

## Gant de données vs. Cam3D pour la manipulation et la navigation en environnement virtuel

---

# 1 Méthodologie

## 1.1 Présentation générale

La première étude nous a permis de mettre en évidence les avantages et les inconvénients d'un système de capture de mouvements sans marqueurs pour une tâche simple et courante (i.e., la sélection d'objets). Nous avons décidé de continuer dans cette voie pour répondre à notre problématique générale, en évaluant des tâches plus complexes et en améliorant notre système.

Nous avons, pour l'étude précédente, utilisé une caméra time-of-flight de type « *SwissRanger SR 4000* » dont la limite principale était la résolution, ce qui avait pour conséquence principale de limiter l'amplitude des mouvements de l'utilisateur. Cette caméra avait été choisie car son framerate était de 60FPS et sa résolution était l'une des meilleures par rapport à ses concurrentes lors de nos développements et de l'expérimentation. Lors de l'analyse des résultats de notre première étude, un nouveau périphérique est apparu sur le marché, destiné en premier lieu aux applications ludiques (les jeux vidéo sur *Xbox 360* de *Microsoft*). Ce périphérique, nommé Kinect, est constitué d'une caméra couleur de résolution 640 x 480, de microphones, d'accéléromètres et surtout d'une caméra 3D de résolution 640x480 fonctionnant à 30 images par seconde. Étant données les caractéristiques de cette caméra, et la naissance d'une communauté de développeurs, nous avons décidé d'avoir recours à cette caméra pour l'étude présentée dans ce chapitre.

Très rapidement, l'utilisation de la Kinect a été détournée par des particuliers afin qu'elle puisse fonctionner sur ordinateur. Voyant les possibilités offertes par ce périphérique dans des domaines autres que le ludique, ainsi que le fort intérêt manifesté par les communautés de programmeurs et de chercheurs pour ce nouveau périphérique, la société qui fabrique ces caméras a décidé de mettre en accès libre les pilotes ainsi que l'algorithme permettant de capturer les mouvements du corps. Pour cela, un squelette est appliqué sur chaque utilisateur et il est possible de « tracker » jusqu'à 16 personnes simultanément.

Nous avons donc décidé d'utiliser la Kinect pour améliorer le système basé initialement sur la caméra SR 4000. Les développements qui ont été menés permettent désormais au système de capturer les mouvements de tous les membres de l'utilisateur ; nous avons par ailleurs limité le nombre de personnes pouvant travailler simultanément à 2 car au-delà la résolution ne permet pas à trois personnes de travailler côte à côte sans se gêner. Par ailleurs, notre système permet de détecter si chacune des mains est ouverte ou fermée. Pour cette deuxième étude, nous avons décidé de ne faire manipuler qu'une seule personne à la fois, l'aspect collaboratif n'étant pas traité dans le cadre de nos travaux. Il sera néanmoins possible dans des travaux futurs.

L'objectif de cette seconde étude est d'aller plus loin dans l'interaction avec l'environnement virtuel. En effet, si la première étude permettait à l'utilisateur de réaliser des tâches de sélection dans un environnement virtuel en 3 dimensions, cette seconde étude s'intéresse en plus aux actions de désélection, déplacement, rotation et redimensionnement d'objets ainsi qu'à la navigation en environnement virtuel. Ainsi, nous aurons couvert l'ensemble des actions courantes de manipulation en environnement virtuel.

Les interactions sont réalisées avec une main ou de manière bi-manuelle, selon l'action choisie et sont réalisées avec un taux de rafraîchissement de 30 FPS, rendant possible une interaction 3D temps réel en environnement virtuel tels qu'expliqués par (Bowman et al., 2004; Coquillart et al., 2003).

Cette expérimentation vise à montrer d'une part que le système développé avec la Kinect permet d'obtenir des résultats *a minima* équivalents aux systèmes couramment utilisés en réalité virtuelle, comme des capteurs magnétiques (en ce qui concerne la position dans l'espace des mains) et des gants de données (pour détecter l'ouverture ou la fermeture des mains), tout en améliorant le confort, l'efficacité et l'efficacité ressentis par les utilisateurs. D'autre part, nous nous attacherons à démontrer que les modalités d'interaction développées dans notre système sont efficaces, intuitives et adaptées aux tâches de déplacement, de redimensionnement, de rotation et de navigation demandées à l'utilisateur.

## 1.2 Terminologie

Voici les différents acronymes et termes que nous allons utiliser dans la suite de ce chapitre :

- Environnement virtuel : environnement 3D dans lequel les actions sont effectuées ;
- Système Cam3D : système utilisant une caméra 3D Kinect comme interface transparente pour récupérer les actions et les mouvements effectués par l'utilisateur ;
- Système Gants3D : système utilisant 2 gants 5DT et 2 capteurs électromagnétiques pour récupérer les actions et les mouvements effectués par l'utilisateur ;
- Main dominante : main de prédilection de l'utilisateur. La main droite sera la main dominante pour une personne droitère ;
- Main secondaire : main qui n'est pas la main dominante de l'utilisateur. La main gauche sera la main secondaire pour une personne droitère.

Dans la suite de ce chapitre, afin de simplifier la lecture, nous remplacerons environnement virtuel par **EV**, système Cam3D par **Cam3D**, système Gants + Capteurs par **Gants3D**, tâche 1 par **T1**, tâche 2 par **T2** et ainsi de suite jusqu'à **T9** (pour les 9 tâches à réaliser dans l'expérimentation).

## 1.3 Hypothèses

Nous avons démontré dans l'étude précédente qu'un système de capture sans marqueur pouvait se subsister à la souris pour des tâches de sélection simple, sans entraîner de baisse de performances et avec un apport en termes de préférences subjectives. Pour des tâches de manipulation en environnement 3D, la souris n'est plus suffisante : nous avons donc choisi comme matériel de référence les composants les plus courants, à savoir le gant de données associé à un système de tracking électromagnétique. Si l'avantage en terme de coût est indéniable (environ un facteur 40) grâce à la large diffusion de la Kinect entraînant un prix raisonnable, il reste à prouver que notre système « Cam3D » permettra d'obtenir des performances aux moins équivalentes au système « Gants3D » pour la réalisation des tâches de manipulation (déplacement, rotation, redimensionnement, navigation). Les deux systèmes sont fonctionnellement équivalents et sont donc évalués sur les mêmes modalités d'interaction, que nous avons par ailleurs développées. L'objectif scientifique premier de cette étude est donc de démontrer l'intérêt de notre système par rapport au matériel courant utilisé en réalité virtuelle, en termes de performances (temps d'exécution, précision), d'acceptabilité (efficacité, confort, efficacité) et de préférences subjectives.

L'objectif secondaire est l'évaluation des modalités d'interaction proposées.

La finalité, si l'intérêt de notre système est démontré, et en fonction de l'évaluation des modalités d'interaction, est l'amélioration de ces dernières (voir le chapitre 5 p. 143) afin d'être en mesure de

fournir un système complet (périphérique et modalités d'interaction) qui soit directement utilisable dans les applications de réalité virtuelle.

Nos hypothèses visent à répondre au premier objectif. Pour y répondre, nous avons mené une étude comparative de deux systèmes (i.e., Gants3D et Cam3D) pour des tâches de manipulation en environnement virtuel. Nous avons formulé 4 hypothèses de travail :

- 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, si elles sont confirmées, permettront de conclure sur la supériorité de la Cam3D sur les Gants3D pour les tâches de manipulation en environnement virtuel rendues possibles par les modalités d'interaction que nous avons développées.

#### 1.4 Tâches de manipulation et de navigation

On entend par tâches de manipulation l'ensemble des tâches pour lesquelles l'utilisateur doit effectuer des actions sur un objet, celles-ci étant de trois types :

- Le déplacement, c'est-à-dire le positionnement dans l'environnement virtuel d'un objet par translation selon les axes X, Y et Z ;
- La rotation, c'est-à-dire l'orientation de l'objet selon les axes X, Y et Z ;
- Le redimensionnement, c'est-à-dire la modification de l'échelle d'un objet. L'utilisateur peut soit agrandir, soit rétrécir l'objet selon les 3 axes à la fois. De cette façon l'objet n'est pas déformé mais garde bien ses proportions initiales.

On entend par tâches de navigation les tâches pour lesquelles l'utilisateur se déplace dans l'environnement virtuel. Afin d'imposer la navigation, nous avons décidé de concevoir plusieurs scènes entre lesquelles le participant devra « se déplacer ». La navigation s'effectue par translation de l'environnement virtuel selon les axes X, Y et Z.

Nous avons décidé d'adopter une complexité graduelle pour les tâches de manipulation, afin de pouvoir réaliser des mesures plus fines. Dans un premier temps, les participants doivent réaliser, dans la première scène, chaque type de tâche de manière isolée sur des objets distincts. Puis, sur la deuxième scène, nous composons deux types de tâche (e.g., déplacement et rotation) et enfin les trois types de tâches (i.e., rotation et déplacement et redimensionnement) doivent être réalisés dans la troisième scène. Ce choix permettra également au participant une meilleure appropriation des modalités d'interaction proposées. Nous avons, de fait, réalisé 3 scènes différentes entre lesquelles le participant doit naviguer. Les scènes et les objets sont différents afin de rendre l'expérimentation plus attractive et motivante pour le participant.

## 1.5 Environnements virtuels et tâches à réaliser : conception

Chaque scène contient des objets à manipuler qu'il faut faire correspondre au mieux à un modèle. Pour chaque objet, nous avons donc reproduit le même mécanisme : afin de montrer à l'utilisateur où positionner, comment orienter et comment redimensionner les objets, des représentations fantômes (en transparence) des objets sont affichées. L'utilisateur doit alors faire correspondre au mieux les objets à manipuler avec leurs représentations sous forme de « ghost » et peut également s'y reprendre autant de fois qu'il le souhaite pour accomplir la tâche.

La première scène ne contient que des objets associés à des tâches simples (i.e. ne requérant qu'une seule action), elle correspond à un environnement « campagne » :

- Tâche 1 (T1) : déplacement d'un puits ;
- Tâche 2 (T2) : redimensionnement d'un cheval ;
- Tâche 3 (T3) : orientation d'une maisonnette.

La Figure 36 représente la scène initiale à gauche (avec les représentations fantômes et les objets à manipuler avec leur position / orientation / taille de départ) et la scène finale, à droite, avec chaque objet correctement positionné / orienté / redimensionné. Il n'est possible d'appliquer à un objet que la manipulation à laquelle il est associé (e.g., il n'est pas possible d'orienter le cheval).

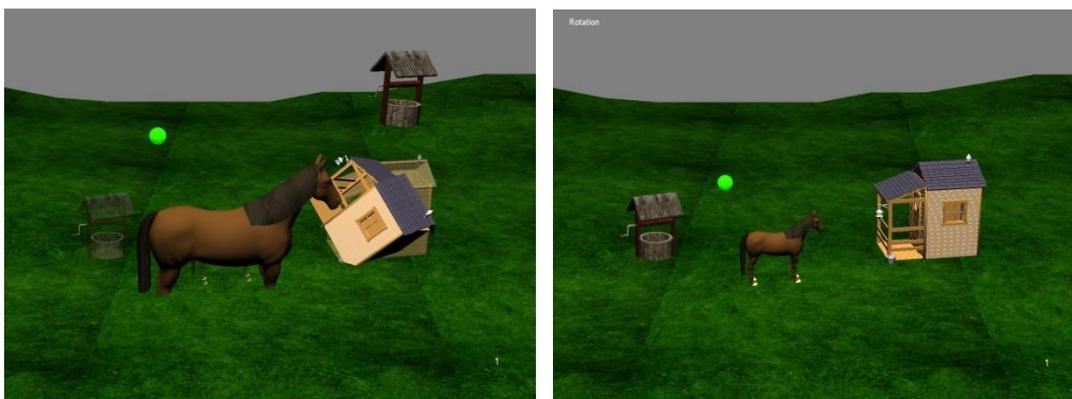


Figure 36 : Scène 1 avec les 3 objets à manipuler (puits, cheval et maisonnette) avant et après manipulation

La scène 2 correspond à l'environnement « bureau ». Elle contient également 3 objets à manipuler, mais cette fois avec des actions composées de deux types d'actions élémentaires :

- Tâche 5 (T5) : déplacement et redimensionnement d'un globe ;
- Tâche 6 (T6) : déplacement et orientation d'une horloge ;
- Tâche 7 (T7) : orientation et redimensionnement d'un ordinateur portable.

Là encore, chaque objet est restreint aux actions que doit lui appliquer l'utilisateur : par exemple l'ordinateur portable ne peut pas être déplacé, il peut uniquement être redimensionné et orienté. La Figure 37 représente la scène initiale (à gauche) et la scène finale (à droite).

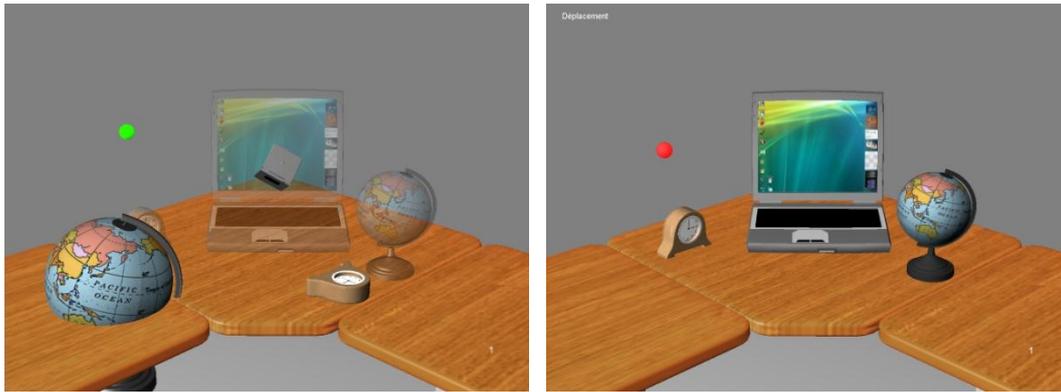


Figure 37 : Scène 2 avec les 3 objets à manipuler (globe, horloge et ordinateur) avant et après manipulation

La dernière scène, « mer », ne contient qu'un seul objet, un bateau qui doit être manipulé en composant les actions de rotation, déplacement et redimensionnement (T9). La Figure 38 représente la scène initiale (à gauche) et la scène finale (à droite).

