

Travail collaboratif assisté par haptique

Sommaire

5	6.1 Introduction	134
	6.2 Assistance haptique pour la communication . .	134
	6.2.1 Travaux existants	134
	6.2.2 Objectifs	135
10	6.3 Présentation de l'expérimentation	136
	6.3.1 Description de la tâche	136
	6.3.2 Spécificités du protocole expérimental	137
	6.4 Résultats	143
	6.4.1 Amélioration des performances	143
15	6.4.2 Amélioration de la communication	148
	6.4.3 Évaluation qualitative	152
	6.5 Synthèse	154
	6.5.1 Résumé des résultats	154
20	6.5.2 Conclusion	155

6.1 Introduction

Cette dernière expérimentation a pour objectif d'introduire et de valider des outils de communication haptique dans le cadre d'une tâche de *docking* moléculaire. Sur la base des précédentes expérimentations, nous avons constaté
5 que la communication est un point essentiel de la collaboration. Nous souhaitons proposer des outils haptiques pour améliorer les interactions et la communication entre les manipulateurs. Ce chapitre a pour but de tester et d'évaluer ces outils dans un contexte de déformation moléculaire.

De plus, ce dernier chapitre sera l'occasion de confronter la plateforme Shad-
10 dock à des experts en biologie moléculaire. En effet, il est nécessaire pour cette dernière étape d'avoir l'avis de spécialistes pour évaluer l'utilisabilité de la plateforme et confirmer la validité de ce processus de travail.

6.2 Assistance haptique pour la communication

6.2.1 Travaux existants

15 Le concept de communication haptique a été initié par les travaux de SALLNÄS *et al.* [2000] avec une expérimentation sur la manipulation synchrone de cube au sein d'un environnement virtuel. Chaque utilisateur dispose d'un outil haptique lui permettant d'exercer une pression sur un cube virtuel ; deux utilisateurs peuvent alors soulever un cube en exerçant une pression
20 de chaque côté du cube. Sur le même principe de manipulation synchrone, BAŞDOĞAN *et al.* [2000] proposent de déplacer un anneau autour d'un fil avec pour objectif de ne pas toucher le fil. Dans les deux études, les résultats montrent l'utilisation de l'haptique permet des améliorations significatives de la collaboration entre les partenaires.

25 Sur la base de ces résultats, OAKLEY *et al.* [2001] propose un environnement en 2D pour la création de diagrammes UML. 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 ;
- 30 – 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] mettent en évidence l'utilité des retours haptiques pour la désignation de cible 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 aux influences de la communication haptique sur le sentiment de présence et sur la conscience périphérique (voir section 1.4.2 page 27). Tout d'abord avec des travaux sur la manipulation collaborative d'un bras articulé en environnement virtuel, il montre une amélioration de la conscience périphérique [NAUD *et al.* 2009]. Puis, c'est avec une tâche de déplacement d'objet virtuel coordonné (une cheville à déplacer dans un trou) que ULLAH *et al.* [2010] montre une amélioration significative du sentiment de présence et de la conscience périphérique.

6.2.2 Objectifs

Les trois précédentes expérimentations nous ont permis de constater un des points critiques de la collaboration synchrone colocalisée : la communication entre les acteurs. Dans cette quatrième et dernière expérimentation, nous proposons des outils haptiques pour assister la communication entre les partenaires et les testons dans le cadre d'une tâche de déformation collaborative de molécule.

MOLL et SALLNÄS [2009] a montré la pertinence de la modalité haptique pour la communication et en particulier pour le processus de désignation. Nous souhaitons tester les bénéfices d'un outil de désignation haptique sur les performances globales de réalisation de la tâche et sur la communication entre les sujets.

De plus, cette quatrième et dernière expérimentation menée dans le cadre de cette thèse 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 molécules. Ces sujets permettront d'obtenir des avis pertinents sur l'utilité des outils proposés et des propositions d'évolutions.

6.3 Présentation de l'expérimentation

6.3.1 Description de la tâche

La tâche proposée est la déformation de molécules et de complexes de molécules dans un EVC. L'objectif est de la rendre le plus conforme possible au modèle.

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. Ils ont la possibilité de communiquer sans restriction de façon orale, gestuelle ou même virtuelle.

Cinq molécules sont utilisés dans le cadre de cette expérimentation dont trois exclusivement réservées pour l'entraînement. Chaque molécule est présentée dans la section A.2.1 page 199. L'affichage des molécules est identique à celui de la troisième expérimentation présenté dans la section 5.3.2 page 114 : la molécule déformable est représentée en CPK et *NewRibbon* alors que la molécule cible est en *NewRibbon* transparent. 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. Cet entraînement se déroule sur la molécule TRP-CAGE. La tâche est volontairement peu complexe et est surtout destinée à permettre aux sujets d'intégrer les étapes du processus de désignation (voir section 2.4.3 page 47).

