



Acquisition visuelle en réalité mixte, depuis et vers une table interactive : Analyse de la transition entre un écran virtuel et un écran physique

Alice Probst, Gary Perelman, Emmanuel Dubois, Marcos Serrano

► To cite this version:

Alice Probst, Gary Perelman, Emmanuel Dubois, Marcos Serrano. Acquisition visuelle en réalité mixte, depuis et vers une table interactive : Analyse de la transition entre un écran virtuel et un écran physique. 33ème Conférence internationale francophone sur l'Interaction Humain-Machine (IHM 2022), Association Francophone d'Interaction Humain-Machine (AFIHM); Institut de recherche NADI de l'Université de Namur, Nov 2022, Namur, Belgique. pp.1-17, 10.1145/3500866.3516377 . hal-03845381

HAL Id: hal-03845381

<https://hal.science/hal-03845381>

Submitted on 9 Nov 2022

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.

Acquisition visuelle en réalité mixte, depuis et vers une table interactive : Analyse de la transition entre un écran virtuel et un écran physique

Visual acquisition in mixed reality, from and to an interactive table: Analysis of the transition between a virtual screen and a physical screen

ALICE PROBST

IRIT – ELIPSE - Université Paul Sabatier Toulouse III, Toulouse, France

GARY PERELMAN

IRIT – ELIPSE - Université Paul Sabatier Toulouse III, Toulouse, France

EMMANUEL DUBOIS

IRIT – ELIPSE - Université Paul Sabatier Toulouse III, Toulouse, France

MARCOS SERRANO

IRIT – ELIPSE - Université Paul Sabatier Toulouse III, Toulouse, France

As part of a project to explore the opportunities and limitations created by the addition of a new interaction space around an interactive table, through an augmented reality headset, this paper aims to better understand the nature and characteristics of the new combined display space, as well as the role of the physical screen in this otherwise virtual environment. We also question the impact of directly superimposing augmented content on the physical screen, or on the contrary of strictly separating the two display environments. To this end, 12 participants performed visual acquisition tasks between these two spaces (tabletop and pure virtual area), with either a physical or virtual display at the tabletop. The results show better performance with strict use of the physical display for the tabletop area and an ability for the user to focus their gaze more towards the surrounding virtual areas.

CCS CONCEPTS • Human-centered computing~Human computer interaction (HCI)~Interaction paradigms~Mixed / augmented reality Human-centered computing~Human computer interaction (HCI)~Interaction devices~Touch screens•

Additional Keywords and Phrases: interactive tabletop; see-through Head mounted display; hybrid interactive environment

Dans le cadre d'un projet visant à explorer les opportunités et les limites créées par l'ajout d'un nouvel espace d'interaction autour d'une table interactive, au travers d'un casque de réalité augmentée, cet article vise à mieux comprendre la nature et les caractéristiques du nouvel espace combiné pour l'affichage, ainsi que le rôle de l'écran physique dans cet environnement autrement virtuel. Nous questionnons également l'impact de la superposition directe de contenu augmenté sur l'écran physique,

ou au contraire de la séparation stricte des deux environnements d'affichage. A ces fins, 12 participants ont effectué des tâches d'acquisition visuelle entre ces deux espaces (zone table et zone virtuelle pure), avec un affichage soit physique, soit virtuel au niveau de la table. Les résultats montrent de meilleures performances avec une utilisation stricte de l'écran physique pour la zone table et une capacité pour l'utilisateur de concentrer davantage son regard vers les zones virtuelles environnantes.

Mots-clés additionnels : table interactive ; casque semi-transparent ; environnement interactif combiné

ACM Reference Format:

First Author's Name, Initials, and Last Name, Second Author's Name, Initials, and Last Name, and Third Author's Name, Initials, and Last Name. 2018. The Title of the Paper: ACM Conference Proceedings Manuscript Submission Template: This is the subtitle of the paper, this document both explains and embodies the submission format for authors using Word. In Woodstock '18: ACM Symposium on Neural Gaze Detection, June 03–05, 2018, Woodstock, NY. ACM, New York, NY, USA, 10 pages. NOTE: This block will be automatically generated when manuscripts are processed after acceptance.

1 INTRODUCTION

Les grandes surfaces d'affichage laissent place à une disposition plus libre et plus organique de l'information et sont ainsi préconisées pour de nombreuses tâches d'analyse complexe en particulier l'analyse de grande quantité de données [1] [25]. C'est notamment le cas dans le cadre de réunions de concertation entre différents acteurs (politique, citoyens, experts métiers) autour d'un projet de réaménagement urbain, situation à laquelle nous sommes confrontés dans le cadre de l'action Aménagement Urbain du projet Vilagil. Les tables interactives en particulier offrent une interaction plus naturelle de par le multi-touch. L'espace vient parfois tout de même à manquer, lors de l'affichage de multiples informations sur un référent unique (e.g. une carte en gestion de crise, un bâtiment lors de sa construction, etc.) ou de la présence d'utilisateurs multiples nécessitant chacun un affichage personnalisé.

Dans ces situations une table plus grande ou un mur d'écrans peuvent être envisagés [4] mais se posent alors des problèmes d'accès aux éléments éloignés [27]. D'autres approches visent alors à exploiter en plus le volume 3D situé au-dessus de la table, à l'aide de la réalité augmentée, pour rendre accessible une troisième dimension perpendiculaire à la table [39]. Ces solutions permettent d'afficher une couche d'information virtuelle à proximité de leur référent physique (e.g. un calque supplémentaire sur une carte), facilitant ainsi l'analyse de données. Toutefois, bien que les casques de réalité augmentée actuels offrent un espace d'affichage théoriquement sans limite, à ce jour, ils possèdent tous un champ de vision relativement limité. Outre la réduction du contenu visible à chaque instant, ils induisent également des mouvements de tête plus amples et peuvent entraîner une fatigue accrue ou encore des changements de contexte plus disruptifs. De plus, ces casques présentent des problèmes de luminosité et de colorimétrie, limitant la superposition efficace d'un hologramme avec un quelconque écran physique rétro-éclairé.

Pour répondre à ces problématiques de perception et d'occultation, tout en tirant profit de l'espace autour de la table interactive pour afficher des données en réalité augmentée [5] [8], nos travaux se focalisent sur l'utilisation d'espaces d'affichage plans, supportant l'affichage de multiples fenêtres ou widgets. Pour minimiser la distance entre l'utilisateur et ces plans additionnels et ainsi faciliter l'interaction avec le contenu de ces plans et leur perception [11], nous explorons plus particulièrement l'apport de zones d'affichage virtuelles verticales autour de la table. Il convient alors de mieux cerner les limitations imposées par les casques dans de tels espaces combinés : Comment percevoir simultanément l'affichage sur la table et l'affichage dans le casque ? Quels facteurs influencent

cette perception ? Dans quelle mesure l'espace environnant la table peut-il être exploité (e.g. zone d'affichage, d'interaction, etc.) ?

Les travaux présentés dans cet article visent à contribuer à cette analyse et abordent dans un premier temps le point de vue de l'accès visuel à l'information dans l'un de ces environnements combinés. Dans notre contexte, notre espace combiné est constitué d'une table interactive physique étendue à l'aide d'un casque de réalité augmentée et nous étudions trois considérations pratiques liées à ce contexte :

1. Quel temps et quel effort sont requis pour déplacer son regard d'un point de l'écran physique (Table) à un point de l'espace virtuel (Face ou Droite) et vice-versa (cf. Figure 1 - gauche) ?

2. Comment se répartie la zone d'affichage virtuelle du casque dans l'environnement combiné en fonction de la position de la cible que l'utilisateur doit atteindre visuellement ?

3. Un affichage virtuel (via un casque de RA) sur la table a-t-il un impact sur ces mesures par rapport à l'utilisation de l'affichage physique de la table directement (cf. Figure 1 – centre et droite) ?

Cet article présente le protocole expérimental et les résultats d'une étude explorant ces questions. Douze participants ont effectué des tâches d'acquisition visuelle entre différentes zones d'affichage de notre environnement. Nos résultats permettent de mieux caractériser l'espace d'affichage en réalité mixte autour d'une table interactive physique. Nous formalisons également les conséquences de l'affichage de contenu augmenté directement au-dessus de la table interactive (affichage virtuel). Ces résultats permettent d'extraire des perspectives pour la conception d'un espace de travail mixte autour d'une table interactive.

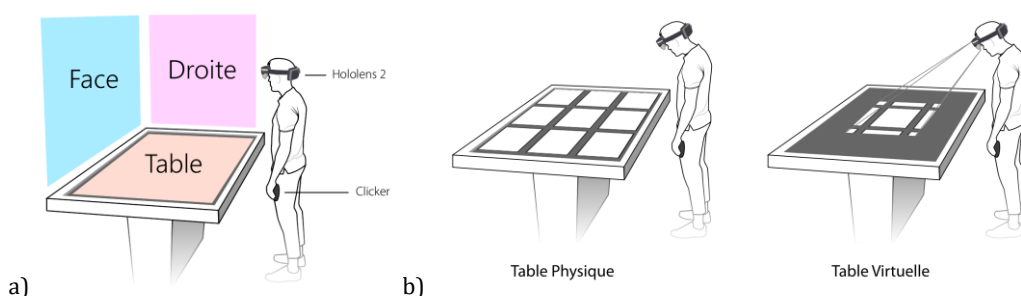


Figure 1. a) Nous avons étudié les transitions entre la table et deux zones virtuelles (Face et Droite), ainsi que les transitions depuis ces deux zones virtuelles vers la table. b) Nous avons considéré deux modalités d'affichage au niveau de la table : affichage par l'écran de la table elle-même (appelé Table Physique) ou par le casque au niveau de la table (appelé Table Virtuelle).

2 ETAT DE L'ART

Exploiter de grands espaces d'affichage pour la visualisation d'information a fait l'objet de nombreux travaux [1] [4] [21]. Deux grandes questions au cœur de ces travaux sont particulièrement en lien avec notre problématique : la disposition des espaces virtuels et l'articulation des surfaces virtuelles et physiques.

2.1 Positionnement de multiples espaces virtuels autour de l'utilisateur

A l'inverse des situations mettant en jeu un dispositif mobile, l'usage d'un casque de RA permet à l'utilisateur de visualiser de l'information quasiment partout : il lui suffit alors d'orienter son regard vers le lieu prévu pour

l'affichage. Les tous premiers travaux dans ce domaine se sont alors portés sur l'étude de l'ancrage des fenêtres virtuelles [13] : la position des fenêtres peut être liée à l'utilisateur, au monde physique ou au casque.

