

Chapitre 2

La recherche collaborative

Sommaire

2.1	Présentation	9
2.1.1	Objectifs	9
2.1.2	Hypothèses	10
2.2	Dispositif expérimental et matériel	10
2.3	Méthode	11
2.3.1	Sujets	11
2.3.2	Variables	12
2.3.3	Tâche	14
2.3.4	Procédure	16
2.4	Résultats	18
2.4.1	Amélioration des performances en binôme	19
2.4.2	Stratégies de travail	22
2.4.3	Résultats qualitatifs	27
2.5	Synthèse	29
2.5.1	Résumé des résultats	29
2.5.2	Perspectives	29

2.1 Présentation

2.1.1 Objectifs

Dans cette première expérimentation, nous proposons d'étudier les deux premières des quatre sous-tâches élémentaires (voir section 1.2.1 page 3) : la *recherche* et la *sélection*. Ces sous-tâches sont cruciales car elles ont un impact important sur les sous-tâches suivantes que sont la *déformation* et la *manipulation*. Les difficultés liées à la complexité de l'environnement virtuel moléculaire seront étudiées à travers cette étude.

Cette première expérimentation a pour objectif principal de comparer un monôme et un binôme. Plusieurs facteurs seront étudiés lors de cette comparaison.

Le premier facteur concerne les performances. Les performances représentent à la fois le temps total pour réaliser la tâche mais aussi les ressources mises en place pour accéder à ce résultat. Un binôme sera-t-il plus performant qu'un monôme ?

Le second facteur concerne les méthodes et les stratégies de travail. C'est principalement l'évolution de ces stratégies au sein des binômes qui focalisera notre attention. Le travail en binôme permettra de mettre en avant différentes stratégies de travail discriminées en fonction de la communication, des espaces de travail, de la répartition des tâches, *etc.*

Enfin, il est nécessaire de valider la plate-forme de manipulation proposée. Pour cela, l'évaluation sera principalement confiée aux sujets qui noteront la plate-forme. L'objectif est ici de vérifier la pertinence de la plate-forme mais aussi d'en améliorer les points faibles.

2.1.2 Hypothèses

(\mathcal{H}_1) **Amélioration des performances en binôme** La première hypothèse est une amélioration des performances des binômes face aux performances des monômes. L'évaluation des performances sera principalement le temps de réalisation de la tâche.

(\mathcal{H}_2) **Stratégies variables en fonction des binômes** Cette seconde hypothèse concerne uniquement les binômes et suppose que les stratégies adoptées seront différentes en fonction des binômes. Cette différence sera liée aux différentes personnalités et aux différentes affinités au sein du binôme. L'identification des différentes stratégies permettra de les évaluer et de trouver celles qui donnent les meilleurs résultats.

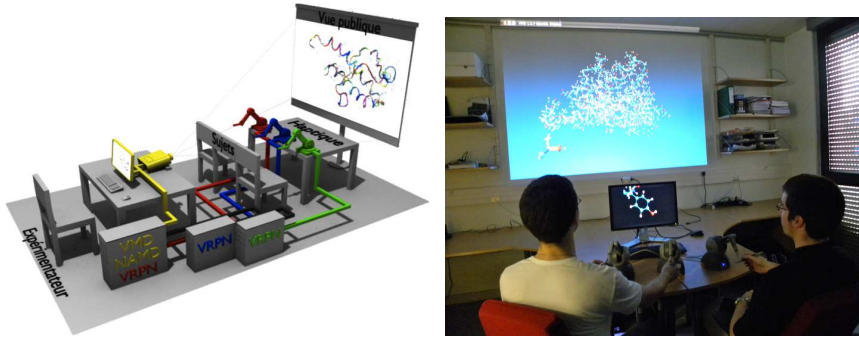
(\mathcal{H}_3) **Les sujets préfèrent le travail en binôme** La troisième hypothèse est de l'ordre du qualitatif. Elle s'intéresse aux conditions de travail en binôme. L'hypothèse est basée sur l'effet stimulant de travailler à plusieurs mais aussi sur l'intérêt de la collaboration sur des tâches répétitives. Il est cependant important que chaque sujet au sein du binôme se considère utile à la réalisation de la tâche.

2.2 Dispositif expérimental et matériel

L'Environnement Virtuel Collaboratif (EVC) utilisé est illustré sur la figure 2.1 page suivante. L'EVC propose une visualisation partagée sur grand écran (vue

publique (à tous les utilisateurs) à l'aide d'un vidéoprojecteur. Le ou les sujets font face à l'écran avec à leur disposition :

- un interface haptique de manipulation *grab* ;
- deux interfaces haptiques de déformation *tug*.



(a) Schéma du dispositif expérimental (b) Photographie du dispositif expérimental

Figure 2.1 – Illustration du dispositif expérimental

Les sujets ont la possibilité de communiquer entre eux sans restriction. Pour les monômes, le sujet a à sa disposition un outil de manipulation *grab* et un outil de déformation *tug* qu'il peut utiliser librement. Pour les binômes, chaque sujet se voit attribuer un outil de déformation *tug*. L'outil de manipulation *grab* est attribué à un seul des deux sujets après une négociation au sein du binôme. Le sujet choisi pour gérer l'outil de manipulation *grab* le sera pour toute la durée de l'expérimentation.

Un micro de bureau est placé en face des sujets afin de capter toutes les communications orales. L'enregistrement, réalisé à l'aide du logiciel Audacity, débute à la fin de la phase d'apprentissage jusqu'à la fin de l'expérimentation. Un découpage par tâche est réalisé en post-traitement.

Pour les détails techniques concernant la plate-forme et les outils de manipulation et de déformation, se reporter au chapitre A page 67.

2.3 Méthode

2.3.1 Sujets

24 sujets (4 femmes et 20 hommes) avec une distribution d'âge de $\mu = 27.8$, $\sigma = 7.2$ ont participé à cette expérimentation. Ils ont tous été recrutés au sein du laboratoire Laboratoire pour l'Informatique, la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur (CNRS-LIMSI) et sont chercheurs ou assistants de recherche dans les domaines suivants :

- linguistique et traitement automatique de la parole ;
- réalité virtuelle et système immersifs ;
- audio-acoustique.

Ils ont tous le français comme langue **principale**. Aucun participant n'a de déficience visuelle (ou corrigée le cas échéant), de déficience audio ou de déficience motrice du haut du corps. Les sujets ne sont pas rémunérés pour l'expérimentation.

Chaque participant est complètement naïf concernant les détails de l'expérimentation. Une explication détaillée de la procédure expérimentale leur est donnée au commencement de l'expérimentation mais **en omettant l'objectif de l'étude**.

2.3.2 Variables

Variables indépendantes

(\mathcal{V}_{i1}) **Nombre de sujets** La première variable indépendante est une variable intra-population. (\mathcal{V}_{i1}) possède deux valeurs possibles : « un sujet » (*c.f. monôme*) ou « deux sujets » (*c.f. binôme*). 24 monômes et 12 binômes ont été testés ce qui fait deux fois plus de monômes que de binômes.

