



HAL
open science

Interaction avec des Référents Physiques Dans et Autour du Champ D’Affichage des Casques Semi-Transparents de Réalité Augmentée

Clément Truillet, Marcos Serrano, Emmanuel Dubois

► **To cite this version:**

Clément Truillet, Marcos Serrano, Emmanuel Dubois. Interaction avec des Référents Physiques Dans et Autour du Champ D’Affichage des Casques Semi-Transparents de Réalité Augmentée. 2024. hal-04450136

HAL Id: hal-04450136

<https://hal.science/hal-04450136>

Preprint submitted on 9 Feb 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L’archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d’enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Interaction avec des Référents Physiques Dans et Autour du Champ D’Affichage des Casques Semi-Transparents de Réalité Augmentée

Interaction with Physical Referents In and Around the Field of View of Optical See-Through Augmented-Reality Headsets

Clément Truillet

Université de Toulouse 3, IRIT, Toulouse, France, clement.truillet@irit.fr

Marcos Serrano

Université de Toulouse 3, IRIT, Toulouse, France, marcos.serrano@irit.fr

Emmanuel Dubois

Université de Toulouse 3, IRIT, Toulouse, France, emmanuel.dubois@irit.fr

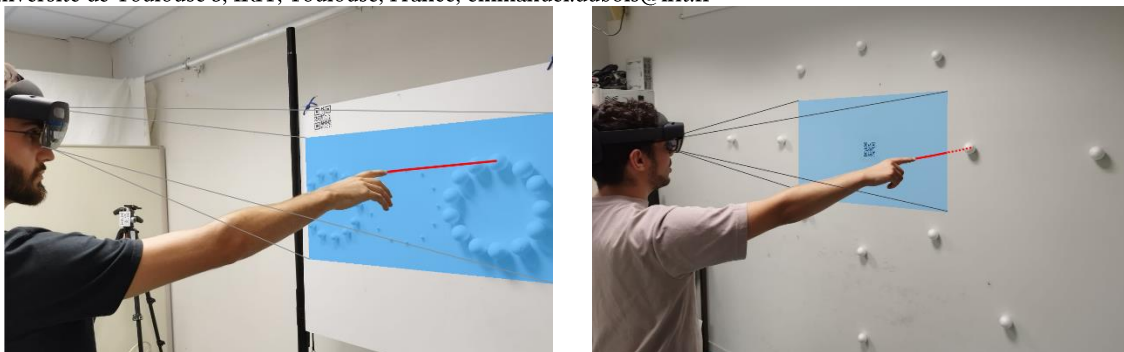


Figure 1 : Pointage de référents physiques dans (à gauche) et autour (à droite) du champ d’affichage du casque HoloLens 2.

Combining digital and physical worlds is today largely simplified thanks to many advances in the capabilities of optical see through AR head mounted displays. In many scenarios such as augmented maintenance, the implementation of AR is now based on the use of physical referents associated with digital information. Although the display space with optical see-through Head-Mounted Displays (HMDs) is almost unlimited, its field of view (FoV) is still small: overlapping the FoV with all these physical referents is therefore very constraining. This raises the challenge of pointing physical referents around the HMD FoV, where the feedback cannot be displayed. To this end, our work characterizes the pointing of physical referents inside and outside the HMD FoV to establish the differences. Our studies focus specifically the nature of the target and the form of feedback used during pointing.

CCS CONCEPTS •Human-centered computing~Human computer interaction (HCI)~Interaction techniques~Pointing•

Additional Keywords and Phrases: Physical target, raycasting, finger pointing.

La combinaison des mondes numérique et physiques est aujourd’hui largement simplifiée grâce aux nombreux progrès réalisés dans le domaine des casques de réalité augmentée (RA). Dans de nombreux scénarios, tels que la maintenance augmentée, la mise en œuvre de la RA s’appuie désormais sur l’utilisation de référents physiques associés à des données numériques. Bien que l’espace d’interaction d’un casque de RA soit presque illimité, son champ d’affichage reste limité.

Par conséquent la question du pointage des référents physiques autour du champ d'affichage du casque, où le feedback ne peut être affiché, devient cruciale. A cette fin, nos travaux caractérisent le pointage d'un référent physique dans, puis autour, du champ d'affichage du casque pour établir les différences. Nos études se focalisent sur la nature de la cible et du feedback mis en œuvre au cours du pointage.

CCS CONCEPTS •Human-centered computing~Human computer interaction (HCI)~Interaction techniques~Pointing•

Additional Keywords and Phrases: Cible physique, raycasting, pointage du doigt

Reference:

Clément Truillet, Marcos Serrano, and Emmanuel Dubois. 2024. Interaction avec des Référents Physiques Dans et Autour du Champ D’Affichage des Casques Semi-Transparents de Réalité Augmentée.

This is the author’s draft version of the work. It is posted here for your personal use. Not for distribution. The definitive version of the record is published in IHM '24: Proceedings of the 35th Conference on l’Interaction Humain-Machine.

1 INTRODUCTION

Compte tenu de la multiplicité des sources et types de données disponibles, l’analyse de données est au cœur de multiples situations dont par exemple le monitoring énergétique, la logistique dans des entrepôts ou encore l’interaction avec des objets connectés dans un environnement de maison intelligente. Dans ces situations, l’utilisateur est confronté aux données dans leur environnement de production : la consommation d’électricité d’un bâtiment, l’historique de stock d’un produit, ou la liste de courses d’un frigo intelligent. Ce paradigme, la visualisation située, permet de présenter une donnée numérique à proximité d’un objet physique générateur ou concerné par cette donnée : c’est le référent physique [38]. La tâche de l’utilisateur consiste alors à explorer ou comparer les données de différents référents, annoter un référent ou sa donnée, ou encore à filtrer des données. Par conséquent l’utilisateur est amené à interagir avec des objets physiques et des objets numériques repartis tout autour de lui en fonction de l’espace et du scénario d’interaction. L’apport des casques de RA pour l’interaction et la visualisation des données est essentiel dans ces contextes d’analyse de grande quantité de données autour de référents. En effet, ces casques permettent une exploration spatiale de données [23], offrent des points de vue multiples [28] et facilitent l’exploitation de grands espaces d’affichagees [11,34]. De telles approches sont particulièrement pertinentes dans le contexte émergeant de la visualisation située, car l’utilisation de casques de RA permet d’implémenter cette proximité entre le monde réel et les données numériques qui s’y rapportent. D’ailleurs, la littérature propose un large panel de techniques de sélection de cibles, physiques ou numériques, dans des environnements de RA. Globalement, deux catégories émergent : celles dérivant du lancer de rayon [9,11] et celles dérivant de la technique de la « main virtuelle » [30,35], avec une préférence des utilisateurs pour le lancer de rayon perçu comme plus rapide et plus facile à utiliser [7,37]. D’autres techniques d’interaction sont plus spécifiques au pointage de cibles physiques et exploitent différentes modalités telle que le tactile [9,40], le pointage à distance [12] direct ou indirect [13]. Toutefois, si les casques de RA permettent d’augmenter un environnement potentiellement infini, ils sont contraints par un champ d’affichage limité [28,33]. Par conséquent, le pointage de référents physiques situés en dehors de ce champ d’affichage, par exemple dans un contexte d’interaction avec une grande maquette augmentée pour l’analyse de donnée, nécessite de bouger la tête afin de placer ces cibles physiques dans le champ d’affichage pour pouvoir percevoir le feedback de pointage. Or ces mouvements de tête s’avèrent rapidement inconfortables et nuisent à

l'interaction [1]. Alors que de nombreuses études portent sur le pointage de cibles, physiques ou numériques, dans le champ d'affichage du casque, la question du pointage de cibles physiques en dehors du champ d'affichage du casque constitue un challenge sous-exploré.

Nos travaux ont donc comme objectif d'analyser et comprendre l'impact de facteurs sur le pointage de cibles situées dans et autour du champ d'affichage du casque et d'apporter une première mesure de leurs impacts sur l'efficacité et la satisfaction de l'utilisateur. Les facteurs que nous considérons sont les suivants : la nature de la cible (physique ou numérique), ainsi que la nature du feedback apporté pendant le pointage (continu, partiel, ponctuel ou absent). Nous étudions d'abord ces facteurs pour un pointage dans le champ d'affichage du casque, afin d'établir une mesure de comparaison basée sur la situation la plus habituelle dans la littérature, avant d'étudier le pointage autour du champ d'affichage.

La première étude, menée pour des objets dans le champ d'affichage, montre que la main est bien détectée par le casque, que le pointage de cibles physiques et numériques peut se faire sans différence de performance, et qu'un rendu complet ou partiel permet de réaliser la tâche avec un taux d'erreur très faible (inférieur à 1%). La seconde étude, menée pour des objets situés autour du champ d'affichage, établit tout d'abord que, fréquemment, la main réalisant le pointage ne peut pas être détectée par le casque HoloLens 2. Elle établit également que les performances de pointage sont globalement très insatisfaisantes quelle que soit la nature du feedback. Ces résultats soulignent les défis significatifs liés à la réalisation de tâches de pointage de cibles physiques présentes autour du champ d'affichage du casque et nous amènent à proposer des pistes de conception de techniques d'interaction pour le pointage de cibles physiques autour du champ d'affichage d'un casque de réalité augmentée.

2 ETAT DE L'ART

Les avancées dans le domaine de la Réalité Augmentée (RA) ont engendré un large éventail de recherches autour de nouvelles techniques d'interaction [20,25]. Nous synthétisons les développements liés au pointage et à la sélection en RA, en mettant particulièrement l'accent sur le pointage d'objets physiques en RA.

2.1 Pointage en Réalité Augmentée

Parmi la multitude de solutions d'interaction pour le pointage à distance en RA [25,30], deux catégories principales émergent. La première regroupe des techniques basées sur la "main virtuelle", qui exploitent une représentation métaphorique de la main de l'utilisateur évoluant de manière non linéaire dans l'environnement [30]. Bien que cette approche présente des avantages évidents pour la manipulation d'objets distants, elle semble être moins rapide et moins intuitive que les techniques de lancer de rayon, en particulier dans le contexte du pointage [7,14,43].