Différentes études ont également été conduites pour faciliter la localisation des informations dans cet espace quasi infini. Ens et al. [11] ont exploré l'impact de la taille des fenêtres, de leur inclinaison et espacement, et du référentiel adopté pour ancrer ces fenêtres autour de l'utilisateur. Les résultats montrent un gain de temps de 40% lors du passage d'une fenêtre à une autre lorsqu'elles sont disposées autour de l'utilisateur, par rapport à un changement de fenêtre classique dans une vue fixe et unique.

Pour accompagner le processus d'exploration de données, Hayatpur et al. [15] ont proposé DataHop, un système permettant de disposer spatialement et de retracer aisément tout le cheminement d'une analyse de données. Dans le cas particulier de données hiérarchisées, Satriadi et al. [34] ont considéré différentes dispositions en 3D des informations affichées en environnement immersif pour comprendre comment l'utilisateur tire profit de l'espace physique autour de lui. Éviter les occultations et privilégier une information située sont les principaux résultats de cette étude amenant alors à privilégier une vue globale au centre et des vues détaillées autour, orientées vers l'utilisateur.

Plus récemment, comme support à un travail d'analyse de données, le système FIESTA [20] a choisi d'immerger les utilisateurs dans une pièce virtuelle 3D sur les murs de laquelle les utilisateurs peuvent créer, déplacer et redimensionner librement les éléments visuels nécessaires à leur travail d'analyse dans la pièce. La pièce constitue alors un référentiel commun sur lequel s'appuyer pour l'interaction. Enfin, résolument ancré dans un espace physique commun, Weizhou et al. [23] se sont intéressés à l'organisation des documents adoptés par les utilisateurs lors de tâches collectives, telles que brainstorming et sensemaking, en réalité augmentée, dans une pièce meublée ou non meublée. Ils ont notamment découvert une tendance à aligner verticalement les éléments avec les bords des surfaces horizontales disponibles (tables, commodes) ou directement sur les surfaces verticales notables (tableau blanc, porte, ...). Ces travaux montrent qu'utiliser une référence physique pour visualiser de l'information contribue à l'analyse de données, notamment en exploitant des murs autour d'une pièce, et les alignements verticaux intrinsèques à une pièce.

D'autres travaux ont étudié différentes solutions permettant d'optimiser la visualisation de données en environnement immersif alors que l'utilisateur se trouve en situation de mobilité [12] [14] [19] [28]. Mais ces considérations dépassent le cadre de nos travaux.

En complément à ces travaux centrés sur la représentation des données en environnement immersif, des techniques d'interactions ont été proposées, et en particulier des techniques adoptant un fonctionnement centré sur le corps de l'utilisateur [22] [37] [38]. Il a notamment été établi que les surfaces planes favorisaient un pointage 3D en comparaison des surfaces courbes et que le mode d'ancrage au corps de l'utilisateur (lieu, alignement) influence les performances.

Ces travaux ont permis de mettre en évidence l'intérêt d'étendre l'espace d'affichage et établi la capacité de l'utilisateur à en tirer profit. Il ressort également que les pointages distants sont plus efficaces sur des surfaces planes que courbes, que l'utilisateur gagne en performance avec des informations placées autour de lui et qu'une organisation verticale des informations est à privilégier. Il apparaît aussi que les utilisateurs préfèrent placer des informations de second plan autour d'une information globale placée au centre de leur espace de travail. Cependant ces travaux n'intègrent pas les contraintes d'affichage liées à la présence de supports physiques statiques, tels qu'une table interactive. La section suivante traite des environnements mêlant des affichages virtuels avec des dispositifs physiques.

2.2 Combinaisons d’affichages virtuels avec des dispositifs d’affichages physiques

De multiples travaux ont combiné les affichages virtuels fournis par les casques immersifs avec des dispositifs physiques d’affichage, quelle que soit leur taille.

Tout d’abord, plusieurs travaux se sont penchés sur l’utilisation du virtuel comme un liant entre les éléments physiques d’un vaste environnement. Précurseurs, Rekimoto et al. [33] ont conçu et implémenté en 1999 un environnement hybride où les différents écrans et objets physiques d’intérêts dans une pièce sont reliés entre eux et peuvent communiquer par le biais d’une réalité augmentée projetée sur toutes les surfaces. Gluey [35] reprend le même concept mais l’opérationnalise avec un casque semi-transparent. Cavallo et al. [8] ont conçu et implémenté un large environnement constitué d’un espace cylindrique entouré de larges écrans physiques verticaux amovibles, centrés autour d’une table ronde non-interactive mais destinée à recevoir des visualisations immersives en 3D liées au contenu des écrans environnants.

Cette articulation avec des ressources physiques a également donné lieu à la prise en compte de dispositifs physiques d’affichages. Ainsi, Grubert et al. [24] évaluent la combinaison d’une smartwatch avec des fenêtres virtuelles additionnelles pour des tâches courantes simples, telle que la recherche d’un objet sur une carte, ou la sélection d’un item de menu. Ils démontrent de meilleures performances que lors de l’utilisation seule de la smartwatch. Normand et al. [30] ont comparé l’utilisation d’un smartphone seul, l’utilisation d’une visualisation immersive seule, et une combinaison des deux, et ont trouvé un net avantage pour cette dernière dans une tâche de classification visuelle. Une revue récente documente les multiples articulations possibles entre smartphone et casque de RA [38]. De telles combinaisons permettent de conserver le côté mobile des casques, l’aisance d’interaction offerte par les surfaces tactiles, tout en palliant ainsi leur espace d’affichage réduit.

Au-delà de ces dispositifs mobiles, des surfaces physiques d’affichage plus grandes ont aussi donné lieu à plusieurs travaux. Par exemple, Reipschläger et al. [32] ont augmenté un mur d’écran par le biais d’un casque immersif, afin de garder une proximité spatiale forte entre les éléments virtuels et les éléments physiques sémantiquement liés. Butscher et al. [6] ont développé un système permettant de manipuler des graphiques en réalité augmentée en leur donnant une forte dépendance spatiale avec une table interactive afin de pouvoir ainsi les manipuler par des interactions multitouch. Millet et al. [26] proposent une solution permettant d’alterner le plus fluidement possible entre l’utilisation du poste de travail classique et un mode immersif favorisant certaines manipulations 3D. Enfin, toujours dans le contexte de la manipulation d’informations 3D, Reipschläger et al. [31] ont étendu horizontalement et verticalement les côtés d’une petite surface interactive pour y présenter respectivement des menus et informations additionnelles comme les vues orthographiques de la modélisation 3D en cours.

Enfin pour compléter ces études et permettre une exploration encore plus large des possibles, des travaux récents ont visé à modéliser le temps d’accès à une donnée représentée virtuellement dans un casque de RA. Ainsi avant de déployer les prototypes, souvent complexes et dépendant de technologies d’implémentation, une prédiction du temps mis pour atteindre visuellement les représentations virtuelles est possible [7].

La prise en compte de l’espace physique et en particulier les supports d’affichage physiques dans le rendu et l’interaction avec des données affichées par un casque de RA ont donc fait l’objet de multiples études. On note toutefois qu’elles s’orientent majoritairement vers une tentative d’exploitation de l’espace physique pour le rendu d’information 3D. A notre connaissance, aucune étude ne s’est penchée sur l’utilisation de plans virtuels 2D autour de surfaces d’affichages physiques telles que des tables interactives comme supports à l’exploitation de représentations 2D. Pourtant de telles situations tirent profit 1) de surfaces physiques utiles pour constituer un

réfèrent spatial fixe et offrant un support tactile pour les interactions et, 2) de surfaces virtuelles permettant d'étendre la zone d'affichage, autour d'une information de référence, et sans occulter l'information première.

3 PROTOCOLE EXPERIMENTAL

L'objectif de cette étude est d'analyser le comportement de l'utilisateur lorsqu'il accède aux différentes zones d'affichage d'un environnement combiné, i.e. mêlant des surfaces d'affichage physiques (sur un écran) et virtuelles (dans un casque en réalité augmentée). Nous mesurons le temps, l'effort et l'espace visible à la fin d'une transition visuelle entre la table et l'environnement virtuel (ou vice-versa), ceci dans les cas où un affichage soit virtuel, soit physique est utilisé au niveau de la table (cf. Figure 1).

3.1 Tâche

Le but de chaque essai est d'étudier l'accès visuel à une cible d'une zone d'arrivée, en partant du centre d'une zone de départ. La zone de départ peut être soit la table, auquel cas la zone d'arrivée sera dans l'espace virtuel alentour, soit une zone de l'espace virtuel alentour, auquel cas la table sera la zone d'arrivée. Il était demandé aux participants d'effectuer la tâche sans délai, mais avant tout de manière confortable.

Pour réaliser la tâche, l'utilisateur commence par porter son regard en direction du centre d'un indicateur sur la zone de départ (Figure 2 - gauche). Cet indicateur schématise les zones et les positions possibles de la cible. L'utilisateur utilise un clicker pour déclencher le début de l'essai. Un point sur l'indicateur représentant la position de la cible se colore en rouge. Le participant doit alors acquérir visuellement la cible sur la zone d'arrivée, parmi neuf autres objets visuels, et doit lire le mot contenu dans la cible à voix haute (Figure 2 - droite). L'essai est réussi lorsque le mot prononcé est le bon. Les mots contenus par chaque grille de cibles sont sélectionnés aléatoirement à chaque essai parmi une liste de vingt mots.

À la fin de l'essai, le rôle des zones est inversé. L'indicateur apparaît au centre de l'ancienne zone d'arrivée, et la grille de mots apparaît sur l'ancienne zone de départ, permettant ainsi le démarrage de l'essai suivant dans l'autre sens de la transition. La Figure 2 illustre cette tâche pour un essai partant de la table vers l'espace virtuel en face.

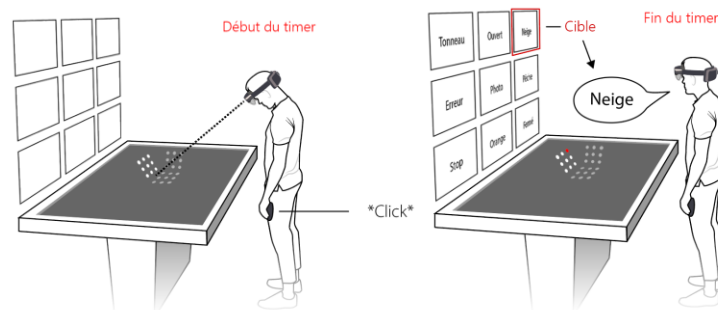


Figure 2. Illustration d'un essai partant de la table et finissant dans le virtuel.