(\mathcal{V}_{i2}) **Résidu recherché** La seconde variable indépendante est une variable intra-population. (\mathcal{V}_{i2}) concerne les résidus recherchés qui sont au nombre de 10 répartis à part égale dans deux molécules (voir table 2.1 page 15).

Variables dépendantes

(\mathcal{V}_{d1}) **Le temps de complétion** Ce temps est **le temps total** pour réaliser la tâche demandée, c'est-à-dire trouver le résidu et l'extraire de la molécule. Il n'y a pas de limite de temps pour réaliser la tâche. Ce temps est divisé en deux phases bien distinctes :

La recherche C'est la phase pendant laquelle les sujets cherchent le résidu. Cette recherche peut être visuelle en orientant et en déplaçant la molécule. Elle peut aussi amener les sujets à déformer la molécule afin d'explorer les résidus inaccessibles du centre de la molécule.

La sélection La phase de sélection débute dès l'instant où un des deux sujets a identifié visuellement le résidu. Elle est constituée d'une phase de sélection puis d'une phase d'**extraction**.

(\mathcal{V}_{d2}) **La distance entre les espaces de travail** Cette **distance** est la distance moyenne entre les deux effecteurs terminaux **présents** durant l'expérimentation. Elle est mesurée dans le monde réel mais peut être convertie dans l'environnement virtuel (à l'échelle de la molécule). **Cette distance est de l'ordre du centimètre.**

(\mathcal{V}_{d3}) **Les communications verbales** L'enregistrement **audio** permet de mesurer la **quantité** de temps de parole pour chaque **tâche** de l'expérimentation. Ces mesures différencie la phase de recherche et la phase de sélection (voir (\mathcal{V}_{d1})) comme indiqué plus précisément sur la figure 2.2.

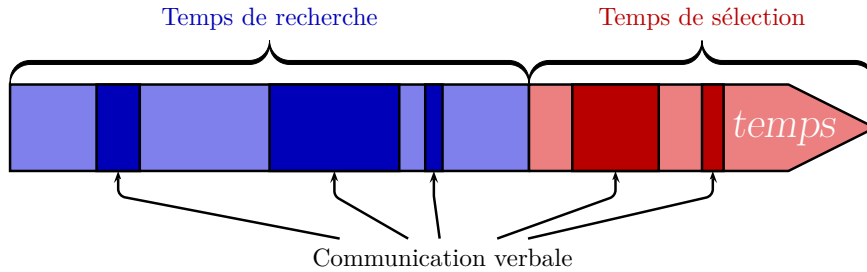


Figure 2.2 – Schéma des phases de la communication verbale

(\mathcal{V}_{d4}) **L'affinité entre les sujets** Le degré d'affinité – concernant uniquement les binômes – est compris entre 1 et 5 selon les critères suivants :

1. Les sujets ne se connaissent pas ;
2. Les sujets travaillent dans la même entreprise, le même laboratoire ;
3. Les sujets travaillent dans la même équipe, sur les mêmes projets ;
4. Les sujets travaillent **dans ensemble**, sont dans le même bureau ;
5. Les sujets sont amis proches.

(\mathcal{V}_{d5}) **Réponses qualitatives** Un questionnaire est proposé à tous les sujets. Il est constitué de plusieurs questions (notées sur échelle de LIKERT [1932] à cinq niveaux).

Le questionnaire est le suivant (les questions sont posées à chaque sujet dans le cas du binôme) :

1. Dans quelle configuration vous êtes-vous senti le plus efficace : *seul* ou *en collaboratif* (**choisissez 1 pour *seul* et 5 pour *en collaboratif***) ?
2. Avez-vous eu le sentiment de travailler en collaboration (**par opposition au travail seul**) ?
3. Pensez-vous avoir une position de **meneur** dans la configuration collaborative ?
4. Vous êtes vous senti utile dans la configuration collaborative (**par opposition à pénalisant**) ?
5. Comment évalueriez-vous votre **taux** de communication. . .
 - verbale ?
 - gestuelle ?

– virtuelle ?

6. Avez-vous trouvé les différents effets visuels intuitifs ?

7. Avez-vous trouvé les différents effets visuels confortables ?

8. Avez-vous trouvé les interactions intuitives ?

9. Avez-vous trouvé les interactions confortables ?

Concernant la communication, les communications verbales concernent tous les échanges, dialogues exposés par la voix. La communication gestuelle représente les gestes que les sujets peuvent effectuer dans le monde réel pour expliquer ou pour désigner par exemple. Enfin, la communication virtuelle concerne les informations données au partenaire par l'intermédiaire de l'environnement virtuel (par exemple, une désignation avec le curseur).

2.3.3 Tâche

La tâche proposée est la recherche et la sélection dans un **EVC** sur des molécules complexes. Les motifs à rechercher dans les structures moléculaires sont les résidus de la table 2.1 page suivante. Une fois le résidu trouvé, les sujets doivent le sélectionner puis l'extraire hors de la sphère virtuelle englobant la molécule. Les sujets possèdent deux outils pour trouver, sélectionner puis extraire ces motifs :

- ils peuvent explorer la molécule en la déplaçant ou en la tournant à l'aide de l'outil *grab* ;
- ils peuvent déformer la molécule à l'aide de l'outil *tug*.

La première molécule nommée TRP-CAGE [NEIDIGH et al. 2002] a pour identifiant PDB 1L2Y sur *Protein DataBase*¹. La seconde molécule nommée Prion [CHRISTEN et al. 2009] avec l'identifiant PDB 2KFL. Cinq résidus à chercher sont présents sur chaque molécule (voir figure 2.3 page 17) et chacun présente différents niveaux de complexité. Les critères de complexité, résumés pour chaque résidu dans la table 2.2 page 16, sont les suivants :

Position La position du résidu peut se trouver sur le pourtour de la molécule (position *externe*) ou à l'intérieur, au milieu de l'amas d'atomes que constitue la molécule (position *interne*). Un résidu en position externe ne nécessite pas de déformer la molécule pour le trouver et l'atteindre contrairement à un résidu en position interne qui sera plus complexe d'accès.

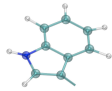

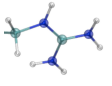
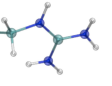
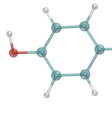
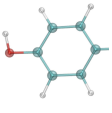
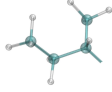
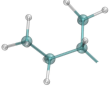
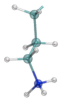
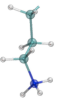
Forme La forme du résidu influe énormément sur la complexité de la recherche. On distingue trois formes différentes :

Chaîne Une chaîne d'atomes (la plupart du temps carbonés) avec des atomes d'hydrogène de part et d'autres.

Cycle Une chaîne d'atomes de carbone ou d'azote qui boucle sur elle-même.

