

Influence du périphérique sur les performances

3.1 Tests préliminaires

En premier lieu, nous avons effectué des tests de normalité (Kolmogorov-Smirnov) sur les variables relatives aux performances (temps total d'exécution de la tâche), pour chaque périphérique, afin d'évaluer le type de test statistique à mener par la suite. En cas de non normalité des distributions, nous avons eu recours à des transformations. Bien que leur usage soit sujet à discussion (Pallant, 2007), elles sont suggérées dans de nombreux manuels de statistiques et mises en œuvre par de nombreux auteurs. De plus, les tests non paramétriques se révèlent limités pour l'étude des interactions entre plusieurs effets sur des modèles mixtes. Le cas échéant, une analyse qualitative de la forme des distributions a permis de déterminer la transformation mathématique à appliquer. De fait, l'ensemble des tests réalisés pour les performances appartient à la famille des tests paramétriques.

Pour vérifier l'absence d'effet d'apprentissage, normalement annulé par le contre-balancement, nous avons réalisé un test T de Student pour échantillons indépendants (ordre de passation x périphérique).

L'étude principale a consisté en l'analyse de l'influence du type de périphérique sur les performances des participants (test T de Student pour échantillons appariés) et en l'analyse de l'influence du sexe, de la taille de la main et de l'expérience en réalité virtuelle sur les performances en lien avec le périphérique. Pour cette dernière analyse, nous avons effectué une ANOVA à plan mixte composée d'une variable intra-sujet (le périphérique) et d'une variable inter-sujet (sexe ou taille de la main ou expérience en RV). Pour l'analyse éventuelle des effets simples, nous avons eu recours, selon le nombre de modalités de la variable étudiée, soit à un test T pour échantillons indépendants, soit à une ANOVA à un facteur. Pour l'analyse éventuelle des effets principaux, nous avons mené des tests post-hoc de type LSD.

Nous nous sommes basés, pour tous ces tests, sur le seuil de significativité le plus courant, à savoir $p < 0,05$.

3.1.1 Normalisation

Les temps d'exécution mesurés pour la souris ne suivent pas une loi normale (Kolmogorov-Smirnov ; $Z = 1,680$; $p = 0,007$), contrairement à ceux mesurés pour la Cam3D. Nous avons donc fait le choix, en fonction de la forme de la distribution, d'appliquer une transformation logarithmique (Log10).

3.1.2 Etude de l'effet d'apprentissage

Pour vérifier s'il existe ou non un effet d'apprentissage, nous avons eu recours à un test T pour échantillons indépendants. Les résultats montrent qu'il n'y a pas d'effet d'apprentissage pour la souris ($t = 0,044$; NS) ni pour la Cam3D ($t = 0,858$; NS).

3.2 Résultats globaux : temps d'exécution

3.2.1 Influence du type de périphérique sur les performances

Il n'y a pas de différence significative de performances des participants entre les 2 périphériques utilisés, « Souris » et « Cam3D » ($t = 1,363$; $p = 0,177$). Les résultats sont présentés dans le Tableau 8.

Tableau 8 : Temps d'exécution avec la Cam3D et la Souris – données originales et transformées (Log10)

		Données originales		Données (Log10)	
		Cam3D	Souris	Cam3D	Souris
Moyenne		45,89	49,12	1,65	1,67
E.T.		13,29	19,15	,12	,15
t-Test	t			1,363	
	p			0,177	

L'étude qualitative confirme ces résultats en montrant que 19 des 71 participants sont plus rapides avec la souris (différence de plus de 15%), quand 26 participants sont plus rapides avec la Cam3D et 26 ont des performances équivalentes entre les 2 systèmes.

Notons néanmoins qu'en supprimant les participants ayant obtenu des temps supérieurs à 4 écarts-type de la moyenne (la règle en usage étant plutôt de considérer 1,5 ou 2 écarts-types - un seul participant est concerné ici), la significativité du test statistique est légèrement modifiée ($t = 1,698$ / $p = 0,094$). Ce dernier résultat indique une légère tendance en faveur de la Cam3D (moyenne = 1,64 ; E.T. = 0,11) par rapport à la souris (moyenne = 1,66 ; E.T. = 0,14).

Enfin, si les hommes obtiennent des résultats similaires avec les 2 systèmes ($t = 0,458$; $p = 0,649$), les femmes sont significativement plus rapides avec le système « Cam3D » ($t = 3,417$; $p = 0,003$).

3.2.2 Discussion

Ces résultats confirment l'hypothèse opérationnelle HO1 (cf : Tableau 5). Même s'ils peuvent apparaître relativement neutres, ils sont encourageants. Outre le fait que nous obtenons une légère tendance en faveur de la Cam3D, qu'il conviendrait de confirmer ou d'infirmer avec davantage de participants, nous pouvons d'ores et déjà affirmer que le système basé sur la Cam3D a le même niveau de performances que la souris pour la tâche considérée. Malgré le soin apporté à rendre le système « Cam3D » aussi simple que possible, la souris présente tout de même un avantage majeur sur tout autre système, celui de l'utilisation fréquente, qui tend à minimiser le temps d'apprentissage, même dans le cas d'une tâche

originale ou nouvelle. Les résultats obtenus ici nous incitent donc à réaliser une étude plus longue, qui permettrait de mettre davantage en valeur les différences entre les 2 systèmes.