3.2 Facteurs

Nous avons retenu quatre facteurs délimitant les conditions : la position de la zone virtuelle, la position de la cible, le sens de la transition et la modalité d'affichage du contenu de la table, décrits ci-dessous.

- *Position de la zone virtuelle* : Ce facteur décrit la position des zones virtuelles affichée avec le casque. Comme rappelé dans l'état de l'art, lorsque les utilisateurs ont la liberté d'organiser des fenêtres virtuelles dans une pièce meublée, ils ont tendance à aligner les fenêtres avec des repères physiques de la pièce, et ce selon un axe vertical : tableaux blancs, bords des tables, étagères, etc. Les utilisateurs tendent aussi à préférer une forte proximité spatiale, ou, à défaut, un lien visuel continu, entre les éléments possédant un lien sémantique. De plus un pointage sur une surface plane a été montré plus efficace que sur des surfaces courbes. Nous avons donc choisi d'étendre virtuellement les bords de la table, par des surfaces d'affichage virtuelles verticales. Nous séparons ainsi trois zones d'affichage : une zone pour la surface de la table, une zone perpendiculaire au bord long de la table (en face), une zone perpendiculaire au bord court de la table à droite (en périphérie). Nous ne considérons pas la zone de gauche afin de réduire le nombre de zones à étudier et car les résultats devraient être symétriques par rapport à la zone de droite. Pour étudier les transitions entre ces différentes zones virtuelles et la table, nos essais se distinguent donc selon la zone verticale utilisée en combinaison avec la table : **[Face, Droite]**.
- *Position de la cible* : Afin d'obtenir une granularité de positions représentatives de chaque zone, chaque zone est divisée en une grille de 3 * 3 positions possibles pour la cible.
- *Sens de la transition* : Comme décrit dans la tâche, nous distinguons également les essais selon le sens de la transition : **[Depuis la table, Vers la table]**. En effet, en contexte réel, l'utilisateur pourrait aussi bien aller chercher un élément sur la table après un travail dans l'espace vertical que l'inverse.
- *Modalité d'affichage du contenu de la table* : Même si la table sert de référent pour afficher une information partagée par les différentes parties prenantes (e.g. une carte ou le plan d'un bâtiment), des informations supplémentaires spécifiques à une seule partie prenante peuvent être nécessaires (e.g. le nom des rues, la température dans une pièce). Les informations servant de référent commun pourraient donc être affichées sur l'écran physique de la table, alors que les informations spécifiques à un utilisateur pourraient être superposées virtuellement à travers le casque, ne créant pas ainsi d'occlusions superflues pour les autres utilisateurs. Afin d'étudier l'impact de ces deux modalités d'affichage sur l'acquisition d'une cible, nous distinguons ces deux cas pour l'affichage du contenu de la table : **[Virtuelle, Physique]**

3.3 Équipement

Pour cette étude nous avons utilisé une table interactive Speechi (143cm x 80 cm); un casque HoloLens 2 (2048 x 1080 (par œil), 52° FOV) et une souris comme clicker pour démarrer les essais (le casque HoloLens 2 ne dispose pas de clicker intégré). Les logiciels pour la table comme pour le casque ont été développés en C# dans Unity. La communication entre les deux appareils s'est faite par l'intermédiaire de C# et de sockets Universal Windows Platform. Nous avons utilisé un ordinateur avec un processeur Intel Core i5 et 8Go de Ram.

3.4 Participants

Douze participants masculins âgés de 20 à 48 ans, avec un âge moyen de 28 ans (écart-type = 7.50), travaillant ou étudiant dans le domaine de l'informatique, ont pris part à l'étude. Deux d'entre eux étaient déjà familiarisés avec les casques de RA, un autre ne l'avait essayé qu'une fois et les neuf autres n'avaient aucune expérience préalable avec ces dispositifs (bien que quelques-uns d'entre eux furent familiers avec les casques de RV). Un seul utilisateur avait une expérience préalable avec une table interactive.

3.5 Mesures

Les mesures collectées concernent tout d'abord le temps nécessaire à la réalisation de chaque essai. Il correspond à la durée entre l'apparition de l'indicateur et le moment où l'utilisateur commence à prononcer le mot. Ce temps est rétrospectivement calculé par les algorithmes fournis par la HoloLens 2 : une fois le mot détecté et reconnu, HoloLens2 indique le temps correspondant au début de prononciation du mot. Par conséquent aucun lag ou erreur n'a été détecté. Le taux de succès/erreur a été acquis par la reconnaissance vocale de l'HoloLens 2. L'essai était erroné si le mot prononcé n'était pas le mot cible. Le casque avait un taux de rafraîchissement de 60FPS.

Nous avons également collecté les mouvements de la tête : l'orientation et l'amplitude maximale. L'orientation de la tête à la fin de l'essai (degrés) a été calculée en récupérant le vecteur directionnel du tracker de tête HoloLens. Le vecteur zéro était le centre de la zone frontale. L'amplitude maximale du mouvement de la tête du début à la fin de l'essai (degrés) a été calculée en récupérant le plus grand angle atteint lors de mouvements de la tête entre le début et la fin de l'essai.

Pour analyser la surface de chaque zone située dans le champ de vision de l'HoloLens à la fin de l'essai, nous avons superposé à chaque zone d'affichage une grille de 10 * 10 cellules invisibles. Nous avons ainsi pu calculer quelle cellule se trouve ou ne se trouve pas dans un objet représentant le frustum de vision du casque et en déduire la partie visible de chaque zone au moment de l'acquisition d'une cible.

Enfin, la perception de l'effort physique fut obtenue par le biais d'un questionnaire de Borg à la fin de chaque bloc (étayé par les commentaires qualitatifs des participants à la fin de l'étude) et des commentaires subjectifs furent recueillis lors d'un entretien semi-structuré avec le participant à la fin de l'étude.

3.6 Design

L'ordre et le contenu des blocs fut organisé selon un design factoriel intra-sujet, à partir de la Modalité d'affichage de la table (Virtuelle, Physique) et de la Zone Verticale (Face, Droite) (2 * 2 blocs). Chaque bloc contient 3 répétitions des 9 positions de cible possibles, et ce dans les 2 Sens de la Transition (Depuis la table, Vers la table) possibles (+ 8 essais d'entraînement), soit au total 216 essais par participant.

3.7 Procédure

Après avoir donné son consentement éclairé et répondu à un questionnaire démographique préalable à l'étude, le participant a mis le casque et s'est placé devant la table. La hauteur de la table était ajustée à la taille de chaque participant, de sorte que la distance entre leur tête et la table soit à peu près la même. L'expérimentation durait de 35 à 40 mn pour chaque participant. Tout le matériel utilisé était désinfecté avant chaque participant afin de respecter les consignes anti-COVID19. Les participants ont été invités à retirer leur masque afin de ne pas bloquer leur champ visuel inférieur, mais la pièce était ventilée et l'expérimentateur a conservé son masque en permanence.

3.8 Analyse des données

Nous avons choisi de nous appuyer sur des techniques d'estimation avec des intervalles de confiance à 95 % et une analyse des ratios intra-sujets, tel que recommandé par l'APA [10] et suivant les conventions récentes dans la communauté IHM (une liste non exhaustive d'études CHI et VIS sans valeur p se trouve dans [2]).

Comme l'indique [3], la communauté CHI s'efforce de mettre l'accent sur la taille des effets et de s'éloigner des valeurs p : les tailles d'effet permettent une analyse plus nuancée des résultats, plutôt qu'une inférence

dichotomique basée sur les valeurs p. Dans le cadre de cette approche, le ratio est une mesure intra-sujet qui exprime la taille de l'effet (comparaison par paire) et est calculé entre chacune des moyennes géométriques.

Tous les IC sont des intervalles de confiance à 95 % par bootstrapping BCa, hormis pour les mesures temporelles, qui étaient adaptées au T-Test. Pour le lecteur plus habitué à interpréter les valeurs p, nos résultats peuvent être lus en comparant l'espacement de nos IC avec l'espacement habituel des valeurs p comme indiqué par Krzywinski et Altman [18]. Les scripts utilisés pour calculer la moyenne géométrique et les intervalles de confiance ont été utilisés dans [36] et sont disponibles en ligne [9].

4 RESULTATS

Au cours des 2592 essais d'acquisition de cible réalisés par les 12 participants, la reconnaissance vocale, censée valider la fin de l'essai par la reconnaissance du mot énoncé, a été mise en défaut à plusieurs reprises. Par conséquent, les mesures temporelles pour un total de 129 essais (4,97%) ont dû être écartées et remplacées par la médiane de leur condition respective. Les mouvements de la tête et autres données non liées au temps de ces essais ont été conservés sans ajustement. Une analyse a posteriori des résultats avec et sans cette correction n'a pas fait apparaître d'effet dans les conclusions rapportées ci-dessous.

La section suivante présente tout d'abord les résultats en termes de temps d'acquisition de la cible dans les différentes conditions définies, puis l'analyse des mesures d'inclinaison de la tête, du contenu du champ de vision du casque, et enfin les mesures subjectives de fatigue, préférence et autres commentaires libres.

4.1 Analyse des temps d'acquisition de la cible

Chaque essai était mesuré depuis l'affichage de l'indication de la position du mot cible, jusqu'au tout début de sa lecture à voix haute par le participant : un post traitement de reconnaissance vocale permettait en effet de reconnaître le bon mot une fois lu et de rendre le temps constaté au début de son énonciation. Les sous-sections suivantes présentent les temps moyens d'acquisition visuelle d'une cible en fonction des différents facteurs étudiés.

4.1.1 Temps par zones (Table, Face, Droite) et positions de cible (9 par zones)

L'étude des temps moyens d'acquisition de cible par zone révèle des temps systématiquement plus longs avec la zone de droite qu'avec la zone d'en face. En effet, les acquisitions visuelles depuis et vers la zone d'en face prennent en moyenne 1063ms [95% CIs : 1014ms, 1115ms] contre 1154ms, [95% CIs : 1096ms, 1216ms] avec la zone de droite (voir Figure 3-gauche), soit une différence moyenne de 91ms. Une analyse du ratio intra-sujet indique que le temps requis pour la zone de droite est environ 8.5% plus long que pour la zone d'en face [*Depuis et vers la droite / Depuis et vers en face*, ratio : 1.085 [95% IC : 1.047, 1.125] (voir Figure 3-droite) et ce quel que soit le sens de la transition (depuis ou vers la zone).