La seconde catégorie regroupe des techniques basées sur la technique de lancer de rayon, également connue sous le nom de Raycasting [14], qui permettent un pointage direct de l'utilisateur vers un objet. Cependant, cette méthode engendre un défi majeur en termes d'ambiguïté concernant l'objet visé lorsque le rayon traverse plusieurs objets. Parmi les diverses solutions de désambiguïsation proposées nous retrouvons des visualisations spécifiques telles que FlowerRay [14] où l'utilisateur sélectionne l'objet souhaité parmi un ensemble d'objets intersectant le rayon en les dispersant autour de ce rayon. Un autre type de solution consiste à proposer un pointage en deux étapes comme avec DepthRay et LockRay [14]. Ces méthodes ajoutent un curseur au rayon, dont la position sur ce dernier est contrôlée par la main de l'utilisateur ou par des dispositifs tels qu'un smartphone [31] ou un contrôleur comme avec RayCursor [3,4]. L'utilisation de tels dispositifs offre à l'utilisateur un degré de liberté supplémentaire dans la tâche de sélection.

En résumé, ces deux catégories de techniques de pointage en RA, basées sur la main virtuelle et le lancer de rayon, présentent des avantages et des inconvénients distincts. La première privilégie la manipulation d'objets distants, tandis que la seconde offre une interaction plus directe, interaction largement préférée par les utilisateurs pour les tâches de sélection et de pointage.

2.2 Pointage d'objets physiques en Réalité Augmentée

La problématique du pointage d'objets physiques a suscité l'intérêt de chercheurs dans différents contextes tels que l'interaction avec des pièces historiques fragiles dans des musées. Dans ce contexte, TouchGlass [9] a examiné le pointage d'objets à distance à travers une vitre en utilisant une technique de raycasting. Dans un tout autre contexte, les travaux de Freeman et al. [12] ont exploré un nouveau type de feedback, la vibration d'objets en lévitation, lors du pointage d'objets de petite taille.

Enfin, dans un contexte de mobilité urbaine, Vincent et al. ont proposé une technique nommée Shift&Freeze [36] permettant à l'utilisateur de sélectionner précisément un lieu sur une carte physique murale en deux temps via un smartphone. Le premier clic de l'utilisateur lui permet de figer l'affichage, le second de sélectionner précisément un lieu sans contrainte de position et d'orientation du smartphone. Ainsi, cette technique permet d'augmenter la précision lors du pointage d'objets physiques en RA en réduisant l'instabilité du smartphone due au tremblement de la main.

Plus récemment, des travaux ont proposé une étude comparative entre le pointage d'objets numériques et d'objets physiques au sein d'un environnement augmenté [43]. Ces expériences de pointage se sont déroulées dans un espace proche de l'utilisateur, lui permettant d'interagir physiquement avec les objets. Les résultats ont révélé que le pointage d'objets physiques était nettement plus rapide que le pointage d'objets numériques dans ce contexte.

Enfin, la plupart de ces techniques se concentrent sur le pointage d'objets physiques présents dans le champ d'affichage du casque. Comme souligné en introduction, la limitation majeure des casques de RA à ce jour demeure leurs champs d'affichage réduit, bien inférieur à celui de l'humain. Aussi en situation d'interaction, l'utilisateur peut percevoir une partie de l'espace physique plus grande que ce que le casque peut enrichir par un affichage de données numériques. Pour ne pas diminuer l'utilisateur il devient alors essentiel de considérer également la qualité du pointage d'objets physiques situés hors du champ d'affichage du casque mais dans le champ de vision de l'utilisateur.

2.3 Localisation d'objets physiques en RA en dehors du champ d'affichage du casque

Des travaux antérieurs ont développé plusieurs techniques de visualisation pour résoudre le challenge de la localisation de cibles en dehors du champ d'affichage, ces techniques ayant trouvé une pertinence particulière dans les environnements de réalité augmentée (RA), que ce soit sur des smartphones ou des casques.

Parmi elles, Halo [5,26] est une méthode de localisation qui repose sur l'affichage d'un cercle centré sur l'objet situé en dehors du champ d'affichage du dispositif. Ce cercle a un rayon suffisamment grand pour atteindre le bord du dispositif de RA, une tablette dans le cas de Halo. Par conséquent, plus un objet est proche de l'utilisateur, plus le cercle affiché est petit. Une variante de cette technique, nommée Wedge [18], offre une précision directionnelle accrue pour les objets situés en dehors du champ d'affichage du casque en affichant non pas une portion du cercle, mais plutôt un triangle isocèle. Le sommet principal du triangle coïncide avec l'objet, tandis que les deux autres sommets sont affichés sur les bords de l'écran. Des études comparatives ont révélé que ces deux techniques offraient des résultats équivalents, que ce soit dans un contexte 2D [18] ou en réalité augmentée [15]. Une autre approche consiste à utiliser le bord de l'écran pour permettre à l'utilisateur de visualiser la distance et la position des objets, comme le propose EdgeRadar [19]. Cette technique affiche l'ensemble des objets situés en dehors du champ d'affichage sur le bord de l'écran en utilisant une

représentation écrasée. Bien que cette méthode diffère de Halo et Wedge, elle semble préférée par les utilisateurs et offre de meilleures performances, notamment dans un contexte d'utilisation en 2D. De plus, dans la lignée d'EdgeRadar, d'autres techniques telles que Scaled-Arrow et Stretched-Arrow [8] ont été développées. Elles consistent à afficher une flèche orientée vers l'objet en dehors du champ de vision de l'utilisateur, dont la taille est proportionnelle à la distance de l'objet. Une étude comparative a été menée pour évaluer cette technique par rapport à EdgeRadar et Halo dans un contexte RA [27]. Les résultats ont montré que la version 3D d'Halo, appelée Halo3D, offrait les meilleures performances dans des tâches de pointage en apportant un guidage efficace [27].

De manière similaire, plusieurs études se sont intéressées aux possibilités offertes par les casques de RA pour fournir des indications sur la direction des points d'intérêt situés autour du champ de vision de l'utilisateur. Cela a été réalisé en activant des LED placées dans la vision périphérique de l'utilisateur. Ces extensions [16,17,24] visent à améliorer la perception des objets en dehors du champ de vision direct de l'utilisateur et à faciliter leur localisation.

Enfin, les récents travaux de Assor et al. [2] présentent un espace de conception autour de la visualisation de référents physiques non présents dans le champ de vision de l'utilisateur. Ces travaux visent à refléter la diversité actuelle et les opportunités de recherches futures de technique d'interaction avec des référents physiques non visibles. Cependant, cet espace, bien qu'étant un premier point de départ dans ce domaine, ne s'étend pas à l'interaction avec des référents physiques présents en dehors du champ d'affichage du casque de RA mais dans le champ de vision de l'utilisateur.

2.4 Conclusion

De multiples solutions de pointage en RA ont été proposées et font ressortir une préférence pour le pointage d'objets basé sur une technique de lancer de rayon. Plus récemment, des travaux ont spécifiquement porté sur le pointage d'objets physique en RA et non plus seulement d'entités numériques. Compte tenu de la taille limitée des champs d'affichage des casques de RA, des travaux ont proposé des techniques de mise en évidence de l'existence de cibles au-delà du champ d'affichage. Toutefois, à notre connaissance, aucune étude n'est allée jusqu'à évaluer le pointage d'objets physiques visibles directement par l'utilisateur et placés en dehors du champ d'affichage du casque de RA. De fait, nos travaux se concentrent sur l'étude des facteurs ayant un impact sur le pointage d'objets physiques disposés en dehors du champ d'affichage du casque de RA tels que décrits dans plusieurs scénarios présentés en suivant.

3 FACTEURS DE CONCEPTION ET APPROCHE EXPERIMENTALE

Notre but est de mieux comprendre les spécificités du pointage de cibles physiques autour du champ d'affichage du casque. Parmi les deux méthodes les plus courantes pour réaliser un pointage en RA, nous focalisons dans ces travaux exclusivement sur le pointage par lancer de rayon, pointage plus rapide [7,14,37] que le pointage par « main virtuelle » comme expliqué dans notre état de l'art. Nous détaillons les facteurs de conception que nous avons considéré dans nos études, ainsi que notre approche expérimentale.

3.1 Facteurs de conception

Nature de la cible. En contexte de RA, deux types de cibles peuvent faire l'objet d'un pointage par l'utilisateur : les cibles physiques présentes dans l'environnement, par exemple un référent physique, et les cibles numériques ajoutées par le système, par exemple les données relatives à ce référent. Cette considération de cibles numériques et physiques a pour objectif de vérifier si la superposition d'un feedback numérique sur un objet physique est susceptible d'impacter l'interaction en perturbant la perception humaine. De plus des travaux ont montré une différence entre un pointage sur

des cibles physiques ou numériques [43]. La nature des cibles constitue donc le premier facteur pris en compte dans nos études.

Nature du rayon. L'ajout d'un feedback illustrant la position et orientation du rayon est inévitable : il fera nécessairement l'objet d'un rendu numérique. Superposer de données numériques avec des données physiques peut entraîner un problème de parallaxe. Aussi, un second facteur de nos études consiste à mesurer l'impact de la nature du rayon et nous en distinguons deux formes : le feedback dénommé rayon « Continu » sera matérialisé sous la forme d'une ligne continue dans l'espace depuis son origine tel qu'une baguette par exemple ; la nature du rayon dénommée « Ponctuel » sera restreint à un rendu dans le plan de la cible uniquement tel qu'un pointeur laser sur un écran.

Détection de la main par le casque. Pour garantir la validité externe de notre étude, nous nous reposons sur le mécanisme de détection de la main inhérent au casque de Réalité Augmentée HoloLens 2 (librairie MRTK). Le champ d'affichage du casque est corrélé au champ de détection de la main, qui est aussi contraint à une zone limitée devant l'utilisateur. La capacité du système à détecter la main est donc essentielle dans la conception du système de pointage.

3.2 Approche expérimentale

Notre approche se décompose en deux étapes : d'abord nous étudions les facteurs précédents dans le cas du pointage de cibles dans le champ d'affichage, afin d'établir des valeurs de référence pour la situation la plus habituelle dans la littérature. Ensuite, nous étudions le pointage autour du champ d'affichage.

Tableau 1 : Facteurs de conception de nos études

| | Pointage d'un objet dans le champ d'affichage du casque (étude 1) | Pointage d'un objet autour du champ d'affichage du casque (étude 2) |
|--------------------|---|---|
| Nature de la cible | Physique Numérique | Physique |
| Nature du rayon | Continu Ponctuel | Continu Ponctuel |

Ces deux cas présentent des différences concernant les valeurs possibles pour les facteurs de conception (voir Tableau 1). Si des cibles physiques et numériques peuvent cohabiter dans le champ d'affichage du casque, les cibles numériques ne peuvent plus, par définition, être affichées en dehors du champ d'affichage du casque et leur pointage revient à la question, non étudiée ici, du pointage de cible cachée. Concernant la nature du rayon, dans le cas du pointage de cibles autour du champ d'affichage du casque, l'implémentation du rayon « Continu » correspond alors à un rayon qui part du bras et suit sa direction et dont la représentation s'interrompt au bord du champ d'affichage puisque ce champ d'affichage ne couvre pas l'espace jusqu'à la cible. Pour la même raison, une nature de rayon « Ponctuel » se traduira autour du champ d'affichage par une absence de feedback puisque la cible est en dehors du champ d'affichage du casque et qu'aucun feedback ne peut donc être affiché à proximité de la cible.