Entraînement 2 La seconde phase d'entraînement s'effectue sur la molécule Prion qui est de taille plus importante. C'est dans cette phase qu'on introduit les outils de communication haptique pour les phases de désignation. Cet entraînement permet de continuer l'assimilation du processus de désignation sur une tâche plus complexe tout en introduisant l'assistance 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 et est solidaire de l'outil de manipulation. Cette phase d'entraînement permet de découvrir l'ensemble des outils proposés au sein d'un même scénario.

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 possède des atomes fixes afin de ne pas dériver.

Scénario 2 La seconde tâche consiste à reconstituer le complexe de molécules NUSE:NUSG. La molécule NUSG est laissée complètement 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 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 et l'ensemble des atomes de la chaîne carbonée principale de la molécule NUSE sont fixes afin d'éviter que cette dernière ne dérive.

Afin de pouvoir réaliser la tâche demandée, les sujets disposent de deux informations calculées en temps-réel. Une première mesure est le score RMSD, déjà décrit dans la section 4.3.1 page 80. 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 197) et principalement aux outils d'interaction. La méthode expérimentale est exposée dans la section B.4 page 214. Un résumé de cette méthode se trouve dans la table 6.1 page 142.

Matériel

Dans cette quatrième et dernière 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 adaptés pour le processus de désignation (voir section 6.3.2 page ci-contre) matérialisés par des PHANTOM Omni®. Le coordinateur aura à sa disposition trois outils dont deux basés sont des interfaces haptiques : une
5 souris USB pour l'outil d'orientation, un PHANTOM Omni® pour l'outil de désignation et un PHANTOM Desktop® pour l'outil de manipulation. Chaque interface haptique est liée 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
10 les sujets et l'écran de vidéoprojection. Le son est également enregistré par la caméra. Là encore, les vidéos sont exportées et séquencées *a fortiori* à l'aide du logiciel iMovie.

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

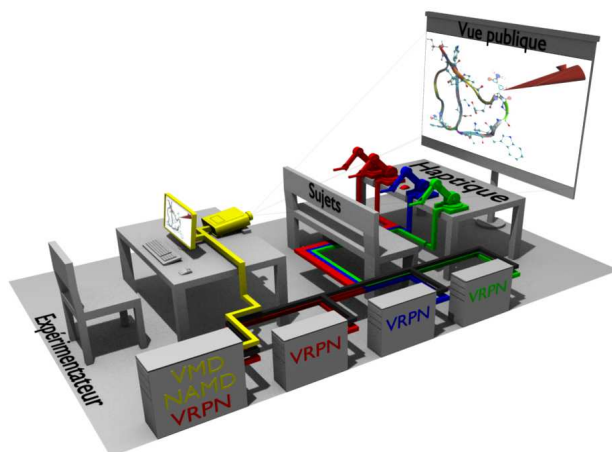


Figure 6.1 – Schéma du dispositif expérimental

Images à compléter
Il va falloir faire des
photos du dispositif ex-
périmental

Figure 6.2 – Photographie du dispositif expérimental

15 Visualisation

Dans cette quatrième et dernière expérimentation, les molécules étant très importantes, surtout pour le complexe de molécules NUS:E:NUSG, nous avons décidé de donner un rendu secondaire aux atomes. En effet, ils sont à présents

rendus de manière transparente. Cependant, nous verrons dans la section suivante que le coordinateur aura la possibilité de colorer les résidus au besoin. Pour le reste, le rendu visuel est similaire à celui des expérimentations trois et quatre. La figure 6.3 représente la molécule Ubiquitin et la figure 6.4 page 5 suivante représente le complexe de molécules NusE:NusG.

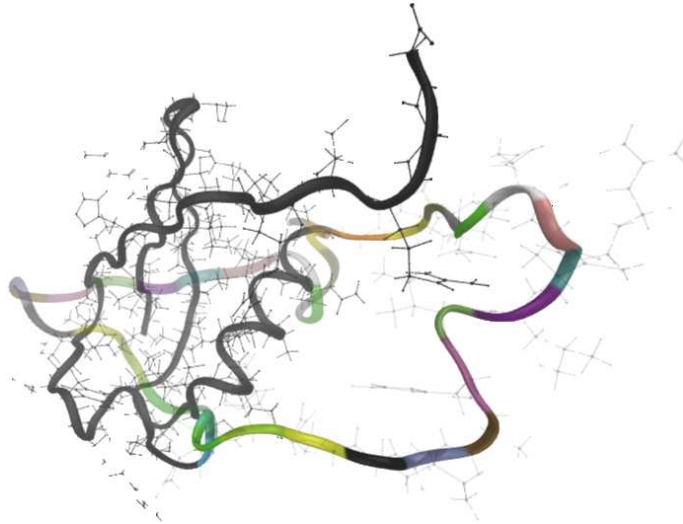


Figure 6.3 – Représentation de la molécule Ubiquitin pour le scénario 1

Outils d'interaction

Pour cette expérimentation, des modifications ont été apportées aux différents outils. En effet, nous souhaitons apporter une assistance haptique afin d'augmenter la communication sensorielle entre les sujets. Les outils modifiés sont l'outil d'orientation, l'outil de désignation, l'outil de déformation par atome et l'outil de déformation par molécule que nous nommerons outil de manipulation. Ces outils sont décrits dans la section 2.4.3 page 45.