1. <http://www.pdb.org/>

Table 2.1 – Liste des résidus recherchés**(a)** Résidus sur la molécule TRP-CAGE**(b)** Résidus sur la molécule Prion

Résidu	Image	Résidu	Image
(\mathcal{R}_1)		(\mathcal{R}_6)	
(\mathcal{R}_2)		(\mathcal{R}_7)	
(\mathcal{R}_3)		(\mathcal{R}_8)	
(\mathcal{R}_4)		(\mathcal{R}_9)	
(\mathcal{R}_5)		(\mathcal{R}_{10})	

Étoile Séries de chaînes d’atomes toutes reliées sur un atome central (un atome de carbone pour la plupart du temps).

Couleurs Les atomes sont colorés en fonction de leur nature (rouge pour l’oxygène, blanc pour l’hydrogène, *etc.*). Les atomes rares seront donc rapidement **trouvés** grâce à leur couleur **différente**. Par contre, les atomes nombreux (comme les hydrogènes ou les carbones) seront plus difficiles à filtrer à cause de **leur fréquence importante**.

Similarité Certains **résidus** à chercher sont très similaires à d’autres **résidus** également présents sur la molécule. Les **résidus** similaires possèdent un atome de moins ou de plus par rapport au **résidu** recherché. **De par leur similarité, ils vont mobiliser les capacités de recherche des sujets sur des **résidus** ressemblants mais incorrects.**

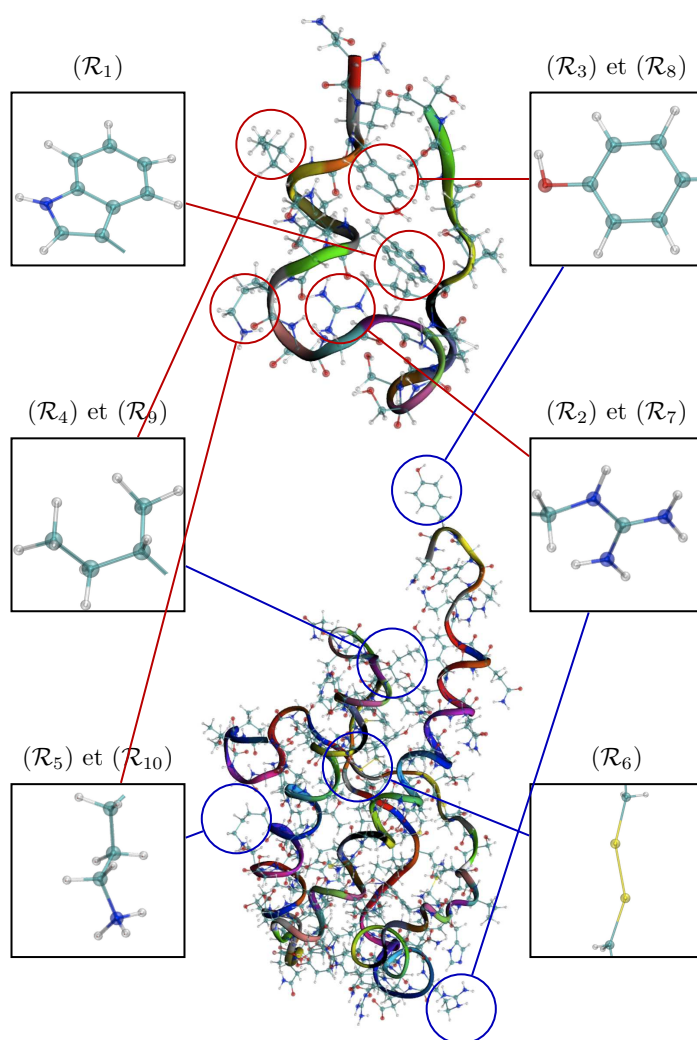
Table 2.2 – Paramètres de complexité des résidus – Carbone en *cyan*, Azote en *bleu*, Oxygène en *rouge* et Soufre en *jaune*

Résidu	Position	Forme	Couleurs	Similarité
(\mathcal{R}_1)	Interne	Cycle	8 C, 1 A	Non
(\mathcal{R}_2)	Interne	Étoile	1 C, 3 A	Non
(\mathcal{R}_3)	Interne	Cycle	6 C, 1 O	Non
(\mathcal{R}_4)	Externe	Chaîne	4 C	Non
(\mathcal{R}_5)	Externe	Chaîne	4 C, 1 A	Non
(\mathcal{R}_6)	Interne	Chaîne	2 C, 2 S	Non
(\mathcal{R}_7)	Externe	Étoile	1 C, 3 A	Non
(\mathcal{R}_8)	Externe	Cycle	6 C, 1 O	Non
(\mathcal{R}_9)	Interne	Chaîne	4 C	Oui
(\mathcal{R}_{10})	Interne	Chaîne	4 C, 1 A	Oui

2.3.4 Procédure

Pour débiter cette expérimentation, les sujets sont confrontés à un exemple sur la molécule TRP-ZIPPER [CHRISTEN et al. 2009] ayant pour identifiant PDB 2KFL. Pendant la phase d’apprentissage, les outils sont introduits et expliqués un par un. Chaque sujet a la possibilité de tester les outils et peut questionner l’expérimentateur.

Dès que la phase d’apprentissage est terminée, l’enregistrement audio démarre. Un premier **résidu** est affiché et les sujets peuvent débiter la recherche. Lorsque le **résidu** a été trouvé, sélectionné puis extrait, le système s’arrête. Un second **résidu** est affiché et ainsi de suite pour les dix **résidus**.

Figure 2.3 – Répartition des résidus sur les molécules

L'ensemble des résidus est proposé dans un ordre différent pour chaque monôme ou binôme. Les sujets sont tenus d'effectuer l'ensemble des dix résidus deux fois, en monôme et en binôme. Les configurations monôme et binôme sont également alternées suivant les groupes selon les trois combinaisons possibles suivantes :

1. Le sujet \mathcal{A} , puis le sujet \mathcal{B} , puis le binôme \mathcal{AB} ;
2. Le sujet \mathcal{A} , puis le binôme \mathcal{AB} , puis le sujet \mathcal{B} ;
3. Le binôme \mathcal{AB} , puis le sujet \mathcal{A} , puis le sujet \mathcal{B} .

Lorsque les sujets ont réalisé toutes les tâches dans les deux configurations possibles (monôme et binôme, ils sont soumis au questionnaire. Chaque sujet est tenu de répondre au questionnaire seul, sans communiquer avec les autres sujets.

Un résumé du protocole expérimental est exprimé dans la table 2.3.