Figure 3. Gauche : durée moyenne des essais par Zone Verticale. Droite : Ratio sur la durée moyenne des essais entre la zone de droite et la zone d'en face (95% ICs).

Une analyse plus détaillée des temps moyens pour les 9 positions de cible possibles de chaque zone suggère d'autres différences moins marquées. La Figure 4 illustre la durée moyenne des essais par position de cible et par zone. La Figure 4-haut illustre notamment que l'acquisition d'une cible placée en haut des zones Face et Droite semble prendre plus de temps que l'acquisition d'une cible placée en partie inférieure de ces mêmes zones, plus proches du point de départ au centre de la table (exception faite des cibles Face-Bas-Gauche qui restent difficile à atteindre en provenance de la table).

Face			Droite		
1 184ms	1 064ms	1 162ms	1 238ms	1 208ms	1 263ms
1 143ms	972ms	1 045ms	1 179ms	1 085ms	1 156ms
1 158ms	953ms	1 037ms	1 182ms	1 177ms	1 217ms
1 009ms	955ms	1 030ms	1 201ms	1 082ms	1 045ms
1 046ms	983ms	1 047ms	1 184ms	1 056ms	1 021ms
1 130ms	1 111ms	1 154ms	1 268ms	1 164ms	1 094ms
Table (depuis Face)			Table (depuis Droite)		

Figure 4. Durée moyenne des essais (ms) par Zone x Position de la cible.

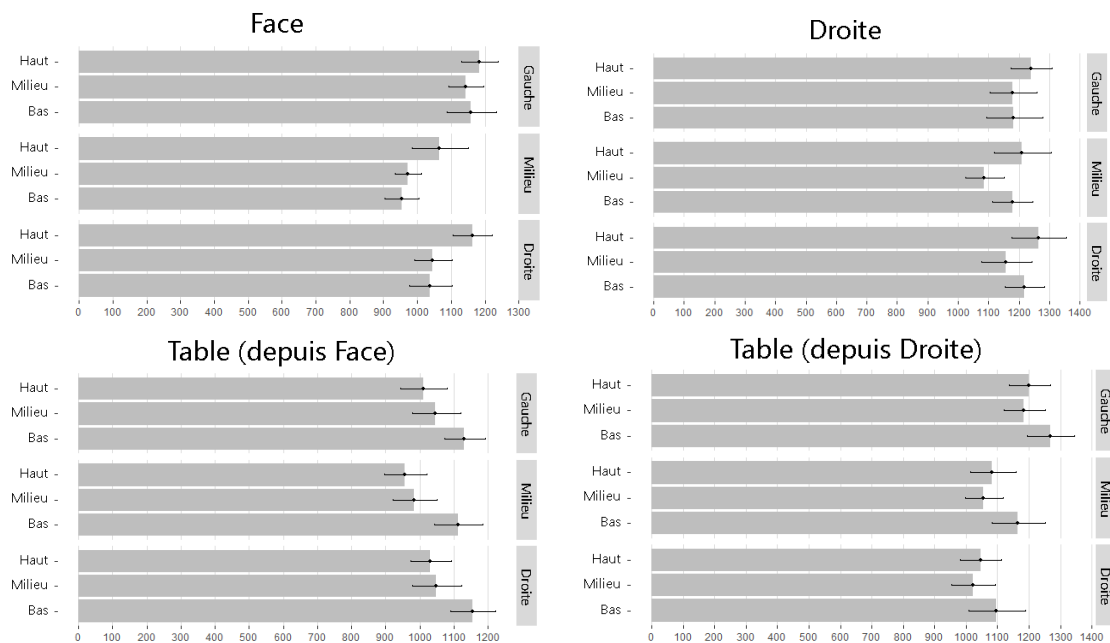


Figure 5. Durée moyenne de l'essai (ms) par Zone x Ligne x Colonne (95% ICs).

Concernant l'acquisition d'une cible sur la table (Figure 4-bas), il apparaît aussi que les temps semblent globalement supérieurs pour les positions les plus éloignées du point de départ : ainsi, il est plus long d'atteindre une cible sur le bord de la table le plus proche de l'utilisateur en partant de la zone Face (voir Figure 4-“Table from Front”), ou sur le bord gauche de la table en partant de la zone Droite (voir Figure 4 - “Table from Right”). La Figure 5 permet de visualiser ces résultats selon la position de la cible (en ligne et colonne par rapport à la grille de 3x3) et la zone d'affichage, avec les barres d'erreurs.

4.1.2 Temps par modalités d'affichage sur la table (physique vs. virtuel)

L'analyse de la modalité d'affichage sur la table, toutes zones confondues (Face, Droite) révèle des temps moyens systématiquement plus longs avec un affichage virtuel sur la table qu'avec un affichage physique. Les acquisitions de cibles avec un affichage virtuel pour la table prennent en moyenne 1196ms [95% ICs : 1137ms, 1257ms] contre 1026ms [95% ICs : 971ms, 1085ms] avec du contenu uniquement physique (voir Figure 6-gauche), soit une différence estimée de 169ms. L'analyse du ratio intra-sujet (voir Figure 6-droite) confirme nettement cette différence et établit qu'un affichage virtuel induit un temps d'acquisition 16,4% supérieur à celui d'un affichage physique (*affichage virtuel / affichage physique*, ratio : 1.164 [95% ICs : 1.106, 1.225]).



Figure 6. Gauche : Durée de l'essai (ms) par Modalité d'affichage de la table. Droite : Ratio par paire sur la durée de l'essai par Modalité d'affichage de la table (95% ICs).

Ce gain de temps moyen se retrouve quel que soit le sens. En effet, pour acquérir une cible virtuelle située sur une des zones verticales, un affichage virtuel de la consigne sur la table induit en moyenne 14% de temps de plus que l'utilisation d'un affichage physique pour la consigne (*Sens = Depuis la table*, ratio *affichage virtuel / affichage physique* = 1.140 [95% IC : 1.064, 1.223]) (voir Figure 7). Dans le sens inverse, si la consigne est affichée virtuellement sur une des zones verticales, acquérir une cible représentée par un affichage virtuel sur la table requiert près de 19% de temps de plus que si la cible était présentée physiquement sur la table (*Sens = Vers la table*, ratio *affichage virtuel / affichage physique* : 1.189 [95% IC : 1.128, 1.254]).

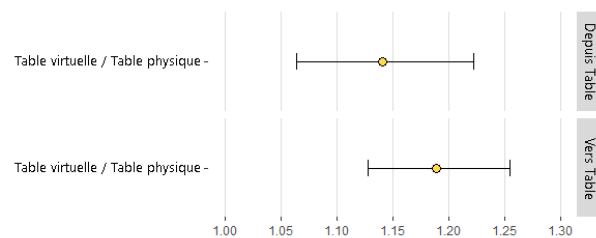


Figure 7. Ratio par paire sur la durée de l'essai par Modalité d'affichage de la table x Sens (95% ICs).

En affinant cette analyse par zone verticale (Face, Droite) et sens (depuis / vers la table), on retrouve le même impact clair et systématique de la modalité d'affichage. La Figure 8 permet de l'illustrer en présentant les temps moyens d'acquisition visuelle en fonction de la modalité d'affichage de la table, de la zone d'arrivée, et de la zone de départ. Ces résultats sont vrais quelle que soit la position de la cible dans la zone d'arrivée.

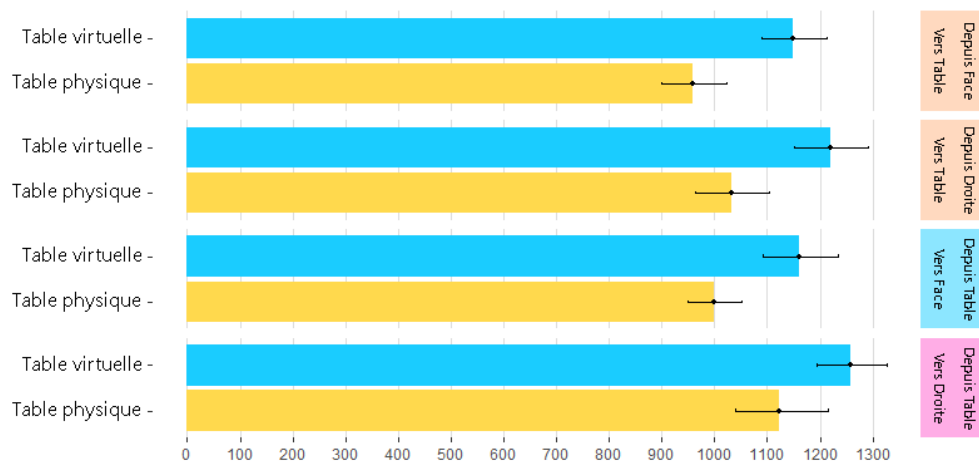


Figure 8. Durée de l'essai (ms) par zone de départ x zone d'arrivée x mode d'affichage de la table (95% ICs).

Pour les acquisitions visuelles dans les zones verticales (toujours virtuelles), nous pensons que le gain de temps observé dans le cas d'un affichage physique de la consigne sur la table est probablement lié au temps nécessaire aux participants pour percevoir et interpréter l'indicateur (schéma indiquant la position de la cible à atteindre) et démarrer le mouvement de la tête permettant l'acquisition visuelle de la cible. En effet, si l'indicateur est virtuel, l'utilisateur le perdra plus vite de vue en initiant le mouvement de tête vers le haut ou la droite, étant données les limites du champ de vision du casque.

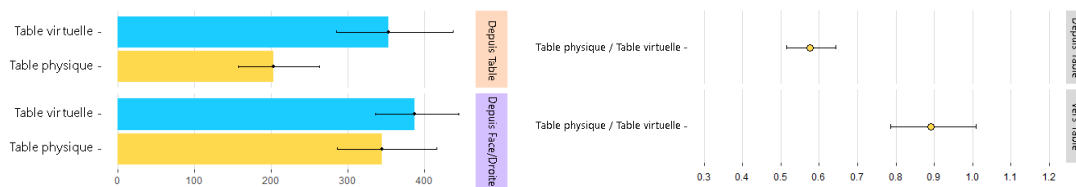


Figure 9. Gauche: Temps moyen (ms) pour initier le mouvement de tête vers la cible, par Sens x Modalité d'affichage de la table. Droite : Ratio sur le temps moyen pour initier le mouvement de tête vers la cible entre les modalités d'affichage de la table (95% ICs).

