

INTERACTION AVEC UNE MAQUETTE PHYGITALE : GESTION DES OCCULTATIONS PHYSIQUES ET NUMÉRIQUES

Soutenance de thèse – 5 décembre 2025

Présentée et soutenue par Clément Truillet

Thèse dirigée par Emmanuel Dubois et Marcos Serrano

EDMITT



Thierry Duval, Rapporteur, IMT Atlantique

Thomas Pietrzak, Rapporteur, Université de Lille

Jean-Pierre Jessel, Examineur, Université de Toulouse

Laurence Nigay, Examinatrice, Université Grenoble Alpes



DE LA VISUALISATION SITUÉE ...

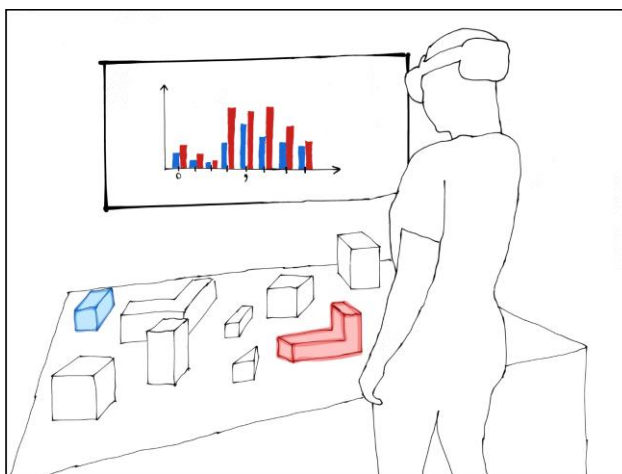
Présenter des **données numériques** à proximité d'un **objet physique** générateur ou concerné par cette donnée

Cet objet physique est le **référent**

Données numériques et référents physiques répartis tout autour de l'utilisateur

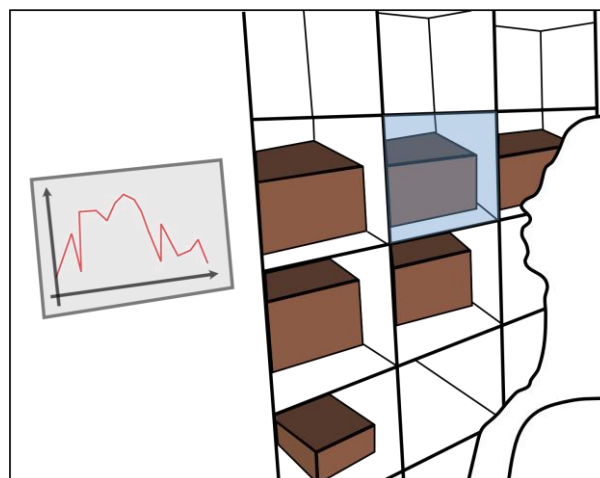
Monitoring énergétique

Consommation d'un bâtiment



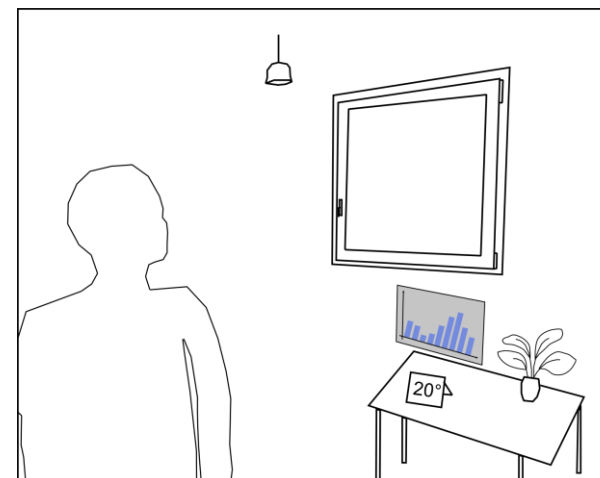
Logistique d'entrepôt

Historique des stocks d'un produit



Maison connectée

Données hebdomadaires de capteurs



DE LA VISUALISATION SITUÉE ... À L'INTERACTION SITUÉE

Présenter des **données numériques** à proximité d'un **objet physique** générateur ou concerné par cette donnée

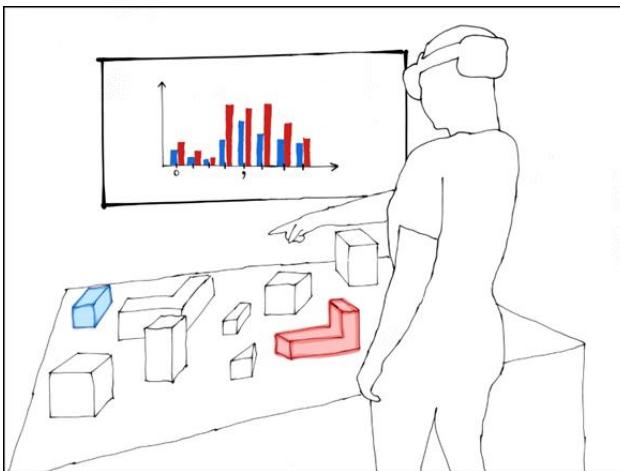
Cet objet physique est le **réfèrent**

Données numériques et référents physiques répartis tout autour de l'utilisateur

Permettre aux utilisateurs d'interagir avec ces multiples **sources** et **types** de données

