

Projection Grid Cues : Une manière efficace de percevoir les profondeurs des objets souterrains en Réalité Augmentée

Projection Grid Cues: An Efficient Way to Perceive the Depths of Underground Objects
in Augmented Reality

Cindy BECHER
c.becher@estia.fr

SIG-IMAGE
ESTIA Institute of Technology
LaBRI - Université de Bordeaux
F-64210 Bidart, France

Sébastien BOTTECCHIA
s.bottecchia@estia.fr

Université de Bordeaux
ESTIA Institute of Technology
F-64210 Bidart, France

Pascal DESBARATS
pascal.desbarats@labri.fr
LaBRI - Université de Bordeaux
F-33405 Talence, France

ABSTRACT

Augmented Reality is increasingly used for visualizing underground networks. However, standard visual cues for depth perception have never been thoroughly evaluated using user experiments in a context involving physical occlusion (e.g. ground) of virtual objects (e.g. elements of buried a network). We hence evaluate the benefits and drawbacks of two techniques based on the combinations of two well-known depth cues: grid and shadows anchors. More specifically, we explore how each combination can contribute to positioning, and depth perception. We show that with shadows anchors only or combined with the grid, users generate 2.7 times fewer errors and have a 2.5 times lower perceived workload (NASA-TLX score) than with the grid only or no visual cue. Our investigation study shows that they are two effective techniques for visualizing underground objects. We also recommend the use of one technique or another depending on the situation in which they will be used.

CCS CONCEPTS

• **Computing methodologies** → **Mixed / augmented reality; Perception**; • **Human-centered computing** → **Visualization techniques**.

KEYWORDS

Projection Techniques, Depth Cues, Visualization, Underground Objects, Augmented Reality

RÉSUMÉ

La réalité augmentée est un outil de plus en plus utilisé pour visualiser des données 3D propres à certains métiers. Cependant, les indices visuels standards n'ont pas été évalués dans un contexte impliquant une occultation physique (par ex. le sol) des objets virtuels. Nous souhaitons donc évaluer les avantages et les inconvénients de la combinaison et de l'hybridation de deux sortes d'indices visuels : une grille représentant le sol et la projection par le dessus d'objets

souterrains. Plus spécifiquement, nous explorons comment chaque combinaison contribue à la bonne perception de la position et de la profondeur des objets. La projection seule ou combinée à la grille génère 2.7 fois moins d'erreurs et génère une charge mentale perçue 2.5 fois inférieure à la grille seule ou aucun indice. Notre étude montre qu'il s'agit de deux techniques efficaces pour visualiser des objets souterrains. Également, nous recommandons l'utilisation d'une technique ou d'une autre en fonction des conditions dans lesquelles elles seront utilisées.

MOTS-CLÉS

Méthodes de Projection, Perception de la Profondeur, Méthodes de Visualisation, Objets Souterrains, Réalité Augmentée

1 INTRODUCTION

Dans cet article, notre but est d'aider à la perception d'objets souterrains lorsqu'on les visualise avec un casque de Réalité Augmentée. Selon Milgram *et al.* [21], la Réalité Augmentée (RA) est une partie d'un continuum entre les environnements réels et virtuels et consiste à augmenter la réalité en y superposant du contenu virtuel. La RA est une nouvelle façon de représenter de nombreux types d'informations, telles que des données 2D, 3D, du texte, des images ou des hologrammes. Dans notre cas d'étude plus précisément, la "situated visualization" permet de contextualiser les informations in situ et avec une meilleure immersion [38]. En revanche, une mauvaise perception des distances ou des positions des augmentations peut considérablement altérer l'expérience de RA, notamment avec des systèmes de perception directe comme un casque ou des lunettes de réalité augmentée.

De nombreux projets de recherche sur la RA [8, 11, 19, 28] ont été menés ces dernières années et mettent en évidence les problèmes de perception. Ils montrent que le contenu virtuel ne peut être superposé naïvement à la réalité : des indices visuels sont nécessaires. En effet, la perception humaine est influencée par notre expérience

de notre environnement, et les objets virtuels ne suivent pas les mêmes règles physiques que les objets réels.

Reste donc un défi : comment lever les ambiguïtés d'interprétation d'une scène complexe en réalité augmentée ? Nous devons nous assurer que les objets sont vus là où nous voulons qu'ils soient vus par l'utilisateur. Récemment, en 2020, Ventura *et al.* se focalisent dans leur cours [34] sur le problème de perception de la profondeur en réalité augmentée. Ils soulignent qu'il s'agit toujours d'un problème ouvert.

Dans ce travail, nous nous focalisons sur une technologie de réalité augmentée spécifique : la première version du casque HoloLens. Il s'agit d'un appareil stéréoscopique composé d'écrans optiques transparents. La conception de ce produit permet une parallaxe de mouvement et une disparité stéréoscopique, deux caractéristiques naturelles pour améliorer la perception de la profondeur [6]. Dans cet article, nous nous concentrons sur les indices améliorant la visualisation d'objets souterrains. Une première technique utilise une projection sur le sol de la silhouette de l'objet virtuel (Projection Display - PROJ). Cette projection est liée à l'objet par un axe. Une deuxième technique consiste à combiner cette projection avec une grille (Projection Grid Display - PROG). La grille représente le sol virtuel qui est confondu avec le sol réel.

Nous avons mené deux expériences pour déterminer si ces techniques de visualisation amélioreraient la perception spatiale. Plus précisément, nous évaluons les avantages et les inconvénients de chaque combinaison d'indice visuel par rapport un affichage sans indice visuel pour afficher des objets enfouis en RA.

Nos contributions à cet article sont les suivantes :

- Deux techniques de visualisation pour afficher des objets souterrains en réalité augmentée.
- Une comparaison de la façon dont quatre techniques de visualisation affectent la perception du positionnement absolu des objets virtuels souterrains en réalité augmentée.
- Une comparaison de la façon dont quatre techniques de visualisation affectent la perception du positionnement relatif et de l'altitude des objets virtuels souterrains en réalité augmentée.

Tout d'abord, nous présentons nos motivations pour mener à bien ce travail, puis nous présentons un aperçu des travaux en lien avec les nôtres. Ensuite, nous développons nos techniques en discutant des théories qui les sous-tendent et de leur mise en œuvre. Aussi, nous expliquons nos hypothèses et les conditions expérimentales, et nous montrons nos résultats. Enfin, nous interprétons et discutons de ces résultats et parlons des travaux futurs.

2 MOTIVATION

Ces dernières années, les installations souterraines (par exemple pour les réseaux d'électricité, d'eau, de gaz naturel) sont référencées avec précision afin de prévenir les accidents lors de travaux futurs. Elles sont reportées sur des cartes 2D avec une information de profondeur ou parfois directement en 3D. Ces informations servent à plusieurs tâches : marquage, piquetage, suivi de chantier ou planification par exemple.

Nous nous sommes focalisés sur la tâche de marquage-piquetage qui consiste à reporter les points d'intérêt de cartes 2D directement

sur le sol du chantier. Lors de la réalisation de cette tâche, les ouvriers ont beaucoup de contraintes. Nous avons donc conduit des entretiens préliminaires afin de recueillir leurs besoins et contraintes durant cette tâche et plus généralement pendant l'utilisation de ces cartes 2D. Selon eux, les plans sont très difficiles à interpréter sur le terrain. Comme le montrent Wang *et al.* [35], l'interprétation des données SIG 3D depuis une carte 2D influence la perception et la compréhension de ces informations. Nous souhaitons donc utiliser la RA pour faciliter la visualisation de ces données sur le terrain. Dans notre cas, nous devons afficher des objets virtuels sous le sol.

Les différentes tâches métier impliquées ici doivent être effectuées in situ. Les couleurs des objets à afficher sont imposées par un code couleur permettant de classer les réseaux selon leur nature et ce qu'ils transportent. Les travailleurs se trouvent dans un environnement dangereux (chantier) et veulent garder les mains libres. En outre, ils ont besoin de visualiser et de comprendre rapidement les informations qui leur sont présentées, c'est pourquoi nous avons opté pour un rendu non réaliste.

