue le nombre total de sélections (et donc la fréquence) ; soit ils effectuent des déformations plus longues (ce qui diminue la fréquence). La figure 6.9 page 146 montre que la présence des outils d'assistance haptique allonge la durée des sélections ce qui nous permet de déduire que les opérateurs produisent des déformations plus longues dans le temps. Les outils haptiques proposés ont eu pour effet de diminuer le nombre d'actions autonomes.

Si les actions autonomes sont moins nombreuses, alors les opérateurs sont plus disponibles pour respecter la stratégie globale mise en place par le coordinateur. Les séquences de sélection et donc de déformation sont alors plus longues et moins nombreuses. D'ailleurs, la figure 6.10 page précédente montre que les opérateurs sont plus rapides à atteindre la cible désignée grâce à l'assistance haptique ce qui leur permet de passer plus de temps à déformer mais moins de temps à effectuer la sélection.

Nous avons vu que les outils d'assistance haptique pour la désignation aident le coordinateur à imposer une stratégie globale ce qui a pour effet d'améliorer les performances du groupe, surtout sur les tâches les plus complexes. L'hypothèse \mathcal{H}_1 est donc partiellement confirmée pour la tâche la plus complexe.

6.4.2 Amélioration de la communication

Données et tests statistiques

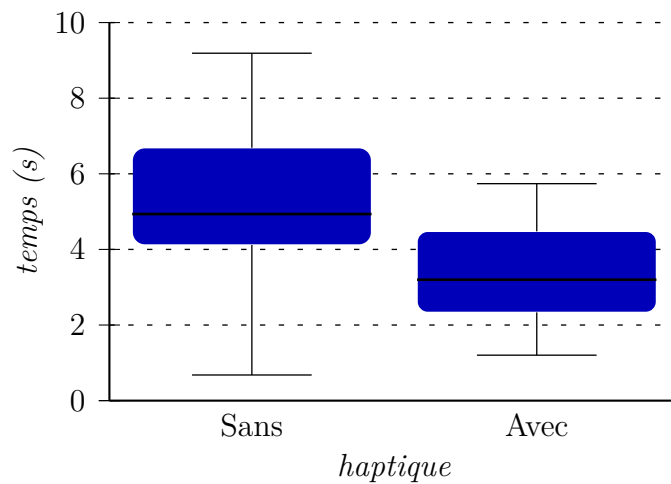


Figure 6.11 – Temps moyen d'acceptation d'une désignation avec et sans haptique

La figure 6.11 présente le temps moyen mis par un opérateur pour accepter une désignation \mathcal{V}_{d5} en fonction de la présence de l'assistance haptique \mathcal{V}_{i1} . L'analyse montre un effet significatif de l'assistance haptique \mathcal{V}_{i1} sur ce temps moyen \mathcal{V}_{d5} ($W = 404$, $p = 0.008$) inférieur de -51.5% .

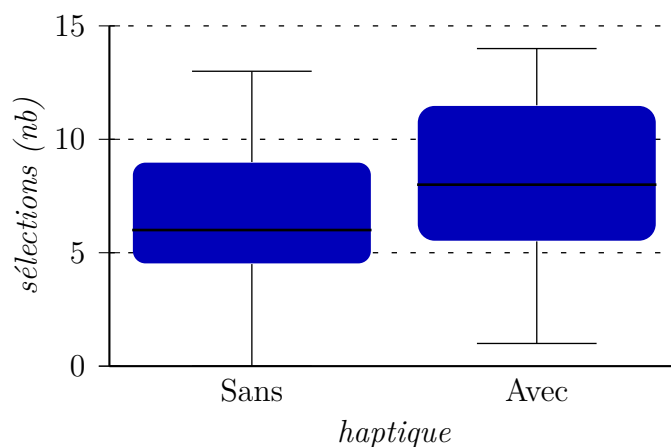


Figure 6.12 – Nombre de désignations acceptées au cours du processus de désignation avec et sans haptique

La figure 6.12 page précédente présente le nombre de désignations acceptées au cours du processus de désignation \mathcal{V}_{d7} en fonction de la présence de l'assistance haptique \mathcal{V}_{i1} . L'analyse montre un effet significatif de l'assistance haptique \mathcal{V}_{i1} sur ce nombre de sélections \mathcal{V}_{d7} ($W = 93.5$, $p = 0.004$) supérieur de 25.7 %.