Par conséquent, dans une première étude, nous réalisons une étude du pointage d'un objet en RA dans le champ d'affichage du casque. Cette étude nous permet d'analyser les facteurs pouvant impacter ce pointage tels que la nature des objets (physique ou numérique) ainsi que la nature du rayon utilisé pour pointer (Continu et Ponctuel).

Puis nous réalisons une seconde étude du pointage d'un objet autour du champ d'affichage du casque. Cette étude se concentre sur des cibles de nature physique uniquement, en prenant en compte les deux mêmes natures de rayon que dans la première étude.

Enfin, nous utilisons, dans nos études, la librairie MRTK, librairie permettant le suivi des mains de l'utilisateur. Par défaut, cette fonctionnalité de suivi des mains est basée sur l'affichage d'un feedback. Une étude préliminaire technique a permis d'établir que sans ce feedback 1,8% seulement des pointages sont réalisés correctement alors même que la main reste bien détectable dans 94,3% des cas par le casque Hololens au moment du pointage. L'absence de feedback n'empêche donc pas la détection du geste mais ne permet pas le pointage d'une cible dans le champ d'affichage du casque .

4 ETUDE 1 : POINTAGE D'UN OBJET EN RA DANS LE CHAMP D'AFFICHAGE DU CASQUE

Cette première étude vise à évaluer l'impact de la nature du rayon et de la cible, ainsi que sa taille et distance, dans une tâche de pointage dans un environnement de Réalité Augmentée.

4.1 Facteurs

Dans cette étude nous considérons deux types de cibles (physiques, numériques) et deux natures de rayons (« Continu » ou « Ponctuel »). Nous considérons aussi trois tailles de cibles (1cm, 3cm et 5cm de diamètre) et deux distances à l'utilisateur (1m et 2m), représentatives de la distance à laquelle un utilisateur peut se trouver d'un référent.

4.2 Cibles

Afin de permettre la comparaison entre les différentes tâches, la conception de l'étude est strictement la même pour les cibles physiques et numériques.

Des sphères physiques de mêmes tailles, au nombre de 13, sont uniformément réparties sur un cercle de 12,5cm de rayon. Un jumeau numérique 3D est aligné avec le modèle physique au début de l'expérimentation. Pour chaque essai, la cible à pointer est colorisée en bleu. Une fois pointée, cette cible devient rouge dans le cas d'un mauvais pointage (le rayon ne touche pas la cible) ou verte dans le cas d'un bon pointage.

Dans les conditions expérimentales visant le pointage de cibles physiques, hormis la cible à atteindre ainsi que le résultat du pointage précédent, aucun élément du modèle numérique n'est affiché. A l'inverse, lors du pointage d'une cible numérique, le participant est placé devant une zone sans aucune cible physique afin de s'assurer qu'il pointe effectivement des cibles numériques sans perturbation des cibles physiques.

4.3 Tâche

Les participants sont invités à pointer naturellement la cible (colorisée en bleu) avec leur main dominante et presser un bouton situé dans leur main non dominante avant de valider le pointage. Les pointages se font séquentiellement et font intervenir une cible puis celle qui lui est diamétralement opposée et ainsi de suite jusqu'à ce que toutes les cibles aient été pointées. La durée moyenne de l'étude était d'environ une heure par participant.

4.4 Protocole expérimental

L'étude suit un protocole intra-sujet 2x2x3x2 avec comme facteurs la nature du rayon (« Curseur » ou « Complet »), la nature des cibles (physique ou numérique), la taille des cibles (1, 3 et 5 centimètres) et la distance des cibles (1 et 2 mètres). Chaque participant réalise quatre blocs : un bloc correspond à une combinaison de nature de la cible et nature du rayon. L'enchaînement des blocs est contrebalancé entre les utilisateurs, et l'enchaînement des tailles et distance se fait par ordre croissant de difficultés pour tous les participants. Avant tout bloc, le participant effectue une tâche d'entraînement consistant au pointage de cibles de 3cm à 1m avec l'affichage du rayon et la nature des cibles de la tâche associée.

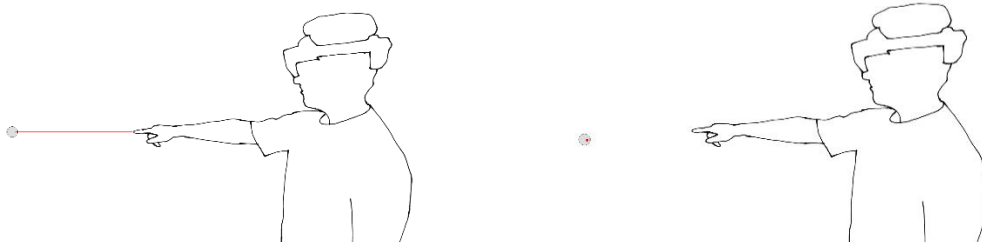


Figure 2 : Illustration du rayon « Continu » (à gauche) et « Ponctuel » (à droite)

4.5 Participants

Nous avons recruté 12 participants (six femmes et six hommes) âgés entre 19 et 30 ans (moyenne = 24, écart-type : 2,82) avec une expérience en RA évaluée à 2,7 sur une échelle de Likert à cinq points. Tous les participants sont droitiers.

4.6 Setup

Nous avons développé une application Unity en C# utilisant la librairie MRTK 2.8 avec un casque HoloLens 2 connecté à un ordinateur portable. Les participants étaient debout et immobiles durant toute l'étude. La position de chaque utilisateur était contrôlée de façon à garantir une distance similaire aux cibles à tout moment et entre tout participant.

4.7 Données collectées

Au début de l'étude, nous avons recueilli des informations sur les participants (âge, genre et expérience de la réalité augmentée). Pendant les tâches, nous collectons pour chaque cible des données habituelles des évaluations de sélections de cibles [6] : le temps pour faire le pointage, le nombre de pointage incorrects, et le nombre d'entrées et de sorties sur la cible. A l'issue de chaque bloc, les participants remplissent un questionnaire NASA-TLX afin d'évaluer la charge de travail ressentie durant l'ensemble de la tâche.

4.8 Analyse

Nous avons choisi de nous appuyer sur des techniques d'estimation avec des intervalles de confiance à 95% comme recommandé par l'APA [44]. Tous les intervalles de confiances sont calculés avec une méthode de BCa Bootstrap avec 10000 réplifications. Notre méthode de Bootstrap utilise une approche déterministe. Pour le lecteur plus habitué à interpréter les valeurs p, un parallèle peut être établi avec les résultats obtenus par la technique d'estimation et les rapports d'intervalles de confiance (voir la Figure 3 dans [21]). Auparavant, nous avons procédé à l'élimination des valeurs aberrantes sur nos données, c'est à dire les données situées à plus de trois fois l'écart-type à la moyenne. Cette opération a réduit le jeu de données d'analyse de 3468 à 3397 observations, soit une diminution de 71 observations (2%).

4.9 Résultats

4.9.1 Temps moyen de pointage en fonction de la nature du rayon et de la nature des cibles.

Nous n'avons pas observé d'effet sur le temps de pointage lié à l'ordre de passage des blocs. Nous traitons donc toutes les données ensemble.

Globalement, le temps de pointage d'une cible de 5cm est de 1,60s [IC = 1,55, 1,67], 1,87s [IC = 1,81, 1,94] pour 3 cm et 2,67s [IC = 2,57, 2,78] pour 1 cm. Les résultats mettent clairement en évidence une différence liée à la taille de la cible : logiquement plus la taille est petite, plus le temps de pointage est long, et ce quelle que soit la technique utilisée. De plus

pour ces petites tailles, si la cible est numérique, l'utilisation d'un rayon de nature « Ponctuel » plutôt que « Continu » allonge nettement la durée de réalisation de la tâche. Nous pensons vraisemblable que l'utilisateur ne différencie pas correctement la cible du rayon « Ponctuel » dans ces conditions et que cela entraîne des mouvements incorrects lors du pointage.

En dehors de ces observations, les résultats ne permettent pas de mettre en évidence d'autres différences de temps moyen de pointage selon la nature de la cible et la nature du rayon. Ces résultats, peuvent paraître en contradiction avec les résultats de Zhao et al. [43] qui montrent un effet de la nature des cibles sur le temps de pointage en RA. Cependant ces travaux portent sur la sélection de cibles physiques et numériques à portée de bras de façon à donner à l'utilisateur un feedback haptique, feedback absent dans cette étude.

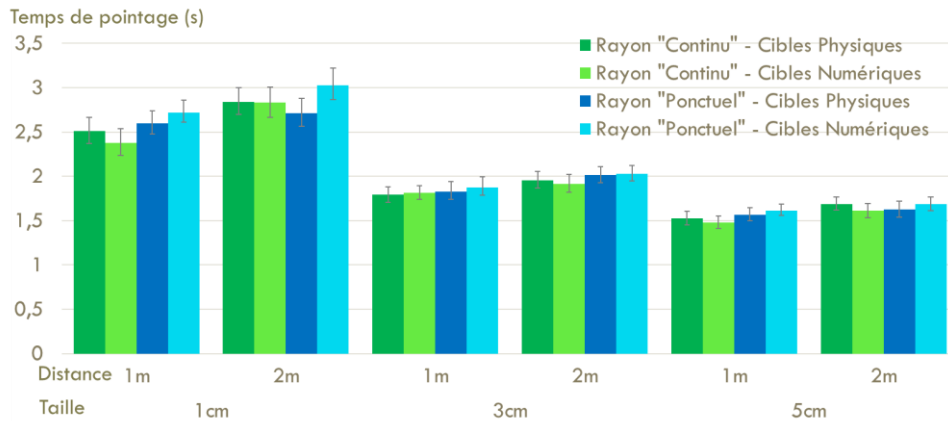


Figure 3: Temps moyen (s) de pointage de la cible en fonction de la nature du rayon et de la nature des cibles (95% IC)

4.9.2 Entrées/sorties sur la cible avant le pointage

Le nombre d'entrées / sorties sur la cible traduit le fait qu'un utilisateur a pu avoir du mal à pointer et a donc plusieurs fois dépassé la cible. Comme attendu, la distance et la taille de la cible ont un effet sur le nombre de fois où le rayon entre ou sort de la cible avant d'être pointée (cf. Figure 4). Plus les cibles sont petites ou éloignées, plus ce nombre est élevé. La nature du rayon et de la cible ne semble pas avoir d'influence sur ce nombre. En effet, il est relevé une moyenne de 1,33 [IC = 1,30, 1,36] entrées/sorties sur les cibles physiques comme numériques et une moyenne de 1,32 entrées/sorties sur la cible avec le rayon « Ponctuel » [IC = 1,29, 1,3] contre 1,33 [IC = 1,30, 1,36] pour les pointages avec le rayon « Continu ».

