

## Évaluation des modalités d'interaction proposées

Au-delà de l'étude de l'acceptabilité des systèmes, nous nous sommes intéressés à l'évaluation des modalités d'interaction et de l'adéquation entre le périphérique et celles-ci. Ce second axe d'analyse permettra d'alimenter l'étude complémentaire portant sur l'évaluation de nouvelles modalités d'interaction en réponses aux commentaires et jugements des participants. Les résultats présentés dans cette partie permettront d'affiner les résultats précédents et d'apporter des explications sur les préférences des participants, en faisant le lien entre le système et l'interaction.

### 5.1 Analyse statistique

L'évaluation de chaque modalité d'interaction (déplacement, navigation, rotation, redimensionnement) a été réalisée par des échelles de Likert à 5 modalités pour 5 critères distincts : l'efficacité globale, la rapidité, la précision, la simplicité et l'intuitivité de l'action. Nous allons nous appuyer sur des statistiques descriptives (moyenne, écart-type, médiane) pour évaluer ces 5 critères. Ensuite, nous opposerons les 4 modalités pour ces 5 critères. Pour réaliser cette étude, nous avons choisi de nous baser sur des tests non paramétriques pour échantillons appariés ; étant donné que nous évaluons 4 modalités, nous nous appuyerons sur le test de Friedman et si les résultats s'avèrent significatifs, sur le test de Wilcoxon pour chaque paire.

Concernant l'adéquation entre les systèmes et les modalités d'interaction, il a été demandé aux participants de choisir le système (Gants, Cam3D) qui d'une part permettait d'atteindre la meilleure précision et d'autre part qui offrait la meilleure facilité d'utilisation, pour chaque interaction possible (déplacement, navigation, redimensionnement, rotation). Les participants pouvaient également marquer une absence de préférence pour l'un ou l'autre système (« Egal »). Comme pour les préférences globales, nous réaliserons une étude statistique descriptive basée sur les comparaisons d'effectifs, illustrée de verbalisations issues des questionnaires finaux.

### 5.2 Évaluation des modalités d'interaction

Pour une meilleure lisibilité des résultats, nous avons réparti les réponses en 3 groupes plutôt que de considérer les 5 modalités des réponses aux échelles de Likert pour chaque critère : « Bon – Très bon », « Moyen », « Mauvais – Très mauvais ». Les effectifs sont présentés sous forme d'histogrammes empilés et commentés.

### 5.2.1 Efficacité

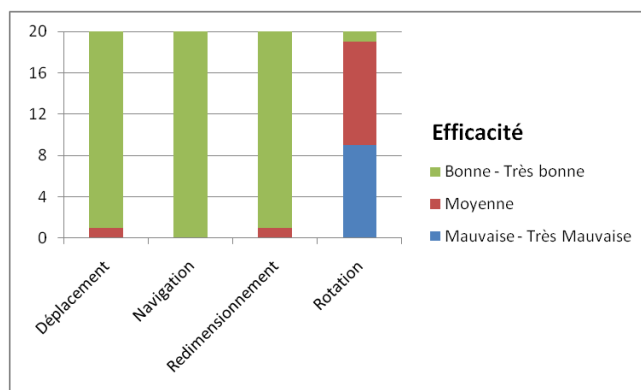


Figure 47 : Histogramme empilé de la répartition des participants selon leur évaluation de l'efficacité pour les 4 modalités d'interaction

L'efficacité du déplacement a été jugée bonne ou très bonne par 19 des 20 participants (95 %). L'efficacité de la navigation a été jugée bonne ou très bonne par l'ensemble des participants (100 %). L'efficacité du redimensionnement a été jugée bonne ou très bonne par 19 des 20 participants (95 %). Seul un participant a jugé bonne l'efficacité de la rotation (5 %), la moitié des participants l'ont jugée moyenne et 9 participants l'ont jugé mauvaise ou très mauvaise (45 %).

### 5.2.2 Rapidité

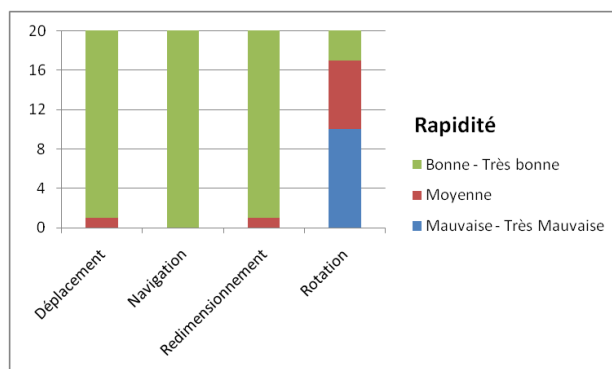


Figure 48 : Histogramme empilé de la répartition des participants selon leur évaluation de la rapidité pour les 4 modalités d'interaction

La rapidité du déplacement a été jugée bonne ou très bonne par 19 des 20 participants (95 %). La rapidité de la navigation a été jugée bonne ou très bonne par l'ensemble des participants (100 %). La rapidité du redimensionnement a été jugée bonne ou très bonne par 19 des 20 participants (95 %). Seuls 3 participants ont jugé bonne la rapidité de la rotation (15 %), 7 participants l'ont jugée moyenne (35%) et la moitié participants l'ont jugé mauvaise ou très mauvaise (50 %).