Table 2.3 – Synthèse de la procédure expérimentale

Tâche	Recherche et sélection de motifs		
Hypothèses	(\mathcal{H}_1) Amélioration des performances en binôme		
	(\mathcal{H}_2) Stratégies variables en fonction des binômes		
	(\mathcal{H}_3) Les sujets préfèrent le travail en binôme		
Variable indépendante	(\mathcal{V}_{i1}) Nombre de sujets		
	(\mathcal{V}_{i2}) Résidu à chercher		
Variable dépendantes	(\mathcal{V}_{d1}) Temps de complétion		
	(\mathcal{V}_{d2}) Distance entre les espaces de travail		
	(\mathcal{V}_{d3}) Communication verbales		
	(\mathcal{V}_{d4}) Affinités entre les sujets		
Condition (\mathcal{C}_1)	Condition (\mathcal{C}_2)	Condition (\mathcal{C}_3)	
Sujet \mathcal{A} 10 résidus	Sujet \mathcal{A} 10 résidus	Binôme \mathcal{AB} 10 résidus	
Sujet \mathcal{B} 10 résidus	Binôme \mathcal{AB} 10 résidus	Sujet \mathcal{A} 10 résidus	
Binôme \mathcal{AB} 10 résidus	Sujet \mathcal{B} 10 résidus	Sujet \mathcal{B} 10 résidus	

2.4 Résultats

Cette section va présenter tous les résultats de cette première étude concernant la recherche et la sélection sur une tâche complexe de collaboration. Les données, confrontées à un test de SHAPIRO et WILK [1965], ne sont pas distribuées selon une loi normale. Cependant, un test de BROWN et FORSYTHE [1974] permet

de confirmer l'homoscedasticité. L'analyse de la variance est alors pratiquée à l'aide d'un test de FRIEDMAN [1940], adapté pour les variables intra-population non-paramétriques.

2.4.1 Amélioration des performances en binôme

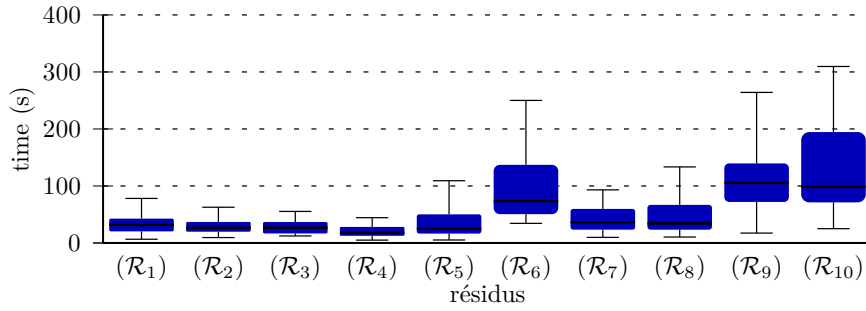


Figure 2.4 – Temps de complétion par résidu

La figure 2.4 présente le temps de complétion (\mathcal{V}_{d1}) de chaque résidu (\mathcal{V}_{i2}). L'analyse montre qu'il y a un effet significatif des résidus (\mathcal{V}_{i2}) sur le temps de complétion (\mathcal{V}_{d1}) ($\chi^2 = 163.1$, $df = 9$, $p \ll 0.05$). Un test post-hoc de MANN et WHITNEY [1947] avec une correction de HOLM [1979] permet de déterminer que les résidus (\mathcal{R}_6), (\mathcal{R}_9) et (\mathcal{R}_{10}) obtiennent des temps de complétion significativement plus longs que les autres résidus.

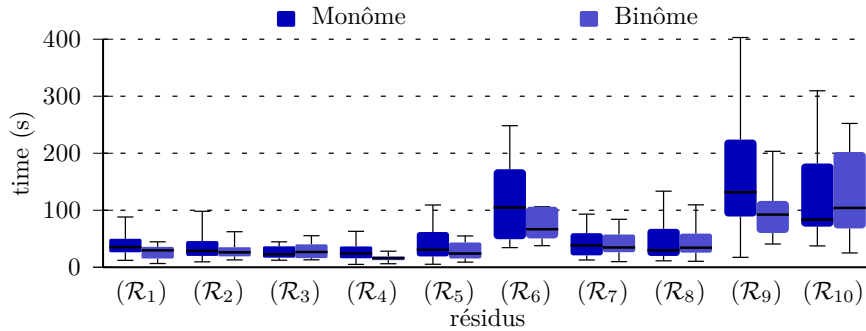


Figure 2.5 – Temps de complétion comparés (monôme ou binôme) par résidu

La figure 2.5 présente les temps de complétion (\mathcal{V}_{d1}) de chaque résidu (\mathcal{V}_{i2}) en fonction du nombre de participants (\mathcal{V}_{i1}). L'analyse ne montre pas d'effet significatif du nombre de participants (\mathcal{V}_{i1}) sur le temps de complétion (\mathcal{V}_{d1}) ($\chi^2 = 3$, $df = 1$, $p = 0.082$). Cependant, en se limitant au groupe de trois

résidus (\mathcal{R}_6), (\mathcal{R}_9) et (\mathcal{R}_{10}) identifiés précédemment comme significativement plus longs à trouver et extraire, on montre un effet significatif du nombre de participants (\mathcal{V}_{11}) sur le temps de complétion (\mathcal{V}_{d1}) ($\chi^2 = 7.7$, $df = 1$, $p = 0.006$).

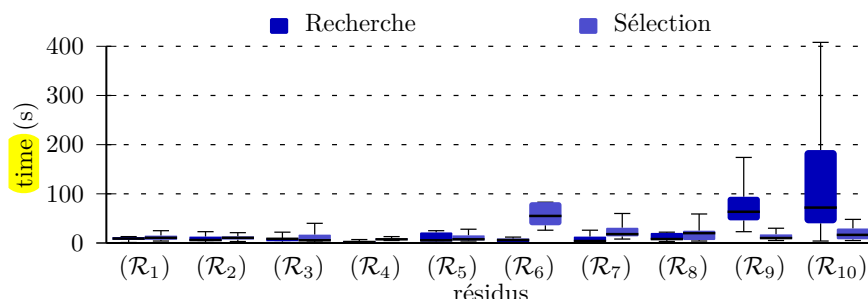


Figure 2.6 – Temps de recherche et de sélection comparés par résidu

La figure 2.6 présente les temps de recherche et de sélection par résidu (\mathcal{V}_{i2}). L'analyse montre un effet significatif des résidus (\mathcal{V}_{i2}) sur les temps de recherche ($\chi^2 = 97.6$, $df = 9$, $p \ll 0.05$). Un test post-hoc de MANN et WHITNEY [1947] avec une correction de HOLM [1979] permet de déterminer que les résidus (\mathcal{R}_9) et (\mathcal{R}_{10}) obtiennent des temps de recherche significativement plus longs que les autres résidus. L'analyse montre également un effet significatif des résidus (\mathcal{V}_{i2}) sur les temps de sélection ($\chi^2 = 72.8$, $df = 9$, $p \ll 0.05$). Un test post-hoc de MANN et WHITNEY [1947] avec une correction de HOLM [1979] permet de déterminer que le résidu (\mathcal{R}_6) obtient un temps de sélection significativement plus long que les autres résidus.