3.3 Interaction entre le sexe et le périphérique sur les performances

Une ANOVA à plan mixte (sexe x périphérique) indique une différence significative selon le périphérique ($F(1,69) = 6,62$; $p = 0,012$). Nous notons également un effet du sexe ($F(1,69) = 6,33$; $p = 0,014$) et enfin une interaction entre ces deux facteurs ($F(1,69) = 9,448$; $p = 0,003$).

Une analyse des effets simples, menée via un test T à échantillons indépendants pour chaque périphérique, ne met pas en évidence de différence significative entre les hommes et les femmes pour la « Cam3D » ($t = 1,008$; NS). A contrario, avec la souris, les hommes sont significativement plus rapides que les femmes ($t = 3,345$; $p = 0,001$). Ces résultats sont synthétisés dans le Tableau 9.

Tableau 9 : Moyennes des temps d'exécution avec la Cam3D et la Souris selon le sexe – données originales et transformées (Log10)

	Sexe	Données originales		Données (Log10)	
		moyenne	écart-type	moyenne	écart-type
Souris	H	44,13	12,56	1,63	0,114
	F	60,98	26,20	1,75	0,182
Cam3D	H	44,44	10,40	1,64	0,098
	F	49,35	18,30	1,67	0,152

En accord avec notre hypothèse de travail HO3, les performances avec notre système ne sont pas influencées par le sexe de l'utilisateur. Il est inattendu de trouver une différence significative de performances avec la souris. Ces derniers résultats sont bien sûr liés à l'étude réalisée. Ils mériteraient néanmoins d'être étudiés pour d'autres actions possibles en environnements virtuels, comme par exemple la navigation ou la manipulation d'objets, cependant nous n'avons pas développé ce type d'interaction car cela n'était pas l'objet de cette étude.

3.4 Interaction entre l'expertise en R.V. et le périphérique sur les performances

Nous avons défini trois groupes d'expertise en réalité virtuelle : novice, initié et expert. Une ANOVA à plan mixte (expertise en RV x périphérique) n'indique pas d'effet de l'expertise ni du périphérique, mais une interaction significative entre ces deux facteurs ($F(2,69) = 4,150$; $p = 0,020$). Une ANOVA à un facteur, pour étudier l'influence des effets simples (i.e. l'influence de l'expérience en RV sur les performances pour chaque périphérique), indique de façon significative que les personnes qualifiées d'expertes ou d'initiées en Réalité Virtuelle sont plus performantes que celles qualifiées de novices, aussi bien dans l'utilisation de la souris que de la Cam3D (Tableau 10Tableau 9). Ces différences sont illustrées dans la Figure 31.

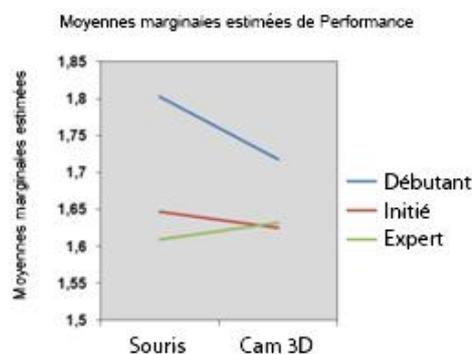


Figure 31 : Différences de performances pour chaque périphérique selon le niveau d'expertises en RV

Tableau 10 : Résultats de l'analyse des performances en fonction d'expertise en RV pour chaque périphérique

	Novice vs. Expert	Novice vs. Initié
Souris	$p < 0,005$	$p < 0,005$
Cam3D	$p = 0,027$	$p = 0,012$

Enfin, nous avons comparé les performances mesurées avec chaque périphérique indépendamment pour chaque groupe d'expertise. Il n'y a pas de différence significative entre les deux périphériques pour les groupes d'expertise « Initié » et « Expert ». En revanche, pour le groupe « Novice », les performances sont significativement meilleures avec la Cam3D ($t = 2,650$; $p = 0,020$).

Discussion

Les différents résultats rapportés ici apportent plusieurs réponses à notre questionnement. D'une part, nous pouvons constater que, en accord avec notre hypothèse opérationnelle HO6, l'expertise en réalité virtuelle a une influence sur les performances, mais que cet effet est similaire avec les 2 périphériques proposés pour la tâche à réaliser. D'autre part, nous remarquons que la « Cam3D » apporte un avantage significatif pour les personnes qualifiées de « Novices ». La prise en main immédiate de notre système, sans recours à une métaphore d'interaction peut expliquer ce résultat. Les personnes ayant une expertise plus importante ont déjà rencontré la problématique de positionnement dans un espace 3D avec un périphérique simple (clavier + souris ou souris seule). De nouveaux périphériques ou visualisations peuvent provoquer des phénomènes de rejet, s'ils n'apportent pas un avantage immédiat à l'utilisateur. Notre dernier résultat est encourageant puisqu'il confirme l'intérêt de notre système en particulier pour les novices.