Outil de désignation Le coordinateur est en charge d'effectuer les désignations envers les opérateurs. Nous souhaitons fournir au coordinateur un moyen de connaître l'état de la désignation à chaque instant. Une vibration est donc générée sur l'outil de désignation lorsque le coordinateur désigne une cible. L'arrêt de la vibration informe le coordinateur que la désignation vient d'être acceptée par un opérateur. Tant que la cible désignée par le coordinateur n'aura pas été acceptée, le coordinateur ne pourra pas désigner une autre cible.

Outil de déformation Un outil de déformation par atome est fourni aux deux opérateurs. Le coordinateur indique qu'une nouvelle désignation

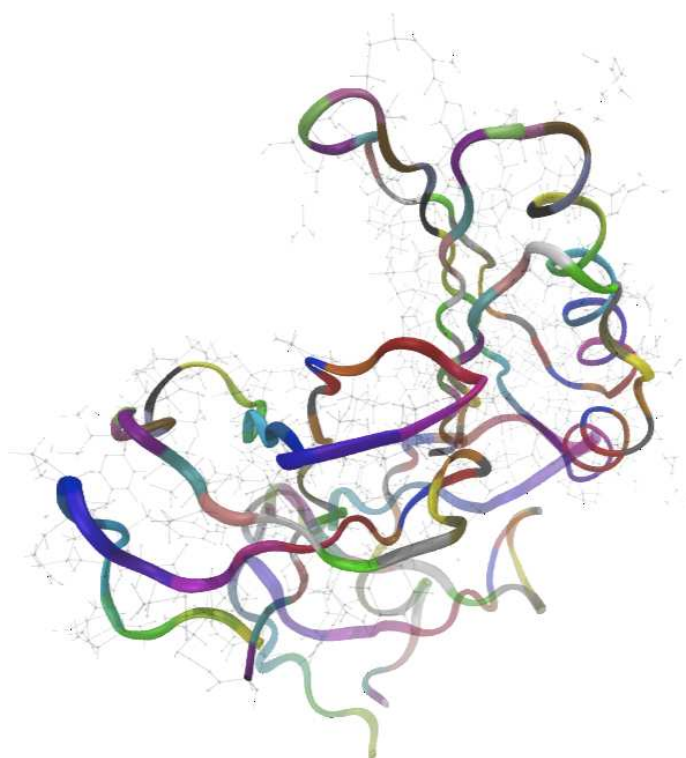


Figure 6.4 – Représentation de la molécule NusE:NusG pour le scénario 2

a été effectuée **en émettant une vibration chez les opérateurs**. Il est à noter que si les opérateurs sont en train de déformer la molécule, ils ne ressentent pas la vibration mais dès qu'ils relâchent leur sélection, la vibration leur indique qu'une requête est en cours. Les opérateurs ont la possibilité d'accepter ou non la désignation. Lorsque un opérateur accepte la désignation, les vibrations du coordinateur et des opérateurs s'arrêtent. L'opérateur qui a accepté est alors attiré vers la cible à déformer. De plus, sa prochaine déformation lui permettra la déformation d'un **résidu** ce qui est un gain de potentiel de déformation substantiel. L'objectif de cette augmentation des capacités est de stimuler l'envie d'interagir avec le coordinateur.

Outil de manipulation Un troisième outil, détenu par le coordinateur, permet le déplacement de la molécule (outil de déformation au niveau moléculaire). Cet outil va permettre au coordinateur de déplacer la molécule comme un bloc pour la rapprocher de sa cible finale. Afin d'aider le coordinateur dans cette tâche, nous avons souhaité utiliser les actions des opérateurs pour aider au déplacement de la molécule. Ainsi, lorsque les opérateurs effectuent une déformation, une infime partie de l'effort déployé est reporté sur l'ensemble de la molécule afin de la déplacer avec cette même intention. Les efforts reportés sont relativement faibles pour ne pas perturber la manipulation du coordinateur mais modifient sensiblement le déplacement de la molécule.

Outil d'orientation Pour finir, la souris permettant de modifier l'orientation de la scène est assignée au coordinateur. Cet outil, générateur de **conflits de coordination**, a été de nouveau mis à disposition après avoir été enlevé de la troisième expérimentation. Il s'est avéré, lors de la précédente expérimentation, que les sujets sont en demande de cet outil pour certaines situations. La souris associée à cet outil constitue le troisième périphérique destiné au coordinateur. En surchargeant le coordinateur avec un troisième outil, l'objectif est que la souris soit utilisée seulement lorsque c'est réellement nécessaire. En effet, la modification de l'orientation peut perturber les manipulations en cours effectuées par les opérateurs. La souris 3D utilisée dans la seconde expérimentation a été remplacée par une souris USB plus traditionnelle car c'est un périphérique connu de tous les sujets qui ne nécessite pas d'apprentissage.