### 5.2.3 Précision

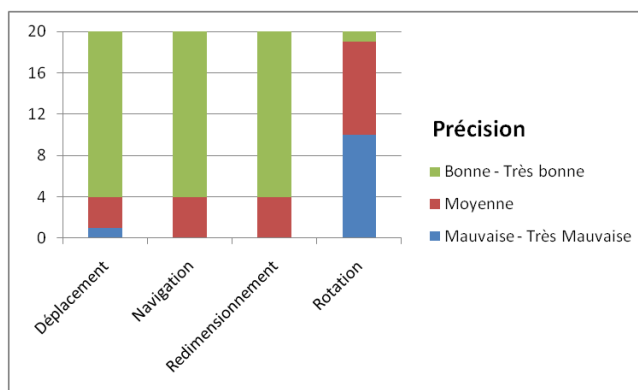


Figure 49 : Histogramme empilé de la répartition des participants selon leur évaluation de la précision pour les 4 modalités d'interaction

La précision du déplacement a été jugée bonne ou très bonne par 16 des 20 participants (80 %). La précision de la navigation a été jugée bonne ou très bonne par 16 des 20 participants (80 %). La précision du redimensionnement a été jugée bonne ou très bonne par 19 des 20 participants (95 %). Seul un participant a jugé bonne la précision de la rotation (5 %), 9 participants l'ont jugée moyenne (45%) et la moitié des participants l'ont jugée mauvaise ou très mauvaise (50 %).

### 5.2.4 Simplicité

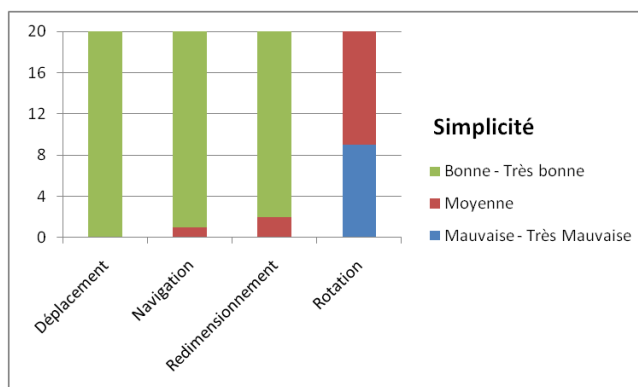


Figure 50 : Histogramme empilé de la répartition des participants selon leur évaluation de la simplicité pour les 4 modalités d'interaction

La simplicité du déplacement a été jugée bonne ou très bonne par l'ensemble des participants (100 %). La simplicité de la navigation a été jugée bonne ou très bonne par 19 des 20 participants (95 %). La simplicité du redimensionnement a été jugée bonne ou très bonne par 18 des 20 participants (90 %). 11 participants ont jugé moyenne la simplicité de la rotation (55 %) et 9 participants l'ont jugée mauvaise ou très mauvaise (45 %).

### 5.2.5 Intuitivité

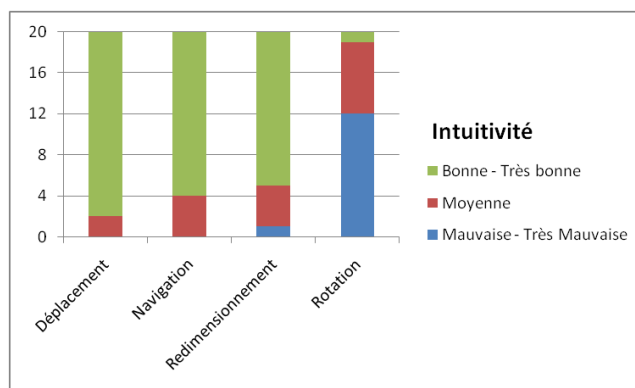


Figure 51 : Histogramme empilé de la répartition des participants selon leur évaluation de l'intuitivité pour les 4 modalités d'interaction

L'intuitivité du déplacement a été jugée bonne ou très bonne par 18 des 20 participants (90 %). L'intuitivité de la navigation a été jugée bonne ou très bonne par 16 des 20 participants (80 %). L'intuitivité du redimensionnement a été jugée bonne ou très bonne par 15 des 20 participants (75 %). Seul un participant a jugé bonne l'intuitivité de la rotation (5 %), 7 participants l'ont jugée moyenne (35%) et 12 participants l'ont jugée mauvaise ou très mauvaise (60 %).