3.5 Interaction entre la taille de la main et le périphérique sur les performances

Une analyse ANOVA « taille de la main x périphérique » ne met pas en évidence d'interaction entre la taille de la main et le périphérique ($F(2,65) = 1,288$; NS). Il existe par contre un effet principal de la taille de la main sur les performances ($F(2,65) = 3,937$; $p = 0,024$). Les tests LSD indiquent une différence significative de performances entre les participants ayant des mains caractérisées de petites et les participants ayant des mains caractérisées de grandes, en faveur de ces dernières ($MD = 0,1117$; $p = 0,007$).

Tableau 11 : Performances en fonction de la taille de la main pour chaque périphérique

		Petite	Moyenne	Grande
Souris	Moyenne	1,74	1,66	1,60
	Dev. std.	0,17	0,14	0,07
Cam 3D	Moyenne	1,68	1,65	1,60
	Dev. std.	0,16	0,10	0,07

Discussion

Pour le périphérique « Cam3D », la taille de la main pouvait avoir une importance dans la capacité du système à reconnaître les mouvements « main ouverte » et « main fermée ». De mauvaises reconnaissances pouvaient alors impacter les performances, comme par exemple si la main sortait de l'espace de jeu. Cette particularité pouvait impacter majoritairement les gens avec des mains caractérisées de « grandes ». Il est surprenant de constater que les personnes avec de petites mains sont moins performantes. De plus, l'analyse statistique a indiqué qu'il n'y avait pas de relation entre la taille de la main et le sexe. Puisqu'on obtient le même effet pour la souris, il est difficile d'avancer une explication ou même de formuler une hypothèse pour tenter de l'expliquer. Ce résultat est cependant en désaccord avec notre hypothèse HO5, puisque la taille de la main a une influence sur les performances avec notre système. Néanmoins, le fait que les résultats soient semblables avec la souris nous force à rester prudents sur cette conclusion et impose de mener des tests complémentaires afin d'apporter une explication. Il apparaît en tous les cas clair que le type de périphérique n'est pas directement responsable de ces différences.

3.6 Discussion

Notre étude des performances s'est déroulée en plusieurs étapes, en lien avec nos hypothèses de travail. D'une part, nous avons étudié avec quel périphérique les participants obtenaient de meilleures performances, puis nous avons mené une analyse plus fine pour mesurer l'impact de trois facteurs sur les performances : le sexe, l'expertise en réalité virtuelle et la taille de la main.

En accord avec notre hypothèse HO1, le périphérique « Cam3D » permet d'obtenir des performances sensiblement équivalentes à celles obtenues avec la souris pour la tâche de sélection dans un environnement virtuel en 3D. Compte tenu de la nouveauté de ce type d'interaction, ce premier résultat est très encourageant. Concernant le premier facteur (le sexe), nous n'avons pas observé de différences dans les résultats pour la Cam 3D, contrairement à la souris (ce qui est en accord avec l'hypothèse HO3). Les résultats sont plus mitigés pour les deux autres facteurs : nous observons des résultats similaires pour les deux périphériques, avec de meilleures performances pour les personnes avec des mains caractérisées de « grandes » (contrairement à notre hypothèse HO5) et pour les personnes qualifiées d'« experts » ou d'« initiés » en Réalité virtuelle (en accord avec HO6). Le fait que nous obtenions des résultats similaires pour les deux périphériques semble limiter le rôle de ces deux facteurs.

Il serait donc intéressant d'étudier d'une part l'évolution des performances sur une période plus longue, afin de voir si une utilisation plus longue peut entraîner une supériorité sur la souris, qui, elle, bénéficie d'une pratique beaucoup plus importante. Pour une tâche de sélection, le périphérique « Cam3D » peut d'ores et déjà remplacer le périphérique le plus courant, sans perte de performance. Il reste néanmoins à étudier l'acceptabilité de ce système comparé à la souris. C'est en conjonction avec ce dernier critère que nous pourrions établir l'intérêt de la « Cam3D », et donc plus généralement de la capture de

mouvement sans marqueur pour des tâches simples comme la sélection d'objets en environnement virtuel.

4 Influence du périphérique sur les préférences subjectives : étude de l'acceptabilité

4.1 Résultats globaux

4.1.1 Statistiques

Comme cela a été défini auparavant, l'acceptabilité a été étudiée sous l'angle de l'utilité, de l'immersion et de l'utilisabilité, ce dernier critère étant décomposé selon l'efficacité, l'efficience et la satisfaction.