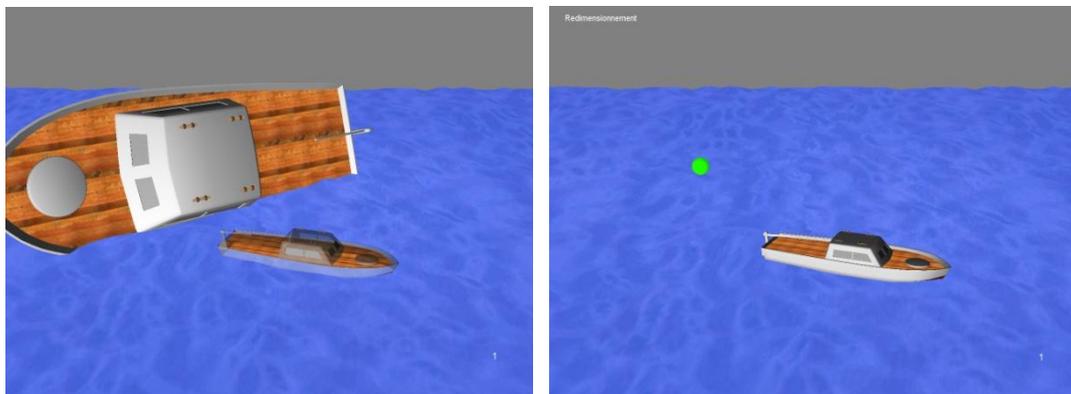


Figure 38 : Scène 3 avec l'objet à manipuler (bateau), avant et après manipulation

Pour passer d'une scène à l'autre, l'utilisateur doit réaliser des actions de navigation (les scènes sont distantes dans l'environnement virtuel).

Le jeu est affiché en perspective, permettant à l'utilisateur de mieux juger des distances et des orientations des objets. La caméra est placée légèrement en hauteur et avec suffisamment de recul pour permettre au participant de voir entièrement la scène dans laquelle il se situe.

La place des objets est fixée au départ et reste identique pour les 2 systèmes à tester. Nous avons décidé de laisser les objets dans les mêmes conditions (position, orientation, dimension) d'un périphérique à l'autre pour obtenir des données comparables entre les systèmes étudiés. Si les participants peuvent affiner leur stratégie entre les 2 conditions (par exemple, utilisation de points de repères), ce n'est pas tant la position, l'orientation ou la taille initiale de l'objet qui rentrera en ligne de compte, que le temps de manipulation et donc d'appropriation. De plus, pour les tâches simples (une seule action), l'utilisateur ne met pas a priori de stratégie pour arriver au but fixé. Dans tous les cas, nous avons mis en place des mécanismes pour assurer la validité interne de notre expérimentation (cf. 2.8 p. 113).

## 1.6 L'utilisation d'un pie-menu adapté à l'environnement

Étant donné que l'utilisateur peut réaliser 3 actions différentes de manipulation, plus une action de navigation, il est nécessaire de rendre possible le changement d'action (e.g., passer de la rotation au déplacement). Pour cela, plusieurs solutions sont envisageables :

- Langage gestuel : étant donné qu'un apprentissage des mouvements est déjà nécessaire pour réaliser les actions de sélection / désélection / manipulation / navigation, nous avons jugé que cette alternative rendrait l'expérimentation complexe et risquerait d'induire une certaine forme de confusion dans l'esprit du participant.
- Commande vocale : même si la reconnaissance vocale est aujourd'hui performante et fiable, elle reste encore peu utilisée. De plus, il nous semble hasardeux d'induire de la multimodalité dans notre expérimentation, l'utilisateur travaillant en interaction bi-manuelle, avec une charge cognitive déjà relativement importante.
- Périphérique externe : l'utilisation d'un périphérique externe (e.g., le clavier) a été proscrite pour éviter une rupture de l'immersion dans la tâche à réaliser.

Nous avons décidé d'afficher des boutons directement à l'écran, et donc de réaliser un menu. Nous n'avons pas jugé opportun de disposer des boutons en permanence dans l'interface, d'une part pour éviter au participant des gestes supplémentaires pour se positionner sur un bouton en particulier, et d'autre part pour ne pas gêner la perception 3D de l'environnement par un plan 2D superposé.

Le choix que nous avons fait a été d'afficher un menu à la demande (qui disparaît une fois effectué le choix de l'action), et à l'endroit où se situe la main de l'utilisateur, pour éviter tout déplacement supplémentaire de la main. La solution d'un « pie-menu » répond à ces différentes contraintes. Des travaux ont attesté l'intérêt de ces menus par rapport aux menus linéaires (Callahan et al., 1988) car ils permettent une rapidité accrue tout en minimisant les erreurs de sélection. De plus, ils permettent de rendre identique la distance entre le point d'activation et les différents items à atteindre, du fait de l'organisation circulaire. Ce type de menu permettra l'adoption éventuelle de techniques avancées de sélection ou mode expert (par exemple les « marking menus » (Kurtenbach & Buxton, 1991)) où seule la gestuelle permet de sélectionner une action, sans affichage du menu.

Nous avons réalisé un menu circulaire composé de 4 secteurs (voir Figure 39). Les 4 secteurs correspondent aux 4 actions possibles (déplacement, redimensionnement, rotation et navigation). Nous avons mis des couleurs différentes afin d'aider le participant à bien différencier les 4 actions.

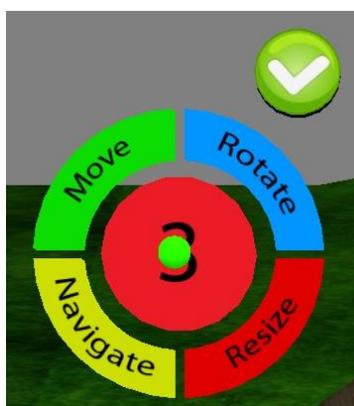


Figure 39 : Menu circulaire avec 4 choix possibles + un bouton validation pour la fin de l'expérimentation

Nous avons également associé au menu une icône de validation (au dessus à droite). Elle n'est utilisée qu'une seule fois pour permettre à l'utilisateur d'indiquer qu'il a terminé l'expérimentation (à l'issue de la scène 3).

Pour faire apparaître le menu, l'utilisateur doit fermer sa main et l'ouvrir rapidement, puis garder la main ouvert immobile pendant 2 secondes. Le menu apparaît alors à l'endroit exact où l'utilisateur a fermé la main. Pour choisir une action, il doit déplacer sa main en la maintenant ouverte vers l'action qu'il souhaite réaliser et rester sur le menu choisi pendant 2 secondes (la main est figurée par un avatar prenant la forme d'une sphère verte). Un compte à rebours s'affiche au centre du menu lui indiquant que son choix est en cours de validation. Tant que le choix n'est pas validé, l'utilisateur peut se déplacer vers un autre menu (par exemple s'il a changé d'avis ou s'il s'est trompé) et le compte à rebours est alors réinitialisé. Le menu reste affiché tant que l'utilisateur n'a pas fermé la main ou qu'une action n'a pas été choisie. Une fois le menu validé, un message en haut à gauche de l'écran affiche l'action que l'utilisateur a choisie et qu'il peut donc effectuer. L'action choisie reste valide tant que l'utilisateur n'en a pas demandé d'autre.

### 1.7 Manipulation : pistes envisagées et solutions retenues

Dans la vie de tous les jours, nous interagissons avec les objets qui nous entourent à l'aide de nos mains. Si un petit objet peut être manipulé avec une seule main, les objets plus volumineux nécessitent l'usage des 2 mains. Notre système ne permet pas à l'heure actuelle de déterminer l'orientation des mains mais uniquement leur position dans l'espace et leur état (ouverte ou fermée). Par conséquent, il nous a fallu trouver des modalités d'interactions (bi-manuelles pour certaines) permettant de réaliser des rotations, des déplacements et des redimensionnements de manière simple et intuitive pour l'utilisateur.

Nous avons également ajouté un retour visuel pour indiquer au participant la position ainsi que l'état de ses deux mains dans l'environnement virtuel. L'utilisation de modèles réalistes de mains n'a pas été retenue pour 2 raisons :

- Pour la manipulation d'objets réels de grandes dimensions, comme une maison ou un cheval, l'utilisation de modèle de mains n'aurait pas été cohérente car il n'y aurait pas eu adéquation entre la taille des mains et la taille de l'objet. Cela aurait pu être perturbant pour les utilisateurs.
- Pour des tâches de précision, un modèle de main pose deux problèmes. D'une part, l'intersection avec l'objet peut être multiple, d'autre part la taille de modèle peut gêner la vision de l'objet, en masquant ce dernier.

Nous avons donc choisi une métaphore simplificatrice, en représentant les avatars des mains sous forme de petites sphères. La couleur de celles-ci indique l'état de la main :

- Vert : main ouverte
- Rouge : main fermée

Plusieurs actions ne nécessitent que l'usage de la main dominante : la sélection d'objet, la désélection, l'affichage du menu, le déplacement d'objet et la navigation dans l'environnement virtuel. En revanche, les tâches plus complexes comme le redimensionnement et la rotation exigent l'utilisation des 2 mains. Nous allons décrire dans un premier temps les tâches simples, puis les tâches complexes dans un second temps.

### 1.7.1 Tâches simples

Pour la sélection d'objet, l'utilisateur doit déplacer sa main dominante sur l'objet à sélectionner puis fermer sa main pendant 2 secondes. Lorsque l'objet est sélectionné, il devient bleu. La Figure 40 décrit la procédure de sélection, qui a également été donnée sous forme papier aux participants. Les procédures pour les autres modalités sont présentées en Annexe B (Fiches explicatives).

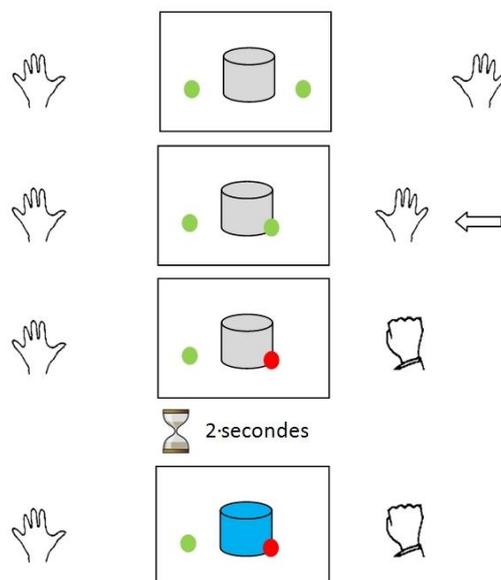


Figure 40 : Procédure de sélection d'un objet (pour un droitier)

Pour désélectionner un objet, l'utilisateur doit déplacer sa main dominante sur l'objet à désélectionner, maintenir sa main ouverte dessus pendant 2 secondes. Lorsque l'objet reprend sa couleur d'origine, il est alors désélectionné.

Pour appeler le menu, l'utilisateur doit fermer la main dominante et l'ouvrir rapidement sans la déplacer. En la maintenant ouverte pendant 3 secondes, le menu apparaît. Pour choisir une action, il doit déplacer sa main (toujours ouverte) sur un des sous-menus pendant 3 secondes. Un compte à rebours apparaît au centre du menu. Une fois arrivé à 0, le sous menu est sélectionné. Un texte en haut à gauche de l'écran indique alors quelle action est actuellement possible.

Enfin, pour déplacer un objet préalablement sélectionné, il faut positionner la main dominante (fermée) dessus. L'objet s'attache à la main et suit alors ses mouvements tant que celle-ci reste fermée. L'utilisateur doit déplacer sa main dominante à l'endroit où il souhaite positionner l'objet. Une fois que ce dernier est correctement positionné, l'utilisateur doit ouvrir la main pour relâcher l'objet.

### 1.7.2 Tâches complexes

On considère que les tâches de rotation et de redimensionnement sont plus complexes car elles demandent une coordination des 2 mains.

La modalité du redimensionnement d'un objet s'apparente dans le monde réel à un ressort duquel on tiendrait une extrémité dans chaque main et que l'on pourrait comprimer ou étirer pour en modifier la taille. Le redimensionnement étant homogène sur les trois axes, la modification de la taille sur l'axe X a pour effet d'appliquer le même facteur sur les axes Y et Z. Une fois l'objet préalablement sélectionné, l'utilisateur doit positionner sur celui-ci sa main dominante fermée et fermer l'autre main pour autoriser le redimensionnement. En écartant ou rapprochant les mains, l'objet s'agrandit ou se réduit. Lorsque l'objet est redimensionné l'utilisateur doit ouvrir les mains pour « verrouiller » la taille de l'objet.

Pour la rotation, une fois l'objet sélectionné, l'utilisateur doit positionner sa main dominante (fermée) sur celui-ci. L'avatar de la main disparaît alors et se positionne automatiquement au centre de l'objet. Il faut fermer l'autre main pour autoriser la rotation. En déplaçant la main secondaire selon l'axe des X, cela permet à l'objet de tourner dans cette même direction. Il en est de même pour les axes Y et Z. Lorsque la rotation est achevée, l'utilisateur doit ouvrir la main dominante d'abord puis la deuxième afin d'éviter de petits décalages lors de l'ouverture des mains.

Le redimensionnement reste assez simple étant donné qu'il suffit de fermer les deux mains et de les rapprocher ou de les éloigner pour agrandir ou rétrécir l'objet. Par contre, la rotation est plus difficile étant donné que la main dominante sert à verrouiller l'objet sur lequel on veut travailler et l'autre main à l'orienter dans l'espace : les 2 mains font donc des mouvements distincts ce qui demande plus de concentration pour l'exécution.

### 1.8 La métaphore du joystick pour la navigation

Une fois le menu « navigation » sélectionné, un joystick apparaît au centre de l'écran. Nous avons choisi la métaphore du joystick pour la navigation car c'est un périphérique dont beaucoup de personnes connaissent le principe de fonctionnement.

Pour naviguer, il faut positionner la main dominante sur la manette du joystick et la fermer pendant 2 secondes afin de sélectionner la manette. Lorsque la manette est sélectionnée, un cadre apparaît ainsi que des flèches pour indiquer à l'utilisateur dans quelle direction il doit aller ainsi que la position finale où il doit se rendre (Figure 41). Un cadre est positionné sur chaque scène, il permet non seulement d'indiquer la position finale mais aussi de s'assurer que l'utilisateur sera bien positionné pour effectuer les manipulations d'objets sans être ni trop près d'eux, ni trop loin et assurer ainsi un confort et une facilité d'utilisation maximum.