### 5.2.6 Synthèse

Pour synthétiser ces résultats, nous avons codé les réponses aux échelles de Likert par des entiers compris entre 1 et 5 (1 = appréciation la plus mauvaise ; 5 = appréciation la plus élevée), pour chaque critère et chaque modalité d'interaction. Les résultats présentés dans sur la Figure 52 correspondent aux moyennes des participants.

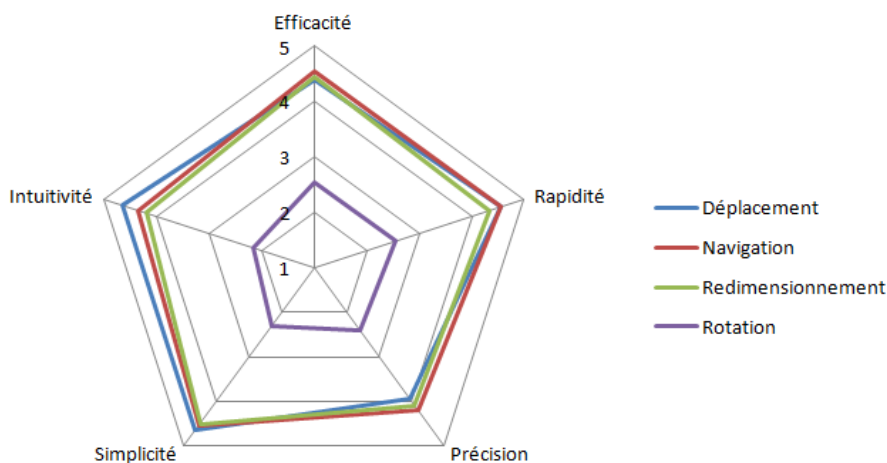


Figure 52 : représentation des scores moyens de chaque critère pour les 5 modalités d'interaction

La faiblesse de la rotation comparée aux autres modalités d'interaction est confirmée par les tests statistiques, synthétisés dans le Tableau 30.

Tableau 30 : Oppositions entre les modalités d'interaction pour chaque critère

	Test de Friedman	Test de Wilcoxon paire à paire		
		Rotation vs Navigation	Rotation vs Navigation	Rotation vs Redimensionnement
<b>Efficacité</b>	Khi2 = 41,525 p < 0,001	Z = 3,881 p < 0,001	Z = 3,897 p < 0,001	Z = 3,886 p < 0,001
<b>Rapidité</b>	Khi2 = 42,765 p < 0,001	Z = 3,863 p < 0,001	Z = 3,880 p < 0,001	Z = 3,778 p < 0,001
<b>Précision</b>	Khi2 = 36,264 p < 0,001	Z = 3,789 p < 0,001	Z = 3,831 p < 0,001	Z = 3,695 p < 0,001
<b>Simplicité</b>	Khi2 = 43,733 p < 0,001	Z = 3,953 p < 0,001	Z = 3,973 p < 0,001	Z = 3,854 p < 0,001
<b>Intuitivité</b>	Khi2 = 42,775 p < 0,001	Z = 3,852 p < 0,001	Z = 3,858 p < 0,001	Z = 3,689 p < 0,001

Il apparaît que la rotation est significativement inférieure aux 3 autres modalités d'interaction, que ce soit en termes d'efficacité, de rapidité, de précision, de simplicité ou d'intuitivité. De plus, le déplacement est jugé plus intuitif que la navigation ( $Z = 1,897$  ;  $p = 0,058$ ) et que le redimensionnement ( $Z = 2,310$  ;  $p = 0,021$ ).

Deux raisons principales justifient la faiblesse de la rotation selon les participants :

- L'aspect « inhabituel » de l'action à réaliser : « *Difficulté à l'apprentissage initial, car rare utilisation des trois dimensions en vie courante* » (Sujet 9). Cette raison a été mentionnée par 6 autres participants.
- La difficulté d'associer un mouvement à une rotation particulière : « *Difficile de savoir quel mouvement permet de tourner autour de quel axe* » (Sujet 20). Cette raison a été mentionnée par 4 autres participants.

Seul un participant a trouvé cette modalité intuitive (sujet 8).

Le déplacement a été jugé efficace et intuitif par l'ensemble des 20 participants : « *Très intuitif, simple et efficace* » (Sujet 13). Les commentaires négatifs sont davantage généraux et concernent la stabilité des systèmes et la qualité de la reconnaissance de l'état ouvert / fermé de la main.

De la même façon, le redimensionnement a été évalué de manière positive par la majeure partie des participants, 16 d'entre eux le jugeant « *intuitif, rapide et précis* » (sujet 3). Un participant a tout de même mentionné qu'il était « *difficile de se dire qu'il faut d'abord positionner les deux mains avant* ».