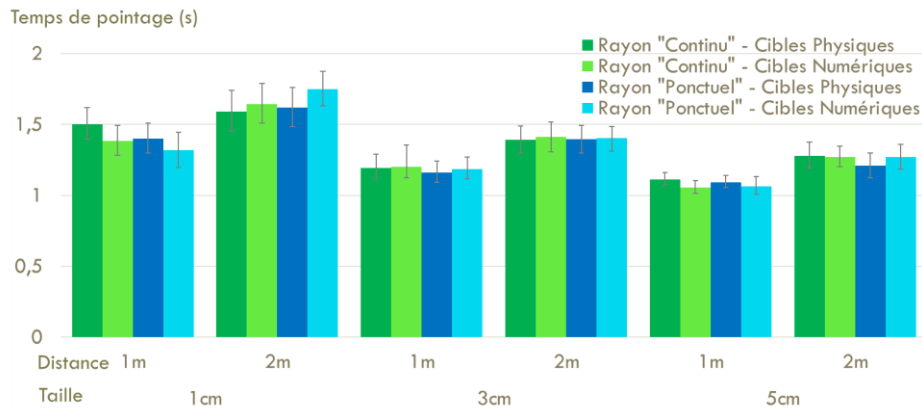


Figure 4 : Nombre moyen d'entrées/sorties sur la cible avant le pointage en fonction du retour et de la nature des cibles (95% IC)

4.9.3 Taux d'erreur de pointage d'une cible

L'étude des taux d'erreur de pointage d'une cible montre (cf. Figure 5) que les pointages de cibles numériques avec un rayon « Ponctuel » [moyenne = 10,3%, IC = 8,3%, 12,4%] entraînent un taux d'erreur nettement supérieur aux autres conditions (cibles physiques avec un rayon « Ponctuel » : 7,5% [IC = 5,9%, 9,3%], cibles physiques avec un rayon « Continu », 7,2% [IC = 5,4%, 9,0%], cibles numériques avec un rayon « Continu » : 6,5% [IC = 4,9%, 8,3%]).

De manière générale, sur l'ensemble des tâches de pointage, plus les cibles sont petites, plus le taux d'erreur augmente. Ainsi, environ deux tiers des erreurs (201 sur un total de 314 erreurs) concernent les pointages des cibles de 1cm [taux d'erreur moyen = 15,1%, IC = 13,0%, 17,2%]. Ce résultat est encore plus marquant pour des cibles numériques de 1cm sous la condition d'utilisation d'un rayon « Ponctuel » [moyenne = 20,7%, IC = 15,9%, 25,5%]. Concernant, les cibles de 3cm et de 5cm, le taux moyen d'erreur est beaucoup plus faible, respectivement de 5,2% [IC = 3,9%, 6,5%] et 3,6% [IC = 2,6%, 4,8%]. Dans ces conditions la tâche de pointage peut être qualifiée de relativement aisée, compte tenu de son faible taux d'erreur.

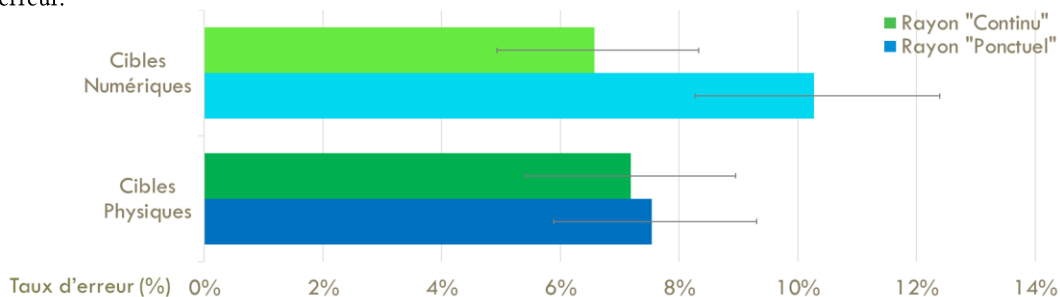


Figure 5 : Taux d'erreur de pointage d'une cible en fonction du retour et de la nature des objets (95% IC)

4.9.4 NASA-TLX

Les résultats du NASA-TLX (cf. Figure 6), dans sa version non pondérée, ne permettent pas d'établir de différences entre les tâches de pointages impliquant des objets physiques et des cibles numériques, pas plus qu'entre un rayon « Ponctuel » ou « Continu ». De manière globale, la tâche de pointage requiert une exigence mentale, physique et temporelle similaire, et entraîne une performance, un effort et une frustration ressenties comparables dans toutes les conditions.

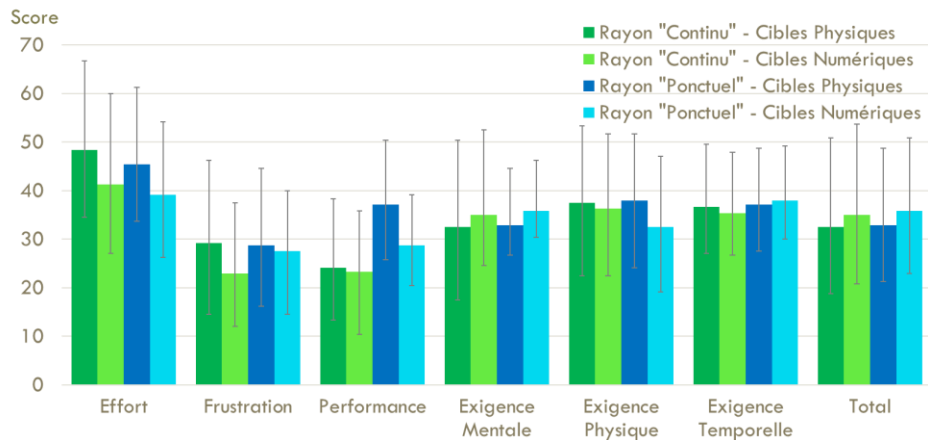


Figure 6 : Résultats du NASA-TLX par critère (95% IC)

4.10 Conclusion

Lors de cette étude, nous avons étudié l'influence de deux facteurs (nature des cibles et nature du rayon) sur les performances des utilisateurs dans des tâches de pointage. Cette étude établit que l'utilisateur parvient à pointer une cible physique ou numérique avec succès dans la quasi-totalité des cas, et ce quelle que soit la nature du rayon considérée (« Continu » ou « Ponctuel »). Un léger infléchissement du taux d'erreur a toutefois été observé dans le cas de pointage de cibles numériques avec un rayon « Ponctuel ».

Ayant caractérisé les capacités de pointage d'une cible dans le champ d'affichage d'un casque de RA selon nos deux facteurs, nous allons maintenant conduire la même analyse pour le pointage de cibles autour du champ d'affichage du casque.

5 ETUDE 2 : POINTAGE D'UN OBJET EN RA AUTOUR DU CHAMP D'AFFICHAGE DU CASQUE

Dans cette seconde étude, nous nous concentrons sur le pointage de cibles situées autour du champ d'affichage du casque mais dans le champ de vision de l'utilisateur. Cette situation est classique à ce jour puisque les casques de RA commercialisés sont limités par la taille de leurs champs d'affichage.

Il s'agit donc d'étudier dans quelle mesure un utilisateur pourrait exploiter sa vision périphérique pour pointer une cible physique présente dans son champ de vision, mais hors du champ d'affichage du casque, tout en gardant les yeux sur les informations affichées devant lui par le casque.

5.1 Facteurs

Dans cette étude nous considérons un seul type de cibles (physiques) et deux natures de rayons (« Continu » ou « Ponctuel »). Conformément aux restrictions présentées en section 3.2, la représentation du rayon continu s'interrompt au bord du champ d'affichage et le rayon ponctuel se traduit ici par une absence de feedback affiché dans le casque (cf. Figure 7). Nous considérons seulement des cibles de 5cm de diamètre, toujours disposées sur deux cercles supports de tailles différentes (0,55m et 1m de rayon). En effet le champ d'affichage de l'HoloLens 2 est inscrit dans un cercle de rayon 0,39m pour un utilisateur placé à 1m : un rayon minimal de 0,55m permet donc d'être sûr que la cible sera hors du champ d'affichage du casque. Par ailleurs, compte tenu de la zone de vision binoculaire humaine [1], une cible placée

sur un cercle de 1m de rayon centré en face de l'utilisateur demeure dans la zone de perception confortable d'un utilisateur.

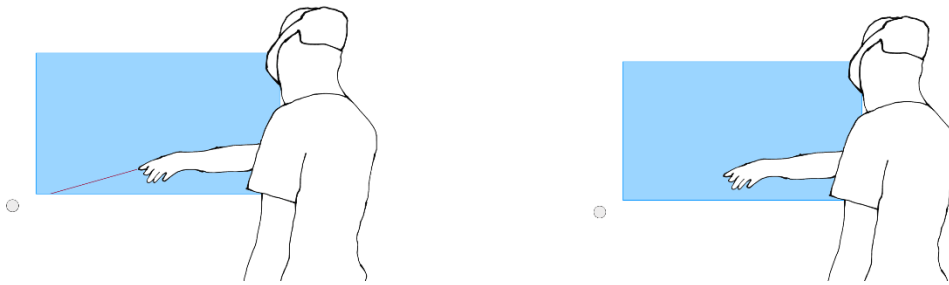


Figure 7 : Illustration des rayons « Continu » (à gauche) et « Ponctuel » (à droite). Le champ d'affichage du casque est représenté en bleu.

5.2 Cibles

Cette étude reprend les cibles physiques de l'étape 1, à l'exception de la répartition de ces cibles : le cercle de rayon 1m comporte cinq cibles et celui de 0,55m huit cibles. Cette différence entre les deux cercles s'explique par une prise en compte de l'occultation du champ de vision de l'utilisateur au niveau de son front causée par le port du casque.