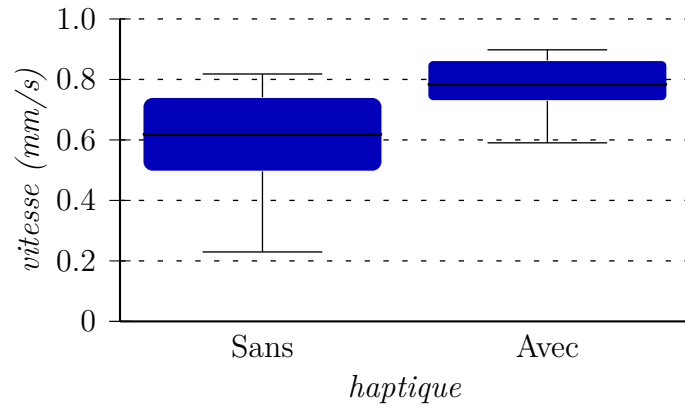


Figure 6.13 – Vitesse moyenne du coordinateur avec et sans haptique

La figure 6.13 présente la vitesse moyenne du coordinateur \mathcal{V}_{d8} en fonction de la présence de l'assistance haptique \mathcal{V}_{i1} . L'analyse montre un effet significatif de l'assistance haptique \mathcal{V}_{i1} sur ce nombre de sélections \mathcal{V}_{d8} ($W = 15$, $p = 0.004$) supérieur de 25.7 %.

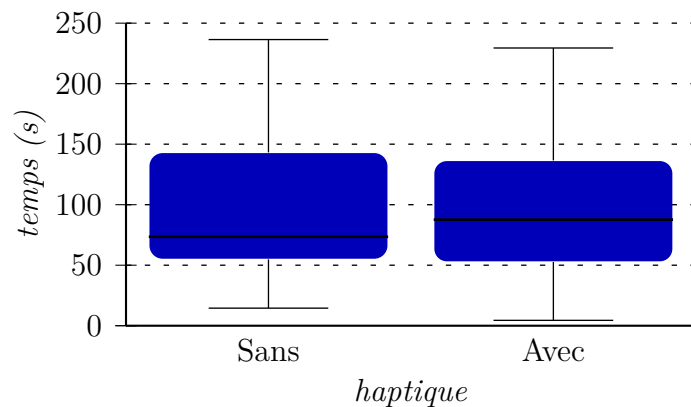


Figure 6.14 – Temps de parole des sujets avec et sans haptique

La figure 6.14 présente le temps de parole des sujets \mathcal{V}_{d10} en fonction de la présence de l'assistance haptique \mathcal{V}_{i1} . L'analyse montre qu'il n'y a pas d'effet significatif de l'assistance haptique \mathcal{V}_{i1} sur le temps de parole \mathcal{V}_{d10} ($W = 871$, $p = 0.554$).