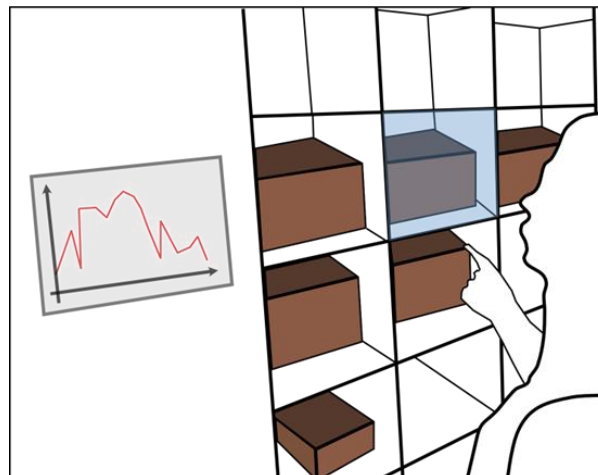
Monitoring énergétique

Consommation d'un bâtiment



Logistique d'entrepôt

Historique des stocks d'un produit



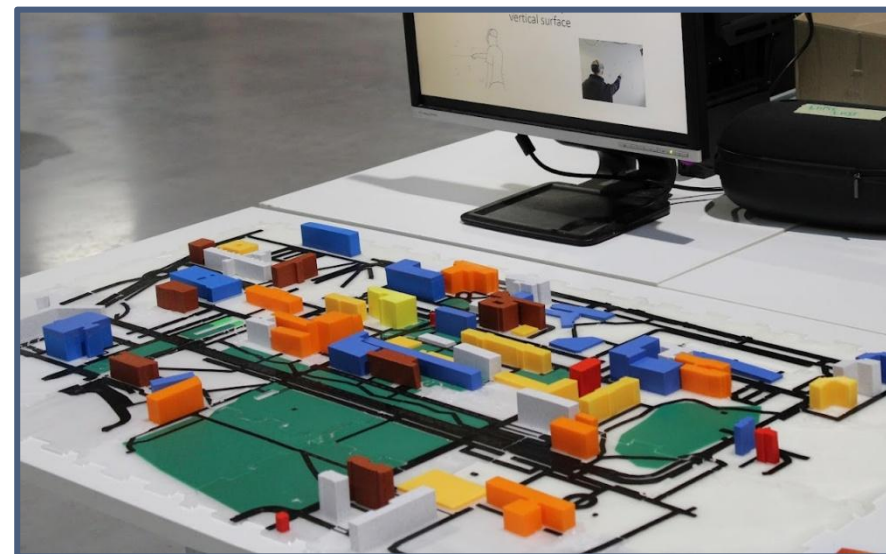
Maison connectée

Données hebdomadaires de capteurs

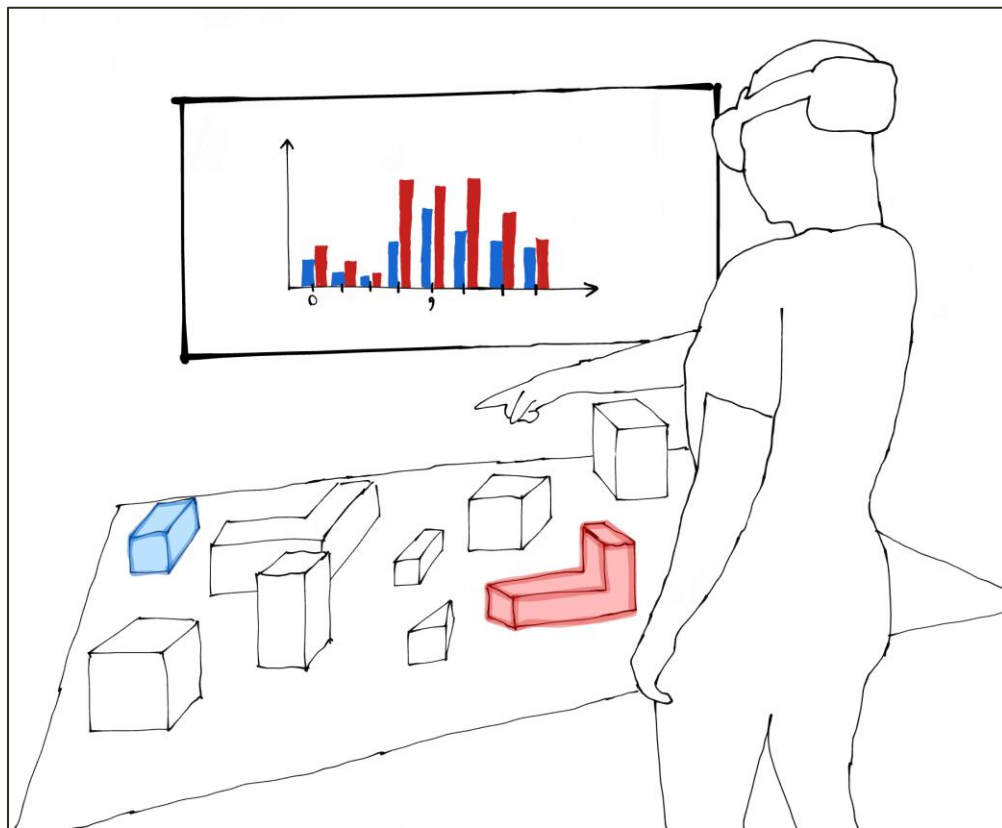


UN CAS D'USAGE CONCRET : LE PROJET AMURB

- Simulation **interactive** pour anticiper l'impact des projets d'aménagements urbains sur la mobilité
- Interaction avec des **modélisations 3D** de bâtiments répartis sur une maquette
- Projet **multidisciplinaire** : simulation multi-agent, RA-RV, modélisation 3D, SHS et IHM



LA RÉALITÉ AUGMENTÉE POUR L'INTERACTION SITUÉE



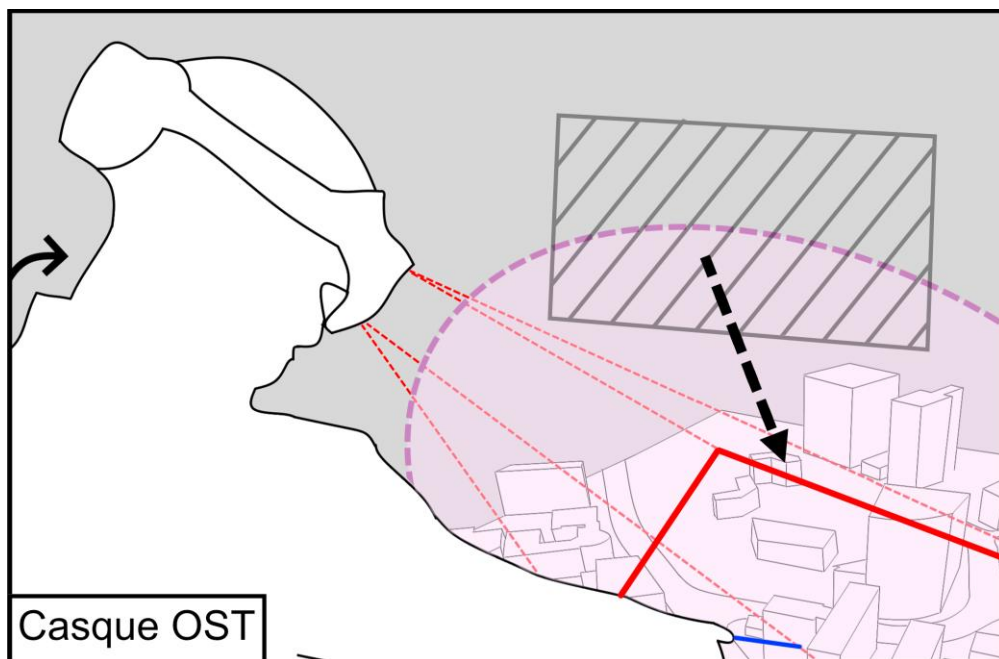
Apport des casques de Réalité Augmentée

- Grands espaces d'affichages
- Multiples points de vue
- Exploration spatiale des données

Casques **Semi-Transparents** (OST) : au plus proche de la réalité

- Ancrage de l'interaction sur le référent
- Interaction mains libres
- Mais un champ d'affichage **limité**

UN CHAMP D'AFFICHAGE LIMITÉ

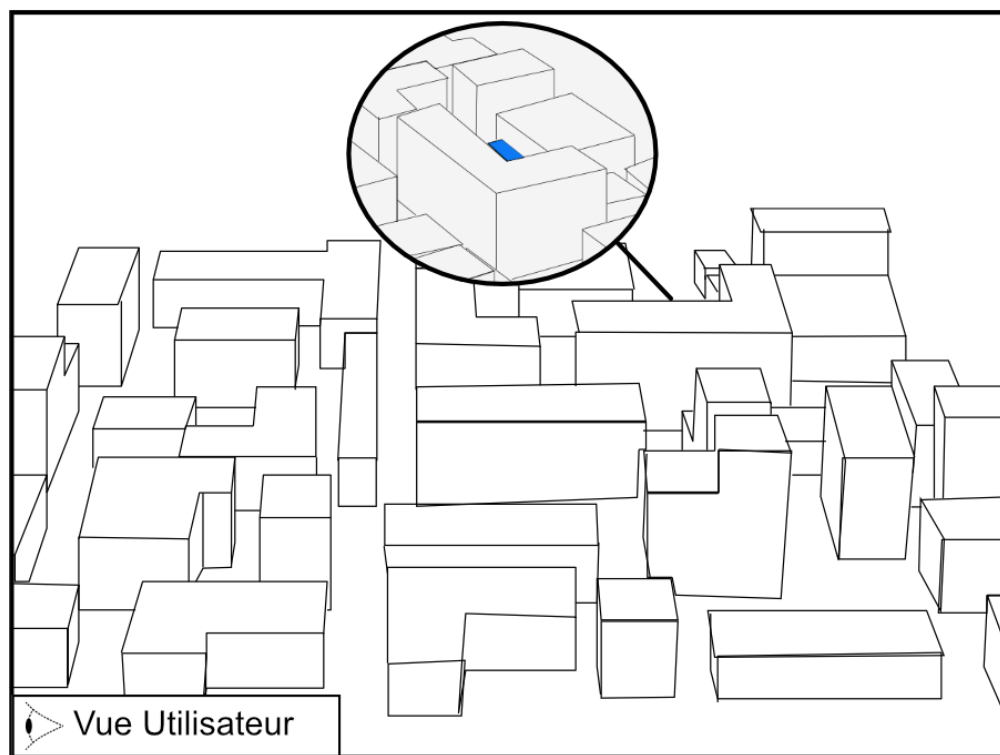


- Champ de vision humain
 - Vision des référents physiques
- Champ d'affichage du casque
 - Vision des données numériques
- Sélection des référents physiques
 - Pointage avec un rayon qu'on ne voit pas
 - Nécessité de mouvement de tête afin de voir le rayon
 - Perte de l'attention de l'utilisateur sur les données



Pointage des référents physiques autour du champ d'affichage du casque

OCCULTATION PHYSIQUE DES RÉFÉRENTS



- De multiples référents physiques induisent de multiples occultations
- Les référents physiques ne peuvent être ni déplacés, ni rendus invisibles



Réduction de l'occultation des référents physiques en Réalité Augmentée

OBJECTIF DE LA THÈSE ET VERROUS

Étudier l'interaction avec des référents physiques
pour la visualisation située en RA
basée sur des casques semi-transparent



Pointage des référents physiques autour
du champ d'affichage du casque



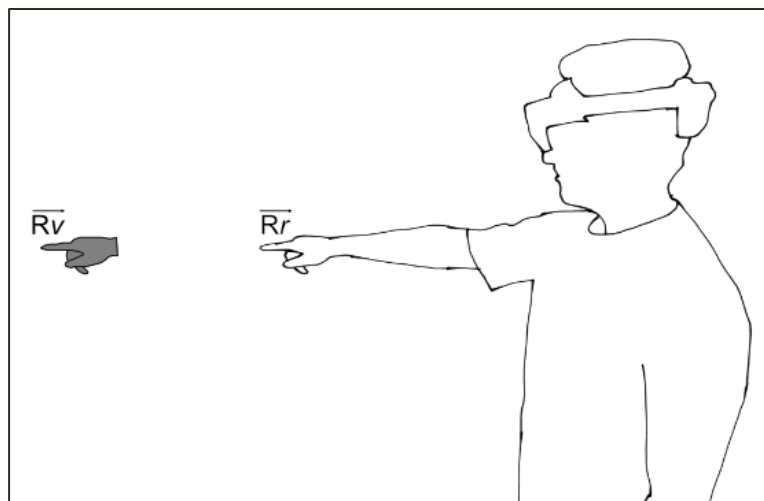
Réduction de l'occultation des référents
physiques en Réalité Augmentée