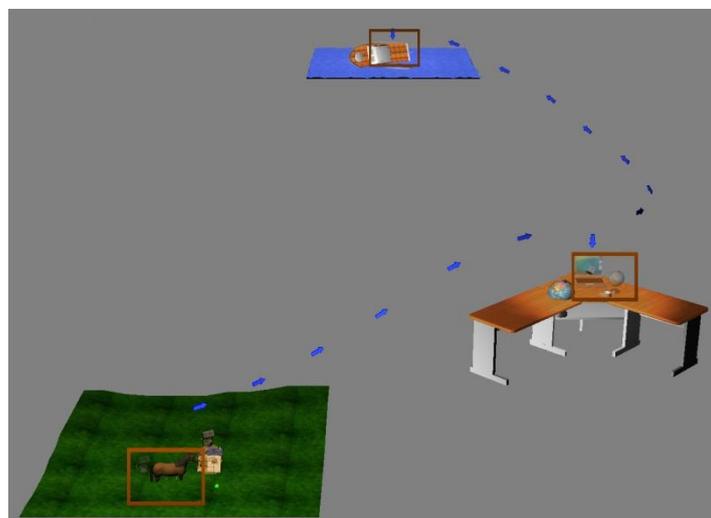


Figure 41 : Navigation entre les 3 scènes. Les flèches bleues indiquent l'itinéraire à suivre, les cadres marrons permettent au participant de se positionner avec précision sur la nouvelle scène

Lorsque les flèches, indiquant la direction à suivre, apparaissent, l'utilisateur déplace sa main (toujours fermée) dans cette même direction. Une fois au bon endroit, il lui suffit d'ouvrir la main pour stopper la navigation. Enfin, l'utilisateur doit maintenir la main ouverte sur la manette pendant 2 secondes afin de la désélectionner.

Lorsque l'utilisateur ferme la main sur la manette, on prend cette position pour référence et le déplacement de la main dans une direction sert de vecteur directionnel pour la navigation. On utilise la distance au cube entre la position de la main et la position de référence pour indiquer la rapidité du déplacement. Ainsi une amplitude de mouvement faible permet un déplacement précis et lent, tandis que des mouvements de grandes amplitudes permettent de se déplacer rapidement d'une scène à l'autre. De plus le déplacement fonctionne de façon incrémentale à la façon d'une « Spacemouse », c'est-à-dire que la navigation ne se fait pas en fonction de la position de la main dans l'espace mais de sa distance par rapport à la position de référence.

## 1.9 Implémentation et développements logiciels

Nous avons utilisé pour cette expérimentation un ordinateur *Alienware* (*Intel*® *Core*™ *i7* CPU930 cadencé à 2.80GHz avec 6 Giga-octets de RAM et une carte graphique de type *NVidia GeForce GTX480*) ainsi qu'un écran *Samsung 120Hz (3D Vision Ready)*. Pour acquérir la position et l'état des mains (ouvertes ou fermées), nous avons utilisé 3 périphériques différents : une *Kinect* de *Microsoft* pour notre système d'une part et 2 gants 5DT ainsi que 2 capteurs magnétiques *Polhemus Patriot* pour le système « Gants3D » d'autre part.

Pour cette expérimentation, nous avons amélioré le système Cam3D précédemment créé. Nous avons essayé de tenir compte des remarques des utilisateurs, aussi bien en termes d'ajout de fonctionnalités qu'en termes d'améliorations de détection. Parmi les suggestions récoltées dans les questionnaires post-passation, certaines idées étaient récurrentes comme par exemple le fait de : « Pouvoir manipuler les objets et non plus seulement les sélectionner » ou encore « effectuer des opérations bimanuelles ». De même, l'algorithme de détection de main fermée / main ouverte a été amélioré.

Comme nous l'avons expliqué précédemment, nous avons délaissé la Caméra 3D *SwissRanger* pour une caméra 3D *Kinect* de *Microsoft*. En effet, bien que le *framerate* ne puisse dépasser les 30 images par seconde, elle offre cependant une résolution nettement supérieure (d'environ 4 fois, 640 x 480). La précision en profondeur reste du même ordre bien que la technologie utilisée soit différente (cf. chapitre 2 partie 4.3.3 p. 50). De plus, ce périphérique possède une seconde caméra couleur de même résolution et a de nombreux capteurs (audio, accéléromètres, etc.). Enfin, elle est motorisée et permet d'orienter la caméra vers le haut ou le bas si nécessaire. Ces nombreux avantages en font un excellent périphérique pour la capture de mouvements (ce qui est logique, étant donné qu'elle a été créée initialement pour cela). De même, les nombreux capteurs pourront être utilisés par la suite pour améliorer le système, par exemple en y ajoutant des commandes vocales. Lorsque la *Kinect* a été vendue en novembre 2010, de nombreux développeurs se sont lancés dans la course pour essayer d'en détourner l'usage et de l'utiliser sur ordinateur. Un concours a même été lancé et une récompense de 1000\$ (initialement) puis 3000\$ (finalement) a été offerte à la première personne étant en mesure de fournir des drivers pour pc. En seulement 3 heures après la sortie du périphérique en Europe, le premier driver a été mis au point et moins d'une semaine après, il était disponible sur internet. Très rapidement, différentes équipes ont réalisé leurs propres versions et il a fallu faire un choix parmi les 2 principales : *LibFreenect* fournie par la communauté « *OpenKinect* » et *CL NUI* par la compagnie « *Code Laborator*. Nous avons décidé d'utiliser *CL NUI* pour nos développements car les possibilités offertes semblaient un peu plus évoluées et qu'elle permettait de programmer en C/C++.

Le driver et la librairie fournis avec *CL NUI* permettaient d'obtenir la carte de profondeur, une image couleur ainsi que le pilotage du moteur et les informations des accéléromètres à un taux de rafraîchissement de 30 fps. Nous avons donc, dans un premier temps, adapté notre code initial pour

qu'il fonctionne avec *CL NUI*, puis nous l'avons amélioré. Avec cette première version améliorée, nous pouvions détecter toutes les mains qui se présentaient à la caméra. Cependant, il était impossible de déterminer si chacune d'elle était une main gauche ou droite et encore moins à qui elles appartenaient. Les mains étaient considérées comme indépendantes les unes des autres et non rattachées à une personne. Une fois le système porté sur *CL NUI*, il a permis d'obtenir de meilleures performances que notre première version. Mais peu de temps après, un nouveau driver est sorti.

Vu l'engouement des développeurs pour ce périphérique, la société *PrimeSense* (qui est à l'origine du développement d'une partie de la *Kinect*) a sorti un *framework* complet sous le nom d'*OpenNI*, laissant penser que les drivers utilisés sont les plus fiables disponibles. L'installation en est fastidieuse car il faut installer les bibliothèques et les drivers dans un ordre précis : *OpenNI* en premier, puis *NITE* et enfin les drivers de la caméra (*SensorKinect Module*) ainsi que les drivers audio. De plus, les différentes versions ne sont pas toujours compatibles et provoquent parfois des conflits.

Cependant, nous avons décidé de nous tourner vers cette nouvelle solution car elle offre, en plus des informations de profondeur, de couleur, etc. (déjà obtenues par les autres drivers), un algorithme permettant d'appliquer un squelette sur les personnes présentes dans le champ de la caméra. Cet algorithme est par ailleurs utilisé par la *Kinect* dans les jeux *Xbox 360*. Nous avons fait le choix de porter la nouvelle version de notre système sur *OpenNI* uniquement pour pouvoir obtenir le squelette des utilisateurs. Dans notre algorithme précédent, il était nécessaire de parcourir l'image en entier pour déterminer où se situaient les mains des utilisateurs. Grâce à cela, il nous est possible de connaître les positions des mains des utilisateurs dans l'espace et de ne travailler que dans des zones 3D précises. Cela permet de gagner énormément de temps de calcul par rapport à la version précédente de notre algorithme dans laquelle nous devions « parcourir » l'image intégralement pour connaître la position des mains. La solution offerte par *CL NUI* est vraiment robuste : un utilisateur peut sortir et revenir du champ de vision, passer devant un autre utilisateur ou encore des objets (tables, chaises, etc.) sans que le tracking soit perdu. Cela est possible grâce à la caméra couleur, qui permet d'établir un histogramme de couleurs de chaque personne. Nous sommes donc en mesure d'identifier d'une part la position des mains dans l'espace mais également les associer à un utilisateur en particulier. D'autre part nous pouvons déterminer si c'est une main gauche ou une main droite. Ce point est déterminant dans la suite de nos traitements, car la main dominante joue un rôle plus important que la main secondaire dans la manipulation d'objet ainsi que dans la navigation. Notre système s'adapte aussi bien pour une personne droitière que gauchère. Il suffit de choisir en début de manipulation la latéralisation de l'utilisateur et les modalités d'interactions développées s'adaptent automatiquement. La première version de notre système permettait un espace de jeu d'environ 30 x 30 x 30 cm et nécessitait que la caméra soit positionnée au-dessus de la table (à environ 80 cm de celle-ci), la version améliorée permet maintenant un espace de jeu de près de 150 x 150 x 100 cm. Le volume de jeu est donc considérablement agrandi et le nombre de mains détectées n'est plus de une mais en théorie 32. *OpenNI* permet en effet de *tracker* au maximum 16 personnes à la fois. Cependant, la zone de tracking est insuffisante pour permettre à plus de 2 personnes de travailler en même temps tout en étant à l'aise. De plus, pour cette deuxième expérimentation, nous avons décidé qu'une seule personne effectuerait la manipulation. Le caractère collaboratif, bien qu'étant pris en compte dans nos développements et donc tout à fait possible, n'est pas abordé dans cette thèse.

Notre système amélioré permet maintenant de récupérer les positions des mains de chaque utilisateur en les identifiant (gauche ou droite) et de connaître leur état (ouverte ou fermée). Ces informations sont envoyées par connexion UDP au logiciel *Virtools* qui permet d'interagir avec un environnement virtuel. Un serveur (créé en VSL – langage de *Virtools*) permet de récupérer ces informations et d'effectuer les

interactions correspondantes en fonction des mouvements et actions de l'utilisateur. Étant donné que l'utilisateur peut utiliser ses deux mains, nous pouvons effectuer des tâches simples comme la sélection, désélection, déplacement d'objet et navigation mais également des tâches plus complexes comme la rotation ou le redimensionnement d'objet. Pour que l'utilisation du système soit facilitée et permette à tous une meilleure prise en main, une meilleure précision ainsi qu'une meilleure immersion, nous avons tenu compte de la latéralisation de l'utilisateur.

Pour cette deuxième expérimentation, deux ordinateurs ont été utilisés. Un pour le système Cam3D et un pour les gants et les capteurs magnétiques. Les capteurs magnétiques permettent d'obtenir les informations de position 3D des mains, tout en les identifiant (main gauche / main droite) et les gants permettent d'évaluer si les mains sont ouvertes ou fermées. Les modalités d'interaction développées sont exactement identiques entre les deux systèmes.

Très récemment, *Microsoft*, voyant le marché potentiel que représente la communauté des développeurs, a accepté de fournir une version officielle des pilotes ainsi qu'un SDK. Il suffit maintenant d'installer un exécutable et toutes les bibliothèques et drivers sont installés automatiquement, ce qui simplifie énormément l'installation et les problèmes de compatibilité. L'algorithme permettant de déterminer le squelette des joueurs est également fourni. De plus, il n'y a plus besoin de phase d'initialisation de quelques secondes avant que le squelette soit appliqué sur la personne, contrairement à *OpenNI* où la personne doit positionner ses bras en l'air pour former avec sa tête la lettre psi ( $\Psi$ ), la reconnaissance est maintenant immédiate. Des points supplémentaires ont également été ajoutés au squelette. Avec *OpenNI*, seule la main possède un point qui se déplace légèrement si la main est ouverte ou fermée. Avec le SDK de Microsoft, un point situé au niveau du poignet est donné, ainsi qu'un point au centre de la main. Dans les développements futurs, cela simplifiera énormément notre détection de l'état de la main (ouverte ou fermée).

## 2 Protocole expérimental

### 2.1 Généralités

Pour cette expérimentation, nous avons repris des éléments du protocole expérimental de la première étude, en particulier concernant les procédures de recueil ainsi que les sources de données des préférences subjectives et commentaires des participants. Cette étude étant plus longue, et permettant d'extraire davantage de données pour les analyses, nous avons choisi de limiter le nombre de participants par rapport à l'étude précédente, afin de disposer d'un temps suffisant pour réaliser l'ensemble de l'exploitation des résultats, certaines données devant être extraites à la main. Nous conservons par contre le principe d'une évaluation par les participants des deux systèmes, et non par des groupes distincts de participants. Certains mécanismes sont mis en place pour assurer de ce fait la validité interne de nos résultats.

### 2.2 Choix des participants

L'expérimentation a impliqué 20 participants volontaires, 8 femmes et 12 hommes, âgés entre 21 et 34 ans. Tous étaient des utilisateurs expérimentés d'ordinateurs et d'un niveau d'étude BAC+3 minimum et disposaient de connaissances variées en réalité virtuelle. La plupart des participants étaient des étudiants en cours de préparation du Master « Ingénierie du Virtuelle et Innovation » ou des membres de l'équipe « Presence & innovation » du « Laboratoire des Arts et Métiers ParisTech d'Angers » (Doctorants, Ingénieurs de Recherche). Le nombre de participants étant relativement restreint, nous

avons veillé à restreindre la tranche d'âge afin de limiter la variabilité interindividuelle quant aux performances et préférences subjectives (moyenne = 26 ; E.T. = 3,7). Les effectifs relatifs des femmes (moyenne d'âge = 25,4 ; E.T. = 2,3) et des hommes (moyenne = 26,4 ; E.T. = 4,0), proches même s'ils ne sont pas strictement équivalents (8 contre 12), nous ont tout de même permis de contrebalancer l'ordre de passation suivant le sexe. Le sexe, comme l'expertise en réalité virtuelle, seront des variables dont l'impact sera évalué dans l'étude statistique conduite dans ce chapitre.

### 2.3 Conditions initiales et consignes

Les conditions initiales sont identiques quel que soit l'ordre de présentation des périphériques (Gants3D ou Cam3D) : le participant commence avec l'expérimentation proprement dite par la phase d'apprentissage nécessitant le placement, le redimensionnement et l'orientation correcte d'un avion de ligne. Pour chaque tâche, la position et/ou orientation et/ou taille de l'objet et du modèle sont identiques, pour les 2 périphériques.