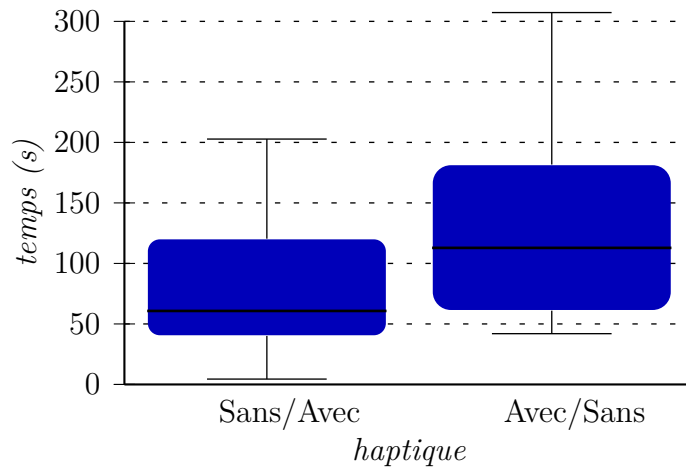


Figure 6.15 – Temps de parole des sujets en fonction de l'ordre de passage de l'assistance haptique

La figure 6.15 présente le temps de parole des sujets \mathcal{V}_{d4} en fonction de l'ordre de passage de l'assistance haptique. L'analyse montre un effet significatif de l'ordre de passage de l'assistance haptique sur le temps de parole \mathcal{V}_{d4} ($W = 849$, $p \ll 0.05$) avec une différence de 81.4 %.

Analyse et discussion

Dans le cas sans assistance haptique, les opérateurs réagissent à une désignation pour deux raisons : soit ils ont vu une nouvelle cible désignée, soit le coordinateur a indiqué oralement la présence d'une nouvelle cible. Dans le premier cas, le temps de réponse de l'opérateur pour accepter la désignation dépend de son degré d'attention et de la visibilité de la cible (cible masquée par des atomes ou cible trop éloignée du champ de vision). Dans le second cas, c'est le temps utilisé pour les échanges verbaux et la qualité des explications qui va déterminer le temps de réponse. Dans le second cas, le temps de réponse dépend de la quantité et de la qualité des échanges verbaux échangés. Ces deux configurations nécessitent que l'opérateur soit attentif concernant toute nouvelle désignation ce qui réduit son attention pour les autres événements (conscience périphérique).

La figure 6.11 page 149 nous montre que l'utilisation d'un retour haptique au sein de ce processus de désignation améliore considérablement le temps de réponse. L'outil d'assistance haptique signale aux opérateurs qu'une nouvelle cible a été désignée par le coordinateur.

Ce moyen de communication permet d'obtenir une réactivité qui ne dépend plus ni du degré d'attention de l'opérateur, ni des interventions verbales du coordinateur. Cela permet de réduire la charge de travail des opérateurs et du coordinateur qu'ils peuvent consacrer à la réalisation d'autres tâches.

L'utilisation du canal haptique permet d'informer seulement le ou les sujets concernés par la désignation. Notre expérimentation utilisant un écran partagé, le canal visuel ne permet pas d'adresser l'information de manière aussi ciblée.

De plus, on constate sur la figure 6.12 page 149 que le nombre de requêtes acceptées par les opérateurs est significativement supérieur avec l'assistance haptique. Les désignations sont mieux perçues avec l'assistance haptique ce qui permet aux opérateurs d'être plus réactifs. Ainsi, la stratégie proposée par le coordinateur est mieux adoptée par les opérateurs.

Les opérateurs étant plus rapides pour accepter une désignation avec l'assistance haptique, le temps d'attente du coordinateur entre chaque désignation est réduit. De cette manière, la fréquence à laquelle il effectue des désignations est augmentée et sa vitesse moyenne de travail est augmentée (voir figure 6.13 page 150). Les étapes du processus de désignation étant plus rapides, les opérateurs attendent moins que le coordinateur leur donne une nouvelle tâche à effectuer.

La figure 6.14 page 150 ne montre pas d'évolution du temps de parole lié à la présence ou à l'absence d'une assistance haptique. Les canaux visuels et haptiques ne semblent pas substituables mais plutôt complémentaires. Cependant, la figure 6.15 page précédente montre que l'ordre de passage a une influence forte sur la communication verbale. En effet, les sujets qui commencent par l'utilisation des outils haptiques produisent significativement plus d'échanges verbaux que les sujets qui commencent sans assistance haptique.