Enfin, la navigation a également été jugée « *très intuitive et très rapide* » (sujet 15) par 12 participants ; le « *ressenti ludique* » (sujet 14) a été mis en avant par 4 participants. Pourtant, les participants ont relevé que cette interaction était trop sensible (2 participants), « *peu précise sur de petites distances* » (sujet 14) et enfin que la « *vitesse [était] parfois trop élevée* » (sujet 4), cela étant mentionné par 5 participants.

Le fait que le déplacement ait été jugé plus intuitif que les autres modalités d'interaction peut s'expliquer par le fait que c'est la seule modalité d'interaction qui n'a pas recours à une métaphore d'interaction (joystick pour la navigation, étirer/comprimer pour le redimensionnement) ou une adaptation (décomposition x, y, z pour la rotation). Le mouvement du déplacement est identique à celui à exercer dans un environnement réel.

### 5.3 Évaluation des modalités d'interaction

Le Tableau 31 présente les effectifs de participants ayant choisi chaque possibilité pour chaque critère et chaque modalité d'interaction. Ces résultats sont représentés sur la Figure 53.

Tableau 31 : Effectifs de participants selon la préférence accordée pour modalité d'interaction et chaque critère

		Gants	Cam3D	Egal
<b>Déplacement</b>	Précision	2	10	8
	Facilité d'utilisation	4	9	7
<b>Navigation</b>	Précision	2	2	16
	Facilité d'utilisation	1	2	17
<b>Redimensionnement</b>	Précision	1	6	13
	Facilité d'utilisation	3	6	11
<b>Rotation</b>	Précision	2	10	8
	Facilité d'utilisation	6	9	5

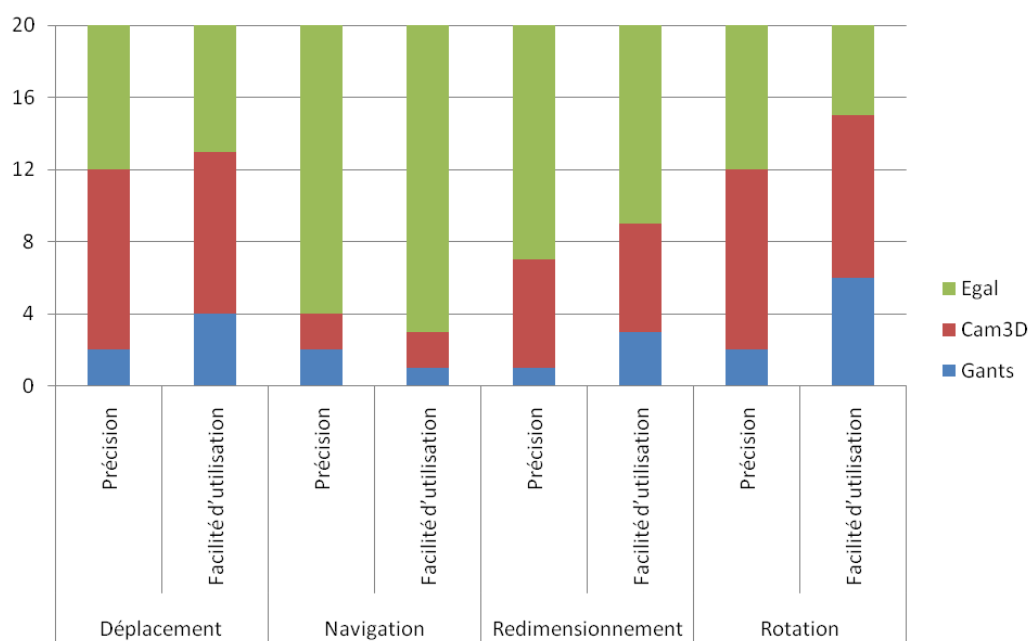


Figure 53 : Histogramme empilé de la répartition des participants selon le choix du participant pour chaque critère étudié et chaque modalité d'interaction

Plus de 75 % des participants n'indiquent pas de préférence pour l'un ou l'autre système concernant la précision et la facilité d'utilisation de la navigation (respectivement 80 % et 85 %).

Plus de 50 % des participants n'indiquent pas de préférence pour l'un ou l'autre système concernant la précision et la facilité d'utilisation du redimensionnement (respectivement 65 % et 55 %).

Les participants ont une préférence plus marquée pour la Cam3D concernant la précision et la facilité d'utilisation du déplacement (respectivement 50 % et 45%), ainsi que pour la rotation (respectivement 50 % et 45%).

De manière générale, la détection de l'état « ouvert » ou « fermé » de la main est un problème rencontré avec la Cam3D, et non avec les Gants3D. Cela entache la facilité d'utilisation et la précision :

« Les gants offrent une meilleure détection de l'ouverture / fermeture » (sujet 15).