5.3 Tâche

La tâche consistait à pointer les 13 cibles physiques. Les participants devaient naturellement pointer la cible avec leur main dominante. Lorsqu'ils pointaient la cible, les participants devaient appuyer sur un bouton tenu dans leur main non dominante. Pour savoir quelle cible pointer, une vue radar des cibles était affichée au centre du champ d'affichage du casque avec une mise en évidence de la cible. Pour commencer chaque pointage, la main de l'utilisateur devait d'abord être ramenée le long du corps pour garantir que la position initiale de l'utilisateur était toujours la même. La durée moyenne de l'étude était d'environ une heure par participant.

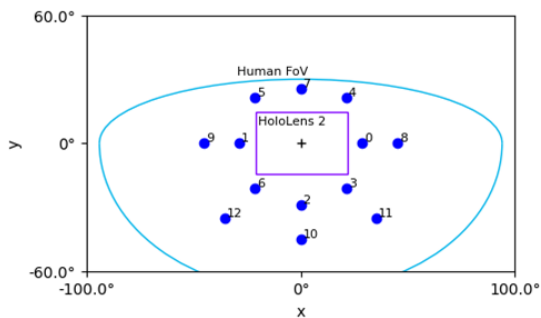


Figure 8 : Disposition des objets (schématisée à gauche, réelle à droite).

5.4 Protocole expérimental

L'étude suit un protocole intra-sujet 2x2 avec comme facteurs la nature du rayon (« Continu » ou « Ponctuel ») et la taille du cercle support des cibles (0,55 et 1 mètre). L'étude est composée de deux blocs, chacun correspondant à la présence, ou non, du feedback. L'ordre des blocs était contrebalancé entre les participants. L'ordre des cibles était aléatoire et l'ensemble des cibles étaient pointées 4 fois, la première série servant d'entraînement.

5.5 Participants

Nous avons recruté 12 participants droitiers (six femmes et six hommes) âgés de 19 à 30 ans (moyenne = 23,25, écart-type = 3,04), avec une expérience en RA évaluée à 2,6 sur une échelle de Likert à cinq points. Tous travaillent dans le domaine de l'informatique.

5.6 Setup

Nous avons développé une application Unity en C# utilisant la librairie MRTK 2.8 avec un casque HoloLens 2 connecté à un ordinateur portable. Les participants étaient debout et immobiles durant toute l'étude. Au cours d'une tâche, afin de placer les objets à la bonne distance, nous avons demandé à l'utilisateur de se déplacer sur des marques virtuelles (marques plaçant l'utilisateur à la bonne distance selon la tâche). Durant toutes les tâches, il a été demandé aux participants de ne pas bouger leur tête, afin d'avoir toujours les objets en dehors du champ d'affichage du casque. Si la tête du participant sort d'une zone de tolérance, l'application affiche un panneau rouge devant le participant afin de l'inviter à revenir dans cette zone de tolérance. Pendant la réalisation des tâches, nous avons suivi la visibilité de la main de l'utilisateur en utilisant la bibliothèque MRTK 2.8 avec un profil HoloLens 2.

5.7 Données collectées

Au début de l'étude, nous avons recueilli des informations sur les participants (âge, genre et expérience de la réalité augmentée). Puis pour chaque cible, nous avons collecté si, au moment de la validation, le rayon était en collision avec la cible. A défaut, nous avons collecté la distance de la cible au rayon, le nombre d'entrées et de sorties du rayon sur la cible avant la validation. Dans tous les cas nous avons collecté si la main se trouvait dans le champ d'affichage du casque. Lorsque la main de l'utilisateur n'était pas détectée, nous considérons que l'utilisateur n'arrivait pas à pointer la cible. Aussi, la distance de la cible au rayon de ces cas n'est pas prise en compte dans l'analyse des résultats.

À la fin de l'étude, les participants ont été invités à fournir des évaluations de leur précision en général, et en particulier lors de l'utilisation de l'affichage du rayon, en comparant les scénarios avec et sans celui-ci. De plus, il leur a aussi été demandé de déterminer et d'expliquer les conditions dans lesquelles ils se percevaient comme plus précis, en tenant compte de facteurs tels que le rayon d'affichage, le cercle support des cibles (0,55/1m), la position de la cible (à droite/à gauche et en bas/en haut).

5.8 Analyse

Nous avons procédé au même type d'analyse que lors de la première étude. Nous avons éliminé 5 valeurs aberrantes sur notre jeu de 936 observations, conduisant à un jeu final de 931 observations (soit une réduction de 0,5%).

5.9 Résultats

5.9.1 Détection de la main de l'utilisateur

Les données collectées indiquent que le HoloLens 2 a détecté la main de l'utilisateur dans 85,7% [IC = 85,2, 89,5] des tâches de pointage. De plus, ce taux de détection varie en fonction de la taille du cercle support de la cible. Ce taux était notamment le plus élevé pour les cibles du cercle support le plus petit (rayon 0,55m), atteignant 95,8% [IC = 92,4, 97,6], à l'exception de la cible 7 de ce cercle, situé en haut et dont la visibilité était probablement gênée par la barre du casque (61,5% [IC=49,3, 71,2]) (cf. [Figure 9](#)). Concernant les cibles du plus grand cercle support (rayon de 1m), le taux de détection est bien inférieur (77,6% [IC=72,8, 81,6]) à l'exception des cibles 10 et 12 (situés en bas et en bas à gauche du cercle) pour

lesquelles, la main de l'utilisateur est plus proche du capteur du HoloLens 2, ce qui facilite sa détection (100,0% [IC = 100,0, 100,0]).

Ces résultats sont en ligne avec ceux du pointage d'une cible dans le champ de vision : dans le champ d'affichage et à proximité, la détection de la main par le casque est satisfaisante ; par contre elle devient problématique pour des cibles plus éloignées incitant l'utilisateur à tendre d'avantage le bras et empêchant ainsi la détection de sa main par le casque. Par ailleurs, comme le montre la [Figure 10](#), la nature du rayon a un impact sur la détection de la main : avec un rayon « Continu », le taux de détection atteint 90,1% [IC = 86,9, 92,3] là où il est de 85,1% [IC = 81,5, 87,9] avec un rayon « Ponctuel ».

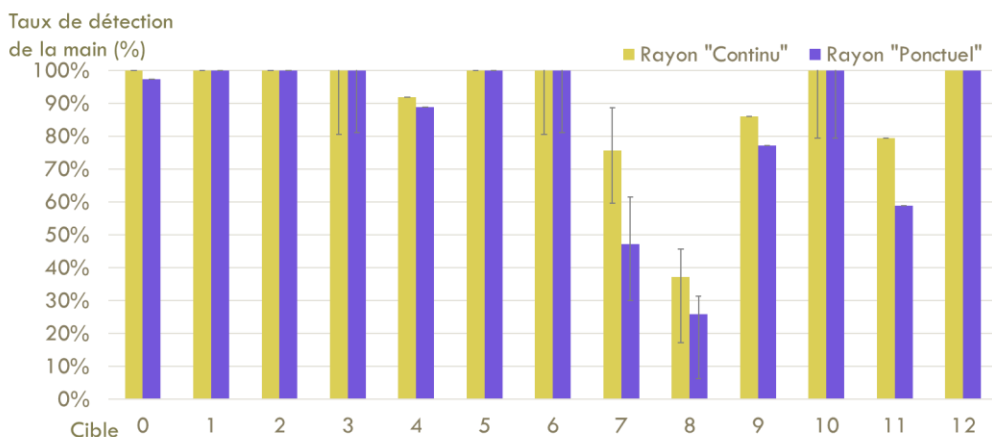


Figure 9 : Taux de détection (%) de la main de l'utilisateur en fonction de la cible et de la nature du rayon (95% IC)

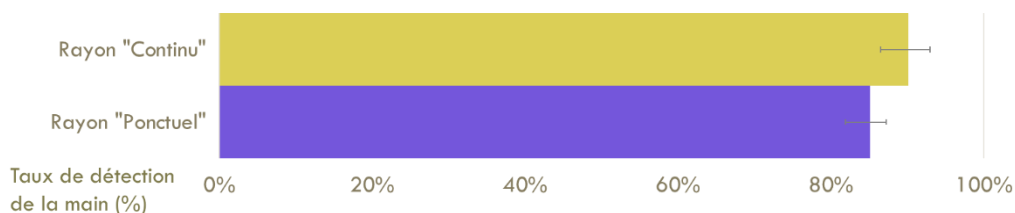


Figure 10 : Taux de détection (%) de la main de l'utilisateur en fonction de la nature du rayon (95% IC)

5.9.2 Taux de succès lors des tâches de pointage

Comme décrit dans la [Figure 11](#), le taux de succès de tous les pointages est quasi nul (en moyenne 2,2% [IC = 1,4, 3,2]). Une différence en termes de taux de succès est toutefois observée en fonction de la nature du rayon (4,7% [IC = 2,9, 6,9] avec un rayon « Continu » et 0,3% [IC = 0,0, 0,8] avec un rayon « Ponctuel »).

En examinant la distance moyenne (cf. [Figure 12](#)) entre le rayon et la cible à la fin de chaque pointage, les résultats établissent nettement que pour les cibles les plus éloignées de l'utilisateur (8, 9, 10, 11 et 12), la distance entre la cible et le rayon est nettement plus importante (moyenne 0,295 cm [IC = 0,281, 0,308]) que pour les cibles les plus proches (moyenne = 0,155 cm [IC = 0,149, 0,163]) : l'erreur est donc accrue avec les cibles les plus éloignées.

Si ce résultat est totalement opposé aux résultats observés pour le pointage dans le champ d'affichage (taux d'erreur entre 6 et 10%), il demeure cohérent avec les résultats obtenus pour un pointage dans le champ d'affichage en l'absence de feedback (cf. section 3.2) : l'absence de feedback semble donc être la cause majeure expliquant ce manque de réussite.

