

Étude des performances et préférences subjectives des participants concernant les interactions

Dans cette partie, nous allons directement confronter les performances et les préférences et commentaires des participants, pour chaque interaction. Après la présentation des tests statistiques nous présenterons, pour chaque interaction, les mesures de performances significatives et l'évaluation comparée selon les modalités des réponses aux questions concernant la facilité d'assimilation, la simplicité, l'intuitivité, la précision et la fatigue engendrée. Cette évaluation sera complétée des préférences globales pour chaque modalité et sera illustrée de commentaires des participants. L'étude des performances et des préférences selon les facteurs de sexe et d'expertise en réalité virtuelle sera détaillée dans la partie suivante.

5.1 Le déplacement

Concernant les performances, c'est-à-dire les mesures du temps moyen d'exécution, des erreurs moyennes de précision et du ratio « temps / précision », nous n'observons pas de différences significatives ni même de tendance en faveur de l'une au l'autre modalité.

En termes de préférences, la nouvelle modalité est significativement jugée plus précise ($Z = 8,865$; $p < 0,001$). La modalité de l'expérimentation 2 (modalité 1) est par contre jugée plus intuitive ($Z = 2,805$; $p = 0,005$) et moins fatigante ($Z = 2,668$; $p = 0,008$). Il n'y a pas de différences concernant la facilité d'assimilation ou la simplicité. Le Tableau 34 présente les différences significatives.

Tableau 34 : Différences significatives entre modalité 1 et modalité 2 pour le déplacement

	Intuitivité		Précision		Fatigue	
	Modalité 1	Modalité 2	Modalité 1	Modalité 2	Modalité 1	Modalité 2
Moyenne	4,33	3,77	3,23	4,43	3,90	3,53
Ecart-type	0,711	0,679	0,898	0,626	0,712	0,937
Wilcoxon	2,805		4,048		2,668	
p	0,005		< 0,001		0,008	

La Figure 58 représente les différences entre les 2 modalités selon les 5 critères étudiés. Les critères pour lesquels les différences sont significatives sont encadrés en noir.

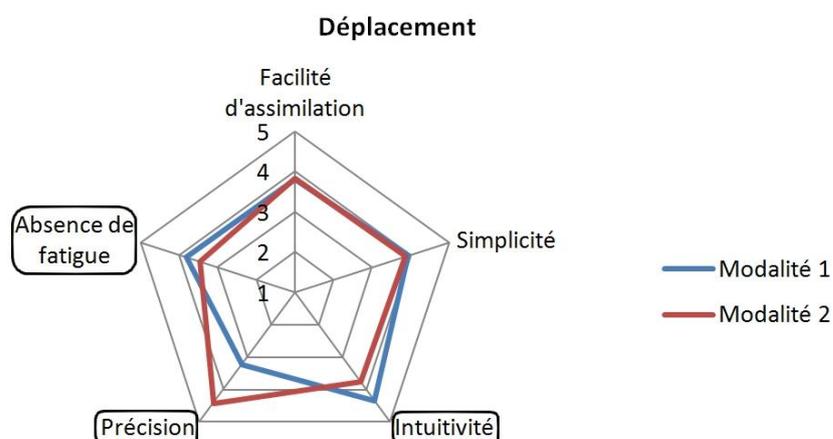


Figure 58 : Représentation des scores moyens de chaque critère pour les 2 modalités étudiées. Les variables pour lesquelles les différences sont significatives sont encadrées

Enfin, de manière globale, Le « nouveau » déplacement a été préféré par 19 des 30 participants, soit 63,3% (intervalle de confiance : 45,5% - 78,1%).

Les participants qui ont donné leur préférence à la modalité 2 expliquent leur choix par « *la meilleure précision* » (sujet 3) du fait de « *l'absence de déplacement lors de l'ouverture de la main* » (sujet 19). Les participants préférant la modalité issue de l'expérimentation 2 motivent leur choix par le caractère « *plus intuitif* » (sujet 6) de ce déplacement et parce qu'il « *paraît plus naturel de manipuler les objets avec une seule main, ce qui se rapproche plus d'une manipulation réelle* » (sujet 8). Ces justifications se retrouvent à l'identique dans les points négatifs et positifs de chaque modalité proposée, indépendamment de la préférence avancée. Ces résultats confirment les différences significatives entre les modalités, pour l'intuitivité, en faveur de la modalité 1, et la précision, en faveur de la modalité 2. La fatigue, plus importante, est une conséquence de « *l'obligation de coordonner les deux mains* » (sujet 15).