La molécule TRP-CAGE présente un nombre de résidus à examiner relativement limité. Les sujets construisent rapidement une carte mentale de la molécule afin de trouver rapidement les résidus recherchés. De plus, les faibles contraintes physiques de la molécule la rendent facile à déformer. Cela facilite la recherche des résidus qui sont en position interne à la molécule et qui nécessite une déformation. Tous ces facteurs rendent les tâches de recherche et de sélection peu complexes sur la molécule TRP-CAGE.

La molécule Prion possède un nombre de résidus beaucoup plus important. La construction complète d'une carte mentale est très complexe, d'autant plus que les sujets ne sont confrontés à la molécule que dix fois (cinq fois en monôme et cinq fois en binôme). Les sujets adoptent différentes stratégies suivant les résidus. Tout d'abord, ils débutent par une recherche exploratoire qui permet de découvrir tous les résidus en position externe à la molécule ((\mathcal{R}_7) et (\mathcal{R}_8)). Ensuite, lorsque cette première phase d'exploration ne permet pas d'achever la tâche de recherche, les sujets déforment la molécule afin d'accéder aux résidus en position interne ((\mathcal{R}_6), (\mathcal{R}_9) et (\mathcal{R}_{10})).

Le travail en binôme n'améliore pas les performances sur la tâche par rapport au travail en monôme bien que la p -value soit seulement très légèrement au-dessus

du seuil. Cependant, une évaluation de l'ensemble des résidus proposés a permis d'identifier des tâches de complexités variables : les résidus (\mathcal{R}_6), (\mathcal{R}_9) et (\mathcal{R}_{10}) apparaissent comme significativement plus complexes que les autres résidus. Sur ce groupe de résidus, les binômes obtiennent une amélioration significative des performances par rapport aux monômes ce qui confirme notre hypothèse (\mathcal{H}_1) sur les tâches complexes.

Comme développé dans la procédure expérimentale, le temps de complétion de la tâche peut être séparé en deux parties : le temps de recherche et le temps de sélection (voir figure 2.2 page 13). Les résidus (\mathcal{R}_9) et (\mathcal{R}_{10}) se distinguent par un temps de recherche significativement plus important que les autres résidus. En effet, ce sont les deux résidus qui possèdent des similarités avec d'autres résidus également présents dans la molécule (voir table 2.2 page 16). À cause de ces similarités, l'œil des sujets est continuellement attiré vers ces résidus similaires et une perte de temps significative se fait ressentir dans la phase de recherche.

En contre-partie, le résidu (\mathcal{R}_6) se distingue par un temps de sélection significativement plus important que les autres résidus. Ce résidu possède deux atomes de Soufre de couleur jaune ce qui les rends très distinguables malgré le nombre importants d'atomes de la molécules. Le temps de recherche s'en trouve extrêmement réduit. Cependant, ce résidu est positionné au centre de la molécule. La sélection nécessite de déplier en grande partie la molécule afin de pouvoir l'atteindre et le sélectionner.

L'analyse met en évidence trois configurations concernant l'allocation du temps pour achever la tâche :

Recherche et sélection Cette configuration se constitue d'un temps identique alloué à la recherche et à la sélection. Ces résidus sont ceux qui ne présentent pas de réelle complexité (la molécule TRP-CAGE et les résidus (\mathcal{R}_7) et (\mathcal{R}_8) de la molécule Prion) et sur lesquels, le travail collaboratif n'améliore pas les performances.

Prédominance de la recherche Cette configuration alloue un temps relativement important à la recherche de l'objectif. Une fois le résidu identifié, les sujets peuvent accéder et sélectionner rapidement l'objectif. Les résidus (\mathcal{R}_9) et (\mathcal{R}_{10}) sont concernés. Le travail collaboratif améliore les performances grâce au caractère très parallélisable de la phase de recherche.

Prédominance de la sélection Cette configuration alloue un temps relativement important à la sélection de l'objectif. Le résidu est rapidement localisé mais il est difficile d'y accéder directement. Une phase de déformation est nécessaire pour le sélectionner. Le résidu (\mathcal{R}_6) est concerné. Le travail collaboratif améliore les performances grâce à la multiplication des ressources allouées pour la déformation.

2.4.2 Stratégies de travail

Dans cette section, les données concernent exclusivement les binômes. Elles sont utilisées afin d'étudier les différentes stratégies adoptées.

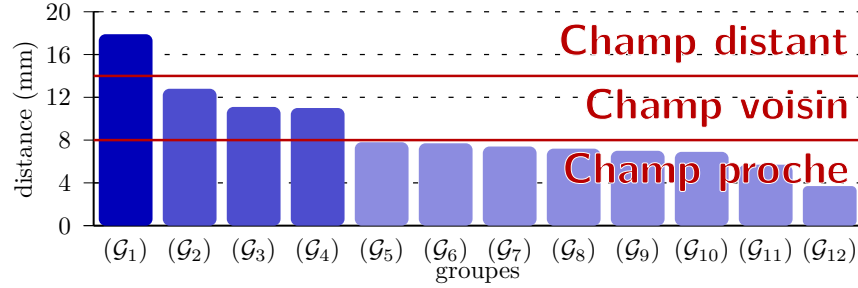


Figure 2.7 – Distance moyenne entre les sujets pour chaque binôme sur les résidus (\mathcal{R}_6), (\mathcal{R}_9) et (\mathcal{R}_{10})

La figure 2.7 présente la distance moyenne entre les espaces de travail (\mathcal{V}_{d2}) de chaque binôme. Les binômes peuvent être classés en trois groupes : *espace distant*, *espace voisin* et *espace proche*.

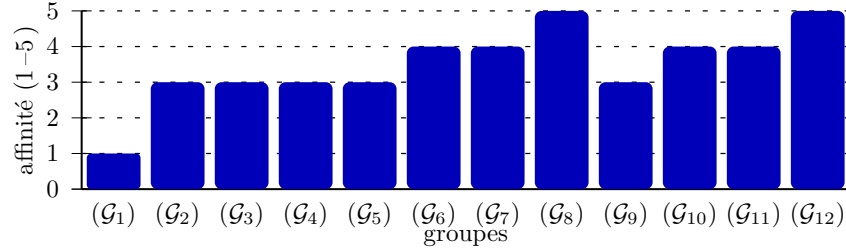


Figure 2.8 – Affinité entre les sujets pour chaque binôme

La figure 2.8 présente les affinités (\mathcal{V}_{d4}) de chaque binôme. Les notes, comprises entre un et cinq, montre que les binômes choisis ont des affinités relativement variées.

La figure 2.9 page ci-contre présente les temps de complétion (\mathcal{V}_{d1}) de chaque binôme. Le temps de complétion de (\mathcal{G}_1) est particulièrement important (plus d'une fois et demi les autres groupes les plus longs). À l'opposé, on note que (\mathcal{G}_2), (\mathcal{G}_3) et (\mathcal{G}_4) obtiennent des temps extrêmement bas.