Pour étudier l'acceptabilité comparativement avec les deux périphériques, des intervalles de confiance ont été calculés dans le cas des réponses aux questions fermées, afin de réaliser une inférence sur les proportions observées, en lien avec les hypothèses quant à la supériorité de la Caméra 3D comparativement à la souris. Plusieurs méthodes ont été développées pour calculer l'intervalle de confiance d'une proportion. La méthode standard traditionnelle, qui correspond à l'intervalle de Wald, est la plus couramment utilisée. Elle présente néanmoins l'inconvénient d'être « très anti-conservatrice, surtout lorsque p (la proportion) est près de 0 ou 1 ou lorsque n (l'effectif étudié) est petit » (Gagnon, 2006). Elle est donc plus adaptée à des valeurs de p proches de 0,5. Nous lui préférons donc la méthode de l'intervalle de Wilson, aussi appelée l'intervalle de score (Wilson, 1927), qui est considérée comme plus performante (Gagnon, 2006). Dans la suite du document, les intervalles de confiance seront toujours calculés sur la proportion des participants ayant choisi la réponse cam3D afin d'être en accord avec les hypothèses de recherche. Les intervalles de confiance seront illustrés par les données qualitatives associées aux questions et recueillies dans le même questionnaire post-passation. Dans le cas des échelles de Likert, nous avons attribué un score à chaque modalité. Nous avons alors comparé les moyennes entre les périphériques « Cam3D » et « souris » avec le test de Wilcoxon des rangs signés. La distribution des notations pour chaque variable mesurée a également été étudiée de manière qualitative avec des exemples provenant des questionnaires post-passation.

Pour étudier l'effet du sexe et de l'expertise en Réalité Virtuelle sur l'acceptabilité, nous avons eu recours, à deux sortes de tests. Pour l'analyse des réponses aux questions fermées, nous avons utilisé un test du Khi-deux de Pearson. Lorsque les effectifs théoriques étaient inférieurs à 5 (d'après les règles en usage) et pour des facteurs à deux modalités, nous avons utilisé le test exact de Fisher. Pour la réponse aux échelles de Likert permettant la comparaison des deux périphériques, nous avons réalisé une analyse de la variance (ANOVA) à un plan mixte, bien que la distribution de nos mesures de performances s'écarte de la normalité. Cela étant, nous nous appuyons sur la remarque de (Winer, 1971) quant à la robustesse de l'ANOVA aux erreurs de type 1.

Dans un premier temps, nous allons comparer l'acceptabilité perçue par les participants pour chaque périphérique. Nous étudierons ensuite l'influence du sexe et de l'expertise en Réalité Virtuelle sur l'acceptabilité.

4.1.2 Influence du périphérique sur le ressenti de l'acceptabilité

Les proportions en faveur de la Cam 3D et de la souris, ainsi que les réponses aux échelles de Likert, sont synthétisées dans le Tableau 12. Elles seront ensuite décrites et discutées dans les parties suivantes.

Tableau 12 : Proportions en faveur de la Cam 3D et de la souris, ainsi que les réponses aux échelles de Likert, selon chaque critère

Critère	Question	Proportion de participants en faveur de		Moyenne échelle de Likert (sur 6)	
		Cam3D	Souris		
Utilité	Périphérique perçu comme le plus approprié pour la tâche de sélection de cibles	85,7 %	14,3 %		
	La Cam3D est perçue comme représentant un apport par rapport à la souris			5,06	
Utilisabilité	Efficacité	Périphérique perçu comme le plus efficace en termes de rapidité de positionnement	75,7 %	24,3 %	
		Périphérique perçu comme le plus efficace en termes de précision de positionnement	41,4 %	58,6 %	
		Périphérique perçu comme le plus efficace de façon globale	66,2 %	33,8 %	
	Satisfaction	Périphérique perçu comme le plus confortable	32,4 %	67,6 %	
		Périphérique avec lequel les participants se sentent le plus à l'aise	47,8 %	52,3 %	
	Efficience	Fatigue perçue avec la souris			1,32
		Fatigue perçue avec la Cam3D			2,58
Périphérique perçu comme le plus facile d'utilisation		59,2 %	40,8 %		
Immersion	Périphérique perçu comme le plus immersif	98,6 %	1,4 %		

4.1.2.1 Perception de l'utilité

Le périphérique « Cam3D » est perçu comme étant globalement plus utile que la souris pour la tâche à effectuer.

D'une part, il est plus approprié pour la sélection de cibles, selon l'intervalle de confiance calculé (75,6% - 92%). Les données recueillies nous permettent de justifier qualitativement ce constat, la « Cam3D » étant jugée « *plus facile et plus rapide* » et permet un « *mouvement en parfaite cohérence avec la tâche à réaliser* ». En effet, pour « *saisir des objets, le schème préhension par la main est le plus naturel et le plus réaliste* ».

D'autre part, la « Cam3D » est associée à un apport élevé comparativement à la souris (note moyenne = 5,06 – E.T. = 0,886). L'analyse de la distribution des notations (Figure 32) montre par ailleurs que la majorité des participants ont jugé l'apport « *élevé* » (30/70 soit 42%) et « *très élevé* » (24/70 soit 34 %).