Rolim *et al.* [24] classent les problèmes de perception en RA en trois catégories : l'attention visuelle, la cohérence photométrique visuelle et la cohérence géométrique visuelle. En raison de notre contexte industriel, nous choisissons de nous concentrer sur la dernière catégorie, la cohérence géométrique visuelle. En effet, il faut afficher les canalisations situées sous le sol en utilisant les données des plans 2D/3D. À l'instar de Zollmann *et al.* [45, 46], nos enjeux majeurs sont de maintenir la cohérence entre le réel et le virtuel (gestion de l'occlusion par le sol) et de créer une bonne perception des distances et des relations spatiales entre les objets, qu'ils soient réels ou virtuels.

3 TRAVAUX CONNEXES

L'affichage d'objets 3D virtuels souterrains implique deux principaux problèmes : la gestion des occlusions et la perception de la profondeur. Nous avons étudié des travaux autour de ces deux problèmes dans les sections suivantes.

3.1 Gestion des occlusions

Le lien entre les mondes réel et virtuel peut être fait en gérant l'occlusion des objets virtuels par le sol. En effet, selon Ware [37] c'est un des facteurs les plus importants pour la perception de la profondeur. Selon Zollmann *et al.* [43], si les occlusions ne sont pas prises en compte, cela conduira toujours à une mauvaise perception des profondeurs. Nous voulons donc prendre en compte ces occlusions sans perdre la précision ou la résolution des informations des objets souterrains (comme ça peut être le cas des solutions utilisant des transparences ou des motifs masquant partiellement ce qui se trouve sous le sol). Il existe plusieurs méthodes pour gérer l'occlusion. La première consiste à révéler ce qu'il y a à l'intérieur d'un objet en gardant et/ou en accentuant ses bords [7, 17, 20]. Cependant, ces solutions concernent de petits objets inclus dans de plus grands (des organes dans un corps, par exemple). Cette solution nécessiterait d'être adaptée pour une occlusion par un grand plan sans limites visibles (comme une occlusion par le sol ou des murs). L'utilisateur peut visualiser l'objet en entier et mieux comprendre les relations spatiales entre cet objet et les objets virtuels qu'il contient.

De nombreux travaux [22, 23, 26, 27, 39, 42] utilisent une autre méthode pour gérer l'occlusion : les masques d'occlusion. Ils séparent les différentes zones d'intérêt, couche par couche, et affichent les objets virtuels au bon niveau de profondeur dans l'image en gérant ses occlusions par d'autres calques. Nous ne pouvons pas envisager cette solution seule, car nous voulons montrer ce qui est souterrain, pas le cacher. Dans notre cas, les objets resteraient invisibles.

Les techniques de semi-transparence sont à mi-chemin entre les deux solutions précédentes. Elles opacifient plus ou moins les surfaces avec différentes textures, afin de les conserver et de révéler ce qui se cache derrière elles. Elles utilisent des éléments importants des images pour l'occultation [2, 4, 10, 27, 44, 46], parfois avec différents niveaux de transparence afin de donner une impression de profondeur. Nous ne souhaitons pas perdre en précision d'information des objets souterrains que nous afficherons. Il semble que cela serait le cas avec ces solutions seules puisqu'elles ajoutent des couches semi-transparentes devant les objets cachés. Nous avons donc mis ces solutions de côté.

Certaines méthodes de transparence ont été combinées avec d'autres techniques [15, 16]. Dans la première, tous les bords les plus proches chevauchent les informations. Tous les objets semblent être sur le même plan malgré leurs différents niveaux de profondeur. Dans la seconde, l'environnement à observer est décomposé et déplacé pour mieux comprendre les relations des parties qui le composent, mais la perception de leur position réelle est perturbée. Il semble que les techniques de transparence permettent d'ordonner les objets, mais pas de quantifier la distance entre eux.

Une autre technique très utile est l'excavation virtuelle [9, 14, 47]. Elle offre des indices visuels précieux, cependant, si elle n'est pas combinée avec des techniques de transparence, les objets qu'elle contient ne seront visibles que lorsque le point de vue de l'utilisateur le permettra. L'excavation virtuelle seule n'offre pas une visualisation intégrale des objets virtuels de tous les points de vue.

3.2 Perception de la profondeur

Nous avons donc quelques solutions pour comprendre quand les objets virtuels sont sous le sol, mais il est encore difficile de bien percevoir leur position et leur altitude négative. Rosales *et al.* [25] étudient la différence de perception entre des objets sur ou flottants au-dessus du sol. Ils constatent que les objets au-dessus du sol sont vus sur le sol, mais plus loin de l'observateur que leur distance réelle. De toute évidence, la distance et l'altitude sont intrinsèquement liées. Nous pouvons émettre l'hypothèse qu'il y aurait une disparité de perception similaire avec nos objets sous le sol : ils seraient perçus comme étant collés au sol mais juste en dessous et plus proches de l'observateur que leur distance réelle.

De nombreux facteurs influencent la perception de la position d'un objet comme le périphérique de RA [1], être en intérieur ou en extérieur [18], le réalisme de la scène [33] (avec notamment la cohérence des ombres [5, 31] et des illuminations [12] qui améliore la perception de la position). Mais il peut aussi s'agir de la distance focale ou même de l'âge (caractéristiques physiologiques de l'utilisateur) comme de la luminosité (caractéristiques de la scène) [29] ainsi que de la distance interpupillaire ou de la parallaxe [41].

Étant données nos contraintes (voir partie 2) et la diversité des utilisateurs finaux, nous choisissons un facteur ayant un grand impact sur la perception de la position d'un objet et pouvant inclure

de nombreux autres facteurs (ombres, réalisme) : la technique de visualisation [9, 13]. Plusieurs méthodes de visualisation ont été proposées. Dans notre contexte, certains repères visuels comme ceux de [19] seraient inutilisables. En effet, leurs lignes de perspective sont intéressantes mais elles doivent être adaptées à notre contexte, car elles pourraient facilement être confondues avec des tuyaux lors de la visualisation de nombreux réseaux. Nous souhaitons un système qui fonctionne malgré l'influence des différents facteurs induits par nos choix techniques et technologiques.

Les visualisations que nous souhaitons comparer sont inspirées de celles de Ware *et al.* [36], Skinner *et al.* [30] ou encore Heinrich *et al.* [13]. Les deux premiers ont travaillé sur des projections d'objets virtuels sur une surface (grille pour Ware *et al.*, sol pour Skinner *et al.*). Heinrich *et al.* quant à eux ont travaillé avec un affichage de RA projetée et ont comparé de nombreuses façons d'afficher des hologrammes 3D afin d'améliorer la compréhension par l'utilisateur de leur position (altitude et distance par rapport à l'utilisateur). Ils demandent à leurs utilisateurs de trier les objets selon ces deux dimensions. Ils ont constaté que leur approche des lignes de soutien est la meilleure pour éliminer l'ambiguïté de la perception de la scène. Les mêmes types de projections ont été nommés lignes de chute ("*dropping lines*") par Ware *et al.* [36] ou ancres d'ombres ("*shadows anchors*") par Ventura *et al.* [34], mais toujours pour des objets au-dessus du sol.

Nous sommes très proches du travail effectué par [45] sur certains aspects. Cependant, rien ne suggérerait au cours de leur étude que leurs repères visuels donneraient les mêmes résultats avec des objets souterrains, dans un petit intervalle de distances (jusqu'à 1.50 m de profondeur dans notre cas). Notre problème est légèrement différent : nous voulons améliorer la perception relative (relation spatiale entre objets) et absolue (distances absolues) des positions des objets. Ainsi, nos objets sont sous le sol, et non au-dessus, et nous voulons une évaluation de la perception du positionnement absolu.

4 CONCEPTS

En RA, lorsque les objets ne sont pas sur le sol, ils ont tendance à être perçus comme étant au-dessus, mais pas à la bonne distance de l'utilisateur. C'est l'un des principaux problèmes de la représentation des objets souterrains en RA.