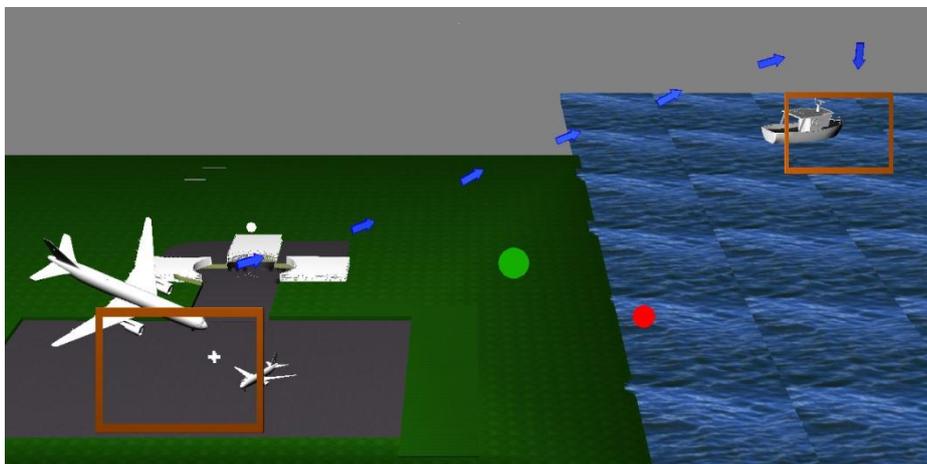


Figure 42 : Environnement virtuel de la phase d'apprentissage de l'expérimentation 2

L'utilisateur est assis à une table, l'écran en face de lui. L'espace de jeu, dans lequel il interagit avec les objets virtuels, se situe au-dessus de la table devant lui. Dans le cas de la Cam3D, la caméra qui capture les mouvements de l'utilisateur est placée au-dessus de l'écran c'est-à-dire à environ 40 centimètres de la table, elle ne gêne ni la vue, ni l'espace de jeu de l'utilisateur. Dans le cas du système Gants3D, un capteur magnétique était fixé sur chaque gant et l'ensemble était relié de manière filaire à l'ordinateur. L'antenne nécessaire aux capteurs magnétiques était posée sur la table devant le participant, sans que cela ne masque l'écran ou ne gêne les gestes du participant.

Il était demandé aux participants d'essayer de faire correspondre avec précision l'objet et le modèle. Il ne leur a pas été demandé explicitement de privilégier la précision sur le temps d'exécution, afin de ne pas induire un temps d'expérimentation exagérément long qui pourrait entraîner une fatigue ou un énervement du participant.

Des consignes sont données en début d'expérimentation, afin d'expliquer l'expérimentation et les tâches à réaliser par le participant. Durant la phase d'apprentissage, sont détaillées au participant, les consignes et les instructions concernant l'interaction et les tâches à réaliser. En plus de ces instructions orales, une explication écrite est donnée à l'utilisateur en guise de rappel sur la manière de sélectionner ou désélectionner les objets, comment appeler le menu et comment réaliser les différentes actions (déplacement, rotation, redimensionnement, et navigation).

Les consignes en cours d'expérimentation étaient des rappels sur les actions à réaliser sur chaque tâche (e.g., redimensionnement et rotation pour l'ordinateur portable) et l'ordre préférentiel à adopter (e.g., rotation puis redimensionnement pour ce même objet). Il s'agissait également de rappel sur l'interaction (principalement pour la rotation) ainsi qu'une aide lorsque le système « perdait » le squelette du participant.

## 2.4 Déroulement de l'expérimentation

Le déroulement de l'expérimentation est identique, que le participant commence avec le système Gants3D ou le système Cam3D.

Le participant commence par remplir le questionnaire d'identification, nous permettant de recueillir les informations générales sur les participants (âge, sexe, latéralisation, niveau d'étude) et les informations spécifiques nous permettant d'établir le niveau d'expertise en réalité virtuelle. Ce questionnaire est un formulaire au format pdf réalisé avec le logiciel Adobe LiveCycle Form.

L'expérimentation commence par une phase de prise en main qui permet au participant de se familiariser avec les modalités d'interactions et les tâches à réaliser. Afin de ne pas introduire un biais dans l'expérimentation, le premier environnement est distinct de ceux utilisés pour l'évaluation des 2 systèmes. Pour cette première tâche, le participant doit tester l'ensemble des actions possibles : déplacement, redimensionnement, orientation, navigation ainsi que les actions de sélection/désélection et l'utilisation des menus. Lorsque le participant a réussi à manipuler l'avion pour le faire correspondre au modèle et de naviguer de la scène 1 à la scène 2, on considère qu'il a correctement assimilé le fonctionnement du périphérique et les tâches à réaliser.

Lorsque le participant se sent prêt et que l'expérimentateur juge que la prise en main est réussie (i.e. le participant réussit à utiliser le système sans difficulté particulière), l'expérimentation sur laquelle on enregistre les données débute par l'affichage d'un écran explicatif (voir Figure 43). Une fois la lecture des consignes achevée, le participant doit placer sa main dominante au centre de l'écran pendant 3 secondes. C'est à partir de ce moment que commence l'enregistrement des informations utiles à l'analyse des données, et l'utilisateur commence par la scène 1.

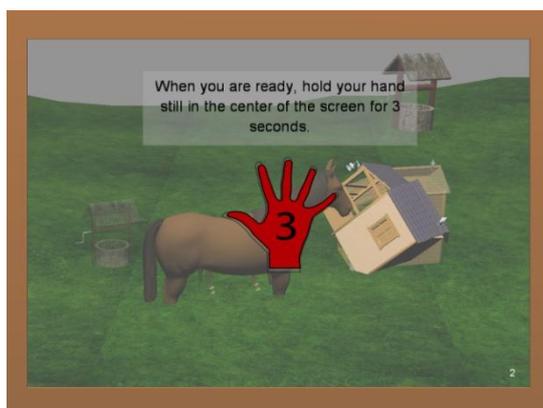


Figure 43 : Écran des consignes au début de l'expérimentation.

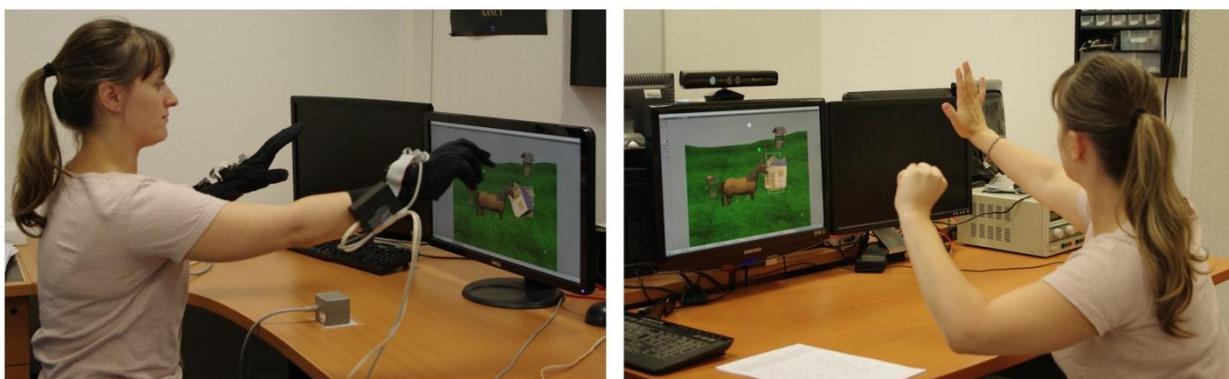
Les participants devaient alors effectuer les 9 tâches demandées, dans l'ordre indiqué par l'expérimentateur (le même ordre pour tous les participants). Chaque tâche se terminait lorsque le participant jugeait correcte la correspondance entre l'objet et le « modèle » ou, correcte, la position

terminale après la navigation. Le temps n'était pas limité pour l'exécution de chacune des 9 tâches, mais le temps total d'expérimentation était limité à 30 minutes (à l'exclusion des éventuels problèmes d'ordre technique). Nous avons estimé qu'au-delà de ce temps, le participant aurait pu éprouver du découragement ou de la fatigue et que cela aurait introduit un biais au niveau des données recueillies. Il faut tout de même noter qu'aucun des participants n'a dépassé cette limite de 30 minutes. Le Tableau 13 présente l'enchaînement des 9 tâches.

**Tableau 13 : Enchaînement des tâches (D = déplacement, T = redimensionnement, R = rotation, Navi. = navigation) - Les cases grisées sont des actions non réalisables pour les tâches correspondantes**

Scène 1									Tâche 4	Scène 2									Tâche 8	Scène 3		
Tâche 1			Tâche 2			Tâche 3				Tâche 5			Tâche 6			Tâche 7				Tâche 9		
<i>Puits</i>			<i>Cheval</i>			<i>Maisonnette</i>				<i>Globe</i>			<i>Horloge</i>			<i>Ordinateur</i>				<i>Bateau</i>		
D	T	R	D	T	R	D	T	R	Navi.	D	T	R	D	T	R	D	T	R	Navi.	D	T	R

A l'issue de la réalisation des 9 tâches, le participant fait apparaître le menu une dernière fois et sélectionne le bouton « valider » pour terminer l'expérimentation. Une fois le menu validation sélectionné, l'expérimentation prend fin et la collecte des informations s'arrête. Il n'est pas possible de revenir en arrière. Le participant doit remplir un questionnaire final (également réalisé sous la forme d'un formulaire pdf). Ce questionnaire nous permet de recueillir les impressions, commentaires et jugements subjectifs des participants.



**Figure 44 : Participante passant l'expérimentation 2 avec le système Gants3D (à gauche) et le système Cam3D (à droite)**

## 2.5 Sources de données

Comme pour la première expérimentation, l'ensemble des interactions des participants avec les 2 systèmes ont été enregistrées : les actions des participants (sélection, désélection, choix d'un item du menu), l'état (ouvert, fermé) des mains des participants, ainsi que la position, l'orientation et la taille des objets. Toutes ces données ont été automatiquement marquées, datées et enregistrées. Ces données nous permettront d'extraire les variables qui rendront possible l'analyse des performances.

Les données permettant l'identification des participants et l'évaluation de l'expertise en réalité virtuelle sont obtenues à partir du questionnaire initial, qui contient des questions ouvertes ainsi que des questions fermées et des échelles de Likert.

Les commentaires et jugement subjectifs sont recueillis dans le questionnaire post-expérimentation. Celui-ci contient des questions ouvertes, des questions fermées ainsi que des questions sous la forme d'échelle de Likert. Les données recueillies concernent l'évaluation comparative de deux systèmes, l'évaluation de l'interaction ainsi que les remarques générales quant à l'expérimentation et aux améliorations éventuelles.

## 2.6 Variables étudiées

Les mesures suivantes ont été prises en compte et ont servi de base à l'étude des performances des participants :

- Le temps d'exécution total des 9 tâches (en secondes). C'est le temps mis par l'utilisateur pour accomplir les 9 tâches avec un des deux périphériques. Il débute après que l'utilisateur a lu les consignes, la fiche explicative et qu'il a positionné sa main 3 secondes au centre de l'écran ; il s'arrête à la sélection du menu « validation ».
- Le temps d'exécution pour chaque tâche (en secondes) et chaque système.
- Le temps d'action total des 9 tâches (en secondes) pour chaque système. Ce temps correspond aux périodes pendant lesquelles le participant effectue une action de rotation, de dimensionnement, de déplacement ou de navigation. Il exclut donc les phases de choix dans le menu, les périodes de « non-activité » ainsi que les moments où aucun objet n'est sélectionné.
- Le temps d'action (en secondes) pour chaque tâche et chaque système. Ces temps sont différenciés le cas échéant selon l'action réalisée.
- L'erreur de précision : elle est soit globale, c'est-à-dire moyennée sur les 3 axes, soit calculée pour chaque axe.
  - o Pour le redimensionnement, il n'y a qu'une valeur, car il est homogène sur les 3 axes. L'erreur correspond au pourcentage de différence par rapport à l'échelle de référence.
  - o Pour la rotation, l'erreur correspond à un pourcentage calculée d'après le décalage angulaire. Une erreur de 100% correspond à un décalage angulaire de 180°.
  - o Pour le déplacement, l'erreur correspond à un pourcentage calculé par rapport à la position de référence, normalisé selon la dimension de l'objet indépendamment pour les 3 axes. Une précision nulle sur un axe pour le déplacement correspond à un décalage au moins équivalent à la dimension de l'objet.
- Le ratio précision / temps d'action pour chaque tâche et chaque système. Ce ratio met en relation la précision atteinte avec le temps de manipulation du participant, et permet d'évaluer la performance du participant. Il s'agit de la précision moyenne sur les 3 axes pour la rotation et le déplacement.
- Le nombre d'actions différentes (i.e., la séquence d'actions) pour les tâches demandant de conjuguer 2 ou 3 actions (T5 à T7 et T9). Cela correspond à la combinaison d'actions élémentaires nécessaires pour réaliser une tâche.

L'expertise en Réalité Virtuelle a été calculée d'après les données du questionnaire initial, sur la même base que pour l'expérimentation 1 : prise en compte de réponses à des échelles de Likert et groupement selon 3 thèmes de poids équivalents (connaissances générales en RV, utilisation de périphériques spécifiques à la RV et utilisation de logiciels spécifiques à la RV). De la même manière que pour l'expérimentation 1, trois groupes ont été constitués (Tableau 14).

Tableau 14 : Niveaux d'expertises basés sur les scores calculés d'après les réponses aux échelles de Likert

Niveau d'expertise	Débutant	Moyen	Expert
Score	de 0 à 1,5	de 1,5 à 3	de 3 à 5
Effectif par groupe	2	2	16

Comparativement à la première expérimentation, où les effectifs des groupes étaient relativement distribués, nous remarquons que la majorité des participants est ici qualifiée d'experte. Cela tient à l'effectif plus restreint de cette expérimentation et à l'origine des participants (étudiants en RV, membres de l'équipe), ceci comme résultat d'avoir une hétérogénéité restreinte en termes de différences inter-individuelles.

L'étude des préférences subjectives et commentaires des participants est divisée en deux parties. D'une part, les appréciations concernant les modalités d'interaction et d'autre part une évaluation de chaque système de manière séparée puis comparative.