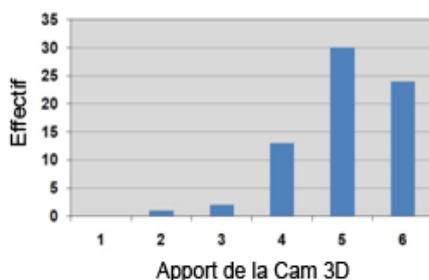


Figure 32 : Distribution des notes jugeant l'apport de la Cam3D par rapport à la souris

4.1.2.2 Perception de l'utilisabilité

L'utilisabilité est étudiée sous l'angle de l'efficacité, de l'efficience et de la satisfaction. D'après la norme ISO 9241-11, qui donne les lignes directrices concernant l'utilisabilité, « un système est utilisable lorsqu'il permet à l'utilisateur de réaliser sa tâche avec efficacité, efficience et satisfaction dans le contexte d'utilisation spécifié ». Les tests d'utilisabilité doivent donc couvrir les trois domaines suivants :

- L'efficacité : Vérifier que les tâches données à l'utilisateur soient réalisées ;
- L'efficience : Mesurer les ressources nécessaires pour réaliser ces tâches et la facilité d'apprentissage de l'interface ;
- La satisfaction : Déterminer si le système est agréable à utiliser ;

Le périphérique « Cam3D » est perçu comme étant plus efficace que la souris pour la rapidité de positionnement (intervalle de confiance 64,5% - 84,2%) et pour l'efficacité globale (intervalle de confiance 54,4% - 76,3%). Pour la dernière question concernant la précision de positionnement, il n'est pas possible d'affirmer la supériorité de l'un ou l'autre périphérique (intervalle de confiance 30,6% - 53,1% pour la Cam3D). Les participants justifient la supériorité de la Cam3D pour la rapidité de positionnement par « la réaction en temps réel aux variations de mouvements [qui permet de] gérer plus facilement les mouvements de la main » et par « un déplacement en profondeur plus facile et rapide qu'avec la souris ». Pour l'efficacité globale, c'est parce que « d'un point de vue technique, le fait que la Cam3D puisse suivre nos mouvements à la fois dans le plan et en profondeur, facilite la tâche et optimise l'efficacité de celle-ci ».

Le périphérique « Cam3D » n'est pas perçu comme étant plus satisfaisant que la souris. En effet, en termes de confort, la Cam3D est jugée inférieure à la souris (intervalle de confiance 22,7% - 43,9%). Pour le sentiment d'aisance, les participants sont partagés (intervalle de confiance 36,4% - 59,4% pour la Cam3D). Si la Cam3D est jugée « intuitive, rapide, performante, naturelle, réaliste, immersive, agréable, directe et sans intermédiaire », les participants trouvent qu'il est « plus fatigant de garder son bras tendu en l'air que de le laisser posé sur la table ».

Enfin, la supériorité de la Cam3D en termes d'efficience n'est que partiellement établie. Celle-ci est majoritairement perçue comme étant plus simple d'utilisation que la souris (intervalle de confiance 47,6% - 69,9%), car « les interactions sont plus naturelles » et « le déplacement est beaucoup plus intuitif qu'avec la souris ». Par contre, la Cam3D est perçue comme étant plus fatigante, selon le test de Wilcoxon pour échantillons appariés sur les scores obtenus avec les échelles de Likert ($Z = 5,486$; $p < 0.005$). Ce résultat est confirmé par la distribution des notes concernant la fatigue perçue avec chaque périphérique (cf. Figure 33).

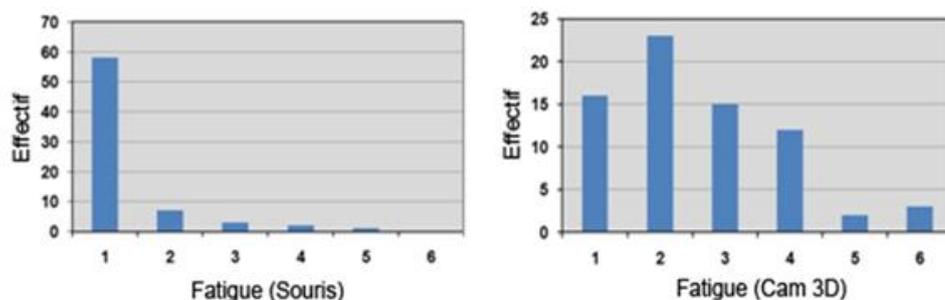


Figure 33 : Distribution des notes concernant la fatigue perçue avec chaque périphérique
« 1 » représente une absence de fatigue, « 6 » une fatigue élevée

4.1.2.3 Perception de l'immersion

La cam3D est perçue comme étant globalement plus immersive que la souris par 70 des 71 participants à l'expérimentation (intervalle de confiance 92,4% - 99,8%). Les données recueillies nous permettent également de justifier qualitativement ce constat. Les participants ayant jugé la cam3D plus immersive que la souris l'ont justifié par le fait que « *la perspective associée au système Cam3D donne la sensation d'atteindre la limite du décor en avançant la main* » ainsi que par le fait que « *de n'avoir aucun périphérique aide à se concentrer davantage sur la représentation visuelle* ».