Nous décrivons ici les différents types de repères visuels avec lesquels nous avons construit les visualisations suivantes :

- **Projection** : Dans différents travaux [13, 36, 40], la projection permet de mieux estimer les distances relatives des objets. Étant donné que nous souhaitons afficher des objets souterrains, nous choisissons une hybridation de cette approche. Nous projetons sur le sol les silhouettes d'objets souterrains, le tout dans un rendu non réaliste afin de garder l'attention de l'utilisateur au bon endroit. Nous connectons également ces silhouettes aux objets correspondants avec un axe vertical. Toutes les projections sont sur le même plan et peuvent être comparées côte à côte. De plus, les hauteurs des axes de projection peuvent être comparées pour permettre une meilleure perception de l'altitude négative.
- **Grille** : La projection seule permet de référencer tous les objets sur un plan unique, mais il est parfois difficile de discerner les objets proches et le fait qu'ils sont sous le sol. En

conséquence, nous choisissons d'ajouter un repère visuel comme référence pour le sol. Zollmann *et al.* [46] aident à matérialiser ce sol dans le monde virtuel en utilisant une technique avec un échiquier semi-transparent. En RA, cependant, nous ne pouvons pas ajouter de nombreuses couches transparentes à cause de la luminosité des écrans. Nous ne pourrions probablement pas voir correctement tous les calques et les objets derrière eux. Par conséquent, nous choisissons d'utiliser une grille. Cela nous permet d'avoir un repère visuel pour le sol sans occulter ce qui est souterrain. La grille est régulière et orthogonale, nous émettons donc l'hypothèse qu'elle améliore la perception des distances. De plus, la grille permet à l'utilisateur d'y connecter sa propre perception corporelle puisqu'il la voit sous ses propres pieds. Ainsi, il peut avoir une meilleure compréhension des relations spatiales entre le sol, les objets (altitude relative) et lui-même.

5 IMPLÉMENTATION

Nous calibrons la position du sol avec un marqueur ARToolKit¹ (motif Hiro de 8x8 cm) qui est imprimé et placé au sol. L'utilisateur doit fixer le marqueur pendant 5 secondes consécutives. L'application évalue la position du marqueur via la caméra HoloLens. Nous avons préalablement renseigné les paramètres intrinsèques à la caméra dans l'application. Ensuite, nous obtenons la hauteur du sol et la sauvegardons.

Nous avons choisi cette solution au lieu de la cartographie spatiale traditionnelle de HoloLens car nous n'avons pas trouvé cette cartographie suffisamment précise [3]. En effet, le sol a été estimé à environ 10 cm au-dessus de sa position réelle avec ce moyen. Nous avons implémenté les deux méthodes comme suit :

- **Projection** : Nous projetons les silhouettes d'objets souterrains directement sur le sol. Nous les connectons par un axe vertical à l'objet qu'elles représentent. L'axe et la silhouette sont rendus de manière semi-transparente pour distinguer l'objet des repères visuels aidant sa perception.
- **Grille** : La grille est constituée de parallélogrammes rectangulaires de 2 cm d'épaisseur qui forment un quadrillage. Elle est verte et semi-transparente. La grille est affichée à la même hauteur que le sol, est horizontale et sa rotation n'est pas modifiée (HoloLens a une méthode de stabilisation de plan).

6 EXPÉRIMENTATIONS

Notre objectif est d'étudier l'influence des indices visuels de projection et de chacune de leurs composantes sur la perception, dans notre contexte industriel. En effet, nous souhaitons améliorer la perception de cartes 2D de réseaux enterrés, en réalité augmentée. Nous devons comprendre comment chaque indice influence la perception d'objets simples. Nous choisissons donc de ne considérer que les points d'intérêt (composantes spécifiques d'une installation ou parties d'un tuyau qui ne sont pas droites) de ces cartes. En effet, les liens entre ces points peuvent induire des références visuelles supplémentaires par leur apparence, leur géométrie et/ou leur perspective. Pour valider nos hypothèses, nous choisissons d'afficher ces points d'intérêt sous forme de cubes. Plus tard, nous souhaitons

étendre notre exploration en considérant la topologie du réseau dans son ensemble et en itérant avec des scènes plus complexes.

Nous avons mené deux expériences : une pour l'évaluation de la perception de la position spatiale absolue et une autre pour évaluer la perception des relations spatiales. L'étude de Rosales *et al.* [25] montre une ambiguïté pour des cubes de 0.20 m de côté à 0.20 m au-dessus du sol. Nous choisissons donc d'évaluer la perception d'objets d'une taille similaire, à 6 niveaux de profondeur sous le sol, de 0.20 m à 1.5 m (la plupart des objets de notre contexte industriel sont dans cet intervalle).

Pour les objets faisant 0.20 m de côté, la distance interpupillaire induit une reconstruction de parallaxe jusqu'à un peu moins de 5 m. Nous souhaitons nous passer de cette reconstruction et avons donc choisi d'évaluer des objets à une distance à partir de 5 m de l'utilisateur. Pour chaque cube, nous définissons les distances d_A et d_E , visibles sur la figure 1. Rosales *et al.* ont également mené une étude préliminaire [25] pour déterminer jusqu'à quelle distance les objets restaient stables avec un HoloLens. Ils ont placé des objets réels dans la salle pour servir de points d'ancrage aux HoloLens et on estime le casque fiable jusqu'à au moins 8 mètres dans ces conditions. En outre, il est difficile de tester une distance plus élevée dans des conditions de laboratoire. Ainsi, nous avons placé nos objets virtuels à des distances allant de 5 à 8 m de l'utilisateur. Pour les besoins des expériences, nous avons défini un système de coordonnées orthogonales $O(X,Y,Z)$ visible sur la figure 1.

6.1 Procédure, Tâches, Apparatus

Nous utilisons le casque HoloLens de Microsoft, celui de la 1^{re} génération pour ces travaux. Les applications sont créées à l'aide d'Unity 2018.3.f1. Quatre modalités ont été évaluées (voir partie 6.3) et le participant les a chacune utilisées deux fois. Nous avons choisi au hasard l'ordre d'apparition des modalités de visualisation évaluées.

Les tests se déroulent comme suit : le participant entre dans la salle de test. C'est une pièce vide, sans marques ni indicateurs au sol, à l'exception d'une table placée à 3 mètres devant l'utilisateur, sur le côté, hors du champ de vision de la scène. Le participant dispose d'un espace libre devant lui de 5 x 10 m (sauf la table qui permet une stabilité de l'affichage des hologrammes [25]). Il lance la calibration du casque (application native HoloLens) afin que l'affichage soit adapté à sa vue.

Ensuite, l'application de test ("Absolue" ou "Relative") est lancée, et dans les deux cas, le participant regarde dans la direction d'un marqueur Hiro posé sur le sol pour calibrer sa hauteur. Ensuite, l'évaluation commence. Le participant fixe un gros cube gris à sa droite pendant 5 secondes et ce cube devient vert pour disparaître et faire place à une nouvelle scène (même comportement pour les deux applications). L'utilisateur réalise alors les tâches demandées, en fonction de l'expérience qu'il est en train de faire.

Pour la première expérience ("Absolue"), l'utilisateur n'a qu'une seule tâche :

- **Tâche 1 (T1)** : La scène est composée d'un seul petit cube gris. Il peut être 6 distances différentes ([5; 5.6; 6.2; 6.8; 7.4; 8] m, nommé d_E sur la figure 1) et à 6 profondeurs différentes ([0.20; 0.46; 0.72; 0.98; 1.24; 1.50] m, nommé d_A sur la figure 1). Il est tourné et mis à l'échelle aléatoirement (il fait 0.20–0.30

¹<http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/>

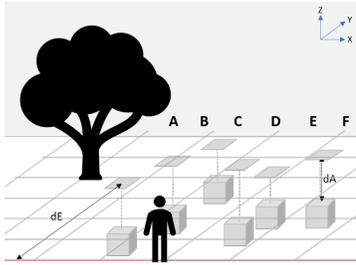


Figure 1: Schéma représentant la configuration d'une scène de l'application "Relative".

m de côté) afin d'éviter un biais de comparaison avec le sol ou la scène précédente. Le cube reste affiché pendant 10 secondes avec une modalité aléatoire, puis disparaît. Ensuite, l'utilisateur doit marcher jusqu'à l'endroit où il a perçu le cube et placer une croix noire sur le sol à l'endroit où lui semblait être le cube. Si le cube était perçu comme étant au-dessus ou en-dessous du sol, le participant doit placer la croix noire respectivement en dessous ou au-dessus de la position réelle du cube, directement sur le sol (il fait une projection du cube sur le sol).