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	

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 confrontées au test des rangs signés de WILCOXON [1945].

6.4.1 Amélioration des performances

Données et tests statistiques

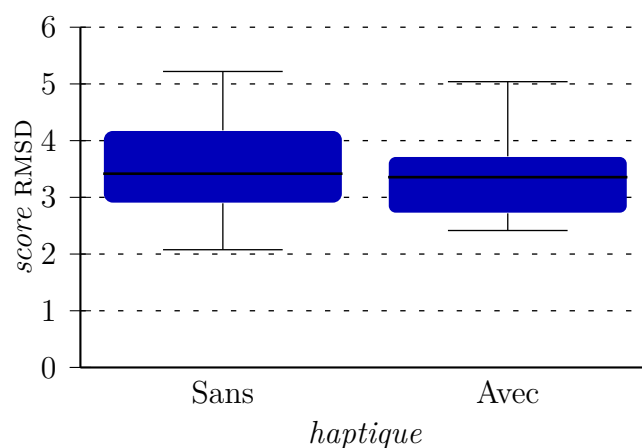


Figure 6.5 – Score RMSD minimum atteint avec et sans haptique

La figure 6.5 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} ($W = 87$, $p = 0.348$).

La figure 6.6 page suivante 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} ($W = 81$, $p = 0.528$).

La figure 6.7 page suivante 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}

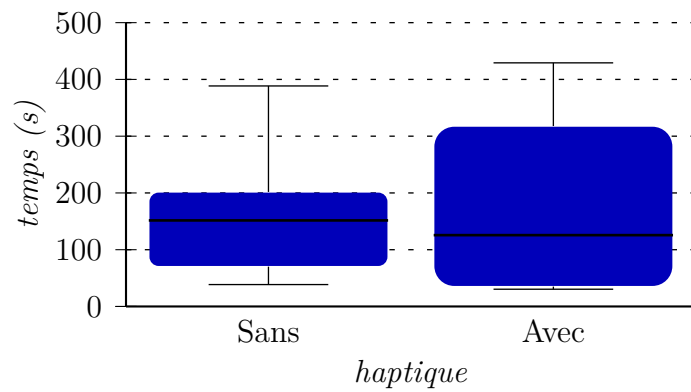


Figure 6.6 – Temps pour atteindre le score RMSD minimum avec et sans haptique

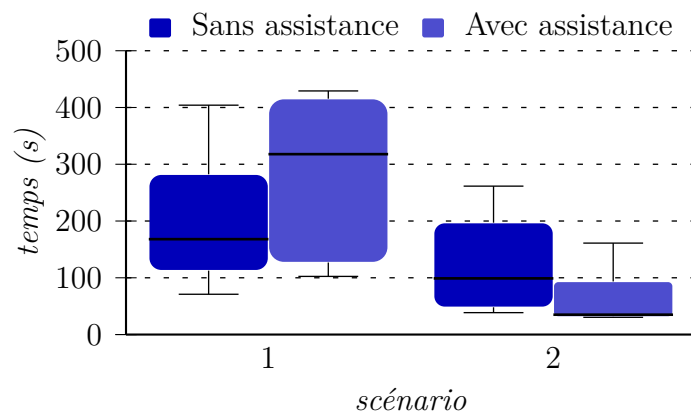


Figure 6.7 – Temps pour atteindre le score RMSD minimum avec et sans haptique pour chaque scénario

pour le complexe de molécules NUSE:NUSG ($W = 36$, $p = 0.008$) inférieur de -48.3% .

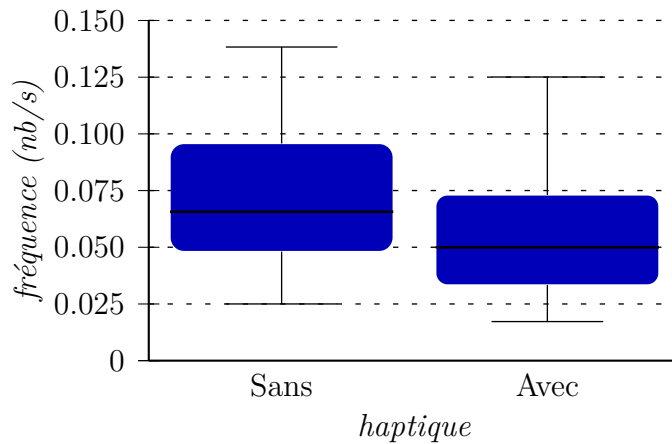


Figure 6.8 – Nombre de sélections par seconde effectuées par un opérateur pour la déformation avec et sans haptique

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% .