POINTAGE SUR DES OBJETS EN RÉALITÉ VIRTUELLE

Main virtuelle

Go-Go

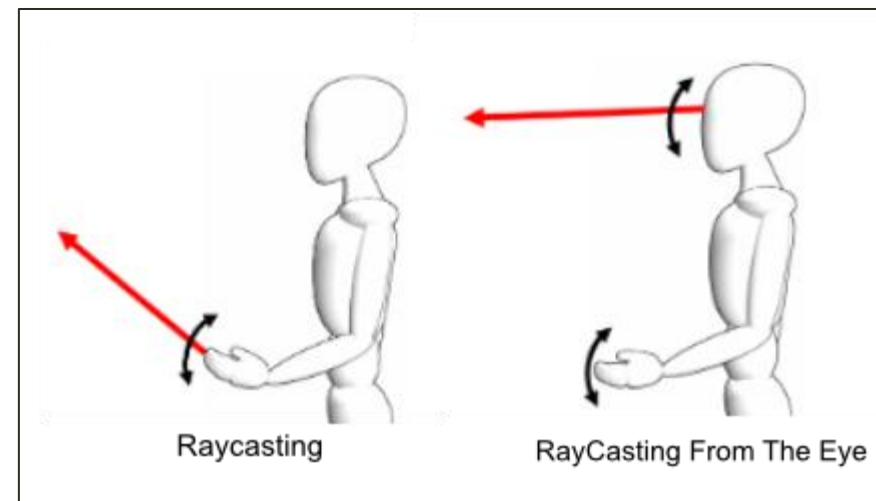
[Poupyrev et al., 1996]



Lancer de rayon

Raycasting et Raycasting From the Eye

[Argelaguet et Andujar, 2008]



Pour les tâches de sélection et de **pointage**, les techniques de **lancer de rayon** sont plus rapides

[Bowman et al., PRESENCE'01]

POINTAGE SUR DES OBJETS PHYSIQUES EN RÉALITÉ AUGMENTÉE

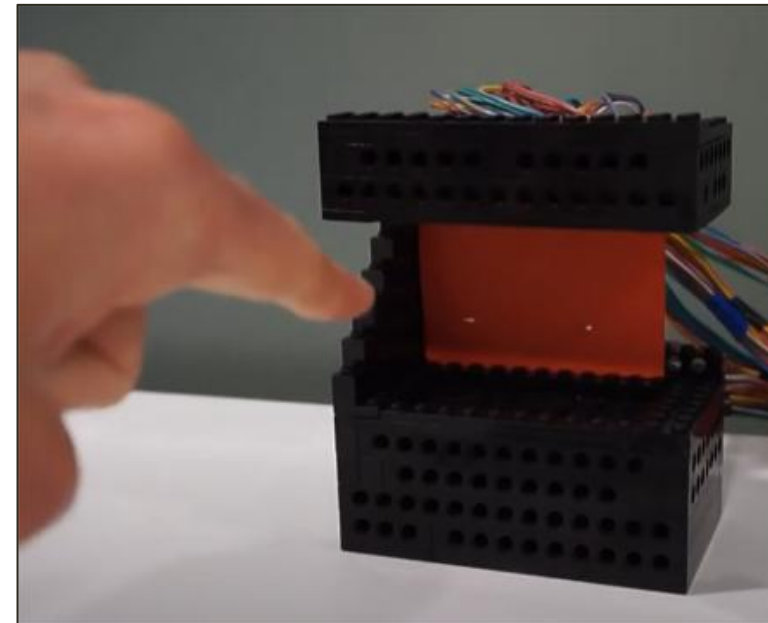
TouchGlass

[Cabric et al., 2019]



Point-and-Shake

[Freeman et al., 2018]



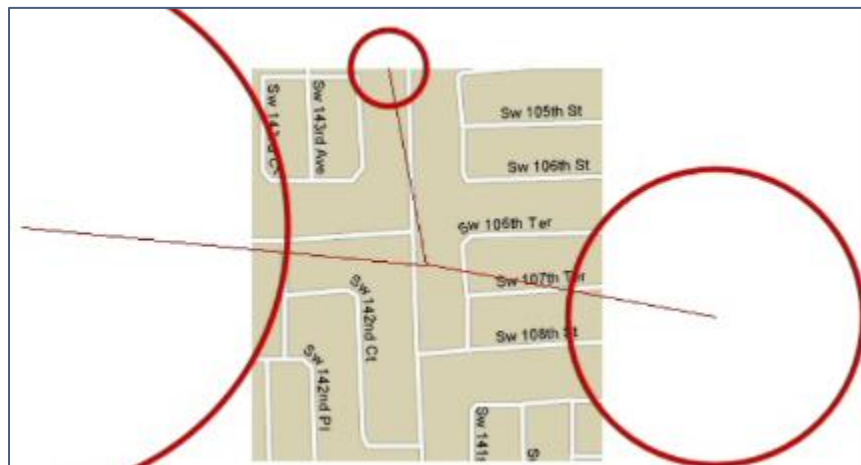
Travaux liés à des **limites physiques** et qui demandent une **augmentation de l'environnement**

LOCALISATION DES OBJETS SITUÉS AUTOUR DU CHAMP DE VISION

Indication de la position des objets

Halo

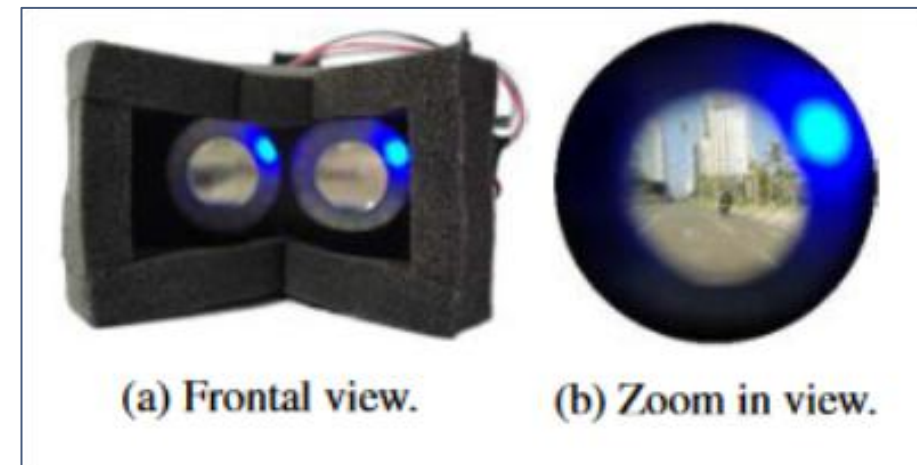
[Baudisch et Rosenholtz., 2003]



Indication de la direction des objets

Monocular

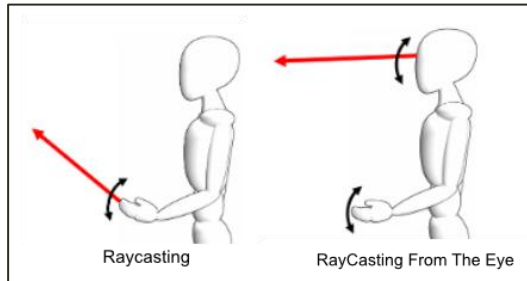
[Gruenefeld et al., 2018]



Inadaptés à la Réalité Augmentée basée OST car les objets sont **visibles** dans le champ de vision

SYNTHÈSE DE L'ÉTAT DE L'ART

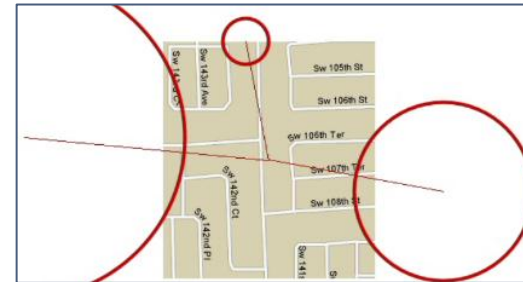
Pointer des objets en Réalité Virtuelle



Pointer des objets physiques en RA



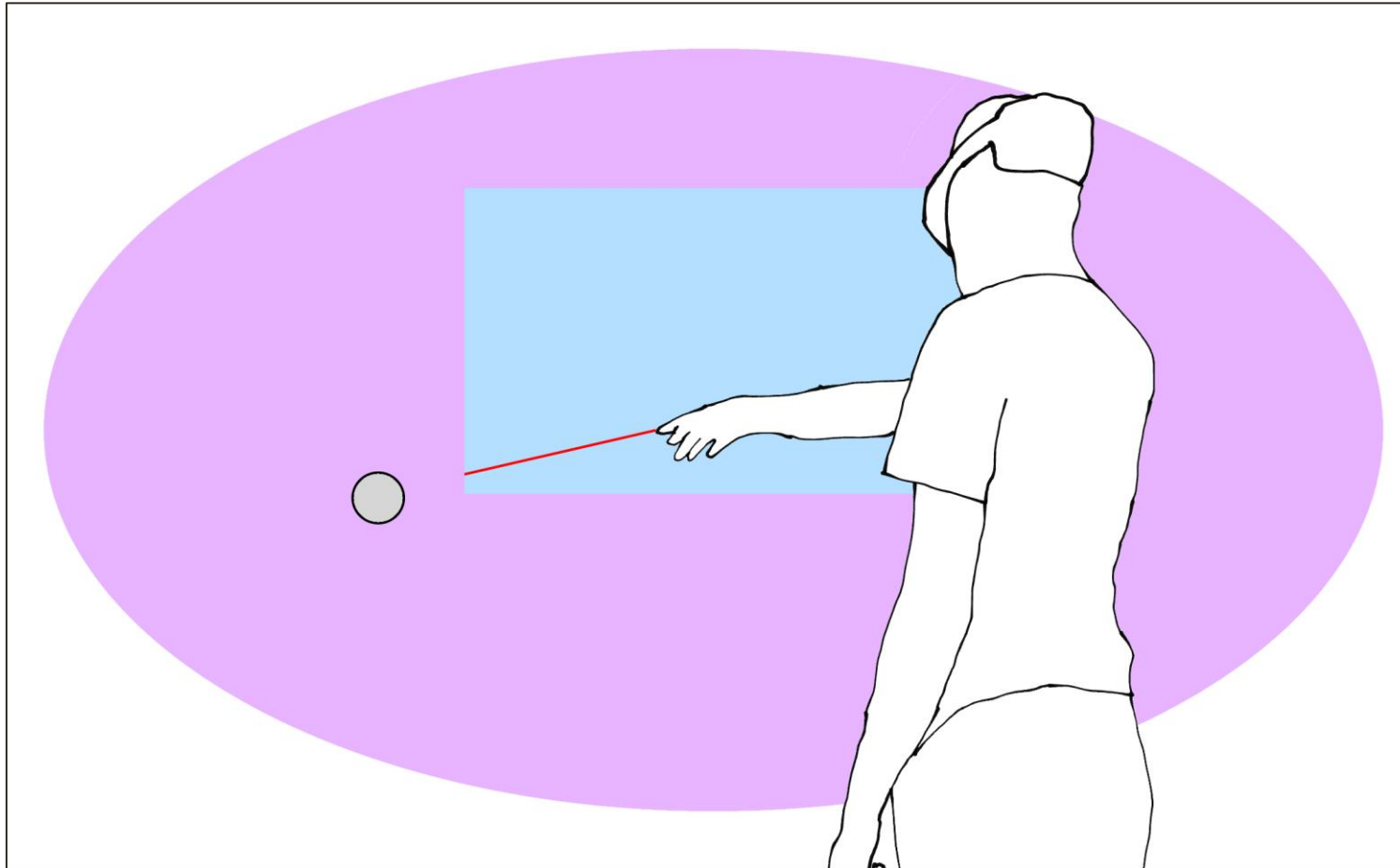
Localisation des objets situés autour du champ de vision