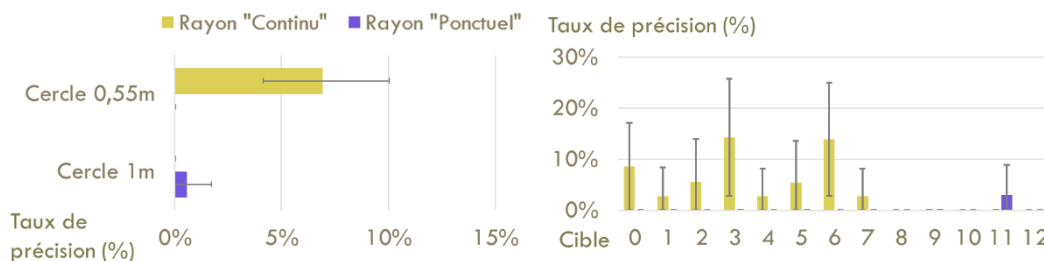


Figure 11 : Gauche : Taux de succès (%) des pointages en fonction du cercle support et de la nature du rayon (95% IC). Droite : Taux de succès (%) des pointages en fonction de la cible et de la nature du rayon (95% IC)

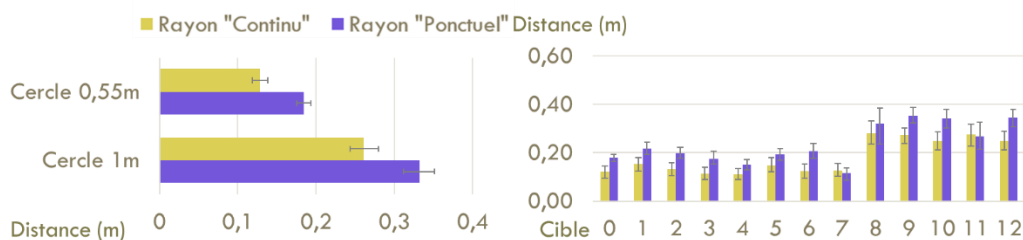


Figure 12 : Gauche : Distance moyenne (m) de la cible au rayon en fonction du cercle support et de la nature du rayon (95% IC). Droite : Distance moyenne (m) de la cible au rayon en fonction de la cible et de la nature du rayon (95% IC)

5.9.3 Retour des participants

A l'issue de l'expérimentation, les 12 participants ont eu la sensation d'être plus précis lors du pointage de cibles situées à leur droite, principalement parce que leur main dominante est leur main droite.

En ce qui concerne les cibles positionnées en bas et en haut, 10 participants étaient d'accord pour dire qu'il était plus facile de pointer avec précision sur les objets du bas, en mentionnant une meilleure visibilité (Participant P12) et un effort moindre au niveau du bras (P8 et P10) comme facteurs contribuant à cette facilité.

Concernant la nature du rayon, 8 participants sur 12 se perçoivent plus précis pour pointer dans les conditions où le rayon est « Ponctuel » que dans celles où le rayon est « Continu ». Les participants se disent perturbés par l'affichage du rayon dans la tâche de pointage (P1, P4, P7 et P8). Deux participants ont toutefois souligné que le rayon fournissait des conseils (P11) et aidait à affiner leur pointage (P9). Bien que minoritaires, ces deux commentaires sont en ligne avec les résultats obtenus en termes de taux de succès.

De manière cohérente avec les autres résultats, la majorité des participants (10 sur 12) ont indiqué qu'ils se sentaient plus précis lorsqu'ils ciblaient des objets à proximité, attribuant cela à une meilleure visibilité de ces objets (P5).

5.10 Conclusion

Dans cette étude, nous avons concentré nos efforts sur la tâche de pointage de cibles physiques situées dans le champ de vision humain mais en dehors du champ d'affichage du casque de RA. Notre investigation a tenu compte de leur

distance par rapport à l'utilisateur ainsi que de la nature du rayon (« Continu » ou « Ponctuel »). Les résultats obtenus à travers notre étude indiquent que la détection de la main de l'utilisateur est loin d'être systématique, et donc peu satisfaisante, lorsque les tâches de pointage concernent des objets situés autour du champ d'affichage du casque HoloLens 2. Les performances de pointage se sont avérées être particulièrement mauvaises, que la nature du rayon soit « Continu » ou « Ponctuel ». Ces performances soulignent les défis significatifs liés à la réalisation de tâches de pointage dans de tels espaces en RA et en particulier l'impact de l'absence de feedback déjà souligné dans notre étude préliminaire technique.

6 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Nos travaux avaient pour objectifs de mieux comprendre les facteurs influençant le pointage de cibles physiques dans une situation de visualisation située autour d'un référent à l'aide d'un casque de RA. Nous nous sommes en particulier intéressés à mieux comprendre les différences entre le pointage d'une cible physique présent dans et autour du champ d'affichage du casque.

En premier lieu, nous avons étudié l'influence de la nature de la cible (physique ou numérique) et la nature du rayon (« Continu » ou « Ponctuel ») lors du pointage en Réalité Augmentée d'une cible située dans le champ d'affichage du casque. Cette étude ne nous a pas permis d'établir de différence entre le pointage de cibles physiques et numériques situées dans le champ d'affichage du casque de RA, à l'exception des cibles numériques avec un rayon « Ponctuel » qui semblent plus compliquées à pointer sans erreur. Dans ces tâches, nous avons observé un faible taux d'erreur de pointage, en particulier pour les cibles de 3cm et 5cm de diamètre, ce qui suggère que des tâches sont relativement faciles à accomplir. Par ailleurs, notre étude permet de conclure que les deux natures de feedbacks considérées permettent de réaliser avec un niveau de performance comparable le pointage d'une cible physique présent dans le champ d'affichage du casque de RA.

Nous avons ensuite étudié les performances des utilisateurs lors du pointage de cibles physiques autour du champ d'affichage du casque de RA. A l'inverse des résultats observés pour la première étude, cette tâche s'avère très complexe avec un taux de succès très limité et ce quelle que soit la nature du feedback utilisée. En effet dans de telles situations, le feedback ne peut être que partiel ou absent puisque la cible ne se trouve pas dans le champ d'affichage du casque. Par conséquent, pointer une cible autour du champ d'affichage revient à pointer une cible sans feedback. Or, comme établi dans l'étude technique précédent la première étude, un tel pointage est également impossible pour des cibles placées dans le champs d'affichage du casque. Cette même difficulté à pointer des cibles physiques sans feedback est d'ailleurs également exprimée dans les travaux de Cabric et al. [9]. Inversement, cet effet n'apparaît pas dans le contexte des travaux de Freeman et al. [12], contexte où les utilisateurs disposent d'un feedback (tremblement de la cible) lors du pointage.

Enfin, les résultats établissent que le champ de détection de la main du casque HoloLens 2 ne permet pas un pointage naturel par lancer de rayon de cibles disposées autour du champ d'affichage du casque, la main n'étant pas toujours détectable par le casque au moment de la validation du pointage.

Ces résultats soulignent les défis significatifs liés à la réalisation de tâches de pointage autour de l'affichage d'un casque de RA et en particulier la nécessité de proposer un feedback pour permettre le pointage de cibles autour du champ d'affichage. Dans un premier pas vers l'aide à la réalisation du pointage dans de telles situations, nous avons alors conçu plusieurs solutions d'interaction devant permettre aux utilisateurs de pointer précisément des cibles présentes autour du champ d'affichage du casque de RA, solutions qui devront faire l'objet d'une implémentation et d'évaluations ultérieures mais que nous introduisons ci-après.

6.1 Conception de techniques de pointage autour du champ d'affichage du casque

Pour mieux assoir la RA comme support efficient pour la visualisation située et accroître le confort de l'utilisateur dans de multiples contextes tels que dans l'interaction avec une grande maquette augmentée pour l'analyse de données ou dans le management logistique d'un entrepôt, nous avons élaboré des solutions d'interaction devant permettre de pallier les verrous mis en lumière par nos expérimentations et devant donc permettre un pointage précis sur des cibles physiques situées dans le champ de vision humain mais autour du champ d'affichage du casque.

6.1.1 Pointer en deux étapes, sans puis avec feedback

Les résultats de notre deuxième étude montrent que les participants parviennent à pointer dans une zone autour de la cible sans toutefois réussir à la pointer précisément. Il manquerait donc un feedback approprié pour les aider à finaliser le pointage. Or, comme vu dans l'état de l'art de cet article, il existe aujourd'hui un grand nombre de techniques d'aide à la localisation d'objets placés en dehors du champ d'affichage du casque RA telles que Halo [5] ou Wedge [18], techniques qui toutefois ne vont pas jusqu'à constituer une aide au pointage.

Une première option de conception consisterait donc à agir sur l'espace de perception et permettre à l'utilisateur de faire une première phase de pointage approximative à l'aide d'un geste physique de pointage mais sans tourner la tête et sans feedback, puis d'afficher dans le casque de réalité augmentée une information numérique pour l'aider à finaliser le pointage en 3D. Concrètement, un feedback de type Halo [5] serait affiché dans le champ d'affichage du casque en fonction de la position calculée du point d'impact du rayon après la phase de pointage gros grain. La représentation de ce feedback évolue ensuite selon la distance restante entre l'extrémité du pointeur et ces cibles potentielles. L'ajout de ce feedback permettrait alors à l'utilisateur d'affiner son pointage comme illustré dans la [Figure 13](#). Une telle étude devra prendre en compte la densité des objets autour de la cible qui aura un impact certain sur le pointage de la bonne cible ainsi que le fonctionnement final du feedback à l'approche d'une cible.

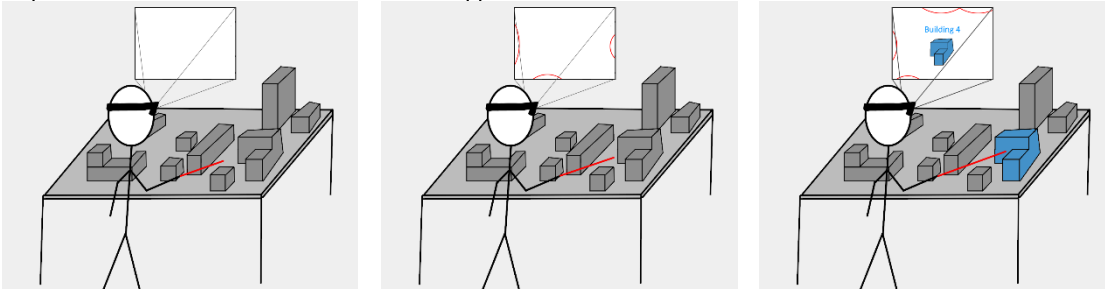


Figure 13 : Ajout d'un feedback après un premier pointage gros grain : L'utilisateur pointe sur une maquette représentant un complexe urbain. Un retour de type Halo (au centre et à droite) lui permet de savoir alors qu'il y a trois bâtiments à proximité du point d'impact du rayon, le plus proche étant positionné à droite. En bougeant le curseur vers la droite, il sélectionne ce bâtiment et constate qu'il y a quatre bâtiments à proximité. Pointage sans retour à gauche.