En ce qui concerne les sujets qui commencent sans assistance haptique, ils éprouvent dès le début le besoin de communiquer verbalement puisque qu'aucun autre moyen de communication ou d'assistance à la communication n'est mis à leur disposition. Lorsqu'on ajoute l'assistance haptique dans la seconde étape de l'expérimentation, les sujets ont déjà pu identifier les problématiques d'interaction et utilisent l'assistance haptique à bon escient qui se substitue aux communications verbales.

Par opposition, les sujets commençant par l'utilisation de l'assistance haptique apprennent à utiliser les outils et découvrent les tâches à réaliser dans le même temps. Lorsqu'on supprime l'assistance haptique dans la seconde

étape de l'expérimentation, ils doivent redéfinir les méthodes de travail et compensent ce manque par une augmentation des communications verbales.

On constate dans cette section que les outils d'assistance à la communication remplissent leur rôle en améliorant l'efficacité et la qualité de la communication. Ceci nous permet de valider l'hypothèse \mathcal{H}_2 . En effet, en améliorant la qualité de l'information – signaler directement aux opérateurs qu'une désignation est en cours – le temps mis par un opérateur pour être opérationnel sur cette désignation est réduit et l'efficacité globale du processus de désignation est augmentée. De plus, l'utilisation de ces outils haptiques se substitue en partie aux échanges verbaux ce qui rend les canaux de communication verbaux et haptiques complémentaires.

6.4.3 Évaluation qualitative

Questionnaire sur la communication et la conscience périphérique

Les utilisateurs pensent que la plateforme collaborative leur permet d'être relativement conscients des actions de leurs partenaires puisqu'ils estiment comprendre les requêtes et consignes de leurs collègues rapidement ($\mu = 2.3$, $\sigma = 0.6$) et qu'ils considèrent, à chaque instant, être conscients de la position spatiale virtuelle des autres collaborateurs ($\mu = 2.2$, $\sigma = 0.8$)¹. D'ailleurs, les sujets n'estiment pas nécessaire de signaler leurs actions aux partenaires ($\mu = 0.8$, $\sigma = 0.7$). Avec cette communication à sens unique, c'est la plateforme et ses outils (système de visualisation, assistance haptique) qui permet aux sujets d'avoir une conscience de groupe.

Pourtant, les sujets participent inconsciemment au processus de communication pour supporter la conscience de groupe ($\mu = 2.3$, $\sigma = 0.8$). En effet, les annotations vidéos ont permis de relever, à plusieurs reprises, le besoin d'informer les partenaires sur l'état actuel de l'environnement virtuel (les désignations en cours, les déformations à effectuer, l'évolution du score *RMSD*, *etc.*). Nous pouvons citer par exemple les cas où un coordinateur indique oralement une cible désignée à un opérateur qui ne l'aurait pas vu ou encore un opérateur qui indique au coordinateur un *résidu* nécessitant une déformation.

Les sujets participent et soutiennent, par leurs actions, la conscience de groupe. Cependant, ce soutien est souvent inconscient car les sujets ne font pas souvent l'effort de signaler explicitement leurs propres actions ou leur

1. L'échelle de notation est comprise entre 1 et 5 mais les moyennes ont été normalisées entre 0 et 4.

propre situation dans l'environnement virtuel. Seuls les cas d'incompréhension ou de litiges donnent lieu à des précisions verbales des sujets concernés. Il semble que l'assistance haptique ne soit pas utilisée dans ce cas. En effet, un test de WILCOXON [1945] montre qu'il n'y a aucun effet significatif de l'assistance haptique \mathcal{V}_{i1} sur :

- la compréhension rapide des actions effectuées par les collègues ($W = 18.5$, $p = 0.669$) ;
- le besoin de signaler ses propres actions ($W = 59$, $p = 0.236$) ;
- le besoin d'informer les partenaires lors de l'acceptation d'une requête du coordinateur ($W = 27$, $p = 0.109$).