Peu de participants ont proposé des améliorations, celles-ci étant avant tout prospectives et moins opérationnelles, comme par exemple le « *verrouillage par la parole* » (sujet 28) ou « *combiner la modalité 2 sur une seule main avec la reconnaissance des doigts* » (sujet 11).

5.2 Le redimensionnement

Concernant les performances, c'est-à-dire les mesures du temps moyen d'exécution, des erreurs moyennes de précision et du ratio « temps / précision », nous n'observons pas de différences significatives ni même de tendance en faveur de l'une au l'autre modalité pour le redimensionnement.

La nouvelle modalité est significativement jugée plus précise par les participants ($Z = 2,592$; $p = 0,017$). La modalité de l'expérimentation 2 est par contre jugée plus intuitive ($Z = 3,155$; $p = 0,002$). Les valeurs moyennes sont présentées dans le Tableau 35. Il n'y a pas de différences significatives concernant la facilité d'assimilation, la simplicité et l'absence de fatigue. La Figure 59 représente, quant à elle, les différences entre les 2 modalités selon les 5 critères étudiés. Les critères pour lesquels les différences sont significatives sont encadrés en noir.

Tableau 35 : Différences significatives entre modalité 1 et modalité 2 pour le redimensionnement

	Intuitivité		Précision	
	Modalité 1	Modalité 2	Modalité 1	Modalité 2
Moyenne	4,43	3,67	4,07	4,43
Ecart-type	0,711	0,758	0,828	0,568
Wilcoxon	3,155		2,392	
p	0,002		0,017	

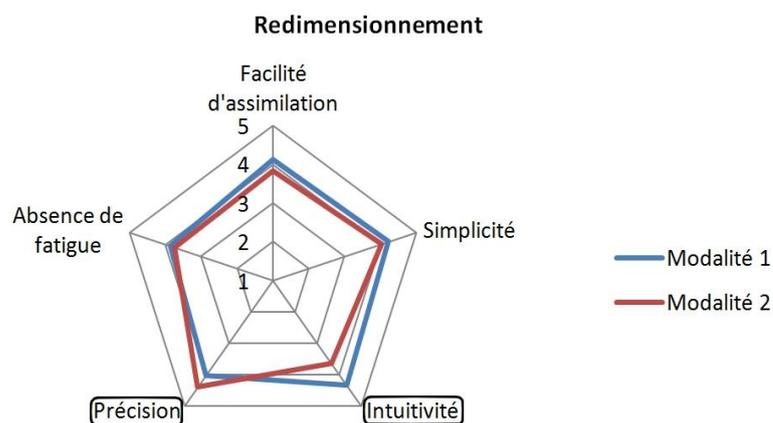


Figure 59 : Représentation des scores moyens de chaque critère pour les 2 modalités étudiées. Les variables pour lesquelles les différences sont significatives sont encadrées

Le « nouveau » redimensionnement a été préféré par 10 des 30 participants, soit 33,3% (intervalle de confiance : 19,2% - 51,2%).

Comme précédemment pour le déplacement, les préférences des participants pour la première modalité s'expliquent par son côté « *plus intuitif* » (sujet 12) et « *plus simple d'utilisation* » (sujet 13). Certains participants ont fait l'analogie avec ce qui se fait pour les interfaces tactiles, parlant d'une « *métaphore proche du multitouch* » (sujet 13). Seuls 5 participants ont évoqué un problème de précision, l'objet « *bougeant quand on ouvre la main* » (sujet 17), ce faible nombre semble surprenant étant donné que la précision est jugée significativement moins bonne avec cette modalité. De plus, un seul participant a évoqué le problème de la réduction de taille « *lorsque les mains arrivent en contact* ».

Le redimensionnement proposé par la seconde modalité est appréciée avant tout car elle apporte « *plus de précision pour de petits objets* » (sujet 20) tout en étant jugée « *facile à assimiler et à réaliser* » (sujet 5) par certains participants. Le redimensionnement, que ce soit pour la modalité 1 ou la modalité 2, n'a pas beaucoup suscité de commentaires, ce qui est cohérent avec les résultats de l'étude précédente.

Les améliorations proposées concernent principalement la vitesse de redimensionnement, comme par exemple l'idée de « *dérivée la position du bras en vitesse de redimensionnement* » (sujet 17). Sur les 30 participants, 21 n'ont pas proposé d'améliorations.