Pointage des objets physiques autour du champ d'affichage du casque



CARACTÉRISATION DU POINTAGE **DANS** ET **AUTOUR** DU CHAMP D'AFFICHAGE DU CASQUE

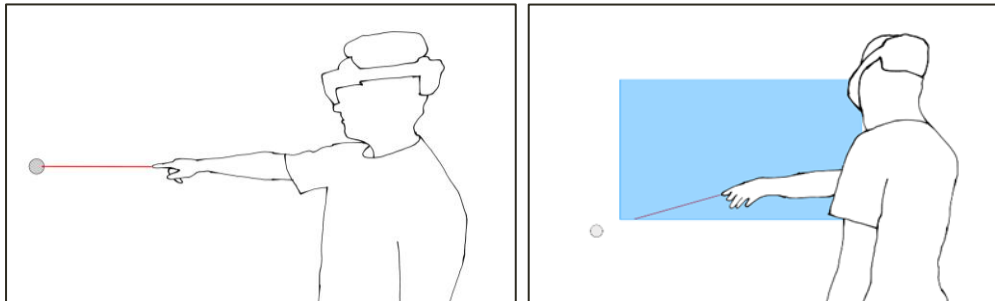


NATURE DU RAYON

Rayon Continu

Du bras à la cible

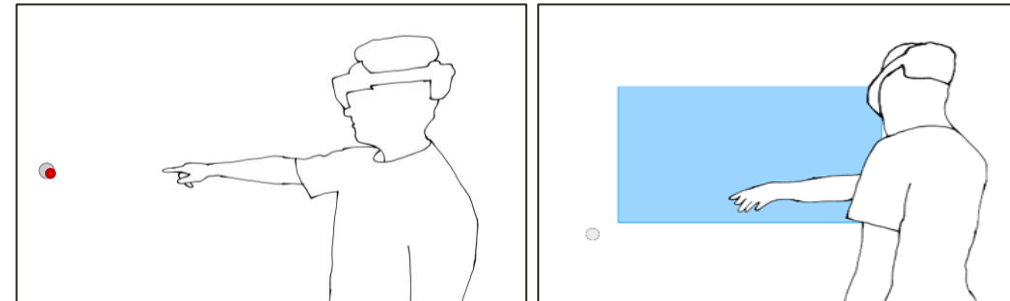
Ligne continue jusqu'au bout du champ d'affichage du casque



Rayon Ponctuel

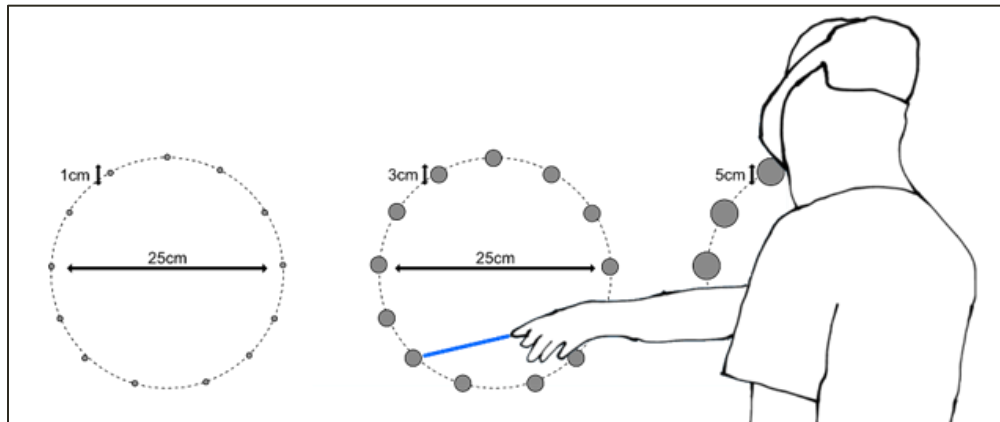
Sphère sur la cible

Visible seulement dans le champ d'affichage du casque

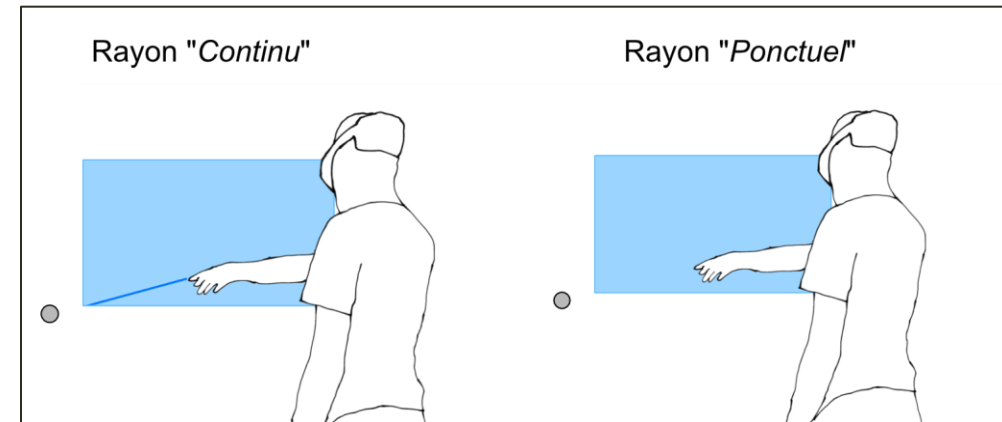


ETUDES

Etude 1 - Pointage d'un objet **dans** le champ d'affichage du casque



Etude 2 - Pointage d'un objet **autour** du champ d'affichage du casque



Facteurs

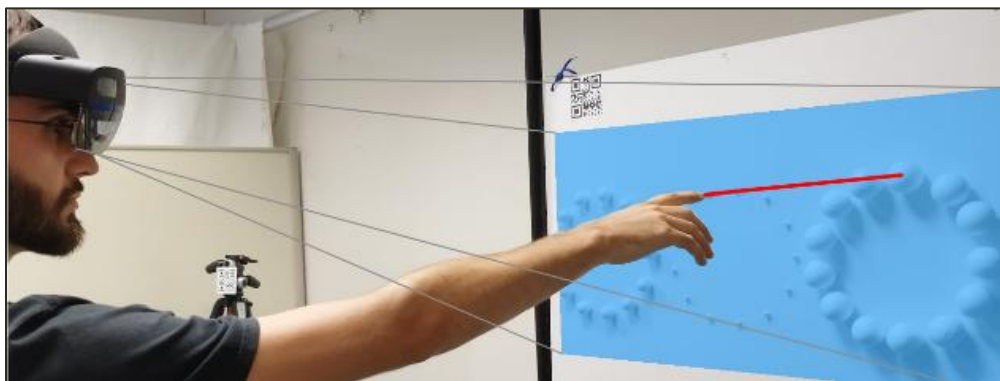
- Nature du rayon
- Cibles de différentes tailles et distances

Tâche : pointer naturellement la cible

12 Participants

RÉSULTATS DES ÉTUDES

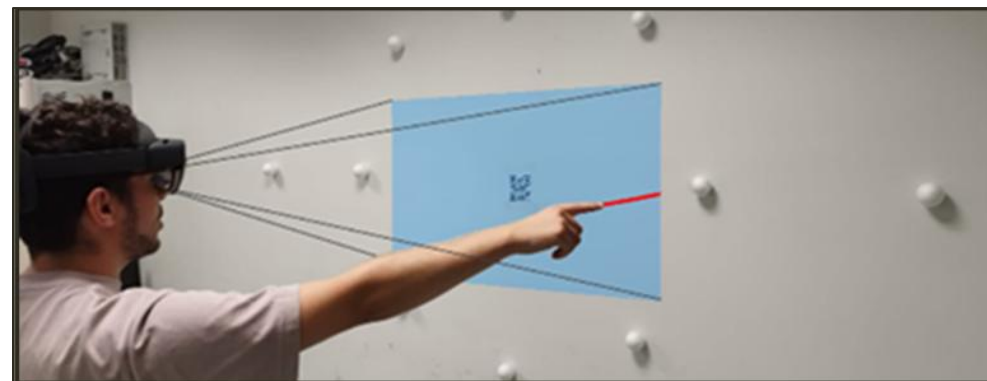
Etude 1 - Pointage d'un objet **dans** le champ d'affichage du casque