4.1.2.4 Discussion

De manière globale, l'acceptabilité est meilleure avec la Cam3D, ce qui est partiellement en accord avec l'hypothèse HO2. C'est indéniable en termes de perception de l'utilité et du sentiment d'immersion. Concernant, l'utilisabilité, la supériorité de la Cam3D est moins évidente, tout du moins sur les critères de l'efficacité et de la satisfaction. Le principal reproche est la fatigue et l'absence de confort, dues à la position de l'utilisateur, qui est assis et doit tendre le bras, sans support pour le reposer. Dans le cas de la comparaison avec la souris, la différence est effectivement très importante. Cet écueil sera évidemment identique avec d'autres moyens de capture, comme par exemple un gant de données ou des marqueurs permettant un tracking via des caméras infrarouges. Il faut néanmoins garder à l'esprit l'utilisation potentielle – et visée – de notre système dans des environnements immersifs à l'échelle 1, de type « CAVE », dans lesquels l'utilisateur est debout. Il est alors plus facile d'adopter une posture plus reposante, avec les bras partiellement en repos au niveau du buste. L'avantage du meilleur sentiment d'immersion permis avec notre système prend alors tout son sens. Notre tâche, pourtant simple, de sélection d'un objet dans un environnement en trois dimensions, souligne les faiblesses de la souris en terme de rapidité et de simplicité de positionnement et confirme l'intérêt de la conception ou de l'utilisation de périphériques adaptés aux tâches en environnement virtuels.

4.2 Interaction entre le sexe et le périphérique

Il n'existe pas de différence selon le sexe pour la perception de l'utilité, d'une part quant à l'appréciation du périphérique le plus approprié pour la tâche de sélection de cibles (test exact de Fisher $p = 1,00$) ni vis-à-vis du jugement de l'apport de la cam3D⁶ (Mann-Whitney ; $U = 457,5$; NS), comme cela est visible sur la Figure 34.

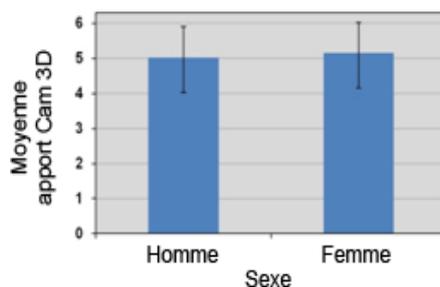


Figure 34 : Évaluation de l'apport de la Cam3D par les hommes et les femmes

De manière générale, le sexe des participants influence peu la perception de l'utilisabilité. Ainsi, nous ne notons pas de différence significative entre les hommes et les femmes pour l'efficacité en termes de rapidité ($\chi^2 = 0,04$; $p = 0,951$) et de précision de positionnement ($\chi^2 = 0,137$; $p = 0,711$), pour la satisfaction en termes de confort d'utilisation ($\chi^2 = 3,156$; $p = 0,076$) et de sentiment d'aisance

⁶ hommes : (moyenne = 5,02 ; E.T. = 0,892), femmes : (moyenne = 5,15 ; E.T. = 0,875)

($\chi^2 = 2,398$; $p = 0,121$). Par contre, nous pouvons noter une différence significative pour l'efficacité, c'est-à-dire pour la facilité d'utilisation ($\chi^2 = 5,864$; $p = 0,015$). L'ANOVA réalisée sur l'appréciation de la fatigue en fonction du périphérique et du sexe des participants montre une interaction significative entre ces deux facteurs ($F(1,69) = 7,965$; $p = 0,006$). Nous notons, par conséquent, qu'il y a une influence du sexe sur la fatigue ressentie avec la cam3D ($U = 369$; $p < 0,043$), contrairement à la souris ($U = 472,5$; NS). Les hommes (moyenne = 2,78 ; E.T. = 1,345) ont perçu une plus grande fatigue que les femmes (moyenne = 2,10 ; E.T. = 1,136) avec la caméra 3D. Ces résultats sont présentés sur la Figure 35.

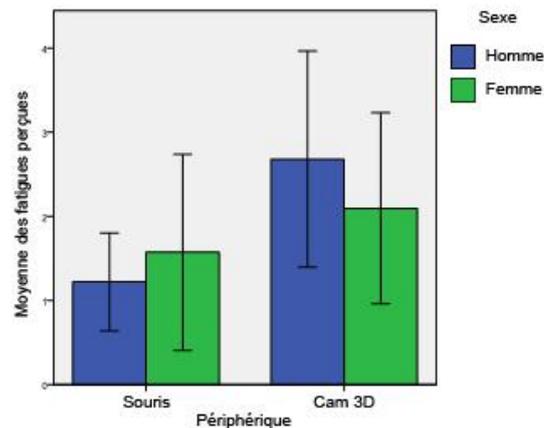


Figure 35 : Fatigue perçue pour chaque périphérique, selon le sexe des participants

Enfin, selon le test exact de Fisher, il n'y a pas de différence significative entre les hommes et les femmes quant à la perception du périphérique le plus immersif ($p = 0,286$). De façon globale, ces résultats confirment l'hypothèse HO4 avec toutefois une réserve émise sur l'utilisabilité.