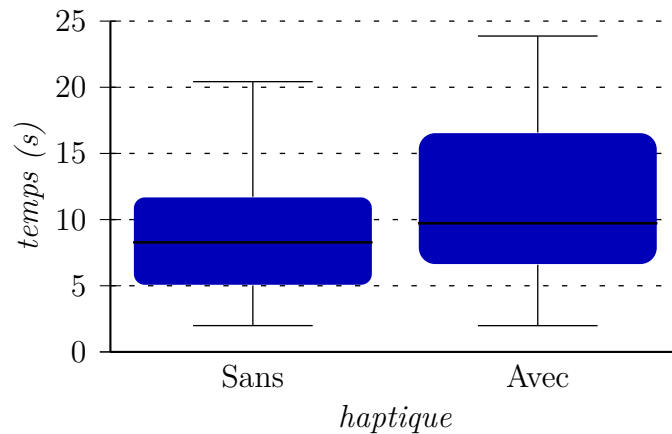


Figure 6.9 – Temps moyen d'une sélection effectuée par un opérateur pour la déformation avec et sans haptique

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 %.

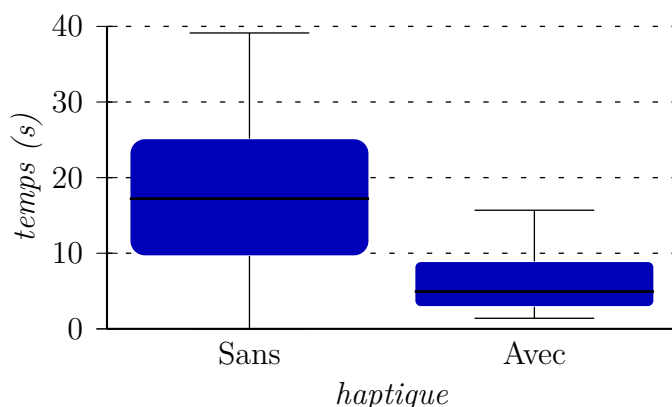


Figure 6.10 – Temps moyen pour atteindre une cible désignée lors d'une désignation avec et sans haptique

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 haptique, on constate qu'il n'y a pas d'amélioration significative des performances (voir figure 6.5 page 143). L'assistance haptique proposée ne semble pas permettre d'améliorer la collaboration entre les sujets et ne confirme pas l'hypothèse \mathcal{H}_1 . D'ailleurs, la figure 6.6 page 144 montre que le temps mis pour atteindre ce score ne s'est également pas amélioré.

Cependant, une analyse segmentée 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 une sorte d'abandon 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 alors à l'évaluation des meilleures stratégies pour la réalisation de la tâche. 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 suivante. Ces outils permettent d'augmenter l'attention des opérateurs qui vont effectuer moins d'actions solitaires. Une action solitaire est une action que l'opérateur décide, sans concertation avec les autres membres du groupe et potentiellement, en désaccord avec la stratégie globale adoptée par ses partenaires. Ces actions peuvent ainsi être improductives et éventuellement interrompues par une requête du coordinateur. Elles sont en général relativement brèves dans le temps par rapport aux actions proposées et désignées par le coordinateur.

La figure 6.8 page 145 et la figure 6.9 page 145 montrent que ces actions solitaires diminuent avec la présence des outils d'assistance haptique. En effet, on constate sur la figure 6.8 page 145 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 moins travailler ce qui diminue la fréquence totale ; soit ils effectuent des déformations plus longues ce qui diminue le nombre de déformations sur le temps total. La figure 6.9 page 145 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 solitaires.

La réduction de ces actions solitaires permet de mieux respecter la stratégie commune dirigée 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 avec l'assistance haptique ce qui leur permet de passer plus de temps à déformer mais moins de temps à chercher des tâches à réaliser.

Nous avons vu que les outils d'assistance haptique pour la désignation aident le coordinateur à imposer une stratégie commune ce qui a pour effet d'améliorer les performances du groupes sur les tâches les plus complexes. L'hypothèse \mathcal{H}_1 est confirmée pour la tâche la plus complexe. Il semble que quelque soit la stratégie, le travail collaboratif sera plus efficace si tous les membres du groupe sont en accord avec la stratégie à suivre.

6.4.2 Amélioration de la communication

Données et tests statistiques

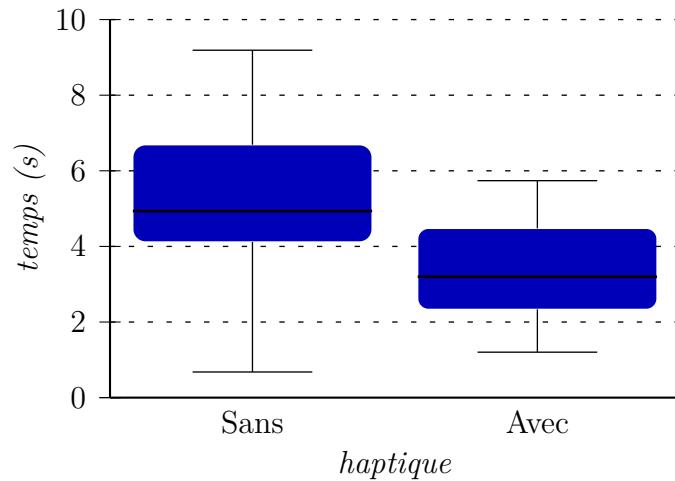


Figure 6.11 – Temps moyen d'acceptation d'une désignation avec et sans haptique

- 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} .
- 5 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% .