La figure 2.10 page suivante présente les temps de communication verbale (\mathcal{V}_{d3}) de chaque binôme. (\mathcal{G}_2), (\mathcal{G}_3) et (\mathcal{G}_4) ont des temps de communication verbale inférieurs à 20 s. À l'opposé, (\mathcal{G}_1), (\mathcal{G}_5) et (\mathcal{G}_{11}) ont des temps de communication verbale qui approche les 60 s.

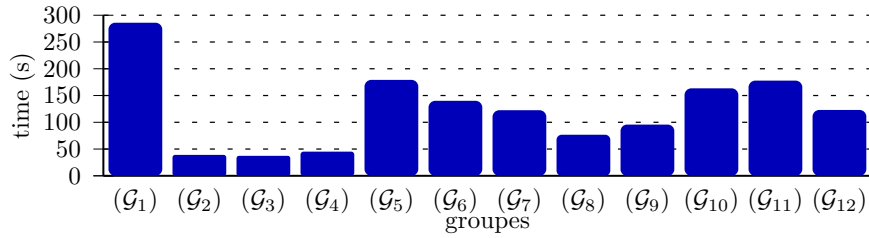


Figure 2.9 – Temps de complétion entre les sujets pour chaque binôme

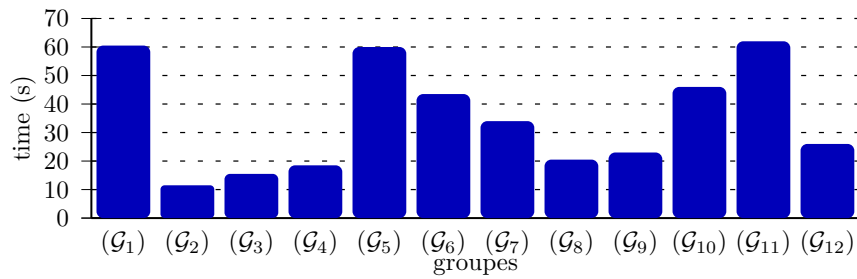


Figure 2.10 – Temps de communication verbale entre les sujets pour chaque binôme

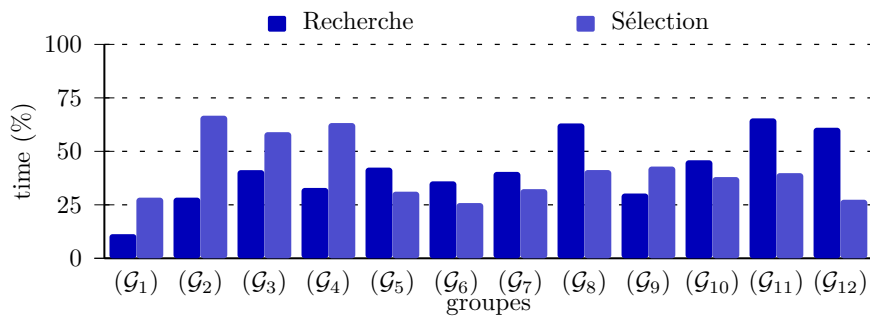


Figure 2.11 – Pourcentage de temps de communication verbale pendant la recherche et la sélection des sujets pour chaque binôme

La figure 2.11 page précédente présente les pourcentages de temps de communication verbale durant la phase de recherche et durant la phase de sélection de chaque binôme. Le pourcentage représente le rapport du temps de communication verbale durant la phase recherche ou de sélection rapporté respectivement au temps total de la phase de recherche ou de sélection. Les binômes (\mathcal{G}_1) à (\mathcal{G}_4) ainsi que (\mathcal{G}_9) communiquent plus durant la phase de sélection. Les binômes (\mathcal{G}_5) à (\mathcal{G}_8) et (\mathcal{G}_{10}) à (\mathcal{G}_{12}) communiquent plus durant la phase de recherche. Notons également que (\mathcal{G}_1) communique assez peu par rapport aux autres binômes.

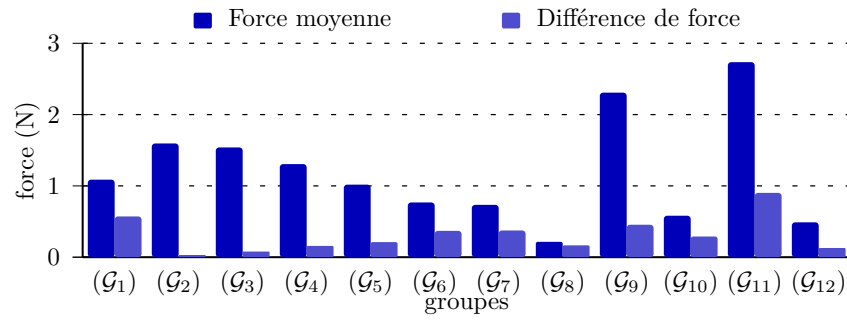


Figure 2.12 – Force moyenne et différence de force entre les sujets pour chaque binôme

La figure 2.12 représente la force moyenne et la différence de force entre les sujets. La force moyenne est la moyenne des forces moyennes des deux sujets. La différence de force est la différence des forces moyennes des deux sujets. (\mathcal{G}_9) et (\mathcal{G}_{11}) apporte un effort moyen très important par rapport aux autres binômes. (\mathcal{G}_2), (\mathcal{G}_3) et (\mathcal{G}_4) apporte un effort moyen important également tout en ayant une différence de force quasiment nulle entre les deux membres du binôme.

Les distances moyennes entre les espaces de travail, données dans le référentiel du monde réel, sont comprises entre 3 mm et 18 mm. Ces distances mènent à trois différents types de stratégies :

Champ proche pour les distances inférieures à 8 mm ;

Champ voisin pour les distances comprises entre 8 mm et 14 mm ;

Champ distant pour les distances supérieures à 14 mm.

Ces différentes stratégies, qui confirme notre hypothèse (\mathcal{H}_2), sont caractérisées de façon précise dans les sections suivantes.

Champ proche

Les interactions en champs proches, inférieure à 8 mm, correspondent, dans l'environnement virtuel, à des distances inférieures à 10 Å ce qui est environ l'envergure d'un résidu². 8 binômes sur 12 sont concernés par cette catégorie (binômes

2. Å désigne l'Ångström qui est une unité de mesure telle que $1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m}$

(\mathcal{G}_5) , (\mathcal{G}_6) , (\mathcal{G}_7) , (\mathcal{G}_8) , (\mathcal{G}_9) , (\mathcal{G}_{10}) , (\mathcal{G}_{11}) et (\mathcal{G}_{12}) . Ces binômes travaillent en collaboration étroite.

Sur la figure 2.8 page 22, tous les binômes manipulant en collaboration étroite ont de fortes affinités ($\mu = 4$) : ce sont des collègues proches ou des amis. D'après la figure 2.9 page 23, ces binômes obtiennent des temps de complétion de la tâche relativement moyens comparés aux autres stratégies de travail. Cela se traduit également par une communication relativement moyenne comme affiché sur la figure 2.10 page 23.