5.3 La rotation

La nouvelle modalité implémentée pour la rotation permet de minimiser significativement l'erreur d'orientation ($T = 8,865$; $p < 0,001$), le ratio « précision / temps » ($T = 2,974$; $p = 0,006$) et nous observons une forte tendance concernant le temps d'exécution des tâches de rotation ($T = 1,950$; $p = 0,061$) en faveur de la nouvelle modalité de rotation. Les données sont synthétisées dans le Tableau 36.

Tableau 36 : Différences significatives entre modalité 1 et modalité 2 pour la rotation

	Temps (s)		Erreur de précision (%)		Ratio temps/précision	
	Modalité 1	Modalité 2	Modalité 1	Modalité 2	Modalité 1	Modalité 2
Moyenne	63,76	56,0	6,47	1,44	1,61	2,06
Ecart-type	20,72	23,27	3,45	0,70	0,52	0,81
T-Test	1,950		8,865		2,974	
p	0,061		< 0,001		0,006	

La nouvelle modalité implémentée pour la rotation est significativement jugée plus précise ($Z = 3,346$; $p = 0,001$). On note également une tendance en faveur de cette modalité pour la fatigue ($Z = 1,667$; $p = 0,096$). Les valeurs moyennes sont présentées dans le Figure 37. Il n’y pas de différences significatives concernant la facilité d’assimilation, la simplicité et l’intuitivité.

Tableau 37 : Différences significatives entre modalité 1 et modalité 2 pour la rotation

	Précision		Fatigue	
	Modalité 1	Modalité 2	Modalité 1	Modalité 2
Moyenne	2,87	3,53	2,97	3,13
Ecart-type	0,900	0,681	0,890	0,819
Wilcoxon	3,346		1,677	
p	0,001		0,096	

La Figure 60 représente quant à elle les différences entre les 2 modalités selon les 5 critères étudiés.

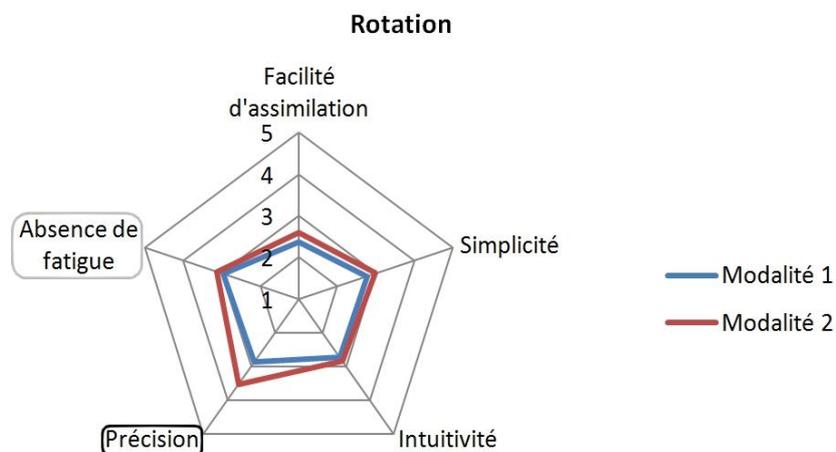


Figure 60 : Représentation des scores moyens de chaque critère pour les 2 modalités étudiées. Les variables pour lesquelles les différences sont significatives sont encadrées en noir(en gris pour les tendances)

La « nouvelle » rotation a été préférée par 23 des 30 participants, soit 76,7% (intervalle de confiance : 59,1% - 88,2%).

Il y a une réelle opposition entre les personnes qui préfèrent la modalité 1 et celles qui préfèrent la modalité 2, puisque c’est principalement le critère de l’intuitivité qui sert de justification. En effet, la modalité 2 est appréciée, car « l’utilisation des deux mains rend la rotation plus simple » (sujet 4) et « qu’au moins un axe peut facilement être bloqué » (sujet 31) ; cette modalité est jugée « plus précise » (sujet 29) et « moins fatigante » (sujet 6). Ces participants jugent trop « difficile de gérer les trois axes en même temps » avec la modalité 1 (sujet 2). De façon similaire, les participants ayant préféré la rotation issue de l’expérimentation 1 le justifient par « un travail cognitif moins important, les rotations s’effectuant d’une seule main » (sujet 7) et par la « difficulté de dissocier les axes de rotation » (sujet 17). Si les préférences sont majoritairement en faveur de la modalité 2, les participants ont tout de même évoqué la nécessité d’une « plus grande coordination des deux mains » (sujet 16). La difficulté d’assimilation reste une problématique commune aux deux modalités : s’il peut être « difficile de trouver les axes de rotations des objets en fonction des mouvements » (sujet 1) avec la modalité 1, il est également « difficile de différencier les axes » (sujet 29) avec la modalité 2.