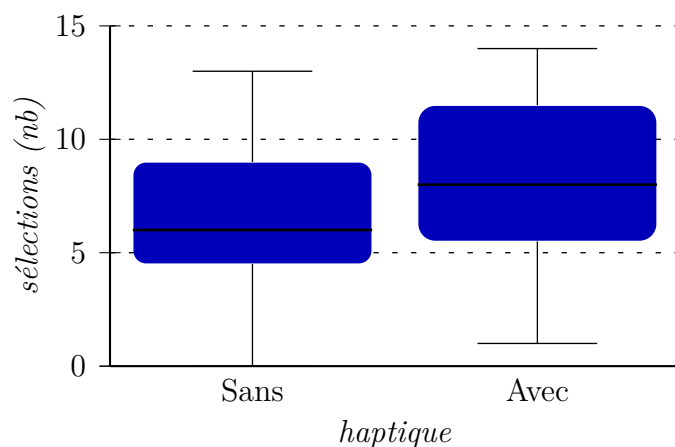


Figure 6.12 – Nombre de désignations acceptées au cours du processus de désignation avec et sans haptique

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 %.

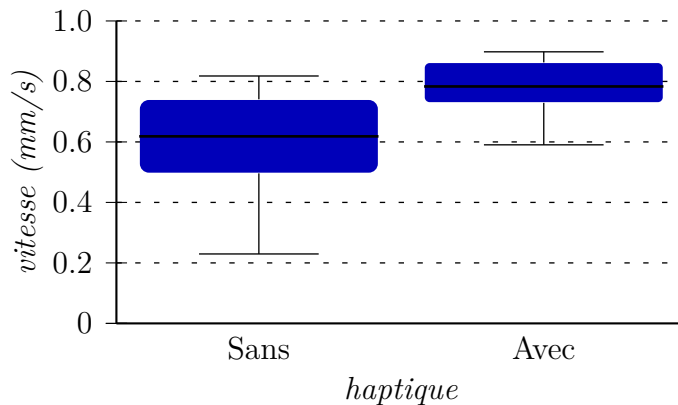


Figure 6.13 – Vitesse moyenne du coordinateur avec et sans haptique

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 %.

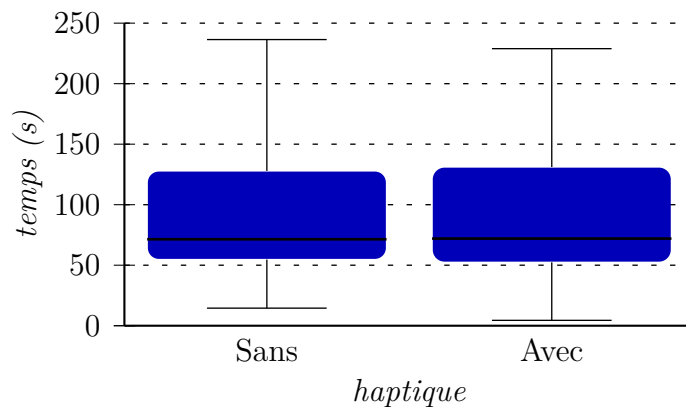


Figure 6.14 – Temps de parole des sujets avec et sans haptique

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} ($W = 657$, $p = 0.662$).

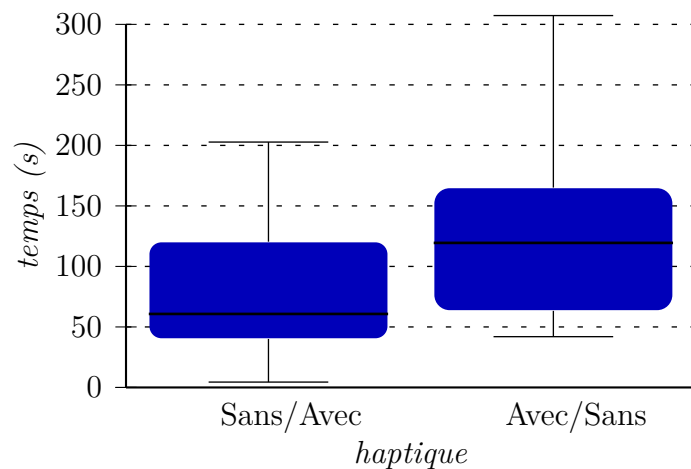


Figure 6.15 – Temps de parole des sujets en fonction de l'ordre de passage de l'assistance haptique

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} ($W = 625$, $p \ll 0.05$) avec une différence de 86.4 %.