Pour la première partie, qui fera l'objet d'un traitement séparé dans les résultats, nous avons demandé aux participants d'évaluer chaque modalité d'interaction selon des échelles de Likert à 5 niveaux pour les critères suivants :

- l'efficacité globale
- la rapidité
- la précision
- la simplicité
- l'intuitivité de l'action

Les participants ont pu également donner leurs impressions grâce à des questions ouvertes : points positifs / négatifs et suggestions éventuelles d'amélioration pour chaque modalité.

L'étude de l'acceptabilité repose quant à elle sur l'évaluation de chaque système selon des échelles de Likert à 5 modalités, pour 10 critères regroupés en 3 catégories :

- confort : poids, maniabilité, liberté de mouvement, fatigue engendrée, confort d'utilisation
- efficacité : efficacité globale, précision, stabilité, fiabilité de la reconnaissance
- efficience : facilité d'utilisation

Les participants étaient interrogés sur leurs préférences globales au moyen de questions à choix multiples (Gants – Cam3D – Egal) sur les critères suivants :

- préférence générale
- périphérique le plus approprié
- meilleur sentiment d'immersion
- meilleure précision
- meilleure aisance d'utilisation

Enfin, nous avons demandé aux participants de juger l'adéquation entre le périphérique et les modalités d'interaction au regard de la précision et de la facilité d'utilisation.

Les Tableau 15 et Tableau 16 résument les variables étudiées ainsi que leur format.

Tableau 15 : Étude des systèmes – variables étudiées et données recueillies

<b>Acceptabilité</b> <i>Evaluation séparée des systèmes</i>		<b>Préférences globales</b> <i>Evaluation comparative des systèmes</i>
<b>Echelle de Likert (5 modalités)</b>		<b>Gants 3D – Cam3D – Egal</b>
Confort	Poids	Préférences générales
	Maniabilité	Système le + approprié
	Liberté de mouvement	Sentiment d'immersion
	Fatigue	Précision
	Confort d'utilisation	Aisance d'utilisation
Efficacité	Efficacité globale	
	Précision	
	Stabilité	
	Fiabilité	
Efficiency	Facilité d'utilisation	

Tableau 16 : Étude des modalités d'interaction – variables étudiées et données recueillies

<b>Adéquation</b> <b>périphérique – modalités d'interaction</b>		<b>Evaluation des modalités</b> <b>d'interaction</b>
<b>Gants 3D – Cam3D – Egal</b>		<b>Echelle de Likert</b>
<b>Déplacement</b>	Précision	Efficacité globale
	Facilité d'utilisation	Rapidité
<b>Rotation</b>	Précision	Précision
	Facilité d'utilisation	Simplicité
<b>Redimensionnement</b>	Précision	Intuitivité de l'action
	Facilité d'utilisation	
<b>Navigation</b>	Précision	
	Facilité d'utilisation	

Les réponses aux échelles de Likert seront traitées comme des variables numériques, chaque modalité étant codée par un nombre (1 = plus mauvais ; 5 = meilleur).

Les zones de textes libres, les justifications et les propositions d'améliorations serviront à illustrer les résultats.

## 2.7 Conditions de passation

Pour éviter au maximum toute variabilité dans les indications données aux sujets, une fiche descriptive a été mise en place pour expliquer en quoi consiste l'expérimentation d'une part et d'autre part pour expliquer comment fonctionnent les modalités d'interaction afin de réaliser les différentes tâches demandées. Cette fiche est expliquée oralement à chacun des participants et leur est ensuite laissée pour qu'ils puissent s'y référer à tout moment pendant la manipulation, si nécessaire.

Une fiche comprenant des consignes précises a été donnée à chaque participant avant l'expérimentation. Cette fiche décrit étape par étape ce que doit faire l'utilisateur pendant l'expérimentation afin qu'il n'y ait pas de différence quant aux consignes initiales données aux participants par l'examineur. Le nombre de tâches à réaliser ainsi que les éventuels problèmes techniques (e.g., problème de reconnaissance de la Kinect) imposait la présence d'un expérimentateur, que nous avons réussi à éviter dans la première expérimentation. L'expérimentateur était assis à côté du participant, légèrement en retrait pour éviter que ce dernier puisse se tourner vers lui. Il vérifiait que la reconnaissance du squelette et la détection de l'état des mains (ouverte / fermée) étaient correctes et donnait les instructions en cas de problèmes. Au début de chaque tâche, l'expérimentateur rappelait

l'objectif (e.g., l'ordinateur portable) ainsi que les actions à réaliser (e.g., rotation et redimensionnement) et la séquence recommandée (e.g., rotation puis redimensionnement). En dehors de ces interventions, l'expérimentateur restait silencieux mais pouvait répondre aux questions des participants, le cas échéant.

La collecte des informations est entièrement automatisée, ce qui facilite la mise en forme de celles-ci en vue de leur analyse par la suite.

## **2.8 Validité interne et externe**

Pour assurer la validité interne et externe, nous avons eu recours aux mêmes techniques que dans l'expérimentation précédente. Pour assurer la validité interne, nous avons essayé de restreindre l'origine (en termes de formation et d'expertise en réalité virtuelle) et l'âge des participants et essayer de maîtriser les variables parasites provenant de l'environnement réel (éclairage, bruit, température), l'expérimentation se tenant dans une salle unique, climatisée et sans fenêtre.

### **2.8.1 Appariement**

Étant donné l'effectif relativement restreint, nous avons fait le choix de faire évaluer successivement les 2 systèmes à chaque participant plutôt que de disposer de 2 groupes distincts. L'appariement nous permet d'obtenir des résultats comparables pour les 2 systèmes et de contrôler les facteurs parasites qui demeurent constants durant l'expérimentation.

### **2.8.2 Contre-balancement**

Nous avons mis en œuvre le contre-balancement pour pallier l'éventuel apprentissage induit par l'appariement. Cela nous permet de prendre en compte la variabilité éventuelle des résultats en cours d'expérimentation (amélioration ou dégradation). Nous avons réparti les sujets en 2 groupes, nommés G1 et G2 dans la suite de ce chapitre. Les sujets appartenant au groupe G1 ont commencé par l'utilisation de la Cam3D, ceux du groupe G2 ont commencé par l'utilisation des Gants3D. Chaque groupe contient 4 femmes et 6 hommes.

### **2.8.3 Affectation aléatoire**

L'affectation des participants à un groupe ou à l'autre (G1 ou G2) s'est faite de façon aléatoire. En revanche, la position, l'orientation et l'échelle des objets dans les scènes sont prédéterminées et est identique pour chaque participant et pour chaque système à tester.

## **3 Analyse comparative des performances des participants**

Nous allons nous intéresser dans cette partie aux résultats comparés des participants selon l'utilisation de chaque système. Après le compte-rendu des tests préliminaires et le détail des tests statistiques réalisés, l'étude de la comparaison des 2 systèmes portera en premier lieu sur les données globales, c'est-à-dire sur l'ensemble de 7 tâches. Nous évaluerons également l'influence éventuelle du sexe et de l'expertise sur ces résultats. En second lieu, nous nous intéresserons à chaque tâche séparément. Étant donné le nombre de tâches et le nombre de variables, nous ne réaliserons pas l'étude de l'interaction éventuelle entre sexe / expertise en RV et périphérique dans ce cas. Nous terminerons la présentation des résultats par les études annexes, portant sur la comparaison de la précision décomposée suivant les axes (rotation et déplacement), sur le ratio temps / précision ainsi que sur l'impact de l'effet d'apprentissage. Enfin, nous mettrons en perspective l'ensemble des résultats dans la discussion.

### 3.1 Tests préliminaires et tests statistiques

Nous avons conservé pour les statistiques la même démarche que dans la première expérimentation. Nous avons donc effectué des tests de Kolmogorov-Smirnov pour vérifier la normalité des distributions des valeurs obtenues pour chaque variable prise en compte pour les 2 systèmes étudiés. Seules quelques variables ne suivent pas une loi normale, pour celles-ci, nous choisirons les tests statistiques non paramétriques mis à part dans le cas d'étude de l'interaction entre plusieurs facteurs auxquels nous privilégierons l'analyse de la variance, étant donnée la robustesse de l'ANOVA aux erreurs de type 1 (Winer, 1971).

Pour analyser l'influence du système sur les performances des participants, nous avons utilisé le test T de Student pour échantillons appariés, ainsi que le test de Wilcoxon en cas de non-normalité d'une des variables comparées. Lors de la comparaison des valeurs prises par 3 variables, nous avons utilisé le test T de Student paire à paire (ou le test de Friedman puis le test de Wilcoxon paire à paire en cas de non-normalité). L'analyse des effets du sexe et de l'expertise en RV en relation avec le système repose sur une ANOVA mixte avec une variable intra-sujet (le système) et une variable inter-sujet (le sexe ou l'expertise en RV). L'étude des effets simples s'appuie sur un test T de Student pour variables indépendantes (2 modalités) ou sur une ANOVA simple (3 modalités). Enfin, des tests post-hoc LSD de Fisher permettent d'étudier les éventuels effets principaux. Enfin, l'étude de l'impact de l'éventuel effet d'apprentissage sur les performances s'appuie sur des tests T de Student ou des tests non paramétriques pour échantillons indépendants.

Nous avons adopté les règles suivantes concernant la significativité des tests statistiques :

- $p \leq 0,05$  : test significatif
- $0,05 < p \leq 0,1$  : tendance
- $p > 0,1$  : test non significatif

### 3.2 Résultats généraux

Le Tableau 17 présente les données correspondant à la comparaison du temps d'expérimentation total ainsi que du temps de manipulation total entre les 2 systèmes.

Tableau 17 : Résultats concernant les temps totaux d'expérimentation et de manipulation

		Temps total d'expérimentation (s)		Temps total de manipulation (s)	
		Gants3D	Cam3D	Gants3D	Cam3D
Moyenne		902,4	954,4	514,5	522,4
Ecart-type		266,7	274,0	176,6	193,5
Test T	T	1,000		0,179	
	p	0,330		0,860	

Nous ne notons pas de différence entre les systèmes pour le temps total d'expérimentation et le temps total de manipulation.

#### Etude de l'influence du sexe sur les temps totaux d'expérimentation et de manipulation

Une ANOVA à plan mixte (sexe x système) sur le temps total d'expérimentation n'indique pas d'effet du système ( $F(1, 16) = 0,03$  ; NS), ni du sexe ( $F(1, 16) = 1,359$  ; NS) et pas d'interaction entre ces 2 facteurs ( $F(1, 16) = 0,164$ ). Concernant le temps total de manipulation, nous n'observons pas d'effet du système

( $F(1, 16) = 0,0437$  ; NS), ni du sexe ( $F(1, 16) = 1,835$  ; NS) et pas d'interaction entre ces 2 facteurs ( $F(1, 16) = 0,084$ ).

### **Etude de l'influence de l'expertise en RV sur les temps totaux d'expérimentation et de manipulation**

Une ANOVA à plan mixte (expertise en RV x système) sur le temps total d'expérimentation n'indique pas d'effet du système ( $F(1, 16) = 0,03$  ; NS), ni de l'expertise en RV ( $F(2, 16) = 0,875$  ; NS) et pas d'interaction entre ces 2 facteurs ( $F(1, 16) = 0,677$ ). Concernant le temps total de manipulation, nous n'observons pas d'effet du système ( $F(1, 16) = 0,0437$  ; NS), ni d'expertise en RV ( $F(1, 16) = 1,503$  ; NS) et pas d'interaction entre ces 2 facteurs ( $F(1, 16) = 0,640$ ).

### **Synthèse**

Nous n'obtenons de résultats significatifs pour les résultats globaux, ni d'effet du sexe ou de l'expertise en RV sur ceux-ci. De ce fait, nous pouvons affirmer que les Gants3D ne permettent pas de réaliser l'ensemble des tâches plus rapidement que la Cam3D. De plus, le temps de manipulation, c'est-à-dire le temps cumulé pendant lequel les participants manipulent un objet (redimensionnement, rotation, déplacement) ou naviguent, n'est pas significativement inférieur. Ce premier résultat permet de valider partiellement l'hypothèse H2 car, sans être meilleure, la Cam3D permet d'obtenir des résultats équivalents. La validation est partielle car les variables étudiées sont macroscopiques et ne permettent pas déterminer s'il existe des différences de temps d'exécution entre les différentes modalités d'interaction. Ces résultats seront présentés dans la partie suivante.

### **3.3 Gants vs. Cam3D selon chaque tâche**

Pour chaque tâche et chaque système, nous étudions les variables suivantes (elles ont été détaillées dans la partie 2.6 (p. 110) :

- Le temps d'exécution (TE) en secondes ;
- Le temps de manipulation (TM) en secondes ; celui-ci est différencié selon le déplacement (TMD), la rotation (TMR) et le redimensionnement (TME) le cas échéant ;
- L'erreur de précision, donnée selon 4 variables distinctes : déplacement (Err\_D), rotation (Err\_R), navigation (Err\_N) et redimensionnement (Err\_E) ;
- Le nombre d'actions différentes (Seq).

Étant donné le nombre important de variables manipulées et dans le but d'assurer une meilleure lisibilité de nos résultats, nous ne présenterons dans les tableaux que les variables pour lesquelles nous obtenons des différences significatives entre les 2 systèmes.

#### **3.3.1 Tâche 1 – Puits**

La tâche 1 correspond au déplacement d'un objet (puits). Seul le temps d'exécution avec les Gants3D ne suit pas une loi normale ( $Z = 1,420$  ;  $p = 0,035$ ). Nous avons donc réalisé le test T de Student pour échantillons appariés sur les variables TM, TE, Err\_D et Seq.

Il n'y a pas de différence significative entre les Gants3D et la Cam3D pour les variables étudiées.

#### **3.3.2 Tâche 2 – Cheval**

La tâche 2 correspond au redimensionnement d'un objet (cheval). Seul le nombre d'actions différentes (Seq) avec les Gants3D ( $Z = 2,014$  ;  $p = 0,001$ ) et la Cam3D ( $Z = 1,820$  ;  $p = 0,003$ ) ne suit pas une loi

normale. Nous avons donc réalisé le test de Wilcoxon pour échantillons appariés sur la variable Seq et le test T de Student pour échantillons appariés sur les variables TM, TE et Err\_R.