5.4 Synthèse des résultats

La modalité 2, implémentée d'après les commentaires des participants à l'expérimentation 2, permet d'obtenir de meilleures performances pour la rotation, tant au niveau du temps moyen d'exécution, que de la précision et du ratio « précision / temps ». Les performances sont équivalentes entre les deux systèmes pour le déplacement et le redimensionnement.

Une majorité de participants donnent leurs préférences aux nouvelles modalités implémentées pour le déplacement et la rotation mais à la modalité issue de l'expérimentation 2 (modalité 1) pour le redimensionnement.

La précision ressentie se révèle significativement supérieure pour l'ensemble des nouvelles modalités d'interaction, mais cela se fait au détriment de l'intuitivité, jugée meilleure pour le déplacement et le redimensionnement. C'est le fait de devoir coordonner les mouvements des deux mains qui explique la faiblesse de l'intuitivité avec la nouvelle modalité. Ce phénomène était moins prononcé pour la rotation, car la première modalité implémentée avait déjà un certain niveau de complexité. Le critère de la fatigue a ici été jugé plutôt du point de vue cognitif que du point de vue physique, la plupart des commentaires rejoignant ceux formulés à propos de l'intuitivité.

Lors de la seconde expérimentation, c'est avec le déplacement que le manque de précision avait été jugé le plus gênant. Nous retrouvons une cohérence dans les commentaires des participants de cette étude complémentaire, puisque c'est l'amélioration de la précision avec la modalité 2 qui a été majoritairement évoquée pour le déplacement. De même, pour la rotation, on retrouve la difficulté de gérer les 3 axes en même temps et avec une seule main, qui avait été largement évoquée lors de l'étude précédente, et qui justifie en creux la préférence plus marquée pour la rotation nouvellement implémentée. Enfin, le redimensionnement, qui avait fait l'objet de peu de commentaires dans l'étude précédente, n'apporte pas de réelle amélioration selon les participants.

6 Influence de critères interindividuels sur les performances et les préférences

Cette partie présente l'étude des performances et des préférences selon les facteurs de sexe, d'expertise en réalité virtuelle.

6.1 Le sexe

L'erreur de rotation, pour les modalités 1 et 2, est significativement plus faible avec les hommes (resp. $T = 2,560$; $p = 0,016$ et $T = 3,384$; $p = 0,002$). Le temps de rotation avec la nouvelle version est significativement inférieur pour les hommes ($T = 2,448$; $p = 0,021$). Nous avons une forte tendance concernant l'erreur de déplacement avec l'ancienne version ($T = 1,918$; $p = 0,065$) en faveur des hommes, ainsi qu'une tendance pour le ratio « temps / précision » pour la rotation avec la nouvelle version ($T = 1,795$; $p = 0,085$).

Pour l'ensemble des variables étudiées, nous ne notons pas d'effet du sexe sur les mesures de difficulté d'assimilation, de simplicité, d'intuitivité, de précision et de fatigue pour les 2 implémentations des modalités d'interaction.

Une majorité d'hommes préfèrent le « nouveau » déplacement (15 sur 23) et la « nouvelle » rotation (18/23) mais le redimensionnement issu de l'expérimentation 2 (16 sur 23). Les femmes semblent avoir une préférence pour la « nouvelle » rotation (5 sur 7).

6.2 L'expertise en RV

Le niveau d'expertise a une importance significative avec les modalités d'interaction issues de l'expérimentation 2 (modalité 1), avec de meilleurs résultats pour les participants qualifiés d'experts en réalité virtuelle, pour le temps de rotation ($T = 2,057$; $p = 0,049$), l'erreur de déplacement ($T = 2,897$; $p = 0,007$), l'erreur de redimensionnement ($T = 2,029$; $p = 0,052$) (forte tendance pour la variable en question), l'erreur de rotation ($T = 2,122$; $p = 0,043$), le ratio « temps / précision » pour le déplacement ($T = 2,088$; $p = 0,046$) et le ratio « temps / précision » pour la rotation ($T = 2,212$; $p = 0,035$). Les données sont synthétisées dans le Tableau 38.