A contrario, la Cam3D ne connaît pas les problèmes de tremblement dus à la sensibilité aux perturbations électromagnétiques du système de tracking de la position des gants. Le volume de travail se trouve également réduit. Cela gêne la précision et la facilité d'utilisation :

« *Trop de tremblements avec les gants, beaucoup moins précis* » (sujet 13), mentionné par 7 participants  
« *Avec les gants, la précision était moins bonne si on s'éloigne du capteur* » (sujet 10), mentionné par 2 participants.

Deux raisons peuvent expliquer que le déplacement et la rotation sont jugés supérieurs avec la Cam3D : l'amplitude des déplacements à effectuer et la précision nécessaire. En effet, les Gants3D induisent des tremblements et une perte de précision lorsque l'on s'éloigne de l'antenne. Dans le cas de la navigation, l'amplitude des déplacements est très limitée du fait de la métaphore utilisée (joystick). Dans le cas du redimensionnement, la possibilité de débrayer et de recommencer plusieurs fois l'agrandissement, fait que l'amplitude des gestes peut être petite et que les mains peuvent rester proches de l'antenne. Les tremblements peuvent être, ainsi, minimisés et apporter une meilleure précision. Cela n'est pas le cas du déplacement, qui nécessite des mouvements amples avec une précision importante en fin de geste. Ni de la rotation, qui demande également une forte précision en fin de geste, de plus, bien que le débrayage soit possible, il est moins aisé qu'avec le redimensionnement.

Ces résultats viennent affiner les résultats précédents concernant les préférences des participants au regard des critères de la précision et de l'aisance d'utilisation (voir partie « préférences globales »). En effet, 11 participants préféraient la Cam3D pour la précision contre seulement 6 qui préféraient les Gants. Cette préférence peut donc s'expliquer par la supériorité de la Cam3D pour les tâches de rotation et de déplacement.

Nous pouvons formuler le même commentaire pour l'aisance d'utilisation, attribuée à la Cam3D par 9 participants, contre 5 pour les Gants. Cela est là encore motivé par une supériorité de la rotation et du déplacement avec les Cam3D, les autres interactions étant équivalentes entre les 2 systèmes.

## 5.4 Synthèse

Dans un premier temps, nous avons évalué les modalités d'interaction, indépendamment des systèmes comparés. Il apparaît clairement que la rotation est inférieure aux autres modalités d'interaction, du fait de la complexité des actions à réaliser. La rotation est, avec le déplacement, la modalité d'interaction qui demande de conjuguer les 3 axes de l'espace. Pour autant, la complexité est loin d'être identique : pour le déplacement, la transposition entre le réel et le virtuel est immédiat, étant donné que le geste a été directement reproduit. Par contre, bien que faire tourner un objet sur lui-même nous paraisse anodin dans la vie de tous les jours, notre stratégie est totalement liée à la forme de l'objet et à sa taille et ce geste fait bien souvent intervenir les deux mains dans un enchaînement assez complexe de prises. Il n'est pas possible de reproduire cette complexité dans le virtuel sans retour d'effort. Il existe de nombreuses métaphores d'interaction tendant à simplifier ce problème, mais elles ne sont pas adaptées (e.g., le globe terrestre). L'interaction que nous avons choisie, correspondant à la décomposition et à l'isolation suivant les 3 axes de rotation, car il nous est difficile de réaliser un mouvement purement rectiligne. Ainsi, les rotations sont souvent effectuées selon 2 ou 3 axes, alors que les participants préféreraient modifier un axe à la fois. Se pose également le problème de l'assimilation de l'association mouvement / axe de rotation, mais cette assimilation est assez rapide d'après les participants. Il apparaît donc assez clairement que la méthode choisie pour la rotation reste encore perfectible. De manière générale, nous pouvons donc affirmer que la rotation n'est pas à la hauteur des 3 autres modalités d'interaction, cela s'expliquant par la complexité de reproduire ce mouvement en virtuel et

par le fait que le système que nous avons créé ne permet pas encore de connaître l'orientation des mains.

Dans un second temps, nous avons évalué l'adéquation entre les systèmes et les modalités d'interaction. Nous avons observé des préférences plus marquées pour la Cam3D concernant la précision et la facilité d'utilisation de la rotation et du déplacement. Cette observation est justifiée par la plus grande sensibilité de ces interactions aux tremblements rencontrés avec les Gants3D. Ce problème se rencontre effectivement dès lors que l'on s'éloigne de l'antenne, c'est-à-dire pour des mouvements de grande amplitude. L'amplitude de ceux-ci étant limitée pour le redimensionnement et la navigation. Bien que nous n'ayons pas observé de différences significatives dans les résultats de performances, nous pouvons remarquer que certains problèmes inhérents au matériel ont suscité de nombreux commentaires des participants et des avis assez tranchés. La Cam3D recueille alors davantage de suffrages que les Gants3D.