Cependant, les sujets estiment que les outils d'assistance haptique permettent souvent de se passer de communication verbale ($\mu = 1.6$, $\sigma = 0.7$). Un test de WILCOXON [1945] montre un effet significatif de l'assistance haptique sur le besoin des sujets à utiliser la communication verbale ($W = 39$, $p = 0.068$). Les outils d'assistance haptique ont été développés pour améliorer la communication pour le processus de désignation. À travers le questionnaire, les sujets pensent, de manière modérée, avoir une meilleure communication entre eux avec l'assistance haptique ($\mu = 1.8$, $\sigma = 0.7$) que sans assistance haptique ($\mu = 1.5$, $\sigma = 0.7$). On peut expliquer ce résultat mitigé par le fait que le processus de désignation n'occupe qu'une portion du temps total de réalisation de la tâche ; le reste du temps, les moyens habituels de communication sont utilisés par les sujets.

De plus, le rôle de l'assistance haptique s'est montré particulièrement utile dans la conscience de la position spatiale virtuelle des partenaires ($W = 23.5$, $p = 0.039$). Les sujets estiment mieux connaître la position spatiale virtuelle de leurs partenaires avec l'assistance haptique ($\mu = 2.5$, $\sigma = 0.7$) que sans l'assistance haptique ($\mu = 2$, $\sigma = 0.8$). Pourtant, les outils d'assistance haptique n'indique en rien la position mais plutôt le statut des partenaires (en cours d'acceptation, en cours de déformation, *etc.*). On peut supposer que les sujets souhaitent parfois connaître le statut (en cours de déformation, en recherche d'une tâche à effectuer, *etc.*) de leur partenaire et que cette information ne nécessite pas d'être accompagnée de la position spatiale virtuelle des partenaires concernés ; les sujets cherchent seulement les informations dont ils ont besoin pour obtenir une conscience de groupe adaptée à la situation.

Questionnaire d'utilisabilité

Cette dernière expérimentation a été l'occasion d'évaluer l'utilisabilité de la plateforme Shaddock à l'aide du score SUS (*System Usability Scale*) décrit dans la section C.3.1 page 237. Cette évaluation, menée sur des sujets dont

un quart de biologistes, permet d'obtenir un score d'utilisabilité de l'application ($\mu = 51.1$, $\sigma = 16.8$)². BANGOR *et al.* [2009] a conduit une étude sur 3 500 enquêtes menées avec ce test pour obtenir une moyenne : le score moyen est de 68. Cependant, si on restreint notre étude de l'utilisabilité aux sujets biologistes, le score augmente ($\mu = 61.2$, $\sigma = 16.7$).

D'après les utilisateurs, notre plateforme est encore considérée comme incomplète. BANGOR *et al.* [2009] propose également de noter les applications évaluées avec le score SUS sur une échelle à sept niveaux : *Worst imaginable*, *Awful*, *Poor*, *Ok*, *Good*, *Excellent* et *Best imaginable*. Selon ce score, Shaddock se place dans la catégorie *Ok* ce qui en fait une application utilisable en l'état mais pour laquelle des améliorations sont nécessaires. L'hypothèse \mathcal{H}_3 n'est pas validée avec ces résultats mitigés.

Une limite importante de la plateforme concerne le système de visualisation. En effet, une proportion importante des utilisateurs se sont plaint d'une grande difficulté à percevoir la dimension de profondeur dans l'environnement virtuel. Plusieurs utilisateurs ont évoqué le besoin d'avoir un système de visualisation en 3D stéréoscopique.

La présence de biologistes dans le panel de sujets a également permis de mettre en évidence différents points critiques à prendre en compte pour les développements futurs. En particulier, ils auraient souhaité pouvoir stabiliser un résidu dans sa position finale ou encore pouvoir déformer des structures moléculaires de taille plus importante que les résidus tels que les structures secondaires (hélices- α et feuillets- β). Ce dernier point a été abordé dans la section 2.4.3 page 50.