5 Analyse et discussion

- Durant le processus de désignation, deux solutions différentes sont proposées aux opérateurs pour les prévenir qu'une nouvelle désignation vient d'être effectuée ; une première solution exclusivement visuelle ; une seconde solution visuo-haptique. Pour des désignations exclusivement visuelles, les opérateurs
- répondent à la désignation soit parce qu'ils ont vu une nouvelle cible en surbrillance, soit parce que le coordinateur leur a communiqué la présence d'une nouvelle cible. Dans le premier cas, le temps de réponse de l'opérateur pour accepter la désignation va dépendre du degré d'attention de celui-ci 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 un cas comme dans l'autre, il faut 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 148 nous montre que l'utilisation d'un retour haptique au sein de ce processus de désignation améliore considérablement le temps de réponse. En effet, l'outil d'assistance haptique va signaler directement

aux opérateurs qu'une désignation vient d'être effectuée 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 autre chose.

L'avantage de l'utilisation d'un retour haptique dans ce cas est la possibilité d'informer seulement le ou les sujets concernés par l'information. En utilisant des effets visuels, l'affichage partagé n'aurait pas permis de restreindre l'information aux sujets concernés.

De plus, l'amélioration de la communication permet d'améliorer la coordination de la stratégie. En effet, une meilleure perception des désignations permet aux opérateurs d'être plus réactifs à la stratégie du coordinateur (voir figure 6.12 page 148). De plus, leur charge de travail étant allégée par l'assistance haptique, ils sont plus aptes à comprendre la stratégie du coordinateur et à en proposer des améliorations pertinentes.

Étant donné que les opérateurs sont plus rapides à répondre aux désignations, le coordinateur est libéré plus rapidement de chaque requête qu'il crée. Cela lui permet de se consacrer rapidement à la prochaine désignation qu'il effectuera. Cette routine plus rapidement effectuée permet au coordinateur d'avoir un meilleur rendement et de ne pas laisser les opérateurs sans occupation. On constate cette amélioration de rendement par une vitesse moyenne du coordinateur augmentée comme le montre la figure 6.13 page 149.

Pourtant, la figure 6.14 page 149 ne montre pas d'évolution du temps de parole lié à la présence ou à l'absence d'une assistance haptique. L'assistance haptique ne semble pas remplacer les canaux de communication oraux mais semble seulement les remplacer. 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. Lorsque dans un second temps, on ajoute un outil haptique de communication, l'apprentissage leur permet de savoir comment utiliser cet outil haptique afin de remplacer certaines phases de communication verbales.

Par opposition, les sujets qui commencent par l'utilisation des outils haptiques n'ont pas eu l'expérience nécessaire pour optimiser l'utilisation de l'as-

sistance haptique par rapport aux échanges verbaux. De plus, lorsque dans la seconde phase de l'expérimentation, on leur enlève un outil de communication, ils doivent redéfinir les méthodes de travail et compensent naturellement ce manque par une augmentation du temps de parole.

- 5 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
10 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

15 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 235. L'évaluation par l'ensemble des utilisateurs fournit une note relativement peu élevée ($\mu = 51.1$, $\sigma = 16.8$)¹. Cependant,
20 si on restreint ce score aux sujets biologistes, le score augmente ($\mu = 61.2$, $\sigma = 16.7$). La plateforme n'est pas encore suffisante dans l'état actuel selon les utilisateurs. En se basant sur les travaux de BANGOR *et al.* [2009], on peut évaluer notre plateforme comme « OK » ce qui signifie qu'elle se trouve en-dessous de la moyenne globale d'utilisabilité du score d'évaluation SUS mais
25 qu'elle reste une application utilisable. L'hypothèse \mathcal{H}_3 est donc partiellement validé avec ces résultats sont mitigés.

Il faut noter que la difficulté de la tâche a amplifié le principal défaut de la plateforme : la visualisation. En effet, la quasi-totalité des utilisateurs se sont plaint d'une grande difficulté à percevoir la dimension de profondeur dans
30 l'environnement virtuel ce qui engendre une contrainte importante pour la réussite de la tâche. 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 relever plusieurs remarques et conseils pour des développements futurs. En

1. Pour rappel, les tests d'utilisabilité SUS fournissent des notes comprises entre 0 et 100.

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 hélices- α et les feuillets- β . Cependant, ce dernier point a été abordé dans la section 2.4.3 page 46.

5 Questionnaire sur la conscience périphérique

Les utilisateurs pensent 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 être conscients à chaque instant de la position des autres collaborateurs ($\mu = 2.2$, $\sigma = 0.8$)². D'ailleurs, ils pensent que leurs partenaires font de même puisqu'ils n'éprouvent pas le besoin de se signaler ($\mu = 0.8$, $\sigma = 0.7$). La communication nécessaire à la conscience périphérique semble être à sens unique : chaque utilisateur va chercher les informations dont il a besoin pour connaître la position et les agissements de ces partenaires mais il ne cherche pas à signaler ses propres actions. La conscience périphérique repose essentiellement sur les dispositifs de la plateforme, à savoir les affichages visuels et les outils de communication haptique lorsqu'ils sont disponibles.