Pour confirmer cette hypothèse, nous avons déterminé, via l'analyse des mouvements de la tête au cours de multiples essais, qu'un mouvement supérieur à 2,5 degrés indiquait systématiquement le début du mouvement intentionnel vers la cible. Par conséquent, en faisant la moyenne du temps pris à chaque essai pour dépasser cette amplitude, nous pouvons observer un temps moyen de 203ms [95 % ICs : 156ms, 263ms] pour initier le mouvement vers les zones verticales avec un affichage Physique sur la table contre 353ms [95 % ICs : 285ms, 437ms] avec un affichage Virtuel sur la table (voir Figure 9- gauche). L'analyse du ratio intra-sujet (voir Figure 9- droite) confirme nettement cette hypothèse en établissant que l'initiation du mouvement vers les zones verticales avec un affichage Physique sur la table demande environ la moitié du temps nécessaire avec un affichage Virtuel sur la table (*affichage physique / affichage virtuel avec Sens = Depuis la table, ratio : 0,575 [95 % ICs : 0,514, 0,653]*).

À l'inverse, le temps nécessaire à l'initiation du mouvement vers la table depuis les zones verticales virtuelles ne fait pas apparaître de différence flagrante en fonction de la modalité d'affichage (intersection importante des intervalles de confiance, Figure 9– gauche). Ce résultat confirme que la différence globale entre Virtuelle et Physique quand on part d'en Face ou Droite vers la table n'est pas dû au début du mouvement, mais à la fin du mouvement sur la table.

4.2 Mouvements de la tête

Outre les mesures temporelles, nous avons également enregistré les mouvements de la tête effectués par les participants au cours de chaque essai. Nous avons calculé l'amplitude maximale du mouvement effectué par rapport à son orientation initiale au début de l'essai. Nous comparons les résultats de ces mesures par zones, par position de la cible, et par modalité d'affichage de la table.

4.2.1 Mouvements de la tête par zones (Table, Face, Droite)

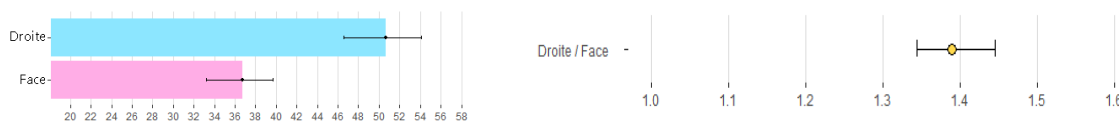


Figure 10. Gauche : Amplitude max. de mouvement de la tête par Zone Verticale. Droite : Ratio sur l'amplitude max. de mouvement de la tête par Zone Verticale (95% ICs).

Une analyse des mouvements moyens effectués par zone révèle une différence entre la zone d'en face et celle de droite, du même type que celle trouvée pour les mesures temporelles, avec des mouvements plus amples pour la zone de droite que pour celle d'en face. La zone droite induit une amplitude moyenne de mouvement de 50.68° [95% ICs : 46.57°, 54.09°] contre 36.73° [95% ICs : 33.19°, 39.72°] en face (voir Figure 10-gauche). La différence observée ici est cependant plus importante que la différence observée avec les temps et traduit une amplitude moyenne de 39% plus grande à Droite qu'en Face (*Depuis et vers la droite / Depuis et vers en face*, ratio : 1.389 [95% IC : 1.344, 1.445]), comme illustré sur la Figure 10-droite.

4.2.2 Mouvements de la tête par modalité d'affichage sur la table (physique vs. virtuel)

L'analyse de la modalité d'affichage sur les mouvements de la tête révèle aussi des différences parfois marquées. L'acquisition d'une cible lors de l'utilisation d'un affichage physique sur la table demande des amplitudes moyennes de 41.60° [95% ICs : 37.56°, 44.86°] contre 45.71° [95% ICs : 41.54°, 49.14°] lorsque tout est virtuel, soit une différence d'environ 4,11° (voir Figure 11-gauche). D'après l'analyse du ratio intra-sujet, on trouve ainsi des amplitudes d'environ 6,36% supérieures avec un affichage virtuel de la table (*affichage virtuel / affichage physique*, ratio : 1.063 [95% ICs : 1.037, 1.091]), comme illustré sur la Figure 11-droite.



Figure 11. Gauche : Amplitude max. de mouvement de la tête (degrés) par Modalité d'affichage sur table. Droite : Ratio sur l'amplitude max. du mouvement de la tête (degrés) par Modalité d'affichage de la table (95% ICs).

Toutefois, contrairement aux mesures temporelles, cette différence ne se retrouve pas pour les deux sens de déplacement du regard. L'amplitude aura été réduite par l'affichage physique de la table uniquement pour les acquisitions sur la table et non pour les acquisitions au départ de la table et visant une cible placée sur une des zones verticales virtuelles. En effet, pour une tâche d'acquisition d'une cible sur la table, partir de la zone frontale induit des amplitudes moyennes de 29.99° [95% ICs : 22.85°, 33.68°] pour un affichage physique, contre 39.02° [95% ICs : 35.05°, 42.16°] pour un affichage virtuel (voir Figure 12).

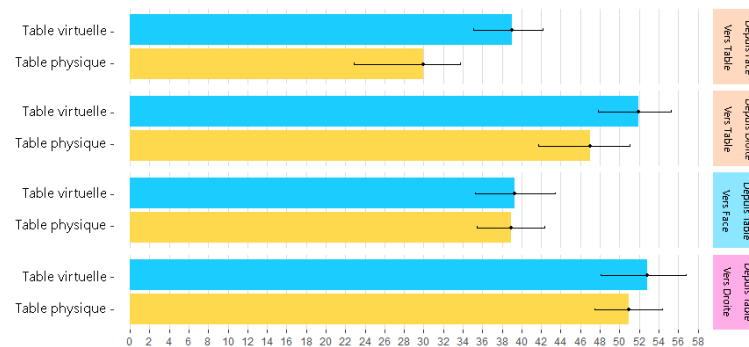


Figure 12. Amplitude max. de mouvement de la tête (degrés) par Zone de départ x Modalité d'affichage de la table (95% Cis).

Le ratio intra-sujet entre les deux modalités d'affichage pour une acquisition depuis la zone frontale vers la table, confirme très nettement ce résultat et montre une différence très importante d'environ 64,7% (*affichage virtuel / affichage physique avec Zone de départ = Face*, ratio : 1.647 [95 % ICs : 1.184, 3.423]), comme illustré sur la Figure 13. La zone de droite quant à elle induit des amplitudes moyennes de 46.64° [95% ICs : 41.90°, 50.38°] pour un affichage physique contre 51.83° [95% ICs : 48.11°, 55.07°] pour un affichage virtuel. Le ratio intra-sujet confirme là aussi très nettement ce résultat en établissant qu'un affichage virtuel induit une amplitude de la tête de 10% supérieure à celle produite avec un affichage physique. (*Affichage virtuel / affichage physique avec zone de départ = Right*, 1.132 [95% ICs : 1.065, 1.314])

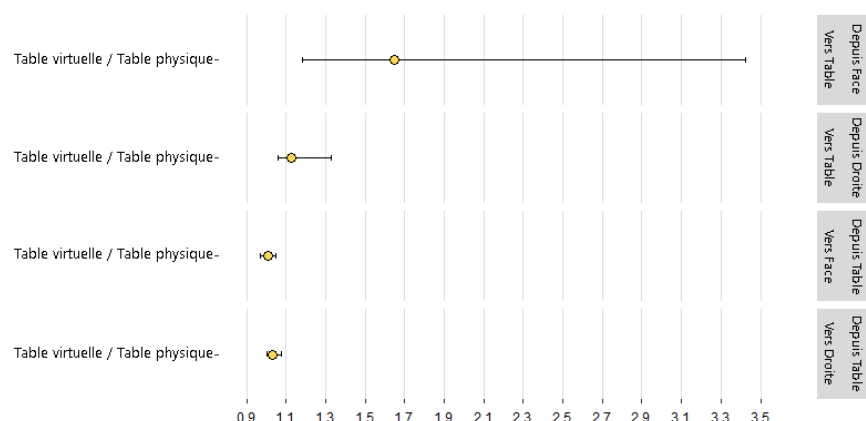


Figure 13. Ratio de l'amplitude max. de mouvement de la tête (degrés) par Zone de départ x Modalité d'affichage de la table (95% Cis).

Il semble important de noter ici qu'un participant en particulier a présenté des différences extrêmes par rapport aux autres, et que ses résultats sont à l'origine des larges intervalles d'erreurs. En excluant ce participant, la différence entre un affichage virtuel et un affichage physique de table pour une acquisition depuis la zone frontale tombe à 20.4% (*affichage virtuel / affichage physique avec Zone de départ = Face, sans le participant n°4, ratio : 1.2044 [95 % ICs : 1.1582, 1.2971]*), ce qui reste conséquent et supérieur à toutes les autres conditions.

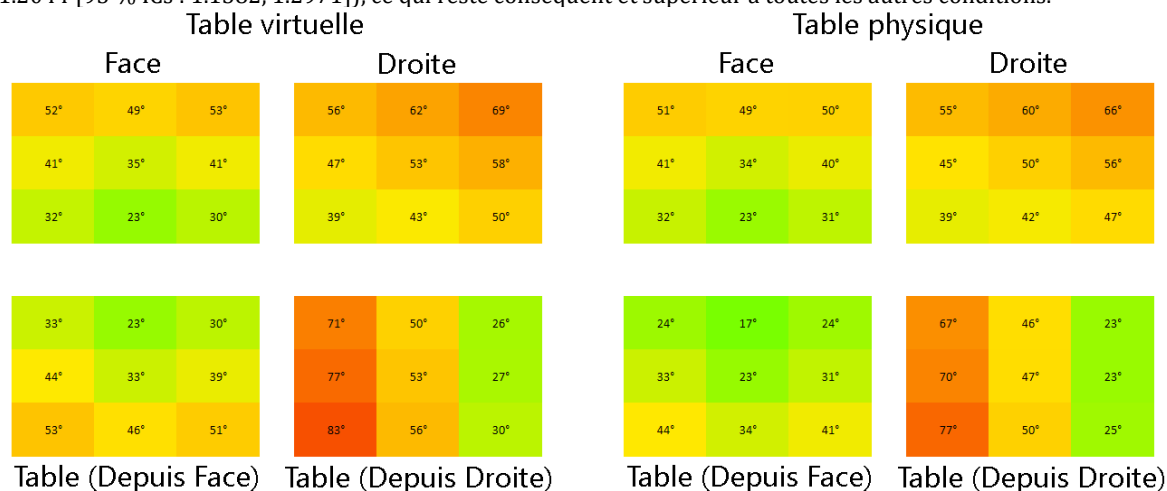


Figure 14. Amplitude max. de mouvement de la tête (degrés) par Modalité d'affichage de la table x Zone x Position de la cible.