## 6 Suggestions d'améliorations

Les suggestions d'amélioration portent sur les remarques et les critiques d'ordre général ou à une modalité d'interaction en particulier.

De manière générale, les participants ont mis en avant un « *long temps d'attente pour la sélection de l'objet* » (sujet 15) et suggèrent donc de diminuer les temps de validation, sans proposer de solution concrète.

L'instabilité du système, particulièrement avec les Gants3D, rendent difficiles les tâches demandant de la précision, comme par exemple le déplacement. Plusieurs solutions sont proposées par les participants :

« *Varié la vitesse [de déplacement] en fonction de la distance* » (sujet 5)

« *Utiliser la seconde main pour valider la fin de déplacement* » (sujet 7)

Ces solutions pourraient s'appliquer également au redimensionnement et à la rotation.

Concernant la rotation, les avis sont partagés : si 6 participants ont apprécié « *l'accès aux 3 axes sans menu supplémentaire* » (sujet 1), 12 participants ont connu des difficultés, principalement concernant « *l'apprentissage initial* » (sujet 9) et la difficulté d'associer le mouvement réel aux rotations effectuées par les objets. Une solution a été proposée par 7 participants :

« *Mettre une aide pour savoir quel mouvement correspond à quel axe* » (sujet 4).

Un autre participant (sujet 14) propose un « *modèle d'interaction basé sur le choix d'un seul axe avec verrouillage des deux autres* » ce qui semble aller à l'encontre de l'intérêt de l'accès immédiat aux 3 axes. Enfin, un participant suggère de « *gérer la rotation en tournant la main* » (sujet 13).

Le redimensionnement a été jugé positivement par l'ensemble des participants. Pourtant, certains ont également mentionné des difficultés lorsque, par exemple, ils avaient débuté le mouvement de diminution avec les mains initialement trop proches. Ils finissaient donc avec les 2 mains en contact et étaient donc obligés de « *débrayer* » puis de repositionner leurs mains et de recommencer. Nous avons relevé 2 suggestions pour pallier ce problème :

« *Une seule main gère l'échelle dans un axe (profondeur ?) et l'autre main sert de on/off pour l'action* » (sujet 14)



« Peut-être faire une échelle exponentielle c'est-à-dire que quand les deux mains sont collées l'objet continue à diminuer de taille pour éviter de devoir relâcher » (sujet 20)

La navigation a été majoritairement évaluée comme rapide et intuitive par les participants. La vitesse a été jugée « parfois trop élevée » (sujet 4) par 5 participants, et la trop grande sensibilité a été notée par 2 participants. Un participant propose de « varier la vitesse en fonction de l'éloignement de la trajectoire idéale » (sujet 5), un autre de « réduire la proportionnalité entre déplacement main / déplacement virtuel » (sujet 16).

Ces différents commentaires et suggestions serviront de base à la construction de la troisième étude, étude complémentaire portant plus spécifiquement sur l'interaction.

## 7 Conclusions générales

### 7.1 Synthèse des résultats

Nous avons évalué les performances et les préférences subjectives ainsi que les commentaires des participants. Nous allons synthétiser dans cette partie l'ensemble des résultats présentés précédemment. Nous ne reviendrons pas sur les interprétations qui ont été formulées dans les parties correspondantes.

Les performances reposent sur l'étude des temps et de l'erreur de précision. Les temps mesurés correspondent aux temps d'expérimentation, aux temps d'exécution de chaque tâche et aux temps de manipulation différenciés selon chaque type d'interaction. L'erreur de précision est calculée pour chaque objet et chaque tâche, et différenciée selon chaque interaction le cas échéant. Elle correspond à un pourcentage de décalage entre l'état final de l'objet et l'état idéal. Nous n'avons pas noté de différence significative entre les deux systèmes pour le temps total d'expérimentation et le temps total de manipulation. L'analyse des données différenciées sur chacune des 9 tâches permet de déceler quelques différences significatives, mais celles-ci restent peu nombreuses au regard de l'ensemble des variables étudiées. Nous observons néanmoins une tendance, qu'il conviendrait d'étudier plus en détails pour l'infirmier ou la confirmer : les Gants3D semblent être à même de minimiser le temps d'exécution pour les actions de redimensionnement.