Le temps de manipulation (TM) et le temps d'exécution (TE) sont significativement plus courts avec les Gants3D. On note une tendance en faveur des Gants3D concernant la séquence d'actions différentes. Le Tableau 18 présente ces résultats.

**Tableau 18 : Différences significatives entre Cam3D et Gants3D pour la tâche 2**

	TE		TM		Seq	
	Gants3D	Cam3D	Gants3D	Cam3D	Gants3D	Cam3D
<b>Moyenne</b>	33,1	41,3	10,0	14,9	1,3	0,571
<b>Ecart-type</b>	10,4	17,2	3,2	8,1	1,65	0,933
<b>Test</b>	(T) 2,093		(T) 2,405		(Z) 1,643	
<b>p</b>	0,05		0,027		0,10	

### 3.3.3 Tâche 3 – Maisonnette

La tâche 3 correspond à la rotation d'un objet (maisonnette). L'ensemble des variables suivent une loi normale, nous avons donc appliqué le test T de Student pour échantillons appariés sur les variables TM, TE, Err\_E et Seq.

Il n'y a pas de différence significative entre les Gants3D et la Cam3D pour les variables étudiées.

### 3.3.4 Tâche 4 – Navigation 1

La tâche 4 correspond à une navigation entre la scène 1 et la scène 2. L'ensemble des variables suivent une loi normale, nous avons donc appliqué le test T de Student pour échantillons appariés sur les variables TM, TE, Err\_N et Seq.

Il n'y a pas de différence significative entre les Gants3D et la Cam3D pour les variables étudiées.

### 3.3.5 Tâche 5 – Globe

La tâche 5 correspond au redimensionnement et au déplacement d'un objet (globe). Seul le nombre d'actions différentes (Seq) avec les Gants3D ( $Z = 1,442$ ;  $p = 0,031$ ) et la Cam3D ( $Z = 1,731$  ;  $p = 0,005$ ) ne suit pas une loi normale. Nous avons donc réalisé le test de Wilcoxon pour échantillons appariés sur la variable Seq et le test T de Student pour échantillons appariés sur les variables TE, TMD, TME, Err\_E, Err\_D.

Il n'y a pas de différence significative entre les Gants3D et la Cam3D pour les variables étudiées.

### 3.3.6 Tâche 6 – Horloge

La tâche 6 correspond à la rotation et au déplacement d'un objet (horloge). Seul le nombre d'actions différentes (Seq) avec les Gants3D ( $Z = 1,880$ ;  $p = 0,002$ ) et la Cam3D ( $Z = 2,093$  ;  $p < 0,001$ ) ne suit pas une loi normale. Nous avons donc réalisé le test de Wilcoxon pour échantillons appariés sur la variable Seq et le test T de Student pour échantillons appariés sur les variables TE, TMD, TMR, Err\_R, Err\_D.

Le temps de déplacement (TMD) et l'erreur de précision en rotation (Err\_R) sont significativement plus faibles avec les Gants3D. Le Tableau 19 présente ces résultats.

Tableau 19 : Différences significatives entre Cam3D et Gants3D pour la tâche 6

	TMD		Err_R	
	Gants3D	Cam3D	Gants3D	Cam3D
<b>Moyenne</b>	24,0	52,6	2,76	3,66
<b>Ecart-type</b>	6,9	30,4	1,71	2,91
<b>Test</b>	(T) 4,268		(T) 2,046	
<b>p</b>	< 0,001		0,055	

### 3.3.7 Tâche 7 – Ordinateur portable

La tâche 7 correspond à la rotation et au redimensionnement d'un objet (ordinateur portable). Seul le nombre d'actions différentes (Seq) avec les Gants3D ( $Z = 1,565$  ;  $p = 0,015$ ) ne suit pas une loi normale. Nous avons fait le choix de réaliser le test T de Student pour échantillons appariés sur les variables TE, TME, TMR, Err\_R, Err\_E.

Le temps de redimensionnement (TME) tend à être plus court avec les Gants 3D alors que la durée de rotation (TMR) est significativement inférieure avec la Cam3D. Le Tableau 20 présente ces résultats.

Tableau 20 : Différences significatives entre Cam3D et Gants3D pour la tâche 7

	TME		TMR	
	Gants3D	Cam3D	Gants3D	Cam3D
<b>Moyenne</b>	20,0	29,1	80,1	46,4
<b>Ecart-type</b>	11,7	18,3	49,4	32,9
<b>Test</b>	(T) 1,920		(T) 3,052	
<b>p</b>	0,07		0,007	

### 3.3.8 Tâche 8 – Navigation 2

La tâche 8 correspond à une navigation entre la scène 1 et la scène 2. L'ensemble des variables suivent une loi normale, nous avons donc appliqué le test T de Student pour échantillons appariés sur les variables TM, TE, PD, Err\_N et Seq.

Il n'y a pas de différence significative entre les Gants3D et la Cam3D pour les variables étudiées.

### 3.3.9 Tâche 9 – Bateau

La tâche 9 correspond à la rotation, au déplacement et au redimensionnement d'un objet (bateau). Seul le nombre d'actions différentes (Seq) avec les Gants3D ( $Z = 1,565$  ;  $p = 0,015$ ) ne suit pas une loi normale. L'ensemble des variables suivent une loi normale, nous avons donc appliqué le test T de Student pour échantillons appariés sur les variables TE, TME, TMR, TMD, PR, PE, PD, Err\_R, Err\_E, Err\_D.

L'erreur de déplacement est significativement inférieure avec les Gants3D

Tableau 21 : Différence significative entre Cam3D et Gants3D pour la tâche 9

	Err_D	
	Gants3D	Cam3D
<b>Moyenne</b>	5,06	10,42
<b>Ecart-type</b>	3,31	10,75
<b>Test</b>	(T) 2,229	
<b>p</b>	0,038	

### 3.3.10 Synthèse

Pour 5 des 9 tâches, nous n'observons aucune différence significative entre les Gants3D et la Cam3D. Pour l'ensemble des 4 autres tâches, seules 8 variables permettent de différencier ces 2 systèmes, principalement concernant le temps de déplacement, de rotation ou de redimensionnement le cas échéant. Sur ces 8 variables considérées, 6 indiquent une différence en faveur des Gants3D.

Pour la tâche simple de redimensionnement (tâche 2, cheval), le temps d'exécution et le temps de manipulation sont plus faibles avec les Gants3D.

Pour la tâche demandant des actions de déplacement et de rotation (tâche 6, horloge), nous observons un temps de déplacement plus faible avec les Gants3D, ainsi qu'une erreur plus faible pour la rotation avec ce même système.

Pour la tâche demandant des actions de redimensionnement et de rotation (tâche 7, ordinateur portable), on observe un temps plus court pour le redimensionnement avec les Gants3D mais un temps de rotation plus court avec la Cam3D.

Enfin, pour la tâche mêlant les 3 actions élémentaires (tâche 9, bateau), on observe une erreur de déplacement plus faible avec les Gants3D.

Pris dans leur ensemble, ces résultats ne démontrent pas la supériorité des Gants3D, car ils restent très partiels, n'étant basés que sur quelques différences statistiquement significatives, ou encore des tendances. Les Gants3D semblent être à même de minimiser le temps d'exécution pour les actions de redimensionnement. Cette tâche demande peu de précision comparativement aux autres, et le meilleur temps obtenu avec les Gants3D peut s'expliquer par l'absence de problème de reconnaissance de l'état de la main d'une part, et par le fait que les mains (et donc les capteurs de position) ne s'éloignent pas de l'antenne, ce qui se traduit par une bonne stabilité de la valeur de position d'autre part. Pour les autres variables, il est impossible de mettre en valeur l'un ou l'autre système.

Ces résultats viennent infirmer l'hypothèse H1 et confirmer l'hypothèse H2. En effet, nous nous attendions à une supériorité de la Cam3D sur les valeurs de précision, étant donnée l'absence de port de matériel sur les mains, et donc de poids à supporter. Au final, la précision reste équivalente entre les systèmes. Le temps d'expérimentation, relativement court, n'a peut-être pas permis d'obtenir une discrimination sur la précision, en limitant la fatigue engendrée par le port des gants et des capteurs. A l'opposé, nous attendions des temps d'exécution *a minima* équivalents entre les 2 systèmes. Globalement, mis à part quelques variables, cette hypothèse est vérifiée. Nous pouvons donc affirmer qu'aux stades des développements actuels, pour des tâches n'imposant pas de reconnaître des gestes de la main, la Cam3D est au niveau d'un périphérique courant de réalité virtuelle en ce qui concerne les performances (temps, précision).

## 3.4 Étude de l'erreur d'orientation et de positionnement décomposée selon les axes X, Y et Z

### 3.4.1 Déplacement

Nous n'avons considéré que les tâches mettant en jeu des déplacements : tâche 1 (puits), tâche 5 (globe), tâche 6 (horloge) et tâche 9 (bateau). Le Tableau 22 synthétise l'ensemble des résultats pour les Gants3D.

Tableau 22 : Décomposition de l'erreur de positionnement selon chaque axe pour les Gants3D

Tâche	1 (puits)			5 (globe)			6 (horloge)			9 (bateau)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
Moy	8,47	9,89	20,09	1,88	2,47	6,39	44,82	18,85	8,93	4,28	7,96	2,96
E.T.	6,33	9,02	17,51	2,05	1,90	3,79	3,40	19,58	6,94	4,27	6,60	2,58
Paire	X - Y	Y - Z	X - Z	X - Y	Y - Z	X - Z	X - Y	Y - Z	X - Z	X - Y	Y - Z	X - Z
Test	0,954	3,561	4,143	1,052	5,289	4,186	5,539	2,450	20,123	2,412	3,583	1,276
p	0,352	<b>0,002</b>	<b>0,001</b>	0,306	<b>&lt;,001</b>	<b>0,001</b>	<b>&lt;,001</b>	<b>0,024</b>	<b>&lt;,001</b>	<b>0,026</b>	<b>0,002</b>	0,217

Pour les tâches 1 et 5, l'erreur est significativement plus importante sur l'axe Z que sur les axes X et Y. Ce constat s'inverse pour les tâches 6 et 9, l'erreur est significativement moins importante sur l'axe Z.

Le Tableau 23 synthétise l'ensemble des résultats pour la Cam3D.

Tableau 23 : Décomposition de l'erreur de positionnement selon chaque axe pour la Cam3D

Tâche	Tâche 1 (puits)			Tâche 5 (globe)			Tâche 6 (horloge)			Tâche 9 (bateau)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
Moy	9,62	8,70	18,58	2,20	2,30	6,84	43,51	27,74	12,75	3,21	22,98	5,07
E.T.	11,57	11,79	16,10	2,11	3,13	7,89	3,18	28,15	10,64	2,95	27,76	4,57
Paire	X - Y	Y - Z	X - Z	X - Y	Y - Z	X - Z	X - Y	Y - Z	X - Z	X - Y	Y - Z	X - Z
Test	1,082	4,429	4,030	0,184	2,953	3,290	2,620	2,387	12,387	3,386	3,108	2,168
p	0,293	<b>&lt;,001</b>	<b>0,001</b>	0,856	<b>0,008</b>	<b>0,004</b>	<b>0,017</b>	<b>0,028</b>	<b>&lt;,001</b>	<b>0,003</b>	<b>0,006</b>	<b>0,043</b>

Les conclusions sont les mêmes que précédemment pour les tâches 1, 5 et 6. Pour la tâche 9, l'erreur est significativement plus importante avec l'axe Y, puis l'axe Z que l'axe X.

### 3.4.2 Rotation

Nous n'avons considéré que les tâches mettant en jeu des rotations : tâche 3 (maisonnette), tâche 6 (horloge), tâche 7 (ordinateur portable) et tâche 9 (bateau). Le Tableau 24 synthétise l'ensemble des résultats pour les Gants3D.

Tableau 24 : Décomposition de l'erreur d'orientation selon chaque axe pour les Gants3D (\* le test utilisé est le test de Friedman, pour cause de non-normalité)

Tâche	3 (maisonnette)			6 (horloge)			7 (ordinateur)			9 (bateau) *		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
Moy	1,42	1,89	2,78	2,56	3,25	2,47	1,61	0,94	0,78	2,33	3,22	1,94
E.T.	1,01	1,44	2,61	2,70	2,07	2,91	1,42	0,92	0,66	3,14	2,49	2,15
Paire	X - Y	Y - Z	X - Z	X - Y	Y - Z	X - Z	X - Y	Y - Z	X - Z	X - Y	Y - Z	X - Z
Test	1,182	1,301	2,486	0,890	1,340	0,096	2,058	0,688	2,498	Khi2 = 4,9		
p	0,252	0,209	<b>0,022</b>	0,385	0,196	0,924	<b>0,054</b>	0,50	<b>0,022</b>	0,086		

Pour une tâche, l'erreur est significativement plus faible avec l'axe X qu'avec l'axe Z (tâche 3). Pour la tâche 7, l'erreur est significativement supérieure avec l'axe X qu'avec les axes Y et Z. Il n'y a pas de différences significatives pour les autres tâches.

Le Tableau 25 synthétise l'ensemble des résultats pour la Cam3D.

Tableau 25 : Décomposition de l'erreur d'orientation selon chaque axe pour la Cam3D

Tâche	3 (maisonnette)			6 (horloge)			7 (ordinateur)			9 (bateau)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
Moy	1,14	2,03	1,53	3,67	3,72	3,58	2,42	0,69	0,69	1,50	3,22	2,14
E.T.	0,94	1,84	1,59	4,64	2,80	3,31	2,27	0,84	0,78	1,22	2,74	1,73
Paire	X - Y	Y - Z	X - Z	X - Y	Y - Z	X - Z	X - Y	Y - Z	X - Z	X - Y	Y - Z	X - Z
Test	1,946	0,978	1,266	0,054	0,182	0,109	3,562	0	3,288	3,151	1,656	1,405
p	0,067	0,340	0,221	0,958	0,857	0,914	<b>0,002</b>	1	<b>0,004</b>	<b>0,005</b>	0,114	0,176

Pour la tâche 7, l'erreur d'orientation est significativement plus faible avec les axes Y et Z qu'avec l'axe X. Pour la tâche 9, l'erreur d'orientation est significativement plus faible avec l'axe X qu'avec l'axe Y.