Avec feedback, le pointage est possible

Que ce soit avec le rayon Continu ou avec le rayon Ponctuel

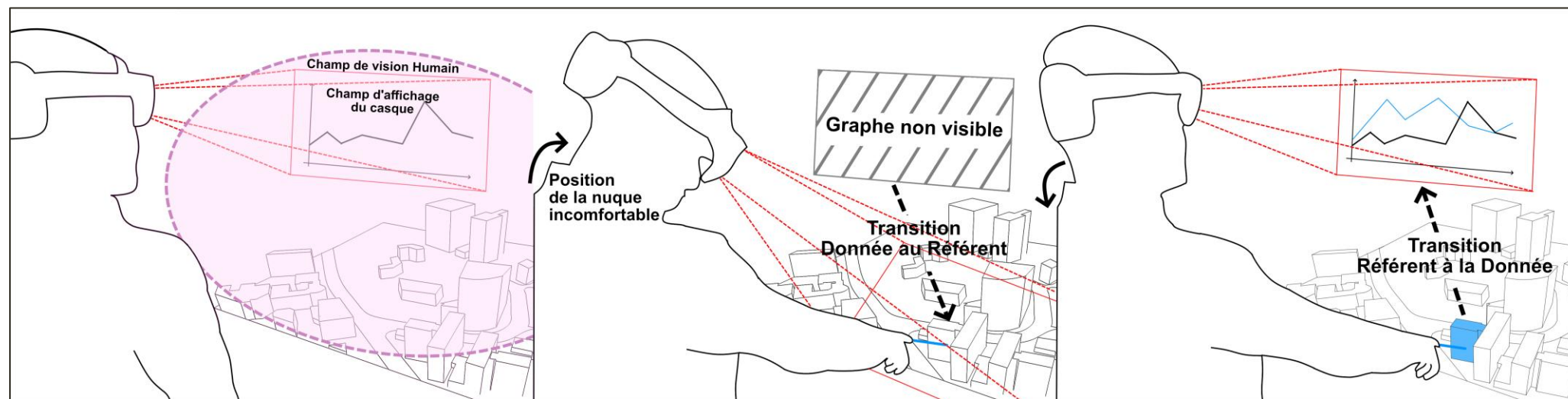
Etude 2 - Pointage d'un objet **autour** du champ d'affichage du casque



Quasi-impossibilité de pointer avec succès une cible

- Taux de succès entre 0,3% (Ponctuel) et 4,7% (Continu)
- Rayon Continu qui perturbe

CONCEPTION DE TECHNIQUES DE POINTAGE **AUTOUR** DU CHAMP D'AFFICHAGE DU CASQUE



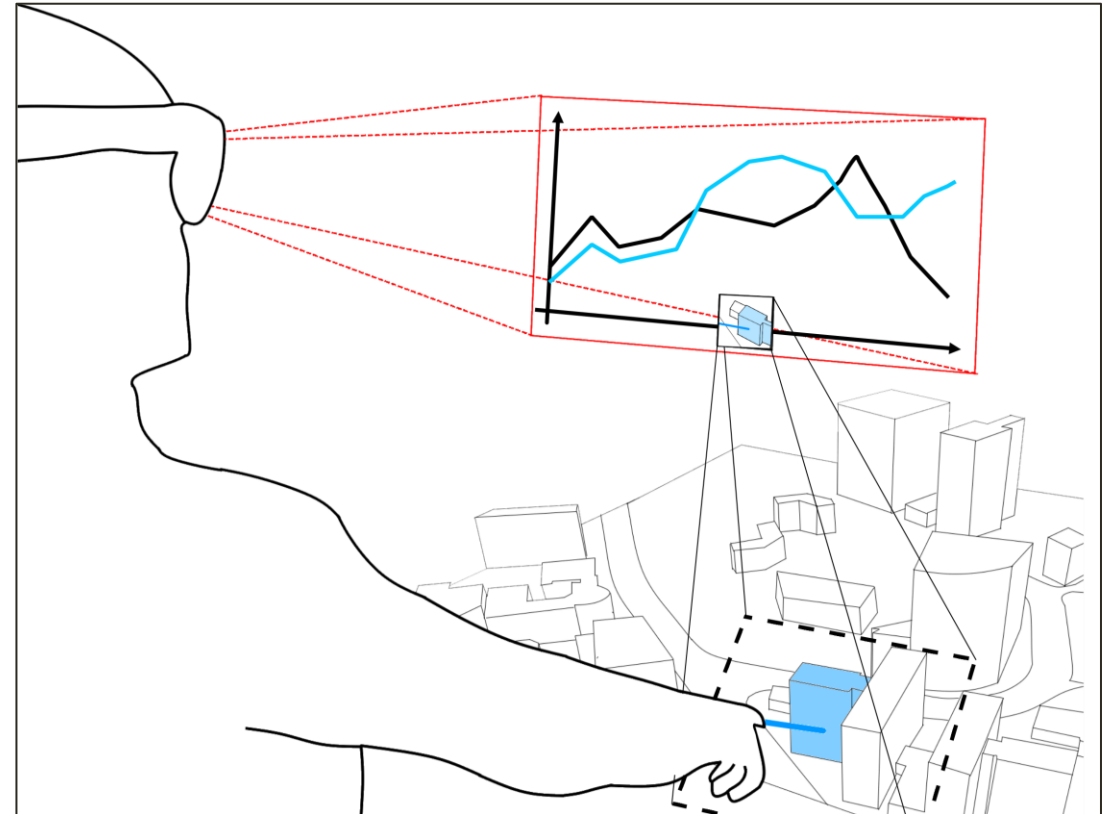
But : éviter les mouvements de têtes, c'est-à-dire les transitions *Données-Référents*