Enfin, le détail des amplitudes moyennes par position de cible (voir Figure 14) dévoile quelques surprises par rapport aux différences observées avec les valeurs temporelles. On retrouve ici aussi des mouvements globalement plus amples pour les positions les plus éloignées ainsi que l'effet généralisé de la modalité d'affichage dans le cas des acquisitions vers la table. Toutefois, les mouvements pour l'acquisition d'une cible sur la zone de droite depuis

la table et pour l'acquisition d'une cible sur la table depuis la droite ne sont pas symétriques. L'un semble être effectué en diagonal, l'autre à l'horizontal.

4.3 Champ de vision du casque à la fin d'une acquisition visuelle

Nous présentons maintenant les mesures qui nous permettent de savoir quel était le champ de vision du casque pendant et à la fin d'un essai : la présence des cibles physique dans le champ de vision du casque, et la surface des zones d'affichage visibles dans le champ de vision du casque. Ces mesures nous permettent de mieux comprendre comment l'environnement physique-virtuel est perçu et quelles parties sont visibles à un moment donné.

4.3.1 Présence de la cible dans le champ de vision du casque pour un affichage Physique

Indépendant du champ de vision réduit du casque, l'affichage physique de la table a permis des situations où les participants pouvaient atteindre visuellement la cible (affichée physiquement sur la table) sans qu'elle ne soit contenue dans le champ de vision (FoV) du casque (en regardant sous le casque par exemple). En observant la fréquence à laquelle la cible est contenue dans ce FoV à la fin de l'essai, on observe en effet des fréquences inférieures à 100% dans le cas d'une cible physique sur la table. Pour la section de la table la plus proche de l'utilisateur, la cible serait contenue dans le FoV du casque à la fin de l'essai dans 71,29% [95 % ICs : 49,07 %, 85,18 %] des cas, pour la section intermédiaire, dans 81.48% [95% CIs : 56.48%, 91.66%] des cas, et pour la section supérieure, dans 87.96% [95% CIs : 55.55%, 97.22%] des cas (voir Figure 15-gauche). Les larges intervalles de confiance sont une fois de plus dus au comportement extrême d'un participant. La Figure 15-droite permet de visualiser ces intervalles en excluant ce participant. Les différences sont alors marquées en fonction de la position de la cible sur la table : il est bien plus fréquent que l'utilisateur visualise la cible physique sur la table sans qu'elle soit dans le FoV du casque lorsque cette cible est sur le bord inférieur de la table (le plus proche de lui) qu'au milieu ou en haut. Dans ces situations il est hautement probable que le regard du participant passe en fait sous les bords du casque.

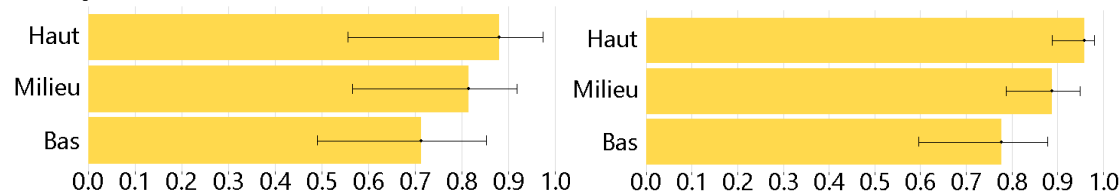


Figure 15. Gauche : Pourcentage de présence de la cible dans le FoV du casque à la fin de l'essai par section horizontale de la zone, pour une cible en physique, sur la table. Droite : même résultats, en excluant le participant n°4 (95% Cis).

4.3.2 Surface des zones d'affichage visibles dans le champ de vision du casque

En découpant chaque zone en 100 sous-zones et en détectant la présence de chaque sous-zone dans le champ de vision du casque au moment de la lecture du mot cible, nous avons pu obtenir des cartes thermiques détaillées de l'espace de chaque zone se trouvant dans ce champ de vision à la fin de chaque essai. La Figure 16 représente la surface couverte par le champ de vision (FoV) du casque, lorsqu'un participant regarde au centre de la zone frontale. Les figures suivantes illustrent la position de ce FOV à la fin d'un essai en fonction de la Modalité d'affichage de la table et de la position de la cible.

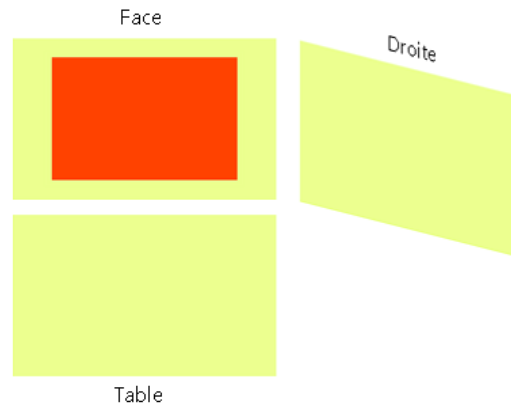


Figure 16. Champ de vision pour le contenu virtuel lorsque l'axe de la tête s'aligne sur le centre de la zone frontale

Les analyses précédentes ayant montré qu'un affichage physique de la table entraînait des mouvements légèrement réduits, ainsi qu'une plus faible fréquence d'apparition de la cible dans le champ de vision du casque, nous avons plus particulièrement observé l'impact de ces effets sur le contenu du FoV pour les cibles se situant dans la ligne basse de la table (section ayant montré le plus grand impact de la modalité d'affichage). La Figure 17 se concentre sur les acquisitions de telles cibles sur la table depuis la zone d'en Face. On observe notamment qu'une représentation physique de la cible à acquérir sur la table (Figure 17 -droite) permet à de conserver une plus grande visibilité des zones verticales, principalement de la zone frontale que lorsque la cible à acquérir est représentée sous forme virtuelle (Figure 17 -gauche).

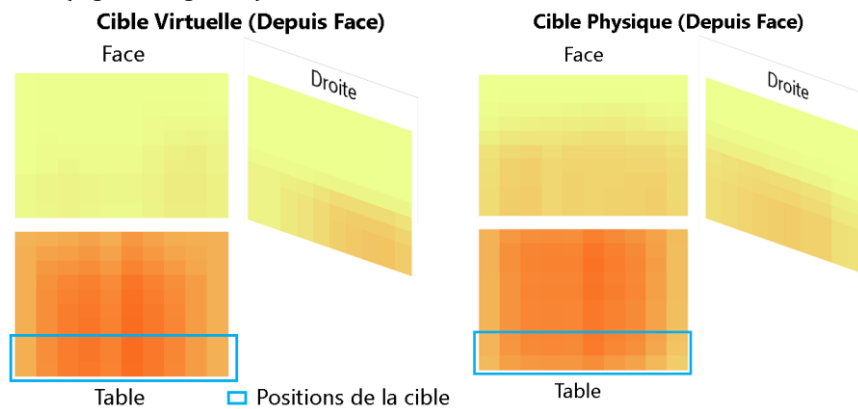


Figure 17. Carte thermique de la couverture du FOV AR, pour une cible virtuelle (gauche) ou pour une cible physique (droite) sur la rangée inférieure de la table, depuis la zone d'en Face.

La Figure 18 se concentre sur les acquisitions depuis la zone de Droite. On observe également une meilleure visibilité de la zone verticale lorsque la cible à acquérir est représentée physiquement (Figure 18-droite) que virtuellement (Figure 18-gauche).

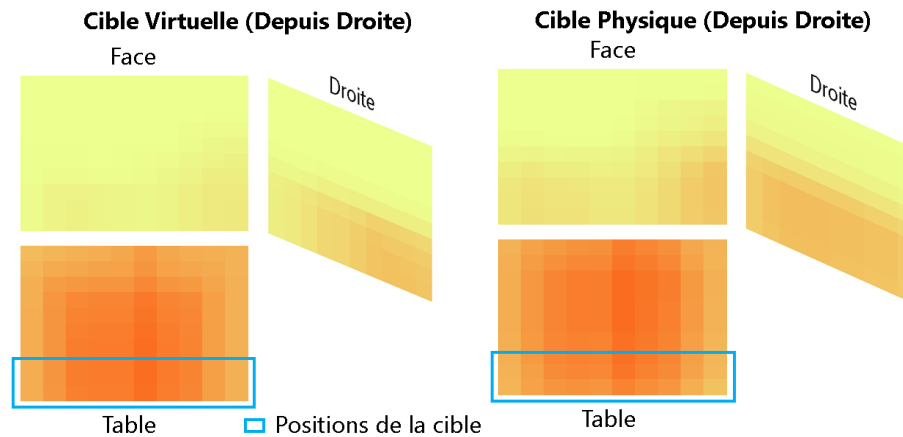


Figure 18. Carte thermique de la couverture du FOV du casque, pour une cible virtuelle (gauche) ou une cible physique (droite) sur la rangée inférieure de la table, depuis la zone de Droite.

Enfin, les figures Figure 19 et Figure 20 illustrent le peu de mouvement nécessaire pour perdre de vue complètement le contenu augmenté de la table, lorsque le regard s'en éloigne vers les zones verticales : dès l'acquisition de cibles placées dans la rangée centrale de la zone frontale, aucune partie de la table demeure dans le champs de vision (Figure 19-droite) contrairement à ce que l'on observe pour une cible situé dans la rangée inférieure de cette zone (Figure 19-gauche). Ceci est aussi observé pour les cibles situées sur la zone de droite (Figure 20)

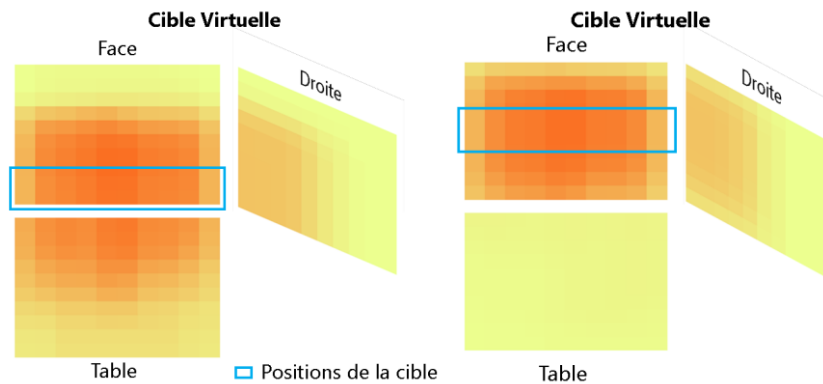


Figure 19. Carte thermique de la couverture du FOV AR, pour une cible sur la rangée inférieure (gauche), ou centrale (droite) de la zone d'en Face.