En observant plus précisément les temps de communication verbale sur la figure 2.11 page 23, les binômes de ce groupe passent plus de temps à communiquer dans la phase de recherche que dans la phase de sélection (excepté pour (\mathcal{G}_9)). Ces résultats tendent à prouver les difficultés du travail en champ proche liées aux nombreux conflits durant la phase de recherche.

La figure 2.12 page ci-contre montre des disparités entre les binômes concernant la force moyenne. Des observations durant l'expérimentation ont permis de déterminer deux stratégies différentes :

Contrôle redondant où les deux sujets effectuent la même action pour obtenir un meilleur contrôle sur les structures manipulées ;

Guidage gestuel où un des deux sujets indique à son partenaire la déformation à effectuer ou la position à atteindre.

Ces deux stratégies impliquent une communication étroite entre les sujets afin de coordonner au mieux les actions.

Cependant, les différences importantes de forces appliquées (voir figure 2.12 page précédente) ou l'analyse des communications verbales montre des conflits importants au sein des binômes. En effet, la grande complexité des tâches considérées couplé à une mauvaise conscience de l'environnement et de son partenaire mène à une mauvaise coordination et à des inter-référencements inexacts. Les communications verbales révèlent de nombreuses incompréhension dans l'inter-référencement (« Pas dans cette direction », « Pas ici mais ici », « C'est juste derrière », etc.). Ces conflits et incompréhensions limitent les performances du binôme.

Champ voisin

Les interactions en champ voisin, comprises entre 8 mm et 14 mm, correspondent, dans l'environnement virtuel, à des distances de l'ordre de résidus voisins (entre 10 Å et 20 Å). 3 binômes sur 12 sont concernés par cette catégorie (binômes (\mathcal{G}_2) , (\mathcal{G}_3) et (\mathcal{G}_4)). Ces binômes travaillent en collaboration relativement étroite sur des résidus voisins. Les résidus voisins sont dépendants physiquement ou structurellement comme indiqué sur la figure 2.13 page suivante.

Sur la figure 2.8 page 22, tous les binômes manipulant en collaboration moyennement couplées ont des affinités moyennes ($\mu = 3$) : ce sont des collègues. D'après la figure 2.9 page 23, ces binômes obtiennent de très bonnes performances sur

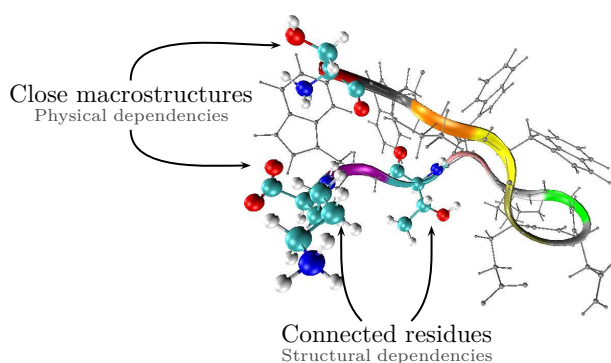


Figure 2.13 – Couplage physique et structure entre les résidus

les temps de complétion de la tâche. De plus, la figure 2.10 page 23 montre une communication **verbale assez limitée**. La manipulation en champ voisin permet d'être continuellement conscient des actions du partenaire ce qui évite les communications verbales. Cependant, les sujets manipulent des **résidus** différents ce qui limite les conflits d'interactions qui interviennent en champ proche.

La figure 2.11 page 23 montre que la stratégie complémentaire de travail en champ voisin est plus performante dans la phase de recherche.

La figure 2.12 page 24 illustre une bonne répartition des efforts entre les deux membres du binôme. En effet, la force moyenne est assez élevée par rapport à la plupart des autres binômes ce qui montre qu'aucun des deux sujets n'est moins actif (ce qui entraînerait une force moyenne moins élevée). La différence des forces moyennes quasi-nulle entre les deux sujets confirme ce résultat. Ceci peut s'expliquer par une bonne coordination pendant laquelle les deux membres du binôme vont effectuer des actions complémentaires mais de même intensité. La stratégie adoptée peut être définie de la façon suivante :

Manipulation complémentaire où les deux sujets sont attentifs aux actions de leur partenaire afin d'avoir un meilleur contrôle du processus de déformation par une synchronisation améliorée.

L'analyse des communication verbales concerne **beaucoup les phases de synchronisation** (« Maintenant, prends ça », « peux-tu m'aider ici ? », « Bien ! », *etc.*). Les performances des binômes travaillant en champ voisin sont relativement élevées bien que quelques conflits similaires à ceux rencontrés en champs proches soient présents bien que plus limités en nombre.

Champ distant

Les interactions en champ voisin, supérieures à 14mm, correspondent, dans l'environnement virtuel, à des **résidus** sans interaction physique (supérieur à 20 Å). 1 binôme sur 12 est concerné par cette catégorie (binôme (\mathcal{G}_1)). Ce

binôme travaille de façon faiblement couplée. En effet, les membres de ce binôme travaillent de façon complètement indépendante, en limitant au maximum le nombre d'interactions.

Les affinités des membres de ce binôme sont très faibles (voir figure 2.8 page 22) : les membres ne se connaissent presque pas. De plus, le binôme obtient de très mauvaises performances en ce qui concerne le temps de complétion de la tâche comme le montre la figure 2.9 page 23. La figure 2.10 page 23 montre que le temps de communication verbale est assez important. Cependant, le temps de complétion étant nettement plus important, le taux de communication verbale est beaucoup plus faible que les autres groupes (voir figure 2.11 page 23). En effet, les membres du binôme travaillant à distance, leurs interactions sont peu nombreuses ce qui implique peu de gestion de conflits et donc peu de communication verbale. La figure 2.11 page 23 montre également que ce binôme communique plus dans les phases de sélection que dans les phases de recherche. En effet, les phases de sélection ont tendance à force la collaboration étroite et favorise ainsi les conflits.

La figure 2.12 page 24 illustre un effort moyen moins élevé que les binômes manipulant en champ voisin. De plus, on constate une forte disparité entre les deux membres du binôme. Ces observations montrent encore une fois la faible collaboration.

Chaque sujet manipulant en champ distant définit chacun sa propre stratégie et son propre espace de travail. Les interactions sont limitées au maximum. Cette configuration réduit considérablement les conflits d'interaction ainsi que la communication. Cependant, elle nuit beaucoup aux performances du groupe dans son ensemble.

2.4.3 Résultats qualitatifs

Les résultats qualitatifs sont constitués de deux parties. La première permet de déterminer les impressions des sujets concernant la collaboration, les rôles et efficacité de chacun durant la tâche. La seconde partie a pour but d'évaluer la plate-forme. Toutes les notes sont comprises entre un et cinq (échelle de LIKERT [1932] à cinq niveaux).