NOTRE APPROCHE : UTILISER UNE FOCUS VIEW

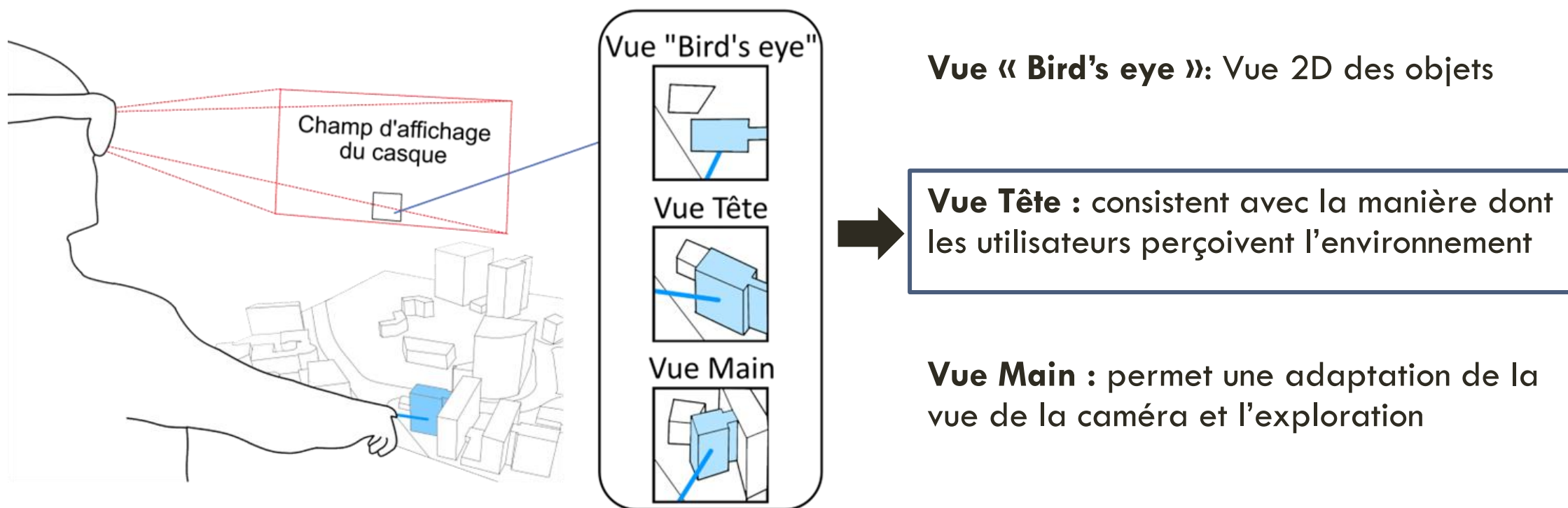
Focus View

- Zone de feedback
- Dans le casque, fixe

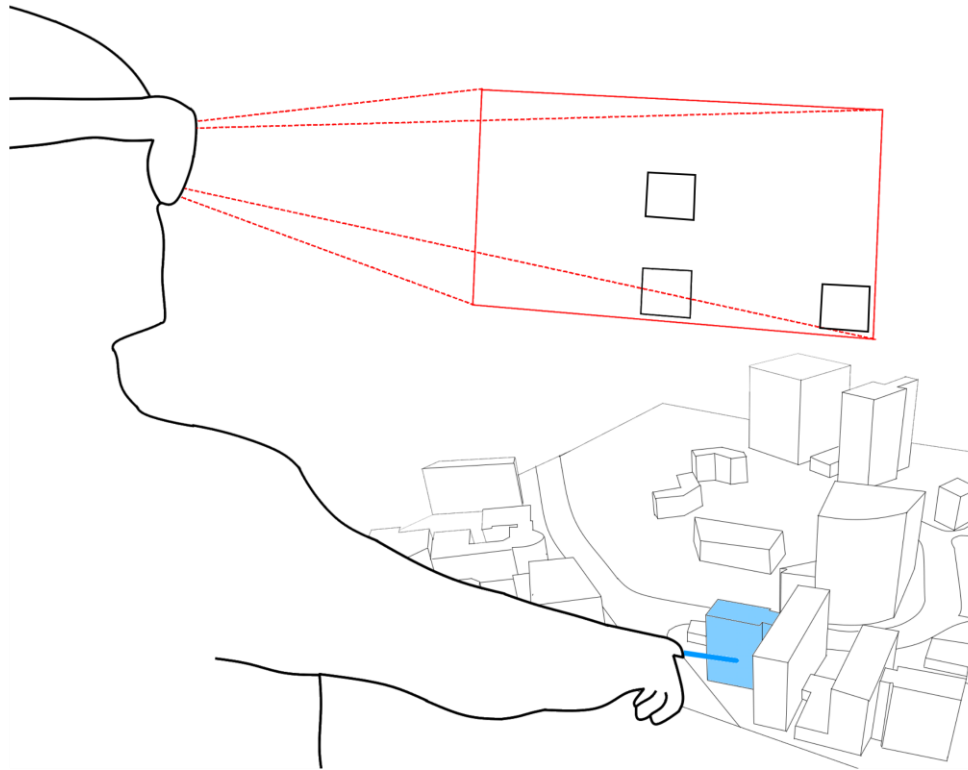
Reproduit une zone de l'environnement physique autour du point d'impact du rayon



FACTEUR — POSITION DE LA CAMERA VIRTUELLE



FACTEUR — POSITION DE LA FOCUS VIEW DANS LE CASQUE



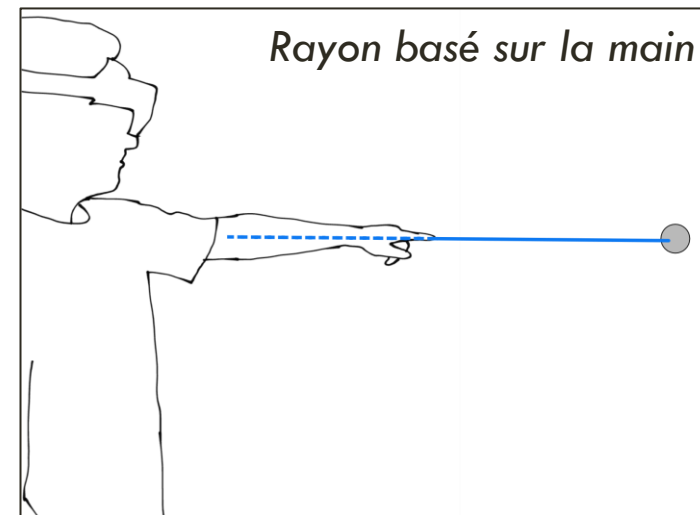
Centrée : Toujours visible mais induit de l'occultation de l'environnement

Coin : Réduit l'occultation mais peut être difficile à voir

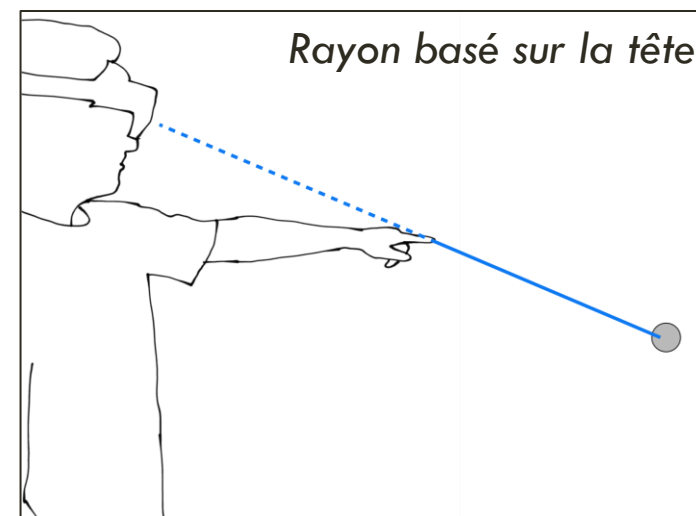
Au centre inférieur : Toujours visible et réduit l'occultation

FACTEUR — FORME DU RAYON

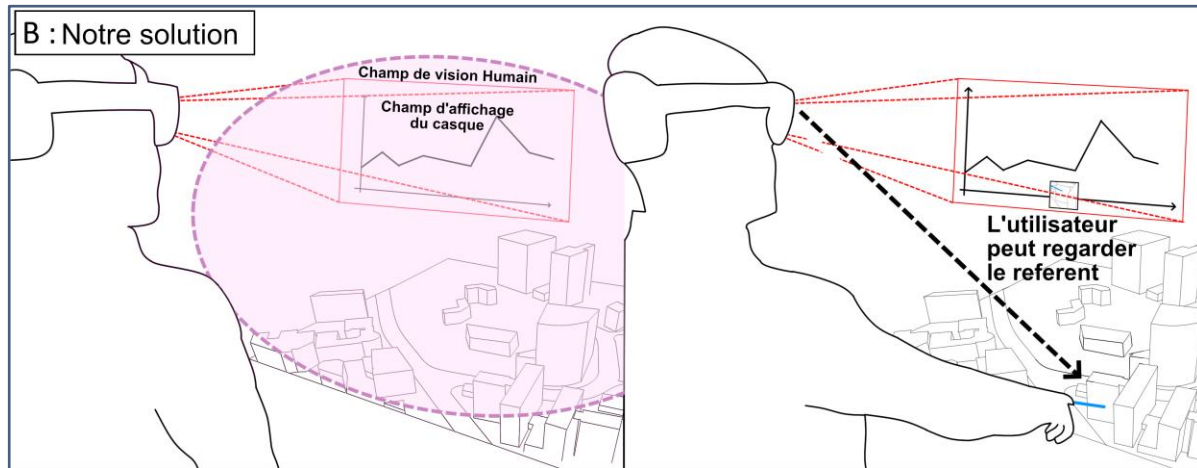
Rayon basé sur la main : lancer de rayon traditionnel



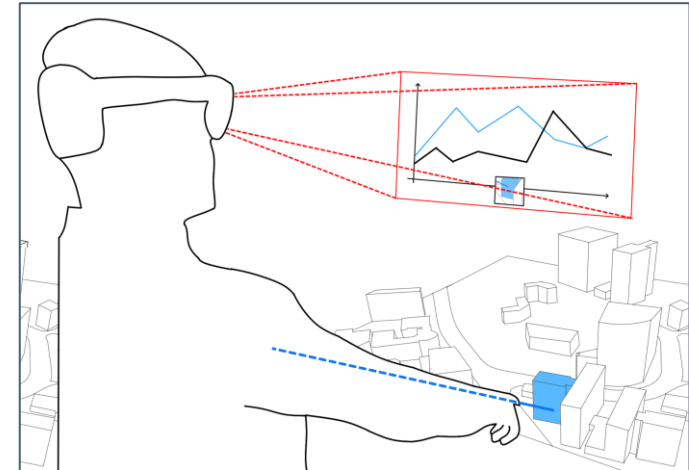
Rayon basé sur la tête : l'utilisateur doit aligner son doigt avec la cible pour la sélectionner