Tableau 38 : Différences significatives de performances pour chaque modalité selon l'expertise en RV

	Tps_Rot_M1		Err_Dep_M1		Err_Sca_M1		Err_Rot_M1		Rat_Dep_M1		Rat_Rot_M1	
	Moy.	Exp.										
Moyenne	72,2	57,3	18,0	12,1	2,8	2,0	7,9	5,4	2,7	3,8	1,4	1,8
E.-T.	24,0	15,6	6,3	4,9	1,2	0,9	2,8	3,5	1,3	1,5	0,4	0,6
T-Test	2,057		2,897		2,029		2,122		2,088		2,212	
p	0,049		0,007		0,052		0,043		0,046		0,035	

On observe des différences significatives pour l'expertise pour seulement 2 variables : les participants avec un niveau d'expertise qualifié de moyen donnent une meilleure évaluation de l'intuitivité du « nouveau » déplacement ($Z = 2,374$; $p = 0,018$) et de la simplicité de la « nouvelle » rotation ($Z = 2,253$; $p = 0,024$). On observe enfin une tendance en faveur de l'intuitivité de la « nouvelle » rotation selon les participants dont l'expertise est qualifiée de moyenne ($Z = 1,936$; $p = 0,053$).

Tableau 39 : Différences significatives de préférences pour chaque modalité selon l'expertise en RV

	Intuitivité Déplacement M2		Simplicité Rotation M2		Intuitivité Rotation M2	
	Moy.	Exp.	Moy.	Exp.	Moy.	Exp.
Moyenne	4,08	3,53	3,38	2,71	3,15	2,59
E.-T.	0,49	0,72	0,77	0,77	0,69	0,80
Mann-Whitney	2,374		2,253		1,936	
p	0,018		0,024		0,053	

Les participants avec un niveau moyen en réalité virtuelle préfèrent en majorité la « nouvelle » rotation (10 sur 13) et le « nouveau » déplacement (10 sur 13). Les participants qualifiés d'experts préfèrent en majorité le redimensionnement issu de l'expérimentation 2 (14 sur 17) mais préfèrent la « nouvelle » rotation (13 sur 17).

6.3 Synthèse

Le sexe des participants n'a pas d'influence sur les préférences et les évaluations subjectives des participants. Ce constat est moins catégorique pour les performances, et en particulier pour la rotation. En effet, nous observons que les hommes obtiennent de meilleurs résultats avec la nouvelle modalité implémentée pour cette interaction, aussi bien en termes de temps d'exécution que d'erreur de précision ou de ratio « précision / temps ».

Nous constatons que l'expertise en réalité virtuelle est de nature à influencer les performances et les préférences des participants. Pour les premières, nous remarquons que seules, sont impactées, les performances liées aux interactions issues de l'expérimentation 2 : les participants qualifiés d'experts obtiennent de meilleurs résultats que ceux dont le niveau est qualifié de moyen. Cela semble indiquer

que les modalités d'interaction étaient plus compliquées à appréhender, cette différence étant « lissée » avec les nouvelles modalités d'interaction. Seuls les participants avec un niveau d'expertise qualifiés de moyen sont sensibles au caractère plus intuitif du nouveau déplacement ou de la simplicité et de l'intuitivité offertes par la rotation de la modalité 2. La nouvelle rotation fait l'unanimité quel que soit le niveau d'expertise en réalité virtuelle.

7 Discussion et préconisations

A la suite de la seconde expérimentation, nous avons analysé les commentaires des participants relatifs aux modalités d'interaction. Cela nous a conduit à implémenter de nouvelles modalités d'interaction pour le déplacement, le redimensionnement et la rotation afin d'être en mesure de proposer, dans notre système, une interaction permettant de réaliser les tâches de manipulation en environnement virtuel de façon performante avec un niveau d'acceptabilité maximal. Nous avons opposé, dans le cadre de cette étude complémentaire, les modalités d'interactions développées dans l'expérimentation 2 aux modalités d'interactions implémentées suite aux commentaires des participants. Nous souhaitons démontrer la supériorité des « nouvelles » modalités d'interaction tant en termes de performances (temps d'exécution, erreur de précision et ratio « précision / temps ») qu'en termes de préférences, aussi bien générales qu'étudiées sous l'angle de la facilité d'assimilation, la simplicité, l'intuitivité, la précision et la fatigue engendrée. L'étude a impliqué 30 participants et a porté sur la réalisation de 30 sous-tâches simples, soit 5 par interaction et par modalité.