Nous avons également mené des analyses complémentaires portant sur trois points : l'étude de la présence éventuelle de différences de précision selon les axes pour le déplacement et la rotation, l'étude de l'effet d'apprentissage éventuel et enfin du ratio « précision / temps ». Il existe des différences de précision selon les axes et le type de manipulation à effectuer, mais nous avons pu remarquer qu'elles sont avant tout liées à la tâche à réaliser et à l'objet à manipuler (présence de point de repère visuel par exemple). De manière globale, nous observons des précisions plus faibles pour les axes Z et Y, pour lesquels les mouvements des participants se trouvent être les plus restreints ou contraints. De manière générale, sur l'ensemble des variables étudiées, nous n'avons pas observé d'effet d'apprentissage. Pour autant, nous avons observé que dans certains cas, les résultats obtenus avec la Cam3D pouvaient être meilleurs lorsque ce système était testé en second. Enfin, le ratio « précision / temps », pouvant être vu comme un compromis entre la précision à atteindre et le temps mis pour réaliser la tâche, n'est pas significativement différent entre les 2 systèmes, mis à part pour quelques variables isolées.

Les réponses des participants au questionnaire final nous ont permis d'étudier l'acceptabilité des 2 systèmes comparés, les préférences globales des participants, les modalités d'interactions et

l'adéquation entre les systèmes et les modalités d'interaction. L'acceptabilité est globalement meilleure avec la Cam3D, avec des différences significatives en faveur de ce système pour le confort, la liberté de mouvements et la maniabilité. Les Gants 3D se révélant seulement plus fiables, en raison de l'absence d'erreur de reconnaissance de l'état de la main. La Cam3D offre également un meilleur sentiment d'immersion que les Gants3D, d'après les participants. L'analyse de l'évaluation des modalités d'interaction a fait apparaître une faiblesse de la rotation comparées aux autres modalités, provenant de la difficulté à appréhender les gestes à effectuer sur les 3 axes de rotation. La rotation d'un objet sur lui-même, qui apparaît triviale dans la vie réel est très difficile à mettre en œuvre dans un environnement virtuel sans retour haptique et donc sans l'aide des propriétés géométriques de l'objet. Les commentaires des participants nous ont fourni certaines pistes d'amélioration. Enfin, concernant l'adéquation entre les systèmes et les modalités d'interaction, les participants ont manifesté des préférences plus marquées pour la Cam3D concernant la précision et la facilité d'utilisation de la rotation et du déplacement, en raison de l'absence des tremblements qui se manifestent avec les Gants3D lorsque le capteur électromagnétique est trop distant de l'antenne.

Une dernière partie de cette étude a été axée sur l'analyse des améliorations proposées par les participants. Celles-ci portent majoritairement sur des réponses aux problèmes d'instabilité et de difficulté de compréhension de la rotation.

## 7.2 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une expérimentation menée auprès de 20 participants, tous utilisateurs d'ordinateurs et pour la grande majorité possédant un niveau d'expertise avancé en réalité virtuelle, visant à démontrer l'intérêt d'un système de capture de mouvement de la main sans marqueur. Le système est ici entendu comme un système complet composé du périphérique (Kinect), des algorithmes de traitement et de détection ainsi que des modalités d'interaction développées. L'objectif sous-jacent et secondaire était d'évaluer ces dernières pour être en mesure *in fine* de disposer d'un système efficace, efficient et confortable.

Nous avons donc fait le choix d'opposer l'ensemble « Camera 3D + algorithmes de détection de la position des mains et de leur état » à une solution commerciale existante et fonctionnellement équivalente, les gants de données (pour détecter l'état des mains) associés aux capteurs électromagnétiques (pour connaître les positions des mains). Afin d'obtenir des résultats comparables, nous avons utilisé les mêmes modalités d'interaction entre les deux systèmes. Après nous être basé sur une tâche simple de sélection dans la première étude, nous avons choisi de considérer ici l'ensemble des tâches de manipulation d'un objet non déformable (déplacement, rotation et redimensionnement) ainsi que la tâche de navigation dans un environnement virtuel. C'est ce qui justifie par ailleurs l'usage d'un périphérique plus évolué que la souris.

Notre objectif principal et notre objectif secondaire nous ont amené à formuler les hypothèses de travail suivantes :

- H1 : le système Cam3D permet d'obtenir une meilleure précision dans les tâches de manipulation que les Gants3D, du fait de l'absence de port de matériel, donc par l'absence d'entrave des mouvements et de l'absence de poids de l'équipement ;
- H2 : le système Cam3D permet d'obtenir des temps d'exécution au moins similaires au système Gants3D, du fait d'une détection des mouvements aussi précise et aussi fiable ;

- H3 : le système Cam3D doit recueillir un meilleur niveau d'acceptabilité globale que les Gants3D, en raison d'un meilleur confort (pas d'équipement, pas de poids à porter/supporter), d'une meilleure efficacité (majoritairement en termes de précision et de stabilité ressentie) et d'une meilleure efficacité ;
- H4 : les préférences des participants sont en faveur de la Cam3D, du fait du plus haut degré d'immersion supposé, ainsi que d'une plus grande aisance d'utilisation.