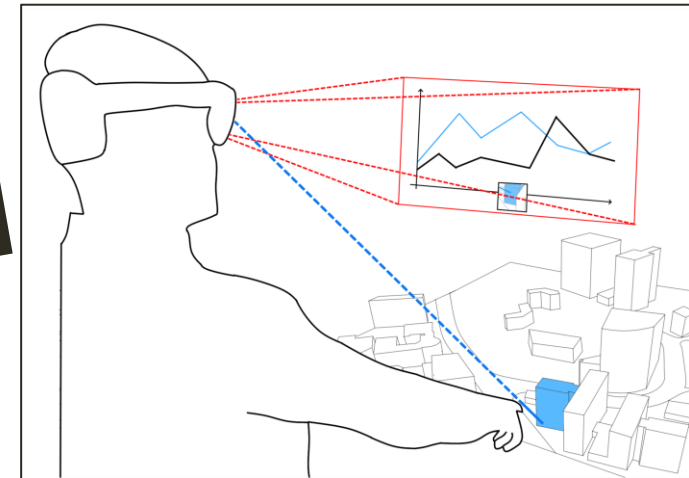
DEUX TECHNIQUES ÉTUDIÉES



Technique Arm



Technique Head-To-Finger

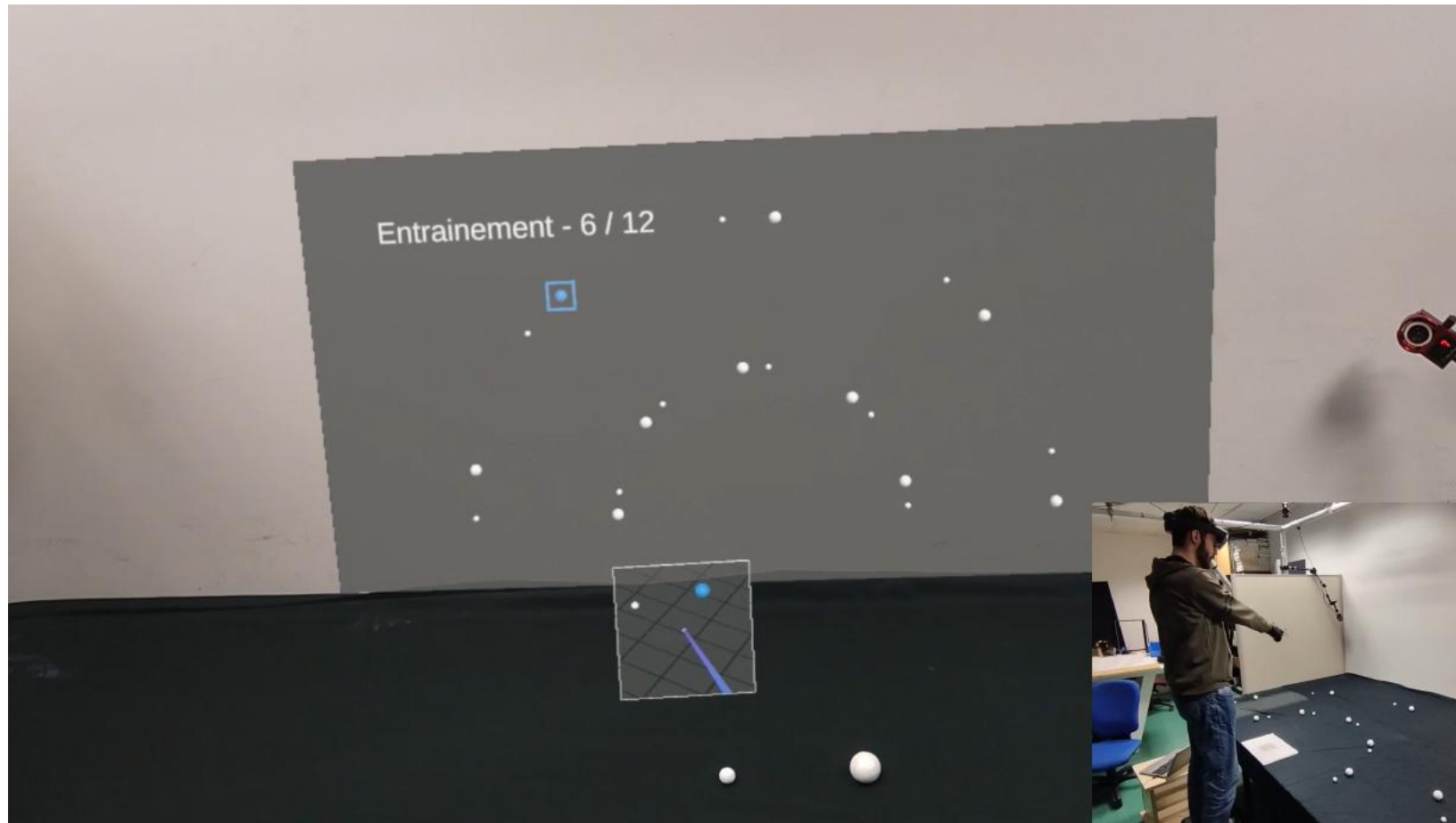


Vue Directe

Pointage gros grain

Focus View

Pointage fin grain



ETUDE — POINTAGE AUTOUR DU CHAMP D’AFFICHAGE DU CASQUE

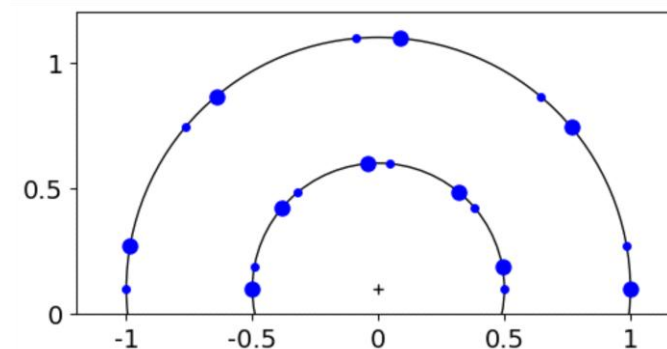
Facteurs

- **Techniques** : Arm, Head-To-Finger, Baseline (Pointage Direct)
- **Surface** : horizontale et verticale
- **Distance de la cible** : 0,5 et 1 m
- **Taille de la cible** : 2cm et 4cm

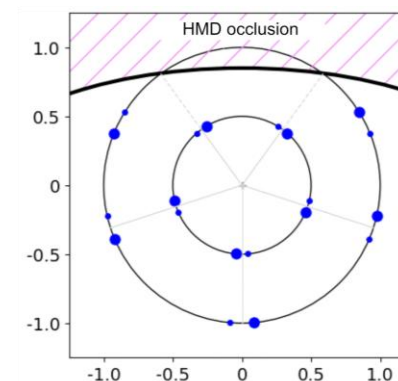
Tâche

- Sélectionner le plus rapidement et précisément possible chaque cible physique

12 Participants



Surface horizontale



Surface verticale

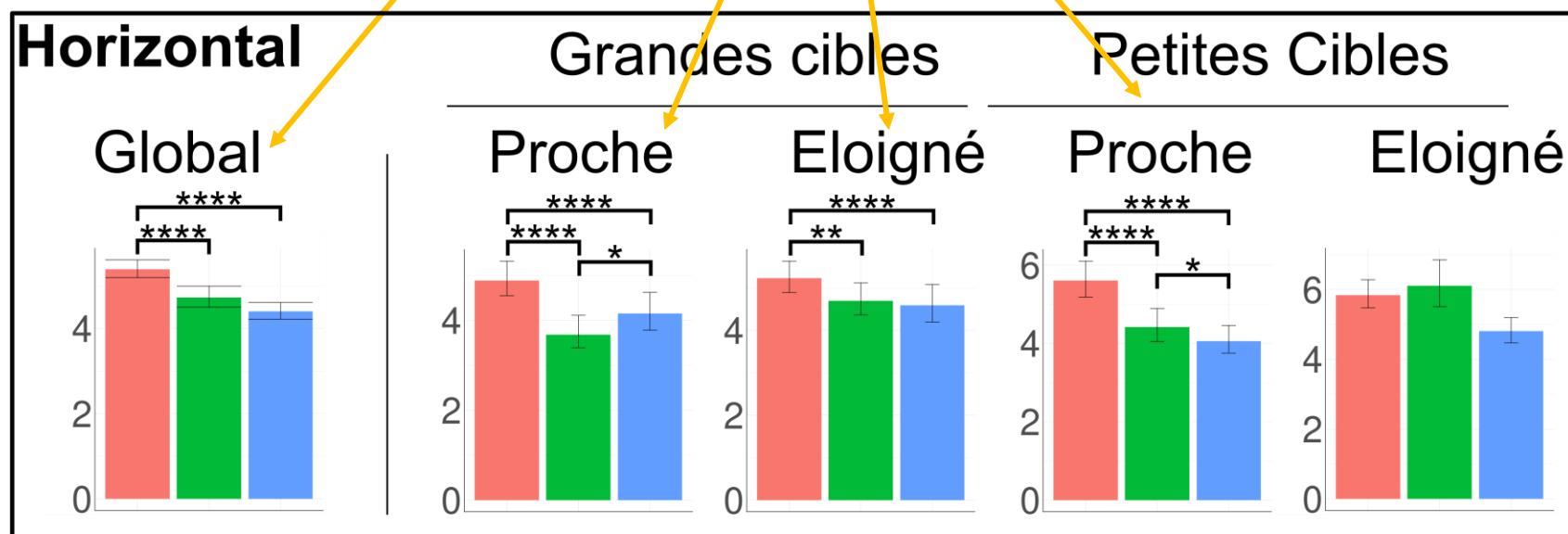


RÉSULTATS SUR LA SURFACE HORIZONTALE

Arm et **Head-To-Finger** sont meilleures que le **Pointage Direct**



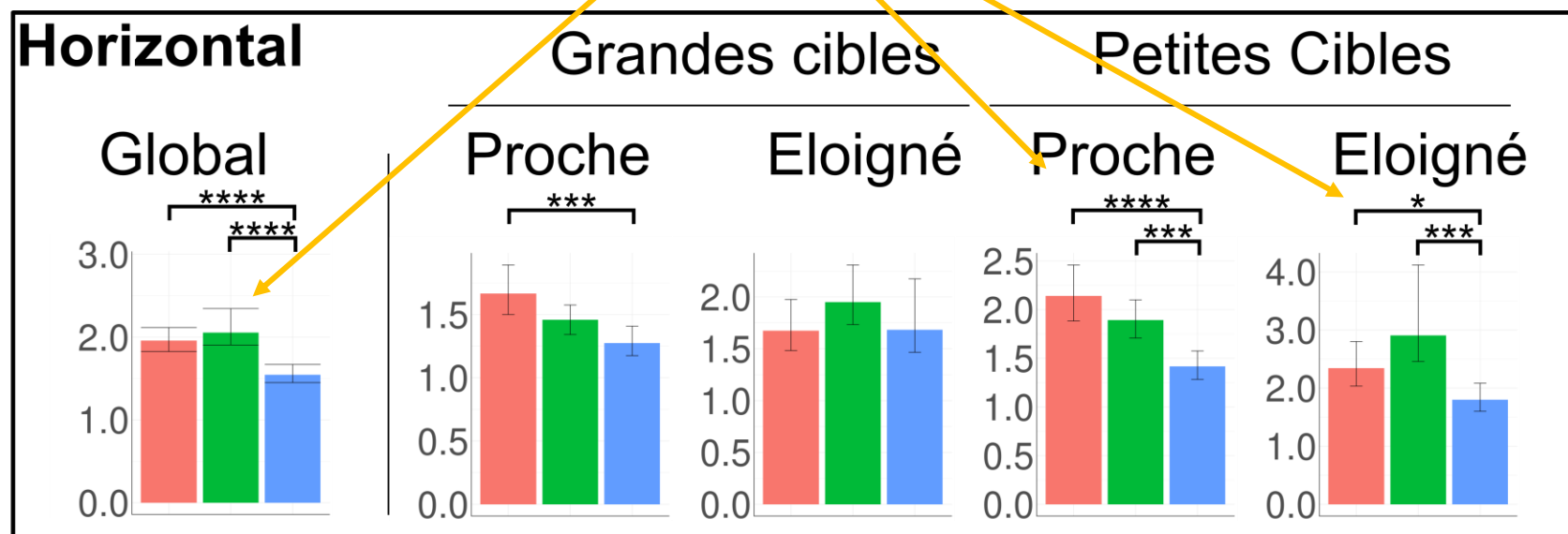
Temps de sélection (s)