4.3 Interaction entre l'expertise en R.V. et le périphérique

Il n'existe pas de différence significative selon le niveau d'expertise en RV quant à l'appréciation du périphérique le plus approprié pour la tâche de sélection de cibles ($\chi^2 = 0,096$; $p = 0,953$), ni pour le jugement de l'apport de la cam3D (Kruskal-Wallis ; $H = 1,993$; NS).

L'expertise en RV des participants n'influence pas la perception de l'utilisabilité. Concernant l'efficacité, il n'y a pas de différence significative entre les niveaux d'expertise en RV que ce soit dans l'appréciation du périphérique le plus efficace en termes de vitesse de positionnement ($\chi^2 = 0,350$; $p = 0,839$), dans l'appréciation du périphérique le plus efficace en termes de précision de positionnement ($\chi^2 = 0,651$; $p = 0,722$) ou encore dans l'appréciation du périphérique jugé globalement le plus efficace ($\chi^2 = 1,459$; $p = 0,482$). Il en est de même pour la perception de la satisfaction, pour le confort ($\chi^2 = 1,312$; $p = 0,519$) et le sentiment d'aisance ($\chi^2 = 0,673$; $p = 0,714$). Enfin, pour l'efficacité, il n'y a pas de différence significative selon le niveau d'expertise en RV quant à l'appréciation du périphérique le plus facile d'utilisation ($\chi^2 = 0,428$; $p = 0,807$). Une ANOVA ne permet pas de mettre en évidence une interaction significative entre la fatigue ressentie pour chacun des périphériques et l'expertise en RV des participants ($F(2,68) = 0,946$; NS).

Il n'existe pas d'effets significatifs de l'expertise en RV sur l'acceptabilité de l'artefact évalué, ce qui confirme l'hypothèse HO7.

4.4 Synthèse des résultats

Nous avons reproduit le schéma d'étude mis en œuvre pour l'analyse des performances, à savoir une étude comparative entre la Cam3D et la souris, puis une étude fine de l'influence du sexe et de l'expertise en Réalité Virtuelle sur ces résultats. D'après les participants, la Cam3D apporte un avantage significatif en termes d'utilité perçue et d'immersion ressentie, mais reste inférieure à la souris en termes d'efficacité et de satisfaction. La principale raison est une fatigue jugée plus importante, cela étant inhérent à la position assise associée au maintien du bras tendu. S'il est évident que ce dernier point est critique, il est davantage lié à la tâche de sélection en environnement 3D qu'à l'usage strict du périphérique. Il sera nécessaire de trouver une solution pour permettre un repos partiel du bras sans pour autant nuire au réalisme et à l'immersion. Enfin, il convient de noter que la fatigue pourrait être atténuée pour l'interaction dans un CAVE, où l'utilisateur se tient debout. Dans ce cas, la Cam 3D peut favorablement remplacer un périphérique à tenir en main (e.g. *ART Flystick*).

Le sexe et l'expertise en Réalité Virtuelle sont des facteurs qui n'influencent pas l'acceptabilité, ce qui est en accord avec les hypothèses HO4 et HO7, mis à part la fatigue qui est jugée supérieure avec la Cam3D pour les hommes.

Dans les questionnaires, les participants n'ont pas fait état de difficultés quant à l'utilisation de notre système. Le fait de ne pas recourir à des métaphores d'interaction représente un intérêt. L'utilisation d'une technique de suivi de la main sans marqueurs ne nous permet pas de recourir à des techniques de retour d'effort : hormis le retour visuel sur la position de l'avatar de leur main dans l'espace, les utilisateurs ne disposent pas d'autres indices proprioceptifs. Pourtant, les participants n'ont pas porté de jugements sur l'absence de retour sur les collisions avec d'autres cubes lors de la sélection. Ces résultats démontrent d'une part la valeur que peut apporter notre système pour des tâches sur écran d'ordinateur où le sentiment d'immersion reste habituellement faible et où le positionnement dans l'espace peut être problématique et d'autre part l'intérêt que pourrait avoir le portage de notre système dans un environnement immersif stéréoscopique à l'échelle 1.