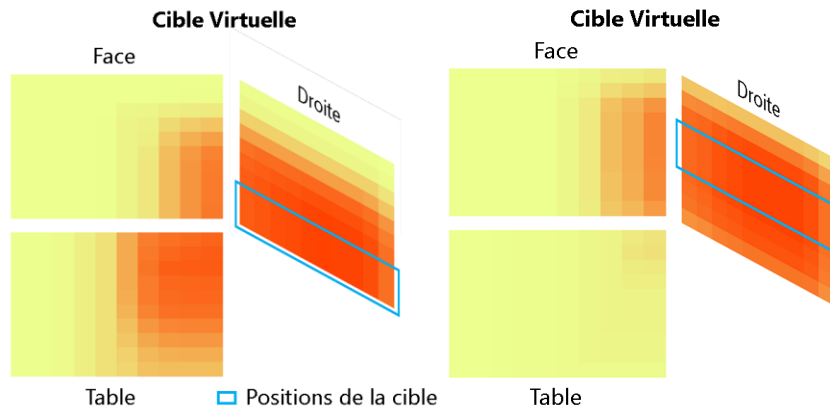


Figure 20. Carte thermique de la couverture du FOV AR, pour une cible sur la rangée inférieure (gauche) ou centrale (droite) de la zone de Droite.

4.4 Effet d'apprentissage

Pour tous les résultats présentés dans toutes les sections ci-dessus, les mesures n'ont pas pu mettre en évidence une différence claire entre les trois répétitions. Bien que les sessions de formation aient été relativement courtes et les participants peu voire pas initiés à cet environnement combiné, aucun effet d'apprentissage n'a pu être identifié.

4.5 Mesures qualitatives

4.5.1 Effort

Les résultats des questionnaires Borg n'ont pas permis de mettre formellement en évidence une différence dans l'effort fourni entre les différentes conditions. Nous pouvons tout de même y voir les tendances attendues, avec d'une part un effort estimé à 11.42 [95% ICs : 10.21, 12.79] pour un affichage virtuel, et 10.99 [95% ICs : 9.62, 12.17] pour un affichage physique (voir Figure 34) ; d'autre part un effort estimé à 10.88 [95% ICs : 9.63, 12.13] pour une cible en Face contre 11.54 [95% ICs : 10.30, 13] pour une cible à Droite. Ces tendances sont confirmées par les commentaires subjectifs post-essais, les participants ayant majoritairement indiqué une préférence pour l'affichage physique sur la table, ainsi que pour les acquisitions vers le haut ou le bas, comparées à l'obligation de tourner la tête sur le côté. Nous avons pu récolter plusieurs commentaires tels que : "Je préfère en face, car sur le côté ou en bas, ça fait mal...", ou encore "J'ai dû me casser le cou pour regarder en bas de la table...". Certains participants ont exprimé explicitement et de manière positive le fait de pouvoir moins baisser la tête avec l'affichage physique de la table qu'avec un affichage virtuelle aligné sur la table. Pour rappel, l'étude des amplitudes de mouvements par participant révèle également que la majorité des participants a adopté un comportement différent.

4.5.2 Préférence

Lorsque questionnés directement, sept participants sur 12 ont exprimé une préférence pour l'affichage physique de la table, avec des commentaires tels que : "Une expérience plus fluide", "Je pouvais commencer à lire le mot en périphérie, avant même de le regarder pleinement", ou encore « J'étais moins perdu avec la table physique, je pouvais déjà voir où je devais regarder avant d'y aller. ».

Les participants n'ont pas exprimé de difficulté supplémentaire pour lire les éléments dans les espaces virtuels par rapport à leur lecture sur l'écran physique de la table. Quelques participants ont toutefois noté une différence de couleurs lorsqu'affichées avec le casque, mais ont ajouté que cela n'avait pas d'incidence sur la facilité à lire les mots.

5 DISCUSSION

5.1 Recommandations pour la conception d'interfaces combinant une table interactive et de la réalité mixte

Sur la base des connaissances acquises dans cette expérimentation, nous pouvons tirer des recommandations pour la conception d'interfaces combinant une table interactive et de la réalité mixte.

- 1) *Exploitation des zones virtuelles selon leur facilité d'accès* : Des zones sont plus difficilement atteignables, telles que le bord de la table le plus proche de l'utilisateur ou les parties hautes des zones verticales virtuelles, tandis que d'autres requièrent moins de temps et d'effort. Repenser l'utilisation de ces zones pourrait leur conférer des usages dédiés. Nous pensons par exemple que la partie de la table proche de l'utilisateur pourrait être réservée à des interactions tactiles non visuelles, exploitant par exemple les principes de MarkPad [17]; les parties hautes pourraient servir à n'afficher que des informations nécessitant une attention prolongée tandis que les parties les plus accessibles seraient plus favorables à des accès ponctuels et brefs tels que des légendes, des menus, etc. Des expérimentations plus avancées devront être conduites pour illustrer ces perspectives et étayer ces hypothèses.
- 2) *Utilisation de l'affichage physique de la table* : Nous avons observé que lorsque l'affichage de la consigne sur la table est physique, nos résultats montrent que la cible physique peut être vue en dehors du casque (probablement en portant le regard en dessous du casque), ce qui explique aussi le gain de temps observé pour atteindre une cible physique par rapport à une cible virtuelle sur la table. L'affichage physique de la table peut donc être utilisé en parallèle de l'affichage virtuel, pour par exemple afficher des informations et notifications périphériques.
- 3) *Utilisation combinée des zones d'affichages virtuelles et physique* : nos cartes thermiques montrent que selon la position de la cible, une ou plusieurs zones virtuelles/physiques sont partiellement visibles en même temps dans le champ de vision du casque. Cela permet de mieux penser la disposition du contenu virtuel sur les zones verticales et leur combinaison avec le contenu de la table. Par exemple, lorsque l'on regarde la partie basse de la zone d'en Face, on voit la partie haute de la table. On peut alors penser à disposer des informations liées, comme par exemple une information contextuelle en Face qui vienne augmenter des points d'intérêt situés sur la partie haute de la table. On peut aussi penser à augmenter le haut de la table avec du contenu virtuel pendant que l'utilisateur regarde le bas de la zone d'en Face.

5.2 Limites et travaux futurs

Notre étude a exploré une tâche d'acquisition de cibles, se concentrant sur les données temporelles et le mouvement de la tête. Il conviendra donc d'étendre cette étude avec une tâche plus écologique, nécessitant de chercher des

informations dans les différentes zones de façon moins séquentielle. Nous pourrions alors relever d'autres mesures, telles l'impact de la complexité ou densité de l'information, l'organisation des données dans l'espace, etc.

De même, notre étude a porté sur un arrangement d'écrans défini, avec une table physique horizontale et des écrans virtuels verticaux. Il serait alors intéressant d'explorer d'abord l'impact de l'orientation des écrans virtuels, qui pourraient par exemple être orientés vers l'utilisateur. Par la suite, nous pourrions étudier la situation inverse, avec un écran physique en face et des écrans virtuels à l'horizontale ou autour.

D'autre part, bien que les tables interactives et la réalité augmentée soient reconnues comme support efficace à un travail collaboratif d'analyse de données [16][20][23], nos travaux se limitent à l'étude d'un seul utilisateur interagissant avec la table et les surfaces d'affichage virtuelles. Il serait particulièrement intéressant d'étendre nos travaux à une étude multi-utilisateurs afin de vérifier si les surfaces d'affichages virtuelles placées sur les bords de la table ne nuiraient pas à la collaboration, par exemple, en occultant les autres utilisateurs, et inversement si la présence de collaborateurs autour de la table ne nuit pas à la perception des informations sur les surfaces d'affichage virtuelles. Dans ce contexte, une solution pourrait être de déformer les surfaces d'affichage virtuelles autour des autres utilisateurs tel que proposé par Niyanov et al. [29][29].

De plus, dans un contexte multi-utilisateurs, la position des utilisateurs autour de la table peut varier au cours du temps. Il serait donc intéressant d'étendre nos travaux en en prenant en compte plusieurs positions autour de la table (sur le bord court de la table, sur le bord long, mais à deux utilisateurs, pour ne pas être centré, etc.) afin d'étudier l'impact de ces positions sur l'acquisition visuelle.

Enfin, après avoir appliqué ces résultats à la conception d'un arrangement visuel d'interfaces, nous souhaitons explorer les conséquences de cette combinaison de table et réalité augmentée du point de vue de l'interaction en entrée : il serait alors pertinent de penser la conception de techniques d'interaction adaptées pour sélectionner une cible dans ce type d'environnement. Ces techniques pourraient tirer profit des zones peu visibles pour interagir en entrée, tirer profit de la présence de la table, ou tenir compte des zones facilement visibles.

6 CONCLUSION

Dans ce papier nous avons étudié l'impact de la combinaison de zones d'affichage virtuelles verticales avec un casque de réalité augmentée, autour d'une table interactive horizontale. Pour cela, nous avons conduit une étude où les participants doivent démarrer soit de la table soit d'une zone virtuelle pour aller chercher visuellement une cible dans l'autre zone. Nous avons considéré le cas où l'affichage sur la table se fait physiquement au moyen de l'écran physique ou bien en superposant à la table un affichage virtuel produit avec le casque. Nos résultats montrent qu'il est plus rapide d'acquérir des cibles virtuelles en face que sur le côté. L'utilisation de l'affichage virtuel sur la table ralentit le démarrage du geste et l'acquisition visuelle par rapport à un affichage physique sur la table. Ces résultats sont concordants avec les amplitudes de mouvement de la tête observées, avec des mouvements plus amples pour la zone de droite que d'en face, et pour un affichage virtuel que physique sur la table. Notre analyse du champ de vision du casque révèle que les cibles physiques sur la table peuvent être acquises sans qu'elles soient contenues dans le champ de vision du casque. A partir de ces résultats, nous déduisons des recommandations pour la conception d'interfaces dans un tel environnement.

REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été menés avec le soutien du Gouvernement Français dans le cadre du programme Territoire d'Innovation, une action du Grand Plan d'Investissement adossé à la 3ème vague du Programme d'investissement d'Avenir (PIA 3), de Toulouse Métropole et de l'opération neOCampus de l'Université Toulouse III Paul Sabatier.

REFERENCES

- [1] Christopher Andrews, Alex Endert, and Chris North. 2010. Space to think: large high-resolution displays for sensemaking. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '10)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 55–64. DOI:<https://doi.org/10.1145/1753326.1753336>
- [2] Bad Stats: Not what it Seems. Retrieved January 3, 2021 from <https://www.aviz.fr/badstats#papers>
- [3] Bad Stats: Not what it Seems. Retrieved January 3, 2021 from <https://www.aviz.fr/badstats#sece>
- [4] M. Beaudouin-Lafon et al., "Multisurface Interaction in the WILD Room," in *Computer*, vol. 45, no. 4, pp. 48-56, April 2012, doi: 10.1109/MC.2012.110.
- [5] Berki, Borbála. "Desktop VR as a virtual workspace: a cognitive aspect." *Acta Polytechnica Hungarica* 16.2 (2019): 219-231.
- [6] Simon Butscher, Sebastian Hubenschmid, Jens Müller, Johannes Fuchs, and Harald Reiterer. 2018. Clusters, Trends, and Outliers: How Immersive Technologies Can Facilitate the Collaborative Analysis of Multidimensional Data. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '18)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Paper 90, 1–12. DOI:<https://doi.org/10.1145/3173574.3173664>
- [7] Florent Cabric, Emmanuel Dubois and Marcos Serrano. A Predictive Performance Model for Immersive Interactions in Mixed Reality (2021). In *ISMAR 2021*, to appear.
- [8] M. Cavallo, M. Dholakia, M. Havlena, K. Ocheltree and M. Podlaseck, "Dataspace: A Reconfigurable Hybrid Reality Environment for Collaborative Information Analysis," 2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR), 2019, pp. 145-153, doi: 10.1109/VR.2019.8797733.
- [9] Data Analysis example with data from a real study. Retrieved May 2, 2020 from <https://aviz.fr/ci/>
- [10] Decleene KE, Fogo J. Publication Manual of the American Psychological Association. *Occup Ther Health Care*. 2012 Jan;26(1):90-2. doi: 10.3109/07380577.2011.629024. PMID: 23899111.
- [11] Barrett M. Ens, Rory Finnegan, and Pourang P. Irani. 2014. The personal cockpit: a spatial interface for effective task switching on head-worn displays. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '14)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 3171–3180. DOI:<https://doi.org/10.1145/2556288.2557058>
- [12] Barrett Ens, Eyal Ofek, Neil Bruce, and Pourang Irani. 2015. Spatial Constancy of Surface-Embedded Layouts across Multiple Environments. In *Proceedings of the 3rd ACM Symposium on Spatial User Interaction (SUI '15)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 65–68. DOI:<https://doi.org/10.1145/2788940.2788954>
- [13] Steven Feiner, Blair MacIntyre, Marcus Haupt, and Eliot Solomon. 1993. Windows on the world: 2D windows for 3D augmented reality. In *Proceedings of the 6th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST '93)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 145–155. DOI:<https://doi.org/10.1145/168642.168657>
- [14] Jens Grubert, Matthias Heinisch, Aaron Quigley, and Dieter Schmalstieg. 2015. MultiFi: Multi Fidelity Interaction with Displays On and Around the Body. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '15)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 3933–3942. DOI:<https://doi.org/10.1145/2702123.2702331>
- [15] Devamardeep Hayatpur, Haijun Xia, and Daniel Wigdor. 2020. DataHop: Spatial Data Exploration in Virtual Reality. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '20)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 818–828. DOI:<https://doi.org/10.1145/3379337.3415878>
- [16] Z. He, R. Du and K. Perlin, "CollaboVR: A Reconfigurable Framework for Creative Collaboration in Virtual Reality," in 2020 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR), Recife/Porto de Galinhas, 2020 pp. 542-554. doi: 10.1109/ISMAR50242.2020.00082
- [17] Bruno Fruchard, Eric Lecolinet, and Olivier Chapuis. 2017. MarkPad: Augmenting Touchpads for Command Selection. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '17)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 5630–5642. DOI:<https://doi.org/10.1145/3025453.3025486>
- [18] Martin Krzywinski and Naomi Altman. 2013. Points of Significance: Error bars. *Nature Methods* 10, 921–922. DOI: <https://doi.org/10.1038/nmeth.2659>
- [19] Wallace S. Lages and Doug A. Bowman. 2019. Walking with adaptive augmented reality workspaces: design and usage patterns. In *Proceedings of the 24th International Conference on Intelligent User Interfaces (IUI '19)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 356–366. DOI:<https://doi.org/10.1145/3301275.3302278>
- [20] Lee, Benjamin & Hu, Xiaoyun & Cordeil, Maxime & Prouzeau, Arnaud & Jenny, Bernhard & Dwyer, Tim. (2020). Shared Surfaces and Spaces: Collaborative Data Visualisation in a Co-located Immersive Environment.
- [21] Can Liu, Olivier Chapuis, Michel Beaudouin-Lafon, Eric Lecolinet, and Wendy E. Mackay. 2014. Effects of display size and navigation type on a classification task. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '14)*. Association for Computing

Machinery, New York, NY, USA, 4147–4156. DOI:<https://doi.org/10.1145/2556288.2557020>

- [22] Paul Lubos, Gerd Bruder, Oscar Ariza, and Frank Steinicke. 2016. Touching the Sphere: Leveraging Joint-Centered Kinespheres for Spatial User Interaction. In *Proceedings of the 2016 Symposium on Spatial User Interaction (SUI '16)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 13–22. DOI:<https://doi.org/10.1145/2983310.2985753>
- [23] Weizhou Luo, Anke Lehmann, Yushan Yang, and Raimund Dachsel. 2021. Investigating Document Layout and Placement Strategies for Collaborative Sensemaking in Augmented Reality. In *Extended Abstracts of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '21)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 456, 1–7. DOI:<https://doi.org/10.1145/3411763.3451588>
- [24] Marriott, Kim, et al., eds. *Immersive Analytics*. Vol. 11190. Springer, 2018
- [25] Mark McGill, Aidan Kehoe, Euan Freeman, and Stephen Brewster. 2020. Expanding the Bounds of Seated Virtual Workspaces. *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.* 27, 3, Article 13 (June 2020), 40 pages. DOI:<https://doi.org/10.1145/3380959>
- [26] A. Millette and M. J. McGuffin, "DualCAD: Integrating Augmented Reality with a Desktop GUI and Smartphone Interaction," 2016 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR-Adjunct), 2016, pp. 21–26, doi: 10.1109/ISMAR-Adjunct.2016.0030.
- [27] Mathieu Nancel, Emmanuel Pietriga, Olivier Chapuis, and Michel Beaudouin-Lafon. 2015. Mid-Air Pointing on Ultra-Walls. *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.* 22, 5, Article 21 (October 2015), 62 pages. DOI:<https://doi.org/10.1145/2766448>
- [28] Ng, A., Medeiros, D., McGill, M., Williamson, J. and Brewster, S. (2021) The Passenger Experience of Mixed Reality Virtual Display Layouts in Airplane Environments. In: *2021 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, Bari, Italy, 4-8 Oct 2021,
- [29] Aziz Niyazov, Nicolas Mellado, Loic Barthe, Marcos Serrano. Dynamic Decals: Pervasive Freeform Interfaces Using Constrained Deformable Graphical Elements. *ACM Interactive Surfaces and Spaces Conference (ACM ISS 2021)*, Nov 2021, Lodz, Poland. (10.1145/3488538). (hal-03380583)
- [30] E. Normand and M. J. McGuffin, "Enlarging a Smartphone with AR to Create a Handheld VESAD (Virtually Extended Screen-Aligned Display)," 2018 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR), 2018, pp. 123–133, doi: 10.1109/ISMAR.2018.00043.
- [31] Patrick Reipschläger and Raimund Dachsel. 2019. DesignAR: Immersive 3D-Modeling Combining Augmented Reality with Interactive Displays. In *Proceedings of the 2019 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces (ISS '19)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 29–41. DOI:<https://doi.org/10.1145/3343055.3359718>
- [32] P. Reipschlagel, T. Flemisch and R. Dachsel, "Personal Augmented Reality for Information Visualization on Large Interactive Displays," in *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 27, no. 2, pp. 1182–1192, Feb. 2021, doi: 10.1109/TVCG.2020.3030460.
- [33] Jun Rekimoto and Masanori Saitoh. 1999. Augmented surfaces: a spatially continuous work space for hybrid computing environments. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '99)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 378–385. DOI:<https://doi.org/10.1145/302979.303113>
- [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, Article 201 (November 2020), 20 pages. DOI:<https://doi.org/10.1145/3427329>
- [35] Marcos Serrano, Barrett Ens, Xing-Dong Yang, and Pourang Irani. 2015. Gluey: Developing a Head-Worn Display Interface to Unify the Interaction Experience in Distributed Display Environments. In *Proceedings of the 17th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services (MobileHCI '15)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 161–171. DOI:<https://doi.org/10.1145/2785830.2785838>
- [36] Wesley Willett, Bernhard Jenny, Tobias Isenberg, and Pierre Dragicevic. 2015. Lightweight relief shearing for enhanced terrain perception on interactive maps. In *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*, Association for Computing Machinery, New York, New York, USA, 3563–3572. DOI: <https://doi.org/10.1145/2702123.2702172>
- [37] Xuhai Xu, Alexandru Dancu, Pattie Maes, and Suranga Nanayakkara. 2018. Hand range interface: information always at hand with a body-centric mid-air input surface. In *Proceedings of the 20th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services (MobileHCI '18)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 5, 1–12. DOI:<https://doi.org/10.1145/3229434.3229449>
- [38] Naoki Yanagihara, Buntarou Shizuki, and Shin Takahashi. 2019. A Comparative Study of Planar Surface and Spherical Surface for 3D Pointing Using Direct Touch. In *25th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST '19)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 42, 1–2. DOI:<https://doi.org/10.1145/3359996.3364814>
- [39] Fengyuan Zhu and Tovi Grossman. 2020. BISHARE: Exploring Bidirectional Interactions Between Smartphones and Head-Mounted Augmented Reality. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '20)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1–14. DOI:<https://doi.org/10.1145/3313831.3376233>