Pour la deuxième expérience, l'utilisateur doit effectuer deux tâches sur une même scène :

- **Tâche 2 (T2)** : La scène est composée de six cubes gris. Ils sont tous à 6 distances différentes (définies dans la tâche 1) et 6 profondeurs différentes (définies dans la tâche 1). Ils sont tournés et mis à l'échelle aléatoirement (ils font 0.20–0.30 m de côté) afin d'éviter un biais de comparaison entre les cubes eux-mêmes et avec le sol. Les cubes sont placés en ligne face au participant, séparés de 0.5 m. Lors de cette phase, le participant doit classer les cubes par altitude (par d_A), du plus haut au plus bas.
- **Tâche 3 (T3)** : Au cours de la même scène, le participant doit ordonner les cubes par distance égocentrique (par d_E , donc selon une projection horizontale), du plus proche au plus éloigné.

Après la partie pratique du test, chaque participant est invité à s'asseoir pour répondre à quelques questions. Tout d'abord, nous avons demandé au participant de remplir une enquête NASA-TLX pour chaque modalité.

Des images des modalités avaient été imprimées et pour chaque expérience ("Relative" et "Absolue") et nous avons demandé au participant de répondre à quelques questions : quelle modalité avez-vous préférée et pourquoi ? Classez-les par ordre de préférence. Avez-vous des idées sur ce qui vous a plus ou moins aidé ? Nous avons ensuite mené un petit entretien pour mieux comprendre ses choix et ses ressentis.

6.2 Participants

Nous avons recruté 40 participants, 20 pour la première expérience (7 femmes, 13 hommes, $\bar{X} = 33$ ans, $\sigma = 10.98$) et 20 pour la deuxième expérience (10 femmes, 10 hommes, $\bar{X} = 33$ ans, $\sigma = 9.35$). Pour la première expérience, leurs âges vont de 21 à 54 ans (9 personnes \in

[20–29] ans, 5 \in [30–39] ans, 4 \in [40–49] ans et 2 \in [50–59] ans) et pour la deuxième leur âge varie de 22 à 53 ans (9 personnes \in [20–29] ans, 6 \in [30–39] ans, 3 \in [40–49] ans et 2 \in [50–59] ans). Tous ont une bonne perception des couleurs (aucun n'était daltonien, 4 portaient des lunettes pour l'expérience "Absolue" et 6 pour la "Relative"). Pour chaque expérience, nous avons mené une enquête préliminaire sur leur familiarité avec la RA indiquée par des moyennes auto-évaluées sur une échelle allant de un (pas familier | jamais) à cinq (familier | tous les jours). Ils ne sont pas très familiers avec la RA (familiarité moyenne – expérience "Absolue" : $\bar{X} = 1.9$, $\sigma = 1.52$ – expérience "Relative" : $\bar{X} = 1.9$, $\sigma = 1.62$).

6.3 Mesures et questionnaire

Nous voulons comprendre les effets de la grille, la projection et la combinaison des deux. Nous souhaitons également les comparer à une visualisation naïve (sans indice visuel). Par conséquent, nous avons des variables indépendantes et dépendantes. Nous présentons également nos hypothèses pour ce travail.

6.3.1 Variables indépendantes : Pour chacune des expérimentations, nos variables indépendantes sont quatre méthodes de visualisation (visibles sur la Figure 2). Les indices visuels de la partie 4 ont été utilisés pour les construire :

- Projection Display (PROJ) = projection
- Projection Grid Display (PROG) = projection + grille
- Grid Display (GRID) = grille
- Naive Display (NAIVE) = pas d'indice

6.3.2 Variables dépendantes : Pour les deux expériences et pour chaque modalité, nous examinons les scores NASA-TLX : Demande Mentale (MD), Demande Physique (PD), Demande Temporelle (TD), Performance (P), Effort (E), Niveau de Frustration (FL) et Score total (Total). En effet, ces scores sont les principaux facteurs que nous souhaitons améliorer. En plus du NASA-TLX, pour la première expérience ("Absolue") nous évaluons les différences de distance (Diff-D) en mètres entre la distance perçue et la distance réelle pendant T1. Pour la deuxième expérience ("Relative"), nous calculons le score d'inversion (Erreur d_A , Erreur d_E), en fonction des positions réelles des cubes ainsi que le temps de complétion de la tâche (respectivement Temps d_A et Temps d_E). Le score d'erreur de tri est donné par le nombre d'inversions entre la combinaison donnée par le participant et la combinaison parfaite (les positions réelles des cubes). Par exemple, si la combinaison parfaite est A-B-C et que le participant a choisi B-A-C, il n'y a qu'une seule inversion (A et B, Erreur = 1). Cependant, s'il choisit C-A-B, il y a deux inversions (B et C mais aussi A et C, Erreur = 2).

6.3.3 Hypothèses : Pour la première expérience ("Absolue"), nous émettons l'hypothèse que :

- la charge de travail perçue (score total NASA-TLX) est moindre avec PROG et PROJ qu'avec NAIVE et GRID - **H1** : PROG-NAIVE (H1a) ; PROG-GRID (H1b) ; PROJ-NAIVE (H1c) ; PROJ-GRID (H1d).
- PROG a une charge de travail perçue plus faible que PROJ - **H1bis**.
- PROG et PROJ sont plus précis en termes d'estimation de distance égocentrique (Diff-D) par rapport à NAIVE et GRID -

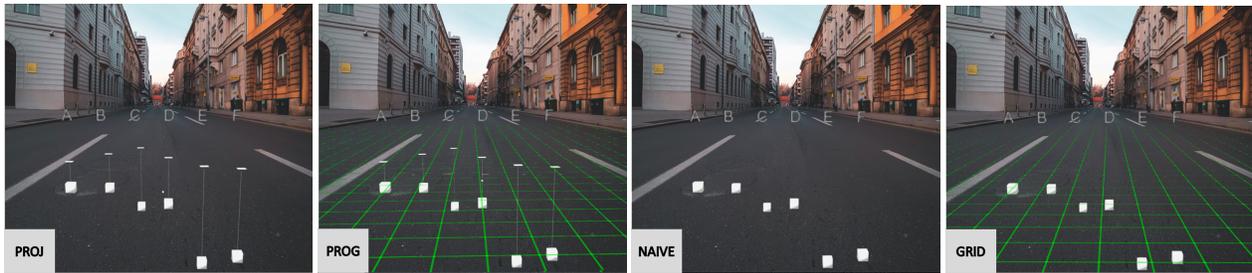


Figure 2: Comparaison de deux techniques avec indices visuels hybridés – Projection Display (PROJ) et Projection Grid Display (PROG) – avec deux techniques classiques – Naive Display (NAIVE) et Grid Display (GRID) – pour des tâches de perception de la profondeur à la fois d’une manière absolue et relative.

H2 : PROG-NAIVE (H2a) ; PROG-GRID (H2b) ; PROJ-NAIVE (H2c) ; PROJ-GRID (H2d).

- PROG est plus précis en termes d’estimation de distance égocentrique (Diff-D) que PROJ - **H2bis**.

Pour la deuxième expérience ("Relative"), nous supposons que :

- PROG et PROJ réduisent la charge de travail perçue (score total NASA-TLX) pour les tâches de tri par rapport à NAIVE et GRID - **H3** : PROG-NAIVE (H3a) ; PROG-GRID (H3b) ; PROJ-NAIVE (H3c) ; PROJ-GRID (H3d).
- PROG réduit la charge de travail perçue pour les tâches de tri par rapport à PROJ - **H3bis**.
- PROG et PROJ sont plus efficaces pour classer les objets virtuels par leur altitude (Erreur d_A) que NAIVE et GRID dans des durées similaires (Temps d_A) - **H4** : (PROG-NAIVE (H4a) ; PROG-GRID (H4b) ; PROJ-NAIVE (H4c) ; PROJ-GRID (H4d)).
- PROG est plus efficace pour ordonner les objets virtuels en fonction de leur altitude (Erreur d_A) que PROJ dans des durées similaires (Temps d_A). - **H4bis**.
- même supposition que H4 mais pour la distance égocentrique (Erreur d_E / Temps d_E) - **H5** : PROG-NAIVE (H5a) ; PROG-GRID (H5b) ; PROJ-NAIVE (H5c) ; PROJ-GRID (H5d).
- même supposition que H4bis mais pour la distance égocentrique (Erreur d_E / Temps d_E) - **H5bis**.