Évaluation de la collaboration

Les résultats du questionnaire montrent qu'une majorité des sujets de cette expérimentation ont préféré et apprécié la réalisation de la tâche en configuration collaborative ($\mu = 4.6$, $\sigma = 0.5$). De plus, le sentiment d'effectuer une tâche en collaboration est fort. L'hypothèse (\mathcal{H}_3) est confirmée par les sujets qui préfèrent la configuration collaborative à la configuration seule. Ceci valide à la fois la pertinence de la plate-forme mais également la pertinence des travaux de recherche sur le travail collaboratif.

Durant ce travail collaboratif, chaque sujet considère qu'il a effectivement contribué à la réalisation de la tâche ($\mu = 4.1$, $\sigma = 0.9$). Cependant, les sujets ne considèrent qu'ils se soient imposés en meneur ou en suiveur ($\mu = 3$, $\sigma = 0.5$). En effet, des questions supplémentaires ont permis de mettre en évidence que chaque sujet a tendance à surestimer le rôle du partenaire ($\approx 70\%$).

L'estime du partenaire est important dans le travail collaboratif. En effet, la collaboration mène à une confiance mutuelle concernant la qualité du travail effectué par le partenaire, nécessaire à toute collaboration. Tout sujet n'ayant aucune estime pour le partenaire passerait son temps à vérifier le travail déjà effectué par le partenaire et entraînerait une perte significative des performances générales du groupe. De plus, chaque sujet se considère utile pour la réalisation de la tâche. Le cas contraire aurait pour effet qu'un des participants s'isole de lui-même, soustrayant ainsi son potentiel de l'action collaborative.

Concernant la communication, les participants estiment que le principal canal de communication a été verbal ($\mu = 4.5$, $\sigma = 0.6$) et, dans une proportion plus faible mais tout de même importante, virtuel ($\mu = 3.5$, $\sigma = 0.8$). En ce qui concerne la communication gestuelle, ils la considèrent comme quasiment inexistante ($\mu = 1.5$, $\sigma = 1$).

La communication gestuelle n'est pas ou peu utilisée pour plusieurs raisons. La principale raison est la difficulté de communiquer par geste lorsque les mains sont occupées à la manipulation. Deuxièmement, les sujets ont rapidement adopté le canal virtuel qui est plus précis dans les tâches de désignation qui constituent la plupart des besoins de communication. La communication verbale reste le canal principal de communication : c'est le canal le plus naturel pour communiquer. Cependant, il vient aussi en soutien du canal virtuel. En effet, aucun outil visuel ou haptique n'a été fourni pour effectuer des tâches de désignation et le canal virtuel seul serait incapable de remplir seul cette mission.

Évaluation du système

L'évaluation du système en terme d'intuitivité comme en terme de confort est relativement satisfaisante. En effet, en ce qui concerne l'intuitivité des graphismes et effets visuels, les participants les trouve accessibles ($\mu = 3.8$, $\sigma = 0.8$). Il est en va de même en ce qui concerne l'intuitivité des interactions avec le système ($\mu = 3.9$, $\sigma = 0.8$). Pour le confort, le visuel ($\mu = 3.7$, $\sigma = 0.7$) et les interactions ($\mu = 3.7$, $\sigma = 0.8$) jouissent d'une évaluation similaire.

Là encore, les sujets valident l'hypothèse (\mathcal{H}_3). La plate-forme est relativement bien évaluée. Il semble cependant nécessaire d'apporter encore des améliorations afin de répondre au mieux aux attentes des utilisateurs.

Ces résultats sont cependant à nuancer. Les écart-types sont relativement élevés ce qui veut dire qu'il y a de fortes disparités dans ces notations entre les différents sujets : certains sujets se sont déclarés plutôt insatisfaits concernant le confort (visuel : 2, interaction : 2). De plus, les outils proposés durant cette expérimentation sont relativement simples et peu envahissants. Des outils plus

complexes, plus informatifs seraient peut-être moins intuitifs au premier abord et pourrait mener à un inconfort.

2.5 Synthèse

2.5.1 Résumé des résultats

Dans ce chapitre, nous avons observé et comparé les performances de monômes et de binômes pendant une tâche de recherche et de sélection sur une simulation moléculaire en temps-réel. L'objectif était de montrer l'intérêt du travail collaboratif dans l'amélioration des performances et d'identifier les différentes stratégies de travail. De plus, il fallait valider la pertinence du système mis en place.

La collaboration a prouvé son intérêt, notamment sur les tâches les plus complexes. La complexité d'une tâche est relativement difficile à établir. Le nombre d'atomes (et donc le nombre de résidus) joue un rôle important dans cette complexité : l'environnement virtuel devient surchargé et difficile à appréhender. Un autre facteur de complexité est l'amplitude des contraintes physiques qui interviennent dans la molécule.

En observant et en analysant les différentes stratégies de travail, il ressort que le travail en champ proche comme le travail en champ distant ne sont pas des stratégies très performantes. En effet, le nombre de conflits en champ proche augmente significativement ; en champ distant, tout l'intérêt du travail collaboratif est perdu. Le travail en champ voisin constitue un juste milieu performant.

Enfin, il paraît nécessaire d'avoir de bonnes relations avec ces partenaires afin d'apporter à la fois, une communication saine et un respect mutuel du travail effectué. Cependant, les résultats montrent de façon évidente que tout déséquilibre dans le groupe mène à des performances dégradées.

2.5.2 Perspectives

Basés sur les résultats précédents, certaines perspectives assez évidentes s'imposent et ont guidé les expérimentations qui suivent. Tout d'abord, il semble nécessaire de proposer des tâches suffisamment complexes pour pouvoir étudier plus en détail le travail collaboratif. Ceci se traduit soit par des tâches à fortes zones de contraintes (voir chapitre 3 page 31) ou par la manipulation de molécules de taille importante (voir chapitre 4 page 43).

Les différentes stratégies observées ont permis de mettre en évidence l'intérêt du travail en champ voisin. Les propositions d'outils visuo-haptiques devront tenir compte de ce paramètre : ils devront encourager le travail rapproché en fournissant une assistance en champ voisin tout en maintenant une distance minimum afin de limiter les conflits liés au travail en champ proche.

L'évaluation qualitative par questionnaire apporte également de nombreuses réponses intéressantes. Tout d'abord, les sujets ont mis en avant un élément primordial de la communication : le canal virtuel est important. À l'aide d'observations durant les phases expérimentales, ce canal de communication est principalement exploité pour des actions de désignation. Fournir des outils spécifiquement conçus pour la désignation devient une nécessité.

Enfin, ces évaluations qualitatives ont permis de valider l'EVC proposé. Des améliorations sont cependant nécessaires en ce qui concerne le rendu visuel et les interactions. De nombreux sujets ont par exemple demandé une mise en surbrillance du résidu survolé. Une assistance haptique pour la sélection est également une des améliorations possibles. Ces améliorations ne sont pas implémentées dans les deux expérimentations suivantes pour ne pas alourdir les outils et ainsi ne pas biaiser l'étude. Cependant, ils sont implémentés pour la dernière expérimentation (voir chapitre 5 page 47).