### 3.4.3 Synthèse

Concernant le déplacement, nous obtenons des résultats similaires entre les 2 systèmes. Pour les premières tâches (le puits et le globe), les déplacements sont significativement moins précis avec l'axe Z qu'avec les axes X ou Y. Pour le puits, cela peut s'expliquer par l'amplitude du mouvement demandé associé aux problèmes inhérents aux systèmes : tremblement lorsque l'on s'éloigne de l'antenne avec les Gants3D et problème de reconnaissance de l'état de la main avec la Cam3D, avec l'éventualité de sortir du champ de la Kinect. Il en est de même pour le globe et l'horloge. Sur ces deux objets, nous avons également observé qu'il était possible d'avoir l'impression d'un bon positionnement alors qu'en réalité il ne s'agissait que d'un effet de perspective lié aux décalages sur plusieurs axes. Ce problème était moins présent du fait de l'orientation du bateau et de l'horloge. Nous pouvons également remarquer que lorsque le déplacement est associé à une rotation, les résultats obtenus sur l'axe X sont moins bons.

Pour la rotation, l'interprétation des résultats est plus difficile compte tenu de la variabilité de ceux-ci. Par exemple, nous observons des tendances similaires entre les Gants3D et la Cam3D pour les tâches 7 (ordinateur portable) et 9 (bateau) mais avec des résultats opposés pour ces deux tâches : pour la tâche 7, la rotation selon l'axe X (c'est-à-dire gérée par un mouvement en profondeur de la main) est la plus imprécise alors qu'elle se révèle meilleure pour la tâche 9. Ce qui confirme nos suppositions pour cet axe. En revanche, nous pensions que la rotation selon l'axe Z (c'est-à-dire un mouvement de la main vertical) aurait également souffert d'un manque de précision : pour une question de complexité du mouvement. En effet, lorsque l'on souhaite décomposer les mouvements pour isoler la rotation suivant les axes, le mouvement selon l'axe Y (pour une rotation selon l'axe Z) est celui pour lequel nous avons la plus faible amplitude, et il est difficile d'abaisser la main sans avancer le bras vers l'avant, ce qui a pour effet de réaliser une seconde rotation en parallèle. Il est de ce fait surprenant de ne pas observer ce « problème » sur la plupart des tâches mettant en jeu la rotation.

A la vue des résultats précédents, il existe des différences, mais qui sont principalement liées à l'interaction et à la tâche à réaliser. Pour les déplacements, nous pouvons préconiser de trouver une technique permettant de restreindre l'espace de jeu pour éviter au participant de ne plus être dans l'angle de vue de la Kinect. Pour les rotations, la difficulté de bien dissocier les axes peut-être une justification de la variabilité des résultats. Ce point reste à confirmer avec l'analyse des préférences et des commentaires des participants.

### 3.5 Étude de l'impact d'effet d'apprentissage

Nous avons contrebalancé l'ordre de passation des participants sur les 2 modalités (Cam 3D puis Gants3D ou Gants3D puis Cam 3D) pour éviter le biais de l'effet d'apprentissage sur l'ensemble des résultats. Pour obtenir un complément d'information sur notre système, il serait néanmoins intéressant d'étudier s'il existe un effet d'apprentissage, ou de manière plus précise, si on obtient de meilleurs résultats lorsque le système est testé en second. Étant donné que l'interaction est la même pour les 2 systèmes, il serait normal que les participants s'approprient celle-ci et deviennent plus performants avec le deuxième système utilisé, dans le cas idéal. Il reste bien entendu la possibilité que des problèmes inhérents au système testé n'entraînent pas de performances meilleures voire les dégradent.

Nous allons évaluer la présence éventuelle de cet effet sur l'ensemble des variables étudiées précédemment, soient les données globales et les données relatives à chaque tâche. Celles-ci correspondent aux mesures d'erreur (déplacement, redimensionnement, rotation), au temps total de chaque tâche et temps d'exécution pour chaque interaction.

Étant donné les effectifs limités des 2 groupes, soient 10 participants, nous avons choisi d'effectuer des tests non paramétriques. Nous avons donc utilisé le test U de Mann-Whitney pour échantillons indépendants.

#### 3.5.1 Données globales

On observe deux tendances sur les variables du temps total d'expérimentation avec la Cam3D ( $Z = 1,890$  ;  $p = 0,059$ ) et du temps total de manipulation avec la Cam3D ( $Z = 1,814$  ;  $p = 0,075$ ) :

- les participants ayant terminé avec la Cam3D ont eu un temps d'expérimentation plus court (moyenne = 841,4 ; écart-type = 190,5) que ceux ayant commencé avec ce système (moyenne = 1067,4 ; écart-type = 306,2).
- les participants ayant terminé avec la Cam3D ont eu un temps de manipulation plus court (moyenne = 437,7 ; écart-type = 120,4) que ceux ayant commencé avec ce système (moyenne = 607,0 ; écart-type = 220,6).

#### 3.5.2 Données relatives à chaque tâche

Concernant les valeurs d'erreurs de précision, il n'y a qu'une seule différence significative, concernant l'erreur de précision de redimensionnement du cheval (tâche 2) avec la Cam3D ( $Z = 2,419$  ;  $p = 0,015$ ) : les participants ayant terminé avec la Cam3D ont fait une erreur de précision plus faible (moyenne = 1,48 ; écart-type = 1,30) que ceux ayant commencé avec ce système (moyenne = 2,77 ; écart-type = 1,10).

Concernant les temps mesurés, nous obtenons des différences significatives pour certaines variables des tâches 6 (horloge), 7 (ordinateur portable), 9 (bateau) et pour tâche 4 (navigation 1). Les résultats sont synthétisés dans le Tableau 26.

Tableau 26 : Comparatif de l'effet d'apprentissage entre les 2 systèmes. TX = tâche n°x ; C = Cam3D ; G = Gants3D ; T = temps total de la tâche ; TD = temps de déplacement ; TR = temps de rotation ; TE = temps de redimensionnement ; TN = temps de navigation

		T6 : C_T	T6 : C_TR	T7 : C_TE	T4 : C_T	T4 : C_TN
<b>Test M.-W.</b>	<b>Z</b>	2,495	1,663	2,570	1,701	2,080
	<b>P</b>	<b>0,013</b>	<i>0,096</i>	<b>0,009</b>	<i>0,089</i>	<b>0,035</b>
<b>Cam3D en 1er</b>	<b>μ</b>	193,4	63,4	39,3	63,2	44,2
	<b>E.T.</b>	67,6	40,2	17,6	21,7	19,5
<b>Gants3D en 1er</b>	<b>μ</b>	<b>126,2</b>	<b>33,6</b>	<b>18,8</b>	<b>48,5</b>	<b>29,6</b>
	<b>E.T.</b>	30,9	15,2	12,8	13,7	8,9

Sur l'ensemble des valeurs significatives, soient 8 variables, toutes concernent la Cam3D et montrent une amélioration des résultats des participants lorsqu'ils testent la Cam3D en deuxième, après avoir déjà réalisé l'expérimentation avec les Gants3D.

Il reste surprenant d'observer ces différences pour la Cam3D mais pas pour les Gants3D, l'interaction étant identique dans les 2 cas. Ces résultats excluent l'hypothèse de l'élaboration de stratégies pour les tâches demandant de conjuguer plusieurs manipulations (e.g., déplacement + rotation). Lors de l'essai avec la première condition, les participants auraient en effet pu évaluer la meilleure façon de terminer chaque tâche, pour être plus performants lors de la seconde condition. L'hypothèse d'une plus grande difficulté de prise en main avec la Cam3D associée à l'appropriation des modalités d'interaction (commune aux 2 modalités), ne peut être confirmée par les résultats rapportés ici.

Ces résultats, mis en perspective avec ceux décrivant les performances générales (pour la plupart similaires entre les 2 systèmes), suggèrent que la Cam3D, sur certains points, du fait d'une progression entre les 2 conditions, pourrait permettre d'obtenir de meilleures performances que les Gants3D in fine, mais là encore uniquement sur certains points.

Pour conclure, les différences observées ne concernant qu'une faible part des variables étudiées (8 sur 74), les résultats obtenus restent très partiels et ne permettant pas d'établir l'existence d'un effet apprentissage.

### 3.6 Étude du rapport précision / temps

Dans les tests précédents, nous avons évalué séparément les mesures de temps nécessaire et d'erreurs (avec pour cette dernière une distinction selon les 3 types de manipulations permises) afin d'obtenir des valeurs absolues pour chaque système. Dans l'optique d'identifier quel système permet de minimiser le temps de manipulation (et par ce biais, la fatigue), tout en conservant une précision maximale, il est nécessaire de s'intéresser au ratio « précision / temps ». Ce rapport se doit d'être le plus faible possible pour garantir le meilleur compromis entre le temps d'exécution et la précision.

Pour prendre en compte le pourcentage de précision et non le pourcentage d'erreur comme précédemment, nous avons simplement retranché les valeurs précédentes à 100. Nous allons considérer la précision globale (moyenne des 3 axes) de déplacement, de rotation et de redimensionnement (précision homogène sur les 3 axes).

Nous avons effectué le test de normalité de Kolmogorov-Smirnov sur l'ensemble des variables étudiées. Seules 2 variables sur les 24 ne suivent pas une loi normale : le rapport précision / temps pour le déplacement dans la tâche 5 avec les Gants3D ( $Z = 1,421$  ;  $p = 0,035$ ) et pour le déplacement dans la

tâche 9 avec les Gants3D ( $Z = 1,485$  ;  $p = 0,024$ ). Nous avons donc décidé de mener des tests T de Student pour échantillons appariés pour l'ensemble des variables.

Seules 2 valeurs présentent des différences significatives entre les Gants3D et la Cam3D et une valeur présente une tendance. Les résultats sont synthétisés dans le Tableau 27.

**Tableau 27 : Différences significatives entre Cam3D et Gants3D pour le ratio « précision / temps »**

	Déplacement T6		Rotation T7		Déplacement T9	
	Gants3D	Cam3D	Gants3D	Cam3D	Gants3D	Cam3D
<b>Moyenne</b>	<b>3,40</b>	1,98	1,73	<b>3,44</b>	<b>6,26</b>	3,93
<b>Ecart-type</b>	0,96	1,33	1,04	2,68	4,66	2,71
<b>T-Test</b>	4,057		3,471		1,743	
<b>p</b>	<b>0,001</b>		<b>0,003</b>		0,097	

Comme pour l'étude de l'effet d'apprentissage, seules quelques variables présentent des différences significatives (2 sur 24) ou des tendances (1 sur 24). Il n'est donc pas possible de conclure à un quelconque effet du système (Cam3D ou Gants3D) sur le ratio « précision / temps », d'autant plus que les résultats sont soit en faveur de la Cam3D (Rotation Tâche 7), soit en faveur des Gants3D (Déplacements Tâches 6 et 9).

Pour effectuer ce calcul, nous avons appliqué la même pondération pour la précision et le temps. Nous avons demandé aux participants de viser avant tout la précision, sans parler du temps d'expérimentation, afin de ne pas introduire de stress. Pour autant, la dimension temporelle est importante car elle agit directement sur la fatigue des participants, ceux-ci devant travailler, quelque soit le système, avec les 2 bras levés, bien qu'ils soient assis. Globalement, nous avons pu observer que les valeurs de précisions étaient assez élevées dans les différentes tâches, ce qui peut expliquer que les valeurs de ratio soient « lissées ».

### 3.7 Discussion sur les performances

Dans cette première partie relative aux performances, nous avons étudié les performances globales (temps total d'expérimentation, temps total de manipulation) ainsi que les variables relatives à chaque tâche (erreur de précision, temps, séquences d'actions élémentaires). Nous avons également réalisé des études complémentaires. La première, pour déterminer si les déplacements ou les rotations suivant certains axes entraînaient une précision moindre, pour nous permettre d'améliorer notre système. La seconde, afin d'évaluer la présence d'un effet d'apprentissage, et de manière connexe, s'il était possible pour les participants d'améliorer leurs performances avec la pratique afin d'évaluer les perspectives d'évolution dans l'usage. Enfin, pour déterminer lequel des deux systèmes permet d'avoir le meilleur ratio « précision / temps ». L'étude des performances devait permettre de valider ou d'infirmer les hypothèses H1 et H2 :

- 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.

Les résultats infirment l'hypothèse H1 et confirment l'hypothèse H2. Sur les variables étudiées et sur les tâches que nous avons conçues, la Cam3D ne permet pas d'obtenir une précision supérieure aux

Gants3D (H1), mais permet d'obtenir des temps d'exécution et de manipulation similaires (H2). Le système que nous avons conçu associant le périphérique, les algorithmes de reconnaissance et les modalités d'interaction permet d'obtenir des performances équivalentes à un système couramment utilisé en réalité virtuelle, associant les gants de données et des capteurs électromagnétiques. Ces premières conclusions rejoignent ainsi celles de la première expérimentation, pour une simple tâche de sélection. Il est néanmoins surprenant d'obtenir des performances équivalentes, étant données les différences entre les 2 systèmes. Le fait de ne pas porter d'équipement et de ne pas être gêné dans ses mouvements aurait dû avoir un impact plus important sur les performances. Deux raisons peuvent expliquer l'absence de différence : d'une part un temps d'expérimentation relativement court qui nivelle la différence de fatigue accumulée avec les deux systèmes. D'autre part, des problèmes inhérents à chaque système, comme la sensibilité à la distance entre les capteurs et l'antenne pour les Gants3D, et d'autre part la sensibilité à la reconnaissance de l'état ouvert / fermé des mains.

Nous n'avons observé un effet limité de l'apprentissage, et seulement avec la Cam3D. En effet, les participants ayant terminé avec ce système ont parfois eu de meilleurs résultats que ceux ayant commencé avec ce système. Nous ne pouvons donc pas conclure à un effet d'apprentissage, même si les résultats observés seraient à étudier plus en détails, afin de voir si la progression observée continue dans le temps ou si ce n'est qu'un effet isolé.

Les actions de rotation et de déplacement (ainsi que de navigation) nécessitent de faire des mouvements dans l'espace, selon les dimensions X, Y et Z. Ainsi, nous avons étudié les erreurs de précision selon ces 3 axes, afin d'évaluer si certains déplacements de la main, plus difficiles que d'autres, peuvent pénaliser la précision. En effet, certains mouvements sont plus difficiles à réaliser, comme par exemple monter et descendre le bras verticalement parallèlement à l'axe de l'écran (axe Y) qui présente une amplitude limitée par rapport à un déplacement selon l'axe X par exemple. De même la difficulté de faire un mouvement en profondeur en ramenant la main vers soi : celle-ci est bloquée par le tronc. Les résultats obtenus sont partagés : si pour certaines tâches les mouvements selon l'axe Z sont les moins précis, cette tendance s'inverse pour d'autres tâches. La précision décomposée selon les axes X, Y et Z reste avant tout fortement liée à la tâche et également à la géométrie de l'objet, qui peut offrir des points de repère facilitant le positionnement et/ou l'orientation.