7 RÉSULTATS

Tous les résultats ont été obtenus avec des scripts R [32] et en utilisant R Studio ² (Version 1.2.1335 sous Windows). Nous définissons α le paramètre de risque, à 5%. Les valeurs p doivent donc être inférieures à 0.05 pour que le test soit significatif.

Nous analysons les résultats de chaque expérience séparément. Puisque les participants ont testé les quatre modalités, les expériences sont intra-sujet, et toutes les données sont appariées. Nous avons utilisé un test de Friedman, avec un test post-hoc de Conover. Le test de Friedman est l’équivalent d’une ANOVA sur mesures répétées non paramétriques, qui s’applique sur des variables qualitatives ordinales et ce même lorsque les conditions de l’ANOVA ne sont pas remplies (normalité des résidus et homogénéité des variances).

²<https://rstudio.com/>

7.1 Expérimentation "Absolue"

Toutes les valeurs p des tests de cette section sont visibles dans Table 1. Voir également la figure 3 pour les scores NASA-TLX par thèmes ainsi que le score total du NASA-TLX. Voir la figure 4 pour les boîtes à moustaches des différences d’estimation des distances absolues.

Il existe une très grande probabilité que les différences observées lors de comparaisons des charges mentales perçues de PROG-NAIVE et PROJ-NAIVE ne soient pas dues au hasard (H1a, valeur $p = 4.6635 \times 10^{-05}$ valeur $t = -4.918$; H1c, valeur $p = 0.0030283$, valeur $t = -3.689$). PROG ($\bar{X} = 20.71$, $\sigma = 11.017$) et PROJ ($\bar{X} = 23.13$, $\sigma = 10.478$) semblent toutes deux des techniques permettant d’abaisser la charge mentale perçue par rapport à l’utilisation de NAIVE ($\bar{X} = 36.63$, $\sigma = 15.305$). Quant à la différence observée entre PROG et GRID ($\bar{X} = 31.67$, $\sigma = 10.044$), elle est non statistiquement significative. Néanmoins, elle est proche du risque alpha (H1b, valeur $p = 0.0539280$ valeur $t = -2.705$). Il faudrait mener des expérimentations complémentaires avec de nouveaux échantillons afin de trancher.

Cernant la distance perçue, il existe une très grande probabilité que les différences observées entre PROG et PROJ et les deux autres modalités ne soient pas dues au hasard. On peut ainsi dire que PROG ($\bar{X} = 0.57$ m, $\sigma = 0.792$) permet une meilleure précision dans l’évaluation de ces distances que NAIVE ($\bar{X} = 1.70$ m, $\sigma = 1.082$) et GRID ($\bar{X} = 1.42$ m, $\sigma = 0.916$) (H2a, valeur $p = 0.00082901$ valeur $t = -3.965$; H2b, valeur $p = 0.00873809$ valeur $t = -3.111$). Il en est de même pour PROJ ($\bar{X} = 0.38$ m, $\sigma = 0.803$) comparé à NAIVE et GRID (H2c, valeur $p = 1.7818 \times 10^{-05}$ valeur $t = -5.185$; H2d, valeur $p = 0.00030423$ valeur $t = -4.331$).

7.2 Expérimentation "Relative"

Tous les résultats de cette section, et d’autres, sont visibles dans Table 2. Voir également la figure 5 pour les scores NASA-TLX par thèmes ainsi que le score total du NASA TLX. Voir la figure 6 pour les boîtes à moustaches des erreurs faites lors du tri par d_E et d_A .

Il est fort probable que la différence observée entre les moyennes des scores globaux du NASA-TLX entre PROG ($\bar{X} = 31.50$, $\sigma = 13.579$) et NAIVE ($\bar{X} = 73.25$, $\sigma = 18.236$) et entre PROG et GRID ($\bar{X} = 54.75$, $\sigma = 13.049$) ne soit pas due au hasard (H3a, valeur $p = 1.323 \times 10^{-06}$ valeur $t = -5.887$; H3b, valeur $p = 0.00327437$ valeur $t = -3.618$). On en déduit qu’utiliser PROG induit une charge mentale moins élevée que d’utiliser GRID ou NAIVE (H3a et H3b validées).

	PROG-NAIVE H*a	PROG-GRID H*b	PROJ-NAIVE H*c	PROJ-GRID H*d	PROG-PROJ H*bis	NAIVE-GRID	P-valeur	χ^2 ddl = 3
MD	3.237×10^{-05}	0.015120	0.082802	1.000000	0.096939	0.408922	8.827×10^{-06}	26.161
PD	0.78331	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	0.4429	2.6842
TD	0.18389	0.48906	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	0.1399	5.4783
P	0.002863	0.059806	0.020445	0.291242	1.000000	1.000000	0.0004363	18.017
E	8.1487×10^{-05}	0.22487126	0.00070701	0.82905500	1.000000	0.06549875	5.24×10^{-06}	27.238
FL	0.0035119	0.0439828	0.0065033	0.0744200	1.000000	1.000000	0.000148	20.276
Total (H1*)	4.6635×10^{-05}	0.0539280	0.0030283	0.8734384	1.000000	0.1853742	5.388×10^{-06}	27.184
Diff-D (H2*)	0.00082901	0.00873809	1.7818×10^{-05}	0.00030423	0.45502326	0.45502326	4.382×10^{-08}	37.101

Table 1: Table des p-valeurs de la première expérience ("Absolue") - Test de Friedman avec post-hoc de Conover. En gras : valeurs p significatives.

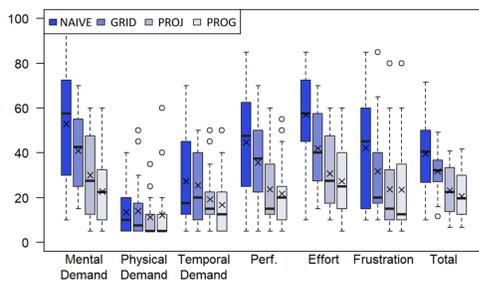


Figure 3: Scores NASA-TLX de l'expérimentation "Absolue" en fonction des modalités.

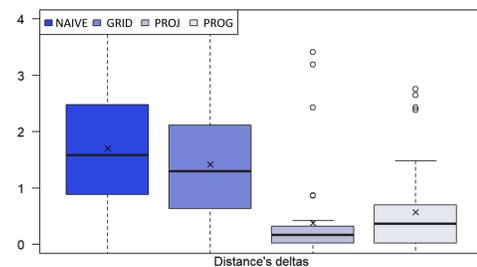


Figure 4: Différences de distances entre l'estimation et le réel pour l'expérimentation "Relative".

	PROG-NAIVE H*a	PROG-GRID H*b	PROJ-NAIVE H*c	PROJ-GRID H*d	PROG-PROJ H*bis	NAIVE-GRID	P-valeur	χ^2 ddl = 3
MD	1.168×10^{-06}	0.0046546	0.0293169	1.000000	0.0246120	0.1278377	7.662×10^{-08}	35.953
PD	0.47542	1.000000	0.47542	1.000000	1.000000	0.47542	0.1899	4.7647
TD	0.011819	0.030582	0.169408	0.358988	1.000000	1.000000	14.524	0.002273
P	1.7731×10^{-05}	0.0096838	0.0140188	1.000000	0.3020057	0.3959460	2.303×10^{-06}	28.942
E	5.2784×10^{-06}	0.0072265	0.0010085	0.3582413	0.8545021	0.2370879	1.40×10^{-07}	34.71
FL	0.00011901	0.08711670	0.00203023	0.589702273	1.000000	0.22332534	1.194×10^{-05}	25.534
Total (H3*)	1.323×10^{-06}	0.0037886	0.0017329	0.6984401	0.2863208	0.1625209	3.287×10^{-08}	37.69
Erreur d _A (H4*)	0.01859832	0.00018972	1.000000	0.04318282	0.53101937	0.94629984	6.004×10^{-05}	22.173
Erreur d _E (H5*)	0.007828861	0.00012059	0.11934822	0.00327437	1.000000	0.146146	4.813×10^{-06}	27.417
Temps d _A	0.71538	1.000000	0.89848	1.000000	1.000000	1.000000	0.3476	3.3
Temps d _E	0.71538	0.10866	1.000000	0.25884	1.000000	1.000000	0.05455	7.62

Table 2: Table des p-valeurs de la deuxième expérimentation ("Relative") - En gras : valeurs p significatives.