6.1.2 Le troisième œil : ajouter un feedback permanent

La limitation majeure du pointage d'un objet autour du champ d'affichage du casque consiste en une incapacité de l'utilisateur à voir le point d'impact du rayon. Ainsi, la seconde solution de conception que nous envisageons consisterait alors à augmenter la vue de l'utilisateur en lui affichant dans le casque de RA une zone de taille constante autour du point d'impact calculé du rayon. Ce retour consisterait en une caméra virtuelle dont l'origine serait à étudier. En effet, un placement de cette caméra au niveau de la tête de l'utilisateur serait cohérent avec une situation réelle de visualisation

de l'environnement physique. En plaçant cette caméra perpendiculairement au plan dans lequel se trouvent les objets constituerait une vue de type « bird-eye » et donnerait à l'utilisateur l'opportunité d'avoir une vue mini-map en deux dimensions de la disposition des objets. Enfin, la position et l'orientation de la caméra pourrait être liée à la main de l'utilisateur. Ce cas permettrait à l'utilisateur d'adapter sa vue en fonction de l'orientation de sa main et ajouterait de la flexibilité dans la visualisation de l'environnement physique (cf. [Figure 14](#)).

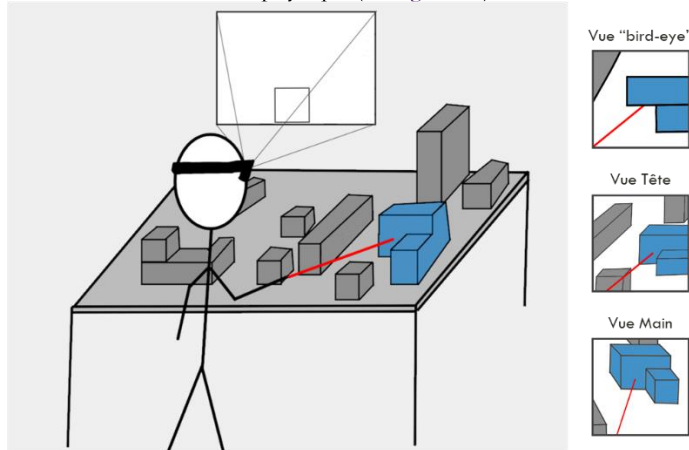


Figure 14 : Illustration de l'ajout de la visualisation du point d'impact

6.1.3 Réduire l'amplitude requise des mouvements de la main de l'utilisateur

Les résultats de notre deuxième étude montrent que la main de l'utilisateur est rapidement hors du champ de détection des capteurs de HoloLens 2 lors du pointage de cibles disposées autour du champ d'affichage du casque. Pour éviter cette situation il conviendrait d'agir sur l'espace moteur en évitant que la main de l'utilisateur sorte de la zone de détection du casque.

Pour cela une option, s'inspirant de MagStick [32], serait de contrôler la position d'un curseur dans l'espace 3D avec des petits gestes dans le champ de détection du casque. La sélection se ferait alors en deux temps : 1) l'utilisateur définit, dans l'environnement, un point de référence et un feedback similaire à celui de la solution 2 est affiché. 2) dès lors une symétrie centrale autour de ce point est appliquée aux mouvements de la main avant de les répercuter sur les mouvements du rayon affiché dans la zone de feedback. 3) Lorsque le curseur est suffisamment proche d'une cible, il est magnétisé sur cette cible. 4) l'utilisateur, via un click, sélectionne la cible sur laquelle est le curseur. L'application d'une symétrie permet alors de toujours conserver la main dans l'espace de détection des capteurs du casque et de limiter l'amplitude des gestes et donc la fatigue induite (cf. [Figure 15](#)).

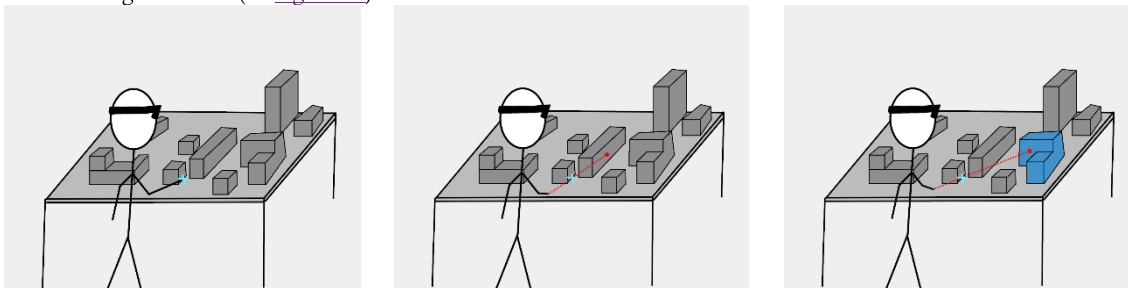


Figure 15 : Illustration de la technique MagStick adaptée à un environnement RA. 1) l'utilisateur définit un point de référence (à gauche). 2) Les mouvements de la main font se déplacer le curseur en quasi-symétrie centrale par rapport au point de référence (au centre). 3) Lorsque le curseur est suffisamment proche d'une cible, il est magnétisé sur celle-ci (à droite)

6.2 Perspectives

Au-delà des développements et études de ces propositions alternatives, nous identifions deux pistes majeures. Tout d'abord, lors de nos études, nous nous sommes concentrés sur une disposition des cibles sur une surface verticale. Cette orientation permet d'étudier différentes positions des cibles dans et tout autour du champ d'affichage du casque de RA. Cependant, nous n'avons pas étudié un placement des cibles selon une surface horizontale. Une telle disposition compléterait l'étude et permettrait s'approcher au plus de scénarios exploitant une maquette horizontale tel que dans le contexte d'interaction avec une grande maquette augmentée pour l'analyse de données sur un campus universitaire. Par ailleurs, lors de nos études, nous avons fait le choix d'utiliser le rayon de base de l'HoloLens 2. Sa stabilité est un atout mais étant basé sur la position et l'orientation du bras de l'utilisateur, il ne correspond pas exactement à un geste de pointage naturel qui tend à aligner l'œil directeur et l'extrémité du doigt. Différentes tentatives ont été faites pour concevoir et utiliser un autre rayon basé sur l'index de l'utilisateur mais nos différentes implémentations basées sur les capteurs HoloLens 2 uniquement, n'ont pas permis de réduire un phénomène de tremblement, et ce malgré l'utilisation de filtres tels que le 1€ Filter [10]. Ne souhaitant pas recourir à un dispositif de localisation extérieur, nous avons donc limité notre étude à l'utilisation du rayon proposé par HoloLens 2 tout en prenant soin d'expliquer son fonctionnement aux utilisateurs en amont des études.

Enfin, nos études se concentrent seulement sur le pointage de référents physiques en utilisant un casque de Réalité Augmentée Optical See-Through, seuls casques de RA permettant de visualiser directement des référents physiques dans et autour du champ d'affichage du casque. Si la question du pointage de référents physiques présents en dehors du champ d'affichage du casque mais directement visibles par les utilisateurs ne se pose pas dans le contexte d'utilisation de casque de RA Video See-Through, car impossible, il sera cependant intéressant d'étudier les solutions futures pour ce pointage dans ce contexte ci, c'est-à-dire dans celui du pointage d'objets physiques cachés par la structure physique du casque.

ACKNOWLEDGEMENTS

Ces travaux s'inscrivent dans le projet Vilagil-Aménagement Urbain, avec le soutien du Gouvernement Français dans le cadre du programme Territoire d'Innovation, une action du Grand Plan d'Investissement adossé à France 2030, de Toulouse Métropole et du GIS neOCampus de l'Université Toulouse III Paul Sabatier et avec le soutien du Projet ANR JCJC PERFIN (ANR- 18-CE33-0009) et du Projet ANR INTERPLAY (ANR -21-CE33-0022).

REFERENCES

- [1] Tilley Alvin R. and Henry Dreyfuss Associates. 2001. *The Measure of Man and Woman: Human Factors in Design, Revised Edition*. Wiley. Retrieved from <https://www.wiley.com/en-us/The+Measure+of+Man+and+Woman%3A+Human+Factors+in+Design%2C+Revised+Edition-p-9780471099550>
- [2] Ambre Assor, Arnaud Prouzeau, Martin Hachet, and Pierre Dragicevic. Handling Non-Visible Referents in Situated Visualizations.
- [3] Marc Baloup, Thomas Pietrzak, and Géry Casiez. 2019. Amélioration du Raycasting par utilisation de la sélection par proximité et du filtrage. 8, (2019), 61–83.

- [4] Marc Baloup, Thomas Pietrzak, and Géry Casiez. 2019. RayCursor: A 3D Pointing Facilitation Technique based on Raycasting. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '19)*, May 02, 2019, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1–12. . <https://doi.org/10.1145/3290605.3300331>
- [5] Patrick Baudisch and Ruth Rosenholtz. 2003. Halo: a technique for visualizing off-screen objects. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '03)*, April 05, 2003, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 481–488. . <https://doi.org/10.1145/642611.642695>
- [6] Joanna Bergström, Tor-Salve Dalsgaard, Jason Alexander, and Kasper Hornbæk. 2021. How to Evaluate Object Selection and Manipulation in VR? Guidelines from 20 Years of Studies. In *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '21)*, May 07, 2021, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1–20. . <https://doi.org/10.1145/3411764.3445193>
- [7] Doug Bowman, Donald Johnson, and Larry Hodges. 2001. Testbed Evaluation of Virtual Environment Interaction Techniques. *Presence Teleoperators Virtual Environ.* 10, (August 2001). <https://doi.org/10.1162/105474601750182333>
- [8] Stefano Burigat, Luca Chittaro, and Silvia Gabrielli. 2006. Visualizing locations of off-screen objects on mobile devices: a comparative evaluation of three approaches. In *Proceedings of the 8th conference on Human-computer interaction with mobile devices and services (MobileHCI '06)*, September 12, 2006, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 239–246. . <https://doi.org/10.1145/1152215.1152266>
- [9] Florent Cabric, Emmanuel Dubois, Pourang Irani, and Marcos Serrano. 2019. TouchGlass: Raycasting from a Glass Surface to Point at Physical Objects in Public Exhibits. In *Human-Computer Interaction – INTERACT 2019 (Lecture Notes in Computer Science)*, 2019, Cham. Springer International Publishing, Cham, 249–269. . https://doi.org/10.1007/978-3-030-29387-1_15
- [10] Géry Casiez, Nicolas Roussel, and Daniel Vogel. 2012. 1 € filter: a simple speed-based low-pass filter for noisy input in interactive systems. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '12)*, May 05, 2012, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2527–2530. . <https://doi.org/10.1145/2207676.2208639>
- [11] Yifei Cheng, Yukang Yan, Xin Yi, Yuanchun Shi, and David Lindlbauer. 2021. SemanticAdapt: Optimization-based Adaptation of Mixed Reality Layouts Leveraging Virtual-Physical Semantic Connections. In *The 34th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '21)*, October 12, 2021, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 282–297. . <https://doi.org/10.1145/3472749.3474750>
- [12] Euan Freeman, Julie Williamson, Sriram Subramanian, and Stephen Brewster. 2018. Point-and-Shake: Selecting from Levitating Object Displays. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '18)*, April 19, 2018, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1–10. . <https://doi.org/10.1145/3173574.3173592>
- [13] Renaud Gervais, Jérémy Frey, and Martin Hachet. 2015. Pointing in Spatial Augmented Reality from 2D Pointing Devices. In *Human-Computer Interaction – INTERACT 2015 (Lecture Notes in Computer Science)*, 2015, Cham. Springer International Publishing, Cham, 381–389. . https://doi.org/10.1007/978-3-319-22723-8_30
- [14] Tovi Grossman and Ravin Balakrishnan. 2006. The design and evaluation of selection techniques for 3D volumetric displays. In *Proceedings of the 19th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST '06)*, October 15, 2006, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 3–12. . <https://doi.org/10.1145/1166253.1166257>
- [15] Uwe Gruenefeld, Abdallah El Ali, Susanne Boll, and Wilko Heuten. 2018. Beyond Halo and Wedge: visualizing out-of-view objects on head-mounted virtual and augmented reality devices. In *Proceedings of the 20th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services (MobileHCI '18)*, September 03, 2018, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1–11. . <https://doi.org/10.1145/3229434.3229438>
- [16] Uwe Gruenefeld, Tim Claudius Stratmann, Abdallah El Ali, Susanne Boll, and Wilko Heuten. 2018. RadialLight: exploring radial peripheral LEDs for directional cues in head-mounted displays. In *Proceedings of the 20th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services (MobileHCI '18)*, September 03, 2018, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1–6. . <https://doi.org/10.1145/3229434.3229437>