Nos résultats permettent de valider les deux hypothèses que nous avons émises, tout du moins en partie concernant l'hypothèse A. En effet, si les performances sont équivalentes entre les deux modalités pour le déplacement et le redimensionnement, elles sont significativement en faveur de la nouvelle modalité pour la rotation, que ce soit en termes de temps d'exécution, d'erreur de précision ou de ratio « précision / temps ». Ce résultat est important car c'est la rotation qui avait cristallisé le plus de critiques lors de l'expérimentation 2. Nous avons ainsi apporté une réponse satisfaisante concernant cette interaction, puisqu'elle recueille également la majeure partie des préférences des participants. Ce qui est également le cas du déplacement. Le redimensionnement, par contre, ne semble pas apporter de différence significative, ce qui peut s'expliquer par le fait qu'elle était déjà peu critiquée lors de la seconde expérimentation.

Le problème de précision dû à l'ouverture de la main et au recalage de la position terminale du squelette sur la main a disparu. La précision ressentie, bien qu'elle ne soit effective que pour la rotation, est significativement meilleure avec la nouvelle modalité, pour toutes les interactions. Ce problème, qui était surtout gênant pour le déplacement, explique la préférence des participants pour la seconde modalité. De la même façon, la possibilité de décomposer la rotation sur les deux mains rend, pour la majorité des participants, la rotation plus efficace.

Par contre, le fait d'utiliser deux mains pour réaliser chaque modalité rend les interactions moins intuitives. La précision a été obtenue au détriment de la simplicité d'utilisation même si l'apprentissage du fonctionnement des interactions reste très rapide. Dans le cas du déplacement et du redimensionnement, le rôle de la main secondaire reste mineur, avec un simple rôle de « verrou », ce qui minimise la complexité de l'interaction. Dans le cas de la rotation, chaque main joue un rôle majeur, ce qui peut induire une certaine complexité d'action chez certaines personnes. Même si celles-ci sont minoritaires dans le cadre de notre étude, il convient de prendre en compte cette population. En particulier, nous avons remarqué que les femmes obtenaient de moins bonnes performances avec la nouvelle modalité. Nous n'avons pas à l'heure actuelle d'explication concrète à formuler concernant ce

résultat. Le fait que seule l'obligation d'utiliser deux mains et donc de coordonner ses mouvements change entre les 2 modalités suggère qu'il faille chercher dans cette direction et dans la littérature traitant des capacités visuo-spatiales et des travaux relatives aux tâches simples de coordination des mouvements en environnements réels.

A l'issue de cette étude, nous formulons 2 préconisations quant au choix des modalités d'interaction à intégrer à notre système :

- En fonction de la précision demandée, privilégier le déplacement et le redimensionnement de l'étude 2 ou ceux implémentés dans le cadre de cette étude. En effet, pour des tâches de positionnement ou de redimensionnement dans lesquelles les mouvements pourraient être assistés (par exemple, magnétisme de la position à atteindre), l'utilisation de la seconde main comme « verrou » n'est pas obligatoire. Par contre, dans le cas d'un déplacement ou d'un redimensionnement libre, ou demandant une grande précision, nous avons pu montrer que la nouvelle modalité implémentée permettait d'apporter une réponse efficace, a minima au niveau du ressenti du participant.
- Concernant la rotation, nous privilégions la nouvelle modalité d'interaction, car elle permet de meilleures performances et recueille également de meilleures préférences de la part des participants. Cette interaction est tout à fait adaptée à l'orientation libre d'un objet au sein d'un environnement virtuel.

Ainsi, si un concepteur d'application intégrant de la manipulation d'objets 3D en environnement virtuel souhaite utiliser notre système mais ne connaît pas *a priori* la nature précise des tâches à effectuer, nous lui conseillons d'implémenter, dans l'état actuel de nos développements, le déplacement proposé dans cette étude, car il est plus « polyvalent ». Nous recommandons également l'implémentation de la rotation basée sur la coordination des deux mains. Le choix du redimensionnement est laissé libre, les deux étant équivalents mais les participants ayant une préférence marquée pour celui issue de l'étude 2. Par contre, si les tâches de manipulation ne demandent pas une précision importante, le déplacement issu de l'étude 2 sera tout à fait adapté.