Ces hypothèses nous ont amené à mesurer d'une part la performance des participants pour les 9 tâches à réaliser et différents critères globaux (comme les temps) ou relatifs à chaque tâche (temps, précision, ratio « précision / temps). D'autre part, nous avons évalué les préférences subjectives des participants vis-à-vis de l'expérimentation et confronté leurs commentaires et suggestions d'améliorations au travers d'un questionnaire post-passation.

Il y a un lien entre les hypothèses H1 et H3. En effet, l'absence de port de matériel et par contrecoup de lien filaire entre les périphériques et l'ordinateur, devait avoir une conséquence sur les performances et les préférences. Sur les performances, puisque l'absence de poids et d'entrave aurait pu permettre de minimiser la fatigue et maximiser la précision. Sur les préférences, parce que les participants auraient pu ressentir un meilleur confort d'utilisation et une meilleure efficacité.

Les résultats montrent que les performances sont similaires entre les deux systèmes étudiés, pour la précision. Cela infirme l'hypothèse H1, car nous pensions que l'absence de port de matériel (et donc l'absence de poids) était de nature à minimiser la fatigue et donc l'imprécision. Deux explications peuvent expliquer ce résultat : la première pourrait être que le temps d'expérimentation est insuffisant pour induire une fatigue susceptible d'influer sur les résultats ; la seconde est que la fatigue induite par le port du matériel est négligeable par rapport à celle induite par la position des bras durant l'expérimentation (sans support de repos). Les temps d'exécution, pris de manière globale ou différenciés selon les tâches, sont également similaires, ce qui valide l'hypothèse H2. Les commentaires des participants permettent d'apporter un éclairage supplémentaire à ces explications, tout en apportant un léger bémol à H2. En effet, les participants ont évoqué un problème de fiabilité dans la reconnaissance de l'état de la main avec la Cam3D, et un problème de tremblements de l'avatar avec les Gants3D dès que la main était trop loin de l'antenne (tracking magnétique). Ces deux points négatifs, inhérents aux solutions techniques retenues, ont pu lisser les résultats de performances. Ainsi, si la détection des mouvements proprement dite (déplacements dans l'espace) avec la Cam3D est d'une précision équivalente à celle obtenue par les Gants3D, la fiabilité de la reconnaissance de la main fermée – main ouverte reste inférieure. Ce problème pourrait être contourné par l'ajout de redondance dans les caméras, afin de s'assurer que la main est toujours orientée correctement. Une autre solution, plus simple à mettre en œuvre car logicielle, consisterait en la reconnaissance de deux points au lieu d'un au niveau de la main (par exemple le poignet et un point terminal sur la main). Pour le moment, seul le poignet est détecté par l'algorithme d'OpenNI et ce point bouge selon l'état de la main. Si ce point était détecté de façon robuste, cela permettrait à l'algorithme que nous avons développé d'être plus efficace. Le kit de développement fourni par Microsoft, disponible depuis juillet, permettrait d'obtenir ces informations. Les perspectives d'améliorations sont donc importantes, et permettent d'envisager à court terme la connaissance de la position de chaque doigt de manière précise, rendant possible une interaction plus riche avec des dictionnaires plus évolués qu'à l'heure actuelle.

Les préférences des participants sont majoritairement en faveur de la Cam3D, principalement pour des critères de confort, de liberté de mouvement et de maniabilité. Le sentiment d'immersion est équivalent entre les deux systèmes pour la moitié des participants, mais supérieur avec la Cam3D pour 8

des 10 autres. De même, l'aisance d'utilisation est ressentie de manière supérieure avec la Cam3D par 9 participants, quand seulement 5 évoquent les Gants3D pour ce critère. Ces différents résultats tendent donc à valider les hypothèses H3 et H4.

A l'heure actuelle, avec le système dont nous disposons, nous sommes en mesure de fournir une alternative aux systèmes classiques tels les gants et les capteurs électromagnétiques pour la manipulation d'objets en réalité virtuelle. L'avantage majeur reste bien entendu le coût, largement moins inférieur à un équipement de réalité virtuelle ainsi que les potentialités d'une caméra 3D, qui dépassent largement le cadre des tâches de sélection, manipulation et navigation. Notre système peut ainsi remplacer les équipements classiques tout en apportant une meilleure « utilité-valeur » (Loup-Escande et al., 2011). La prise en compte des améliorations régulières des librairies de détection du « squelette » des participants permettra l'amélioration continue de notre système tout en étendant progressivement ses potentialités, même si aujourd'hui les interactions proposées permettent de couvrir les besoins les plus courants en environnements virtuels.

Ainsi, si l'amélioration des algorithmes de détection des mouvements des mains ainsi que de leur état est dans une certaine mesure tributaire des mises à jour du kit du développement, les modalités d'interaction peuvent d'ores et déjà être affinées pour tenir compte des commentaires des participants, tout en s'inspirant de leurs suggestions. C'est l'objet de l'étude complémentaire présentée dans le chapitre suivant.