Par le même raisonnement, PROJ ($\bar{X} = 51.75, \sigma = 15.357$) semble plus efficace pour réduire la charge mentale que NAIVE (H3c, valeur p = 0.0017329 valeur t = -3.863).

Il est probable que PROG ($\bar{X} = 0.20, \sigma = 0.516$) soit plus efficace que NAIVE ($\bar{X} = 0.82, \sigma = 1.217$) pour trier des objets selon d_A (H4a, valeur p = 0.01859832 valeur t = -3.089). Quant à la comparaison entre PROG et GRID ($\bar{X} = 1.12, \sigma = 1.682$) selon ce même facteur, il est fort probable que PROG soit plus efficace que GRID (H4b, valeur p = 0.00018972 valeur t = -4.521). Lorsque l'on compare PROJ ($\bar{X} = 0.55, \sigma = 1.061$) et GRID sur ce critère, PROJ semble plus efficace

que GRID (H4c, valeur p = 0.04318282 valeur t = -2.788). Bien que statistiquement significatif, cette comparaison nécessiterait des tests complémentaires.

Pour ce qui est du tri selon d_E, PROG ($\bar{X} = 0.28, \sigma = 0.784$) est très probablement plus efficace que NAIVE ($\bar{X} = 1.10, \sigma = 1.751$) et GRID ($\bar{X} = 1.35, \sigma = 2.070$) (H5a, valeur p = 0.007828861 valeur t = -3.382; H5b, valeur p = 0.00012059 valeur t = -4.651). Pour les comparaisons entre PROJ ($\bar{X} = 0.55, \sigma = 1.358$) et les autres modalités, on peut seulement dire qu'il est très probable que cette technique de

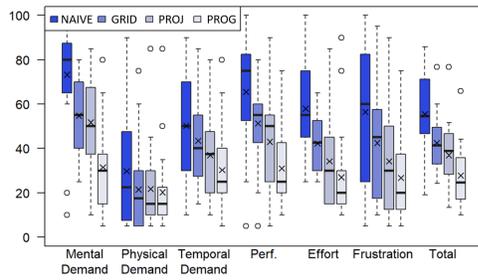


Figure 5: Scores NASA-TLX de l'expérimentation "Relative" en fonction des modalités.

visualisation soit plus efficace que GRID (H5d, valeur $p = 0.00327437$ valeur $t = -3.664$).

En ce qui concerne les hypothèses H1bis, H2bis, H3bis, H4bis et H5bis, aucune ne peut être validée par les expérimentations menées dans cet article. En revanche, certains thèmes du NASA-TLX de l'expérimentation relative montrent des différences significatives entre PROJ et PROG et notamment pour la Demande Mentale et la Performance (Demande Mentale : valeur $p = 0.0246120$ valeur $t = -2.991$; Performance valeur $p = 0.03020057$ valeur $t = -1.999$). Dans les deux cas, les tests statistiques indiquent qu'il semble exister un avantage pour la modalité PROJ qui a un score plus faible en moyenne sur ces deux thèmes (MD : $\bar{X}_{PROG} = 31.50$ $\sigma = 20.203$, $\bar{X}_{PROJ} = 51.75$ $\sigma = 21.901$; P : $\bar{X}_{PROG} = 31.00$ $\sigma = 16.591$, $\bar{X}_{PROJ} = 43.00$ $\sigma = 22.266$).

8 DISCUSSION

Les résultats montrent que la projection et la projection combinée à une grille supplantent les autres modalités avec la grille seule et sans indice. Ces résultats peuvent néanmoins être modérés, en raison des conditions des expérimentations et de nombreux autres facteurs. Également, certains des résultats peuvent être mieux compris grâce aux entretiens avec les participants. Nous discutons de ces résultats ici.

8.1 Expérimentation "Absolue"

Les groupes d'hypothèses H1 et H2 ont été validés, tandis que H1bis et H2bis ne sont pas vérifiées (les valeurs p ne sont pas significatives). Cela signifie que les indices visuels constitués d'une projection sont plus efficaces en termes de perception de distance absolue, et impliquent une plus faible charge mentale perçue, même si nous ne pouvons pas statistiquement déterminer l'influence de l'ajout d'une grille pour représenter le sol. Quatre participants ont dit que la grille les aidait, mais surchargeait la visualisation par rapport à NAIVE ou PROJ. Deux participants ont déclaré que la grille était peut-être trop épaisse. De plus, la position de la grille était déterminée par la détection de la position du marqueur Hiro sur le sol. Bien que la précision soit plus élevée que celle de la simple cartographie spatiale HoloLens, la grille était toujours à environ 5 cm au-dessus du sol. La combinaison de ces deux imprécisions peut induire une mauvaise interprétation de la position de la projection, qui est censée coller à la grille.

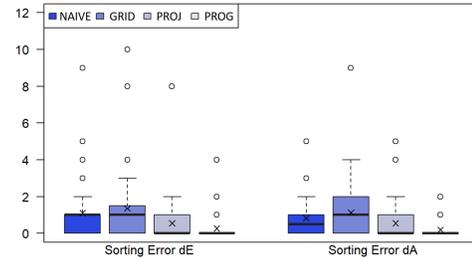


Figure 6: Erreurs de tri des objets virtuels de l'expérimentation "Relative" en fonction des modalités.

En ce qui concerne la projection, les entretiens montrent que certains participants étaient très confiants quant à leur performance en utilisant NAIVE ou GRID, plus qu'avec PROJ ou PROG. Nous ne leur avons pas expliqué à quoi ressemblaient les indices, ni comment les utiliser avant l'expérimentation. Certains participants ont donc préféré faire confiance à leur propre perception et ont choisi d'ignorer ces indices. Cependant, au vu des résultats globaux, nous voyons que la projection améliore grandement les performances, que ce soit pour PROJ ou PROG. Ces quelques utilisateurs pensaient donc, à tort, qu'ils pouvaient être plus efficaces sans indices.

8.2 Expérimentation "Relative"

Toutes les hypothèses de cette expérience n'ont pas été validées. Si l'on considère les comparaisons PROG-GRID et PROG-NAIVE, toutes les hypothèses sont validées (H3a, H4a, H5a, H3b, H4b, H5b). Cependant, en ce qui concerne les comparaisons de PROJ, les hypothèses ne sont pas toutes vérifiées en raison de la non significativité des valeurs de p (H3c, H4c, H5c, H3d, H4d, H5d).

On peut en déduire que, bien que les tests entre PROG et PROJ ne soient pas décisifs, PROG surpasse NAIVE et GRID pour ces tâches (en termes d'efficacité et d'amoindrissement de charge mentale perçue), contrairement à PROJ. On peut alors supposer que PROG est plus efficace que PROJ. D'autres expériences doivent être menées pour préciser les résultats entre PGD et GD, comme l'évaluation des différentes épaisseurs et/ou couleurs de la grille.

Dans cette expérience, nous voyons que PROG est meilleur que PROJ en termes de demande mentale. Cette différence par rapport à la première expérience peut s'expliquer par la nature de la tâche : il est utile d'avoir une grille lorsque l'on veut comparer deux objets, loin l'un de l'autre, mais à peu près à la même distance de l'utilisateur (distance d_E). En effet, selon les participants, la grille est utile pour comparer les distances puisqu'elle est régulière et permet donc des mesures. Les participants ont également ajouté que la grille leur permettait de cartographier la pièce.