5 Conclusions générales

L'objectif de cette étude est de démontrer, par l'intermédiaire d'une tâche simple de sélection en environnement virtuel en trois dimensions, l'intérêt de notre système par rapport à un périphérique utilisé couramment dans ce type de tâche. Nous avons pour cela mené une expérimentation auprès de 71 participants (50 hommes, 21 femmes), la tâche consistant à sélectionner successivement 10 cubes dans un environnement borné, alternativement avec la souris et avec une caméra 3D. Nous avons formulé l'hypothèse générale que la caméra 3D (Cam3D) apportait un avantage significatif, vis-à-vis d'un périphérique courant comme la souris, en termes d'acceptabilité, tout en permettant des performances au moins similaires et cela indépendamment de la taille de la main de l'utilisateur, de son sexe ou de son expérience en réalité virtuelle. Cette hypothèse a donc guidé nos choix pour les analyses quantitative et qualitative. La performance s'appuie sur la mesure du temps d'achèvement de la tâche entière de sélection. L'analyse qualitative repose sur l'étude de l'acceptabilité, et plus précisément de l'utilité, de l'utilisabilité et du sentiment d'immersion, ces données étant recueillies grâce à un questionnaire post-passation. Différents tests statistiques ont été menés pour assurer la validité et la reproductibilité des résultats.

Les performances avec la Cam3D ne sont pas sensiblement meilleures que celles obtenues avec la souris. Ce résultat est à mettre en perspective avec le temps d'expérimentation très court, qui constitue

un désavantage pour la Cam3D, la souris bénéficiant d'un niveau de pratique supérieur, malgré la phase de prise en main au début de l'expérimentation. Ce premier résultat confirme notre hypothèse. Le sexe n'influence pas les performances obtenues avec la cam3D, contrairement à l'expertise en réalité virtuelle et à la taille de la main. Nos résultats indiquent que les personnes expertes et initiées obtiennent de meilleurs résultats que les personnes novices. De la même manière, les personnes avec des mains qualifiées de grande taille ou de taille moyenne sont plus rapides à achever la tâche que les personnes avec de petites mains. La perception de l'acceptabilité est divisée : la Cam3D est jugée plus utile et apporte un meilleur sentiment d'immersion mais l'utilisabilité est par contre jugée moindre en raison de la fatigue ressentie comme supérieure avec la Cam3D. C'est la position de l'utilisateur, assis et bras tendu sans point d'appui qui justifie ce jugement. Le sexe ou l'expertise en réalité virtuelle ne sont pas des critères de nature à influencer l'acceptabilité perçue par les participants.

Pris conjointement, ces résultats quantitatifs et qualitatifs démontrent clairement l'intérêt d'un périphérique sans marqueur pour les tâches de sélection en environnement virtuel. En effet, si les performances sont équivalentes, le sentiment d'immersion est supérieur avec notre système. Le schème d'interaction, sans métaphore intermédiaire, apporte une compréhension immédiate à l'utilisateur et par là même une grande simplicité d'utilisation. Ces différents résultats nous mettent face à un paradoxe : un temps d'expérimentation et donc d'utilisation plus important permettrait de limiter le biais du temps d'apprentissage et pourrait impacter positivement les performances, cependant, il dégraderait dans le même temps l'utilisabilité perçue et plus précisément occasionnerait une grande fatigue (elle est déjà importante pour une durée d'utilisation de moins de 5 minutes). Même si l'intérêt de notre système est avéré, ce dernier serait plus approprié dans deux scénarii d'usages différents permettant de diminuer la fatigue perçue. D'une part, dans le cadre d'une utilisation debout dans un environnement immersif en vision 3D stéréoscopique : l'utilisateur ne serait pas obligé de travailler le bras tendu et pourrait reposer son bras sur le haut du corps. D'autre part, dans le cadre d'une utilisation assise, pour des gestes épisodiques, comme par exemple dans le cas de la commande d'appareils à distance (domotique).

Notre hypothèse générale est donc vérifiée. Certains résultats restent néanmoins difficiles à expliquer : il est curieux de constater une différence de performances relative à la taille de la main des participants. Tout du moins, le résultat observé est contraire à ce que nous aurions pu attendre. En effet, les utilisateurs avec des mains de grande taille, en sortant partiellement de l'espace de jeu, auraient pu entraîner des erreurs de détection de la position de la main et donc un temps d'exécution plus long. Pourtant, les performances sont inférieures avec des personnes avec de petites mains. Les meilleures performances obtenues par les utilisateurs familiers des applications de réalité virtuelle, si elles contredisent nos hypothèses, peuvent s'expliquer par une meilleure propension de ce type d'utilisateurs à s'adapter à de nouveaux systèmes d'interaction. Il convient de souligner que, pour les novices, les résultats sont meilleurs avec la Cam3D qu'avec la souris. Ce résultat est intéressant dans le cadre de l'accès au plus grand nombre aux nouvelles technologies.

Après cette première étude, s'appuyant sur une tâche simple, nous pouvons donc dire que la capture de mouvements sans marqueurs semble prometteuse car elle apporte des avantages indéniables dans le cadre de l'interaction en environnement virtuel, où le sentiment d'immersion est un moteur important du réalisme et de la présence ressentie (Loup-Escande, 2010). Ce travail est un premier pas vers la démonstration scientifique des apports potentiels d'une telle technologie. Il constitue un point de départ et apporte donc une justification à la poursuite des travaux de recherche portant sur d'autres types d'activités 3D temps réel, sur des expérimentations plus longues, et également comparant notre système avec des périphériques plus évolués.