Enfin, l'étude du ratio « précision / temps » ne permet pas d'obtenir suffisamment de différences significatives entre les 2 systèmes au regard du nombre de variables étudiées.

## 4 Influence du périphérique sur les préférences subjectives

Comme cela a été présenté dans la partie 2.6 (p. 110), nous étudions les préférences subjectives à partir des réponses des participants au questionnaire final, et selon 2 points de vue. D'une part, avec une évaluation des systèmes proposés, au travers d'une étude de l'acceptabilité pour chaque système indépendamment et d'autre part via une analyse des préférences globales, prenant la forme d'une évaluation comparative des systèmes.

### 4.1 Analyse statistique

L'étude de l'acceptabilité s'appuie sur une étude statistique des réponses données par les participants à des questions posées sous la forme d'échelle de Likert à 5 modalités. Les critères ont été répartis en 3 thèmes :

- Le confort : maniabilité, liberté de mouvement, fatigue, confort d'utilisation, (poids) ;

- L'efficacité : efficacité globale, la précision, la stabilité, la fiabilité ;
- L'efficience : facilité d'utilisation.

Nous avons donc 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 participant. Le poids n'a pas été pris en compte pour la comparaison des 2 systèmes, car il n'est pas évalué pour la Cam3D, l'utilisateur ne portant pas de matériel ; la valeur moyenne sera donnée à titre indicatif. Nous avons également calculé les scores moyens pour chaque thème et chaque participant.

Nous avons en premier lieu effectué un test de normalité sur chaque variable à l'aide du test de Kolmogorov-Smirnov à un échantillon (loi normale). Sur les 18 variables étudiées, 8 suivent une loi normale :

- Gants : fiabilité (Z = 1,352 ; p = 0,052), stabilité (Z = 1,380 ; p = 0,044), facilité (Z = 1,566 ; p = 0,015) ;
- Cam3D : confort (Z = 1,344 ; p = 0,054), maniabilité (Z = 1,789 ; p = 0,003), efficacité (Z = 2,025 ; p = 0,001), fiabilité (Z = 1,352 ; p = 0,052), facilité (Z = 1,464 ; p = 0,027).

Nous avons décidé d'effectuer des tests non paramétriques pour l'ensemble des comparaisons, à l'aide du test de Wilcoxon pour échantillons appariés. Les règles suivantes ont été adoptées concernant la significativité des tests statistiques :

- $p \leq 0,05$  : test significatif ;
- $0,05 < p \leq 0,1$  : tendance ;
- $p > 0,1$  : test non significatif.

Les questions portant sur les préférences globales sont à choix multiples, les réponses étant « Gants », « Cam3D » et « Egal ». Il n'a donc pas été possible de s'appuyer sur les intervalles de confiance utilisés dans la première expérimentation. Nous nous appuyons donc sur une étude statistique descriptive basée sur les comparaisons d'effectifs. Ces données seront illustrées de verbalisations issues des questionnaires finaux.

## 4.2 Etude de l'acceptabilité

Les données sont synthétisées dans le Tableau 28.

**Tableau 28 : Valeurs moyennes pour chaque critère d'étude de l'acceptabilité, d'après les échelles de Likert à 5 modalités (1 = très mauvais ; 5 = très bon)**

		Cam3D		Gants3D	
		moyenne	écart-type	moyenne	écart-type
<b>Confort</b>	<b>Maniabilité</b>	4,00	0,459	3,50	0,761
	<b>Liberté de mouvement</b>	3,55	0,945	3,10	0,718
	<b>Fatigue</b>	2,60	0,754	2,55	0,759
	<b>Confort d'utilisation</b>	3,90	0,788	3,26	0,733
<b>Efficacité</b>	<b>Efficacité globale</b>	3,80	0,768	3,65	0,745
	<b>Précision</b>	3,45	0,759	3,10	0,968
	<b>Stabilité</b>	3,10	0,788	2,65	0,745
	<b>Fiabilité</b>	3,25	0,639	4,25	0,639
<b>Efficience</b>	<b>Facilité d'utilisation</b>	3,80	0,616	3,70	0,571

La « note » moyenne du critère poids, pour les Gants3D, est de 2,55 (écart-type = 0,605).

Il n'y a pas de différence significative entre les 2 systèmes concernant la fatigue ( $Z = 0,302$ ), l'efficacité ( $Z = 1,136$ ), la précision ( $Z = 1,218$ ), la stabilité ( $Z = 1,510$ ), l'efficacité globale ( $Z = 0,286$ ) et la facilité ( $Z = 0,707$ ).

Le confort ( $Z = 2,448$  ;  $p = 0,014$ ), la maniabilité ( $Z = 2,673$  ;  $p = 0,008$ ) et le confort global ( $Z = 2,652$  ;  $p = 0,008$ ) sont significativement meilleurs avec la Cam3D ; on observe de plus une tendance en faveur de ce système pour la liberté de mouvement ( $Z = 1,654$  ;  $p = 0,098$ ).

La fiabilité est significativement meilleure avec le système Gants3D ( $Z = 3,038$  ;  $p = 0,002$ ). La fiabilité est jugée meilleure avec les Gants3D, cela en raison de problèmes de détection de l'état de la main (ouverte / fermée) avec la Cam3D, soulignés par plusieurs participants :

*La Cam3D a des difficultés pour repérer la main ouverte et fermée, et ça peut couper l'action (Sujet 6)*

La liberté de mouvements est jugée supérieure avec la Cam3D car les participants ne portent pas de matériel avec ce système et que le système Gants3D, en plus du matériel proprement dit, impose d'être relié par 4 câbles de connexion à l'ordinateur (2 pour les gants, 2 pour le système de tracking magnétique) :

*On peut déplacer son corps sans gêne contrairement aux gants où nous sommes rattachés par des fils (Sujet 6)*

Le fait que la maniabilité ait été jugée inférieure avec le système Gants3D peut s'expliquer par la taille unique des gants de données, qui ne conviennent pas à toutes les mains, comme cela a été mentionné par un participant :

*Le gant était plus grand que ma main et me faisait de grands doigts qui ne facilitaient pas mes actions (Sujet 10)*

Le poids des gants est également un facteur qui peut influencer la perception de la maniabilité :

*[Avec la Cam3D] on n'a pas le poids des gants qui entrave légèrement la rotation (Sujet 4)*

L'ensemble des scores est représenté pour une lecture simple sur la Figure 45. Les critères encadrés sont ceux pour lesquels la différence est significative ou illustre une tendance (en bleu).

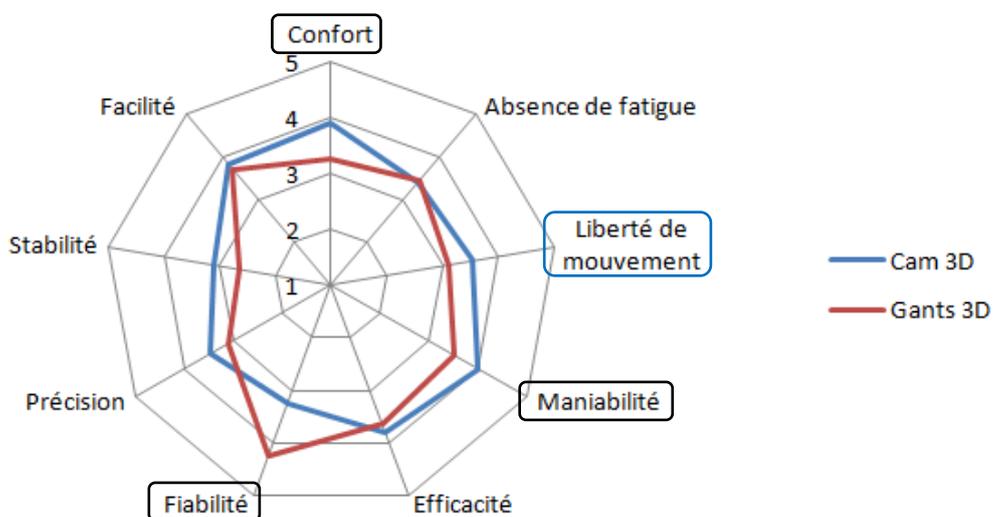


Figure 45 : représentation des scores moyens de chaque critère pour les 2 systèmes étudiés. Les variables pour lesquelles les différences sont significatives sont encadrées (en bleu, tendances).

Le graphique représenté sur la Figure 45 permet de bien mettre en évidence les différences entre les 2 systèmes, avec une supériorité de la Cam3D pour le confort, la maniabilité et la liberté de mouvement, en revanche la fiabilité est meilleure avec les Gants3D. Il est surprenant de constater que la fatigue ressentie est équivalente entre les deux systèmes. Cela implique que le poids des gants et des capteurs magnétiques est négligeable par rapport à la fatigue engendrée par la position des bras tendus, sans support pour se reposer. L'acceptabilité est meilleure avec la Cam3D, ce qui est justifié par les commentaires et jugements subjectifs des participants. Le point négatif, illustré par la fiabilité, correspond à la mauvaise reconnaissance de l'état de la main (ouverte ou fermée) qui peut se produire parfois.

### 4.3 Étude des préférences globales

L'étude des préférences globales repose sur l'évaluation comparative des systèmes selon les 5 critères suivants :

- La préférence générale ;
- L'adéquation aux tâches à réaliser ;
- Le sentiment d'immersion ;
- La précision ;
- L'aisance d'utilisation.

Les participants pouvaient choisir les gants, la Cam3D ou ne pas émettre de préférence (« égal »).

Le Tableau 29 présente les effectifs de participants ayant choisi chaque possibilité pour chaque critère. Ces résultats sont représentés sur le Figure 46.

**Tableau 29 : Effectifs de participants selon la préférence attribuée à chaque critère**

	<b>Gants</b>	<b>Cam3D</b>	<b>Egal</b>
<b>Préférence générale</b>	3	12	5
<b>Adéquation aux tâches</b>	1	13	6
<b>Sentiment d'immersion</b>	2	8	10
<b>Précision</b>	6	11	3
<b>Aisance d'utilisation</b>	5	9	6

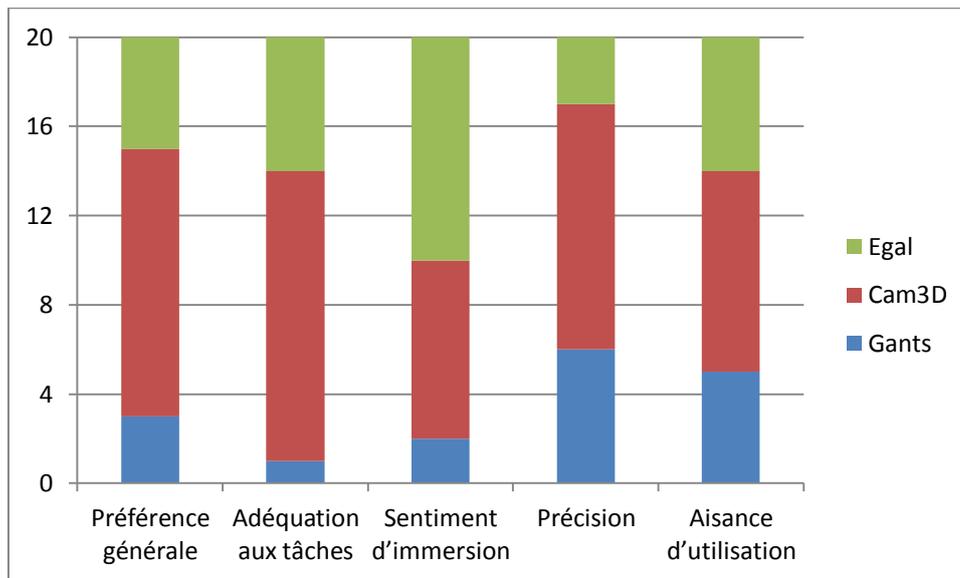


Figure 46 : Histogramme empilé de la répartition des participants selon le choix du participant pour chaque critère étudié

Le système Gants3D est moins apprécié que le système Cam3D pour l'ensemble des critères étudiés (de 1 à 6 participants sur les 20, contre 8 à 13 pour la Cam3D).

Pour 3 des 5 critères (préférences générales, adéquation aux tâches et précision), plus de la moitié des participants donnent leur préférence au système Cam3D.

Concernant l'aisance d'utilisation, cela rejoint les résultats de la partie précédente sur les critères de maniabilité, liberté de mouvements et maniabilité. La Cam3D semble apporter un avantage significatif sur ce point par rapport aux Gants3D.

Il apparaît clairement, même s'il convient de nuancer au regard du nombre de participants, que la Cam3D apporte un sentiment d'immersion égal voire supérieur à celui provoqué par les Gants3D (8 contre 2, 10 sans préférences). L'interaction étant identique entre les 2 systèmes étudiés, nous pouvons avancer l'hypothèse que l'absence de port de matériel (et donc l'absence de poids au niveau des mains et l'aisance de mouvement) est de nature à renforcer le sentiment d'immersion. La faible portée du système de tracking magnétique (qui tremble lorsque trop éloigné de l'antenne) était également de nature à perturber l'engagement du participant dans la tâche et donc à diminuer le sentiment d'immersion.

La répartition des participants quant à la précision traduit une faiblesse des Gants3D sur ce point particulier. Cette observation est corroborée par les verbalisations des participants :

*Il y a trop de trop de tremblement avec les gants, c'est beaucoup moins précis (Sujet 13)*

La préférence générale des participants est nettement en faveur de la Cam3D, puisque sur les 20 participants, 12 choisiraient la Cam3D, contre seulement 3 les Gants (et 5 ne donnent pas de préférence particulière).

#### 4.4 Synthèse

L'étude de l'acceptabilité et des préférences globales des participants, étudiées d'après une analyse statistique (tests de Wilcoxon) d'une part et d'une analyse statistique descriptive d'autre part, permet de conclure à la supériorité de la Cam3D sur les Gants3D. Ce dernier système apporte néanmoins une meilleure fiabilité, ce qui tend à nuancer légèrement le constat précédent, en raison d'une meilleure