- [17] Uwe Gruenefeld, Tim Claudius Stratmann, Lars Prädél, and Wilko Heuten. 2018. MonocularAR: a radial light display to point towards out-of-view objects on augmented reality devices. In *Proceedings of the 20th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services Adjunct (MobileHCI '18)*, September 03, 2018, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 16–22. . <https://doi.org/10.1145/3236112.3236115>
- [18] Sean Gustafson, Patrick Baudisch, Carl Gutwin, and Pourang Irani. 2008. Wedge: clutter-free visualization of off-screen locations. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '08)*, April 06, 2008, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 787–796. . <https://doi.org/10.1145/1357054.1357179>
- [19] Sean G. Gustafson and Pourang P. Irani. 2007. Comparing visualizations for tracking off-screen moving targets. In *CHI '07 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '07)*, April 28, 2007, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2399–2404. . <https://doi.org/10.1145/1240866.1241014>
- [20] Ken Hinckley, Randy Pausch, John C. Goble, and Neal F. Kassell. 1994. A survey of design issues in spatial input. In *Proceedings of the 7th annual ACM symposium on User interface software and technology - UIST '94*, 1994, Marina del Rey, California, United States. ACM Press, Marina del Rey, California, United States, 213–222. . <https://doi.org/10.1145/192426.192501>
- [21] Martin Krzywinski and Naomi Altman. 2013. Error bars. *Nat. Methods* 10, 10 (October 2013), 921–922. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2659>
- [22] Jiandong Liang and Mark Green. 1994. JCAD: A highly interactive 3D modeling system. *Comput. Graph.* 18, 4 (July 1994), 499–506. [https://doi.org/10.1016/0097-8493\(94\)90062-0](https://doi.org/10.1016/0097-8493(94)90062-0)
- [23] Jiazhou Liu, Barrett Ens, Arnaud Prouzeau, Jim Smiley, Isobel Kara Nixon, Sarah Goodwin, and Tim Dwyer. 2023. DataDancing: An Exploration of the Design Space For Visualisation View Management for 3D Surfaces and Spaces. In *Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '23)*, April 19, 2023, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1–17. . <https://doi.org/10.1145/3544548.3580827>
- [24] Paul Lubos, Gerd Bruder, Oscar Ariza, and Frank Steinicke. 2016. Ambiculus: LED-based low-resolution peripheral display extension for immersive head-mounted displays. In *Proceedings of the 2016 Virtual Reality International Conference (VRIC '16)*, March 23, 2016, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1–4. . <https://doi.org/10.1145/2927929.2927939>
- [25] Mark R. Mine. 1995. Virtual environment interaction techniques. *UNC Chap. Hill Comput. Sci. Tech. Rep. ...* (1995).
- [26] Patrick Perea, Denis Morand, and Laurence Nigay. 2017. [POSTER] Halo3D: A Technique for Visualizing Off-Screen Points of Interest in Mobile Augmented Reality. In *2017 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR-Adjunct)*, October 2017. 170–175. . <https://doi.org/10.1109/ISMAR-Adjunct.2017.58>
- [27] Patrick Perea, Denis Morand, and Laurence Nigay. 2019. Spotlight on Off-Screen Points of Interest in Handheld Augmented Reality: Halo-based techniques. In *Proceedings of the 2019 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces (ISS '19)*, November 10, 2019, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 43–54. . <https://doi.org/10.1145/3343055.3359719>
- [28] Gary Perelman, Emmanuel Dubois, Alice Probst, and Marcos Serrano. 2022. Visual Transitions around Tabletops in Mixed Reality: Study on a Visual Acquisition Task between Vertical Virtual Displays and Horizontal Tabletops. *Proc. ACM Hum.-Comput. Interact.* 6, ISS (November 2022), 585:660-585:679. <https://doi.org/10.1145/3567738>
- [29] Carole Plasson, Dominique Cunin, Yann Laurillau, and Laurence Nigay. 2021. A Lens-Based Extension of Raycasting for Accurate Selection in Dense 3D Environments. In *Human-Computer Interaction – INTERACT 2021 (Lecture Notes in Computer Science)*, 2021, Cham. Springer International Publishing, Cham, 501–524. . https://doi.org/10.1007/978-3-030-85610-6_28
- [30] Ivan Poupyrev, Mark Billinghurst, Suzanne Weghorst, and Tadao Ichikawa. 1996. The go-go interaction technique: non-linear mapping for direct manipulation in VR. In *Proceedings of the 9th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST '96)*, November 01, 1996, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 79–80. . <https://doi.org/10.1145/237091.237102>
- [31] Hyocheol Ro, Seungcho Chae, Inhwan Kim, Junghyun Byun, Yoonsik Yang, Yoonjung Park, and Tackdon Han. 2017. A dynamic depth-variable ray-casting interface for object manipulation in ar environments. In *2017 IEEE*

- International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, October 2017, Banff, Canada. Banff, Canada, 2873–2878. . <https://doi.org/10.1109/SMC.2017.8123063>
- [32] Anne Roudaut, Stéphane Huot, and Eric Lecolinet. 2008. TapTap and MagStick: improving one-handed target acquisition on small touch-screens. In *Proceedings of the working conference on Advanced visual interfaces - AVI '08*, 2008, Napoli, Italy. ACM Press, Napoli, Italy, 146. . <https://doi.org/10.1145/1385569.1385594>
- [33] Housseem Saidi, Emmanuel Dubois, and Marcos Serrano. 2021. HoloBar: Rapid Command Execution for Head-Worn AR Exploiting Around the Field-of-View Interaction. In *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, May 06, 2021, Yokohama Japan. ACM, Yokohama Japan, 1–17. . <https://doi.org/10.1145/3411764.3445255>
- [34] Kadek Ananta Satriadi, Barrett Ens, Maxime Cordeil, Tobias Czauderna, and Bernhard Jenny. 2020. Maps Around Me: 3D Multiview Layouts in Immersive Spaces. *Proc. ACM Hum.-Comput. Interact.* 4, ISS (November 2020), 201:1-201:20. <https://doi.org/10.1145/3427329>
- [35] Jonas Schjerlund, Kasper Hornbæk, and Joanna Bergström. 2021. Ninja Hands: Using Many Hands to Improve Target Selection in VR. In *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '21)*, May 07, 2021, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1–14. . <https://doi.org/10.1145/3411764.3445759>
- [36] Thomas Vincent, Laurence Nigay, and Takeshi Kurata. 2013. Precise pointing techniques for handheld Augmented Reality. 2013. Springer, 122. . https://doi.org/10.1007/978-3-642-40483-2_9
- [37] Matt Whitlock, Ethan Harnner, Jed R. Brubaker, Shaun Kane, and Danielle Albers Szafir. 2018. Interacting with Distant Objects in Augmented Reality. In *2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, March 2018, Reutlingen. IEEE, Reutlingen, 41–48. . <https://doi.org/10.1109/VR.2018.8446381>
- [38] Wesley Willett, Yvonne Jansen, and Pierre Dragicevic. 2017. Embedded Data Representations. *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.* 23, 1 (January 2017), 461–470. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2016.2598608>
- [39] H.P. Wyss, R. Blach, and M. Bues. 2006. iSith - Intersection-based Spatial Interaction for Two Hands. In *3D User Interfaces (3DU'06)*, March 2006. 59–61. . <https://doi.org/10.1109/VR.2006.93>
- [40] Takatoshi Yoshida, Junichi Ogawa, Kyung Yun Choi, Sanad Bushnaq, Ken Nakagaki, and Hiroshi Ishii. 2021. inDepth: Force-based Interaction with Objects beyond A Physical Barrier. In *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction (TEI '21)*, February 14, 2021, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1–6. . <https://doi.org/10.1145/3430524.3442447>
- [41] Difeng Yu, Qiusi Zhou, Joshua Newn, Tilman Dingler, Eduardo Velloso, and Jorge Goncalves. 2020. Fully-Occluded Target Selection in Virtual Reality. *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.* 26, 12 (December 2020), 3402–3413. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2020.3023606>
- [42] Futian Zhang, Keiko Katsuragawa, and Edward Lank. 2022. Conductor: intersection-based bimanual pointing in augmented and virtual reality. *Proc. ACM Hum.-Comput. Interact.* 6, ISS (November 2022), 560:103-560:117. <https://doi.org/10.1145/3567713>
- [43] Caijun Zhao, Kai Way Li, and Lu Peng. 2023. Movement Time for Pointing Tasks in Real and Augmented Reality Environments. *Appl. Sci.* 13, 2 (January 2023), 788. <https://doi.org/10.3390/app13020788>
- [44] 2020. *Publication manual of the American Psychological Association, 7th ed.* American Psychological Association, Washington, DC, US. <https://doi.org/10.1037/0000165-000>