Cependant, il y a tout de même un cas pour lequel les utilisateurs éprouvent le besoin de se signaler : l'acceptation d'une requête ou d'une consigne ($\mu = 2.3$, $\sigma = 0.8$). Pourtant, les sujets participent à la conscience périphérique collective malgré eux sans le faire ressortir dans le questionnaire. 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. Par exemple, le coordinateur indique oralement une cible qu'il a désigné mais qu'un opérateur n'aurait pas vu, ou encore un opérateur peut signaler au coordinateur un résidu ayant besoin d'être rapidement déplacé.

Les sujets sont acteurs de la conscience périphérique en commentant verbalement l'environnement virtuel mais ils ne cherchent pas à être particulièrement visibles et remarqués dans cet environnement. Ils souhaitent surtout que les actions qu'ils réalisent soient clarifiées en cas d'incompréhension ou de litige. Dans ce cas, l'assistance haptique qui leur est proposée ne semble être d'aucune aide. En effet, un test de WILCOXON [1945] montre qu'il n'y a aucun effet significatif des outils de communication haptique sur :

- la compréhension rapide des actions effectuées par les collègues ($W = 18.5$, $p = 0.669$) ;

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

- le besoin de se signaler ($W = 59, p = 0.236$) ;
 - le signalement lors de l’acceptation d’une consigne ($W = 27, p = 0.109$).
- Cependant, on note que les sujets estiment **que les consignes peuvent plus souvent se passer d’une** communication verbale lorsque les outils de communication haptique sont présents ($\mu = 1.6, \sigma = 0.7$). Un test de WILCOXON [1945] montre un résultat assez proche du seuil de significativité ($W = 39, p = 0.068$). **Les outils d’assistance haptique ont été développés afin de communiquer plus rapidement et sur différentes modalités sensorielles lors de la soumission d’une désignation. Les utilisateurs font ressortir à travers le questionnaire, de façon modérée, une meilleure communication avec assistance haptique ($\mu = 1.8, \sigma = 0.7$) que sans assistance haptique ($\mu = 1.5, \sigma = 0.7$). Ce résultat mitigé peut s’expliquer par le fait que toutes les consignes ne sont pas assistées par des retours haptiques : seules les consignes de désignation sont assistées.**
- De plus, le rôle de l’assistance haptique s’est montré particulièrement utile dans **la conscience de la position des autres** utilisateurs ($W = 23.5, p = 0.039$). En effet, les sujets ont estimé connaître les zones de travail des partenaires **de manière modérée** sans assistance haptique ($\mu = 2, \sigma = 0.8$) alors que la présence de retours haptiques semble améliorer cette perception ($\mu = 2.5, \sigma = 0.7$). 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.*). **Ce résultat nous permet de supposer que certains statuts fournissent une information suffisante pour ne pas avoir besoin de connaître la position.** De cette manière, les sujets ont une conscience adaptée à la situation mais suffisante.

6.5 Synthèse

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 Shad-dock 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 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 les informations à transmettre directement aux membres concernés. De plus, la distribution de cette communication sur différentes modalités permet de distribuer la charge de travail pour chaque

5 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. Pour les autres aspects de la plateforme, les biologistes se sont principalement montrés enthousiastes. Cependant, ils ont 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 bloquer la position des atomes après les avoir déplacés dans une position finale. Le second outil dont ils auraient aimé disposer est la déformation de blocs tels que les hélices- α ou les feuillets- β . Un tel outil a été discuté dans la section 2.4.3 page 46 mais les contraintes de manipulation d'un tel ensemble d'atomes entraînerait des modifications importantes sur les métaphores de manipulation. Globalement, la plateforme a séduit les utilisateurs mais a montré quelques faiblesses importantes qui la rende encore trop instable dans l'état actuel.

Avec le questionnaire portant sur la conscience périphérique, 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, l'haptique est pertinent puisqu'il permet d'améliorer les performances en augmentant la conscience périphérique.

6.5.2 Conclusion

Cette dernière expérimentation nous a permis de mettre en avant la pertinence de la communication haptique dans le cadre d'une tâche synchrone localisée de collaboration étroite. 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 des idées intéressantes sur le sujet. Notons par exemple la possibilité de ressentir le curseur de ses partenaires, métaphores qui devrait permettre d'améliorer encore la conscience périphérique. La possibilité d'attraper un curseur puis de le tirer vers une cible peut également se montrer pertinente.

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, 5 devant l'enthousiasme général des sujets pour cette expérimentation relativement longue (≈ 75 mn), Shaddock semble fournir les bases suffisantes pour une plateforme consistante de déformation interactive de molécules en temps-réel.

Conclusion et perspectives