9 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans cet article, nous évaluons quatre modalités au regard de la perception des distances verticales et horizontales dans le cas d'objets enterrés. Nos tests sur des objets simples montrent que la projection dessous est un meilleur choix pour afficher des objets souterrains en RA que la grille seule ou aucun indice. En effet, nous obtenons de meilleurs résultats en ce qui concerne la charge de

travail perçue et la performance. La combinaison avec la grille est également très utile pour percevoir les positions des objets virtuels et les comparer entre elles. Elle permet de mieux évaluer le positionnement absolu des objets et leurs relations spatiales. De plus, la connexion entre le sol et ces objets est également mieux comprise. Cependant, selon certains utilisateurs, cette combinaison semble rendre la visualisation un peu surchargée lorsqu'il y a beaucoup d'objets à afficher. Les tests ne montrent pas de différence significative entre cette combinaison et la projection seule, à l'exception de la demande mentale dans l'expérience sur le positionnement relatif qui montre que cette combinaison est meilleure que la projection seule.

Finalement, nous envisageons de mettre en œuvre plusieurs visualisations dans notre système final, afin de laisser à l'utilisateur le choix de la quantité d'informations dont il a besoin. En effet, la projection est suffisamment précise pour visualiser la position absolue des objets virtuels sous le sol. Cependant, lorsqu'il s'agit de comparer les positions des objets les uns par rapport aux autres, sa combinaison avec une grille est plus utile, notamment pour des objets proches.

Une autre question à aborder serait d'évaluer si les mêmes conclusions peuvent être tirées avec des objets situés au-dessus du sol. Nous prévoyons de tester la projection seule et combinée à la grille avec plus d'objets et d'évaluer l'impact de la densité de ces objets. Nous souhaitons également tester ces méthodes avec une géométrie plus complexe, des cubes reliés par des tuyaux, et améliorer la visualisation en modifiant l'apparence des données. La dernière étape consistera à intégrer des données réelles issues de plans de réseaux souterrains et à étudier comment ils sont perçus par l'utilisateur.

RÉFÉRENCES

- [1] Jong-gil Ahn, Euijai Ahn, Seulki Min, Hyeonah Choi, Howon Kim, and Gerard J Kim. 2019. Size Perception of Augmented Objects by Different AR Displays. In *International Conference on Human-Computer Interaction*. Springer, Cham, 337–344. https://doi.org/10.1007/978-3-030-23528-4_46
- [2] Benjamin Avery, Christian Sandor, and Bruce H Thomas. 2009. Improving Spatial Perception for Augmented Reality X-Ray Vision. In *2009 IEEE Virtual Reality Conference*. IEEE, 79–82. <https://doi.org/10.1109/VR.2009.4811002>
- [3] Michael Brand, Lukas Antonio Wulff, Yogi Hamdani, and Thorsten Schüppstahl. 2020. Accuracy of Marker Tracking on an Optical See-Through Head Mounted Display. In *Annals of Scientific Society for Assembly, Handling and Industrial Robotics*. Springer Berlin Heidelberg, 21–31. https://doi.org/10.1007/978-3-662-61755-7_3
- [4] Jiazhou Chen, Xavier Granier, Naiyang Lin, and Qunsheng Peng. 2010. On-line visualization of underground structures using Context features. In *Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*. VRST. ACM, New York, NY, USA, 167–170. <https://doi.org/10.1145/1889863.1889898>
- [5] Jonatan Cöster. 2019. *The effects of shadows on depth perception in augmented reality on a mobile device*. Technical Report. <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1305422&dsid=6742>
- [6] James E Cutting. 1997. How the eye measures reality and virtual reality. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers* 29, 1 (mar 1997), 27–36. <https://doi.org/10.3758/BF03200563>
- [7] Lucio Tommaso De Paolis and Valerio De Luca. 2018. Augmented visualization with depth perception cues to improve the surgeon's performance in minimally invasive surgery. *Medical & Biological Engineering & Computing* 57, 5 (2018), 995–1013. <https://doi.org/10.1007/s11517-018-1929-6>
- [8] Arindam Dey, Andrew Cunningham, and Christian Sandor. 2010. Evaluating depth perception of photorealistic mixed reality visualizations for occluded objects in outdoor environments. In *Proceedings of the 17th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology - VRST '10*. ACM Press, New York, NY, USA, 211. <https://doi.org/10.1145/1889863.1889911>
- [9] Mustafa Tolga Eren and Selim Balcisoy. 2017. Evaluation of X-ray visualization techniques for vertical depth judgments in underground exploration. *The Visual Computer* 34, 3 (2017), 405–416. <https://doi.org/10.1007/s00371-016-1346-5>
- [10] Taiki Fukiage, Takeshi Oishi, and Katsushi Ikeuchi. 2012. Reduction of contradictory partial occlusion in mixed reality by using characteristics of transparency perception. In *2012 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*. IEEE, 129–139. <https://doi.org/10.1109/ISMAR.2012.6402549>
- [11] C. Furmanski, R. Azuma, and M. Daily. 2002. Augmented-reality visualizations guided by cognition: perceptual heuristics for combining visible and obscured information. In *Proceedings. International Symposium on Mixed and Augmented Reality*. IEEE Comput. Soc, 215–320. <https://doi.org/10.1109/ISMAR.2002.1115091>
- [12] Yuan Gao, Etienne Peillard, Jean-Marie Normand, Guillaume Moreau, Yue Liu, and Yongtian Wang. 2019. Influence of virtual objects' shadows and lighting coherence on distance perception in optical see-through augmented reality. *Journal of the Society for Information Display* 28, 2 (2019), 117–135. <https://doi.org/10.1002/jsid.832>
- [13] Florian Heinrich, Kai Bornemann, Kai Lawonn, and Christian Hansen. 2019. Depth Perception in Projective Augmented Reality: An Evaluation of Advanced Visualization Techniques. In *25th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*. ACM, New York, NY, USA, 1–11. <https://doi.org/10.1145/3359996.3364245>
- [14] S Junghanns, G Schall, and D Schmalstieg. 2008. VIDENTE—What lies beneath?, A new approach of locating and identifying buried utility assets on site. In *Proceedings of the 5th International Symposium on LBS & TeleCartography (LBS 08), showcase*. Salzburg, Austria, 28. <https://pdfs.semanticscholar.org/d3e5/c10a2562652ea91d9f4e1b2c28d5ea811b5a.pdf>
- [15] Denis Kalkofen, Erick Mendez, and Dieter Schmalstieg. 2007. Interactive Focus and Context Visualization for Augmented Reality. In *6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*. IEEE, 1–10. <https://doi.org/10.1109/ISMAR.2007.4538846>
- [16] D. Kalkofen, M. Tatzgern, and D. Schmalstieg. 2009. Explosion Diagrams in Augmented Reality. In *2009 IEEE Virtual Reality Conference*. IEEE, 71–78. <https://doi.org/10.1109/VR.2009.4811001>
- [17] Denis Kalkofen, Eduardo Veas, Stefanie Zollmann, Markus Steinberger, and Dieter Schmalstieg. 2013. Adaptive ghosted views for Augmented Reality. In *2013 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*. IEEE, 1–9. <https://doi.org/10.1109/ISMAR.2013.6671758>
- [18] M.A. Livingston, Zhuming Ai, J.E. Swan, and H.S. Smallman. 2009. Indoor vs. Outdoor Depth Perception for Mobile Augmented Reality. In *2009 IEEE Virtual Reality Conference*. IEEE, 55–62. <https://doi.org/10.1109/VR.2009.4810999>
- [19] Martin Luboschik, Philip Berger, and Oliver Staadt. 2016. On Spatial Perception Issues in Augmented Reality Based Immersive Analytics. In *Proceedings of the 2016 ACM Companion on Interactive Surfaces and Spaces - ISS Companion '16*. ACM Press, New York, New York, USA, 47–53. <https://doi.org/10.1145/3009939.3009947>
- [20] Erick Mendez and Dieter Schmalstieg. 2009. Importance masks for revealing occluded objects in augmented reality. In *Proceedings of the 16th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology - VRST '09*. ACM Press, New York, NY, USA, 247. <https://doi.org/10.1145/1643928.1643988>
- [21] Paul Milgram, Haruo Takemura, Akira Utsumi, and Fumio Kishino. 1995. Augmented reality: a class of displays on the reality-virtuality continuum. In *Telematics and Telepresence Technologies*, Hari Das (Ed.). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.197321>
- [22] A Montero, T Zarraonandia, P Diaz, and I Aedo. 2017. Designing and implementing interactive and realistic augmented reality experiences. *Universal Access in the Information Society* 18, 1 (2017), 49–61.
- [23] Mai Otsuki, Yuko Kamioka, Yuka Kitai, Mao Kanzaki, Hideaki Kuzuoka, and Hiroko Uchiyama. 2015. Please show me inside. In *SIGGRAPH Asia 2015 Emerging Technologies on - SA '15*. ACM Press, New York, NY, USA, 1–3. <https://doi.org/10.1145/2818466.2818469>
- [24] Cledja Rolim, Dieter Schmalstieg, Denis Kalkofen, and Veronica Teichrieb. 2015. [POSTER] Design Guidelines for Generating Augmented Reality Instructions. In *IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*. IEEE, 120–123. <https://doi.org/10.1109/ISMAR.2015.36>
- [25] Carlos Salas Rosales, Grant Pointon, Haley Adams, Jeanine Stefanucci, Sarah Creem-Regehr, William B. Thompson, and Bobby Bodenheimer. 2019. Distance Judgments to On- and Off-Ground Objects in Augmented Reality. In *IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*. IEEE, 237–243. <https://doi.org/10.1109/VR.2019.8798095>
- [26] Menandro Roxas, Tomoki Hori, Taiki Fukiage, Yasuhide Okamoto, and Takeshi Oishi. 2018. Occlusion handling using semantic segmentation and visibility-based rendering for mixed reality. In *Proceedings of the 24th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology - VRST '18*. ACM Press, New York, NY, USA, 1–8. <https://doi.org/10.1145/3281505.3281546>
- [27] Christian Sandor, Andrew Cunningham, Arindam Dey, and Ville-Veikko Mattila. 2010. An Augmented Reality X-Ray system based on visual saliency. In *2010 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*. IEEE, 27–36. <https://doi.org/10.1109/ISMAR.2010.5643547>
- [28] Gerhard Schall, Erick Mendez, Ernst Kruijff, Eduardo Veas, Sebastian Junghanns, Bernhard Reitinger, and Dieter Schmalstieg. 2008. Handheld Augmented Reality for underground infrastructure visualization. *Personal and Ubiquitous Computing* 13, 4 (2008), 281–291. <https://doi.org/10.1007/s00779-008-0204-5>