6.5 Conclusion

6.5.1 Résumé des résultats

Cette expérimentation avait pour objectif d'évaluer de nouveaux outils de communication entre les membres d'un groupe sur une tâche collaborative étroitement couplée. De plus, nous avons pu confronter la plateforme Shaddock à des bio-informaticiens, ayant une expertise dans le domaine du *docking* moléculaire.

Il ressort de cette expérimentation que les outils d'assistance à la communication permettent d'améliorer significativement la communication entre

2. Pour rappel, les tests d'utilisabilité SUS fournissent des scores compris entre 0 et 100.

les membres du groupe avec pour conséquence une amélioration des performances, notamment dans les tâches les plus complexes. L'utilisation de l'haptique à bon escient permet de diminuer les temps de réponse lors des communications tout en adressant directement les informations à transmettre aux membres concernés. De plus, la répartition de la communication sur différentes canaux sensoriels permet de soulager de la charge cognitive de travail pour chaque utilisateur.

Les questionnaires d'utilisabilité ont également permis de montrer que la plateforme souffre d'un défaut important : la visualisation, notamment les problèmes liés à la perception de la profondeur. Cependant, un système de visualisation stéréoscopique devrait permettre de résoudre en grande partie ce problème.

Avec le questionnaire portant sur la conscience de groupe, on constate qu'une grande partie de **cette conscience repose** exclusivement sur les outils fournis par la plateforme, à savoir les retours visuels et les retours haptiques, lorsqu'ils sont disponibles. En ce sens, la communication haptique est pertinente puisqu'elle permet d'améliorer les performances en augmentant la conscience périphérique. Par exemple, elle permet d'indiquer rapidement l'action d'un partenaire ou elle guide rapidement les utilisateurs les uns vers les autres.

En ce qui concerne les autres aspects de la plateforme Shaddock, les biologistes se sont **montrés enthousiastes**. Ils ont tout de même suggéré différents outils qui, selon leur propre expérience, seraient nécessaires à une utilisation plus pertinente de cette plateforme. En particulier, ils ont émis le désir de pouvoir stabiliser la position des atomes après les avoir placés dans une position finale. Le second outil dont ils auraient aimé disposer est la déformation de blocs tels que les structures secondaires. Cependant, les contraintes de manipulation d'un tel ensemble d'atomes, exposée dans la section 2.4.3 page 50, entraînerait des modifications importantes sur les métaphores de manipulation. Globalement, la plateforme a séduit les utilisateurs mais a montré quelques faiblesses importantes qui la rendent encore trop instable dans l'état actuel.

6.5.2 Synthèse et perspectives

Cette dernière expérimentation nous a permis de mettre en avant la pertinence de la communication haptique dans le cadre d'une tâche de collaboration étroitement couplée. L'outil haptique proposé ne concerne que le processus de désignation mais d'autres aspects de la communication peuvent être explorés. On peut se reporter aux travaux de OAKLEY *et al.* [2001] qui

propose plusieurs métaphores sur le sujet comme par exemple la possibilité de ressentir la position du curseur des partenaires, métaphores qui devrait permettre d'améliorer la conscience de groupe ou encore la possibilité d'*attraper* un curseur puis de le *tirer* vers une cible.

En ce qui concerne les améliorations de la plateforme Shaddock, de nombreuses propositions ont été suggérées par les bio-informaticiens. Quelques-unes seront intégrées dans un futur proche, d'autres nécessitent une réflexion plus approfondie sur la pertinence et sur la faisabilité. Quoiqu'il en soit, devant l'enthousiasme des sujets pour cette expérimentation relativement longue (≈ 75 mn), Shaddock semble fournir les bases suffisantes pour une plateforme pertinente de déformation interactive de molécules en temps-réel.