- [29] Gurjot Singh, Stephen R Ellis, and J Edward Swan. 2020. The Effect of Focal Distance, Age, and Brightness on Near-Field Augmented Reality Depth Matching. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 26, 2 (2020), 1385–1398. <https://doi.org/10.1109/tvcg.2018.2869729>
- [30] Patrick Skinner, Jonathan Ventura, and Stefanie Zollmann. 2018. Indirect Augmented Reality Browser for GIS Data. In *Adjunct Proceedings - 2018 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, ISMAR-Adjunct 2018*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 145–150. <https://doi.org/10.1109/ISMAR-Adjunct.2018.00054>
- [31] N Sugano, H Kato, and K Tachibana. 2003. The effects of shadow representation of virtual objects in augmented reality. In *The Second IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*. 76–83. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1240690/>
- [32] R Core Team. 2013. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. *Foundation for Statistical Computing* (2013).
- [33] Koorosh Vaziri, Peng Liu, Sahar Aseeri, and Victoria Interrante. 2017. Impact of visual and experiential realism on distance perception in VR using a custom video see-through system. In *Proceedings of the ACM Symposium on Applied Perception - SAP '17*. ACM Press, New York, NY, USA, 1–8. <https://doi.org/10.1145/3119881.3119892>
- [34] Jonathan Ventura, Stefanie Zollmann, Simon Stannus, Mark Billinghurst, and Remi Driancourt. 2020. Understanding AR inside and out — Part Two. In *ACM SIGGRAPH 2020 Courses*. ACM, New York, NY, USA, 1–243. <https://doi.org/10.1145/3388769.3407543>
- [35] Wei Wang, Xingxing Wu, Guanchen Chen, Zeqiang Chen, Wei Wang, Xingxing Wu, Guanchen Chen, and Zeqiang Chen. 2018. Holo3D GIS: Leveraging Microsoft HoloLens in 3D Geographic Information. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 7, 2 (feb 2018), 60. <https://doi.org/10.3390/ijgi7020060>
- [36] Colin Ware. 2004. *Information Visualization: Perception for Design: Second Edition*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-1-55860-819-1.X5000-6>
- [37] C Ware. 2020. Information visualization: perception for design. (2020). https://books.google.com/books?hl=fr&lr=&id=3-HFDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&q=Information+Visualization:+Perception+for+Design&ots=o_{_}jarOBnfNd&sig=OQ0YT3z7MSSdMA1buGJiP289yqM
- [38] Sean White and Steven Feiner. 2009. Sitelens: Situated visualization techniques for urban site visits. In *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*. ACM Press, New York, New York, USA, 1117–1120. <https://doi.org/10.1145/1518701.1518871>
- [39] Austin Wilson and Hong Hua. 2017. Design and prototype of an augmented reality display with per-pixel mutual occlusion capability. *Optics Express* 25, 24 (nov 2017), 30539. <https://doi.org/10.1364/OE.25.030539>
- [40] J. Wither and T. Hollerer. 2005. Pictorial Depth Cues for Outdoor Augmented Reality. In *Ninth IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC'05)*. IEEE, 92–99. <https://doi.org/10.1109/ISWC.2005.41>
- [41] Bereket Haile Woldegiorgis, Chiuhsiang Joe Lin, and Wei-Zhe Liang. 2018. Impact of parallax and interpupillary distance on size judgment performances of virtual objects in stereoscopic displays. *Ergonomics* 62, 1 (2018), 76–87. <https://doi.org/10.1080/00140139.2018.1526328>
- [42] Jiejie Zhu, Zhigeng Pan, Chao Sun, and Wenzhi Chen. 2009. Handling occlusions in video-based augmented reality using depth information. *Computer Animation and Virtual Worlds* 21, 5 (2009), 509–521. <https://doi.org/10.1002/cav.326>
- [43] Stefanie Zollmann, Raphael Grasset, Tobias Langlotz, Wei Hong Lo, Shohei Mori, and Holger Regenbrecht. 2020. Visualization Techniques in Augmented Reality: A Taxonomy, Methods and Patterns. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* (2020). <https://doi.org/10.1109/TVCG.2020.2986247>
- [44] Stefanie Zollmann, Raphael Grasset, Gerhard Reitmayr, and Tobias Langlotz. 2014. Image-based X-ray visualization techniques for spatial understanding in outdoor augmented reality. In *Proceedings of the 26th Australian Computer-Human Interaction Conference on Designing Futures the Future of Design - OzCHI '14*. ACM Press, New York, New York, USA, 194–203. <https://doi.org/10.1145/2686612.2686642>
- [45] Stefanie Zollmann, Christof Hoppe, Tobias Langlotz, and Gerhard Reitmayr. 2014. FlyAR: Augmented reality supported micro aerial vehicle navigation. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 20, 4 (2014), 560–568. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2014.24>
- [46] Stefanie Zollmann, Denis Kalkofen, Erick Mendez, and Gerhard Reitmayr. 2010. Image-based ghostings for single layer occlusions in augmented reality. In *2010 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*. IEEE, 19–26. <https://doi.org/10.1109/ISMAR.2010.5643546>
- [47] Stefanie Zollmann, Gerhard Schall, Sebastian Junghanns, and Gerhard Reitmayr. 2012. Comprehensible and Interactive Visualizations of GIS Data in Augmented Reality. In *International Symposium on Visual Computing*. Springer, Berlin, Heidelberg, 675–685. https://doi.org/10.1007/978-3-642-33179-4_64