RÉSULTATS SUR LA SURFACE HORIZONTALE

Head-To-Finger produit le nombre de passage le plus faible

Nombre de passage sur la cible



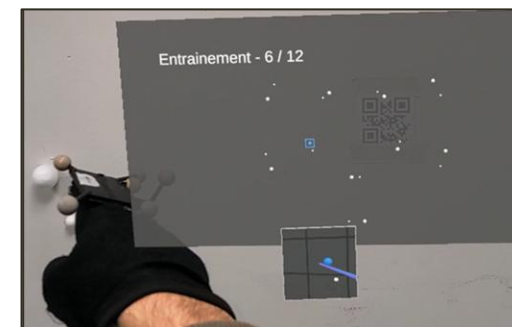
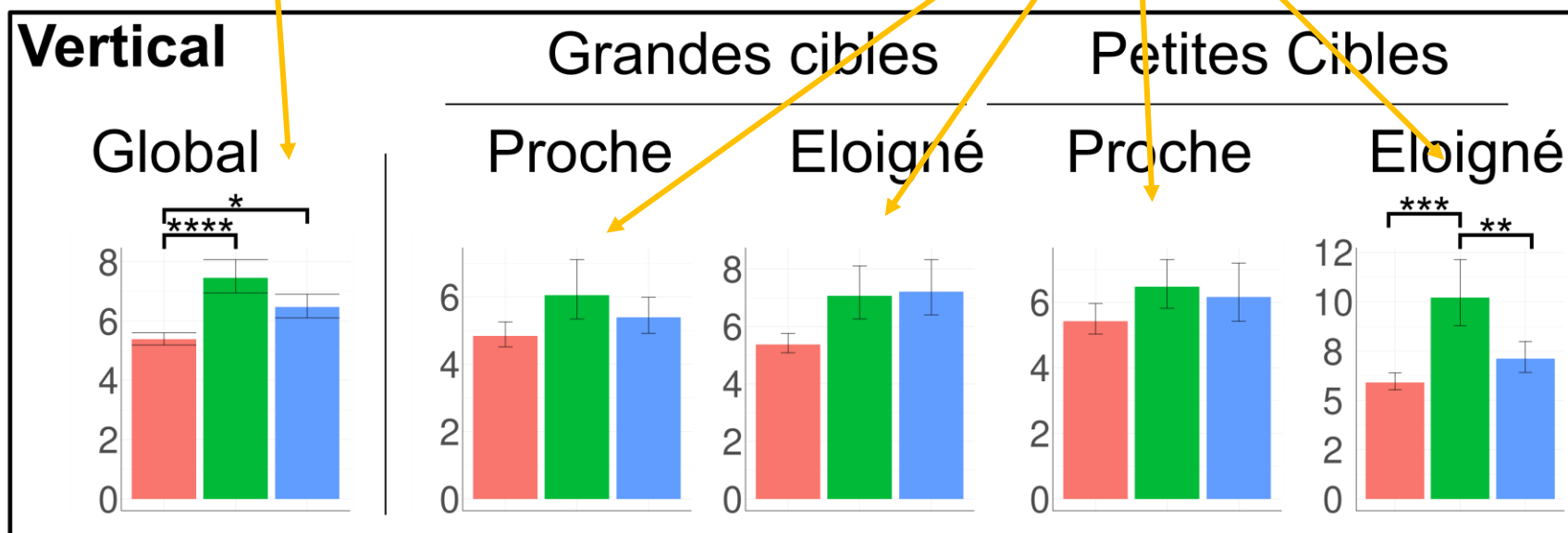
- Pointage Direct
- Arm
- Head-To-Finger

RÉSULTATS SUR LA SURFACE VERTICALE

Globalement, la technique de **Pointage Direct** est la meilleure

Aucune différence significative entre **Head-To-Finger** et le **Pointage Direct**

Temps de sélection (s)



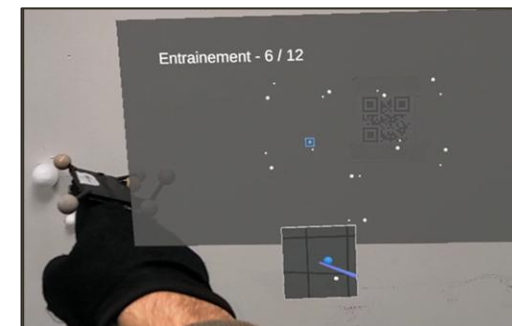
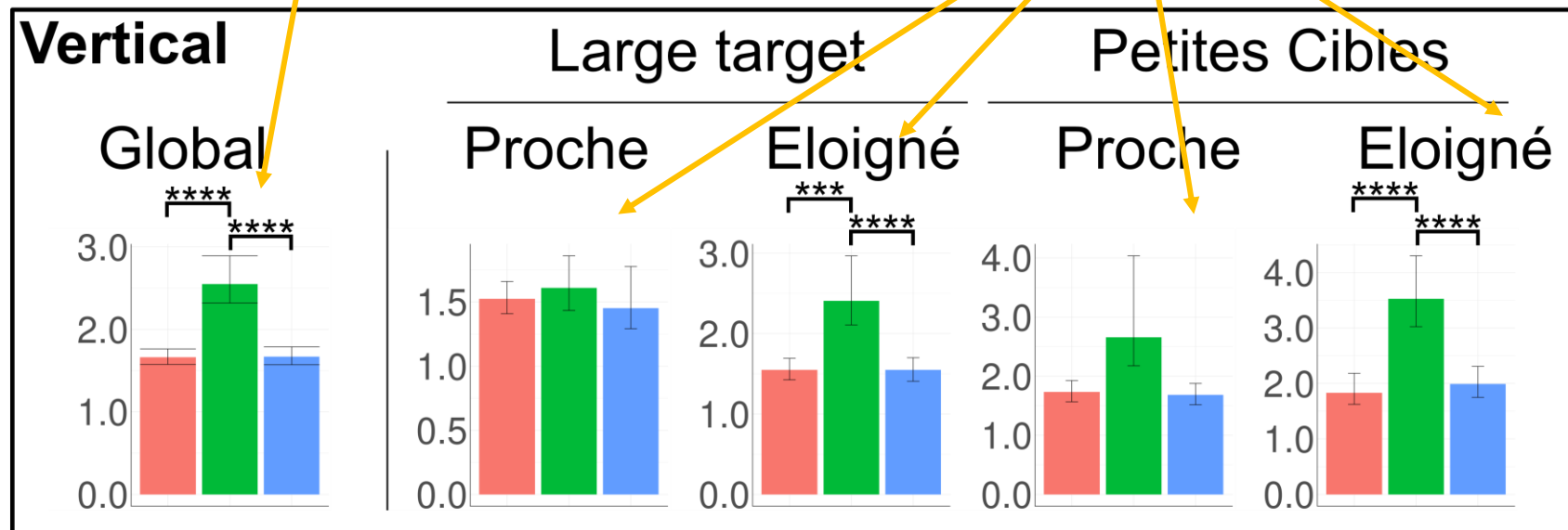
- Pointage Direct
- Arm
- Head-To-Finger

RÉSULTATS SUR LA SURFACE VERTICALE

Globalement, la technique de **Arm** produit le plus grand nombre de passage sur la cible

Aucune différence significative entre **Head-To-Finger** et le **Pointage Direct**

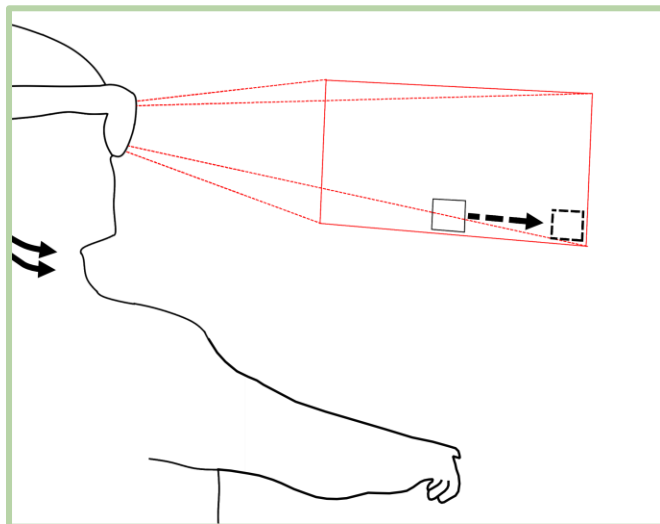
Nombre de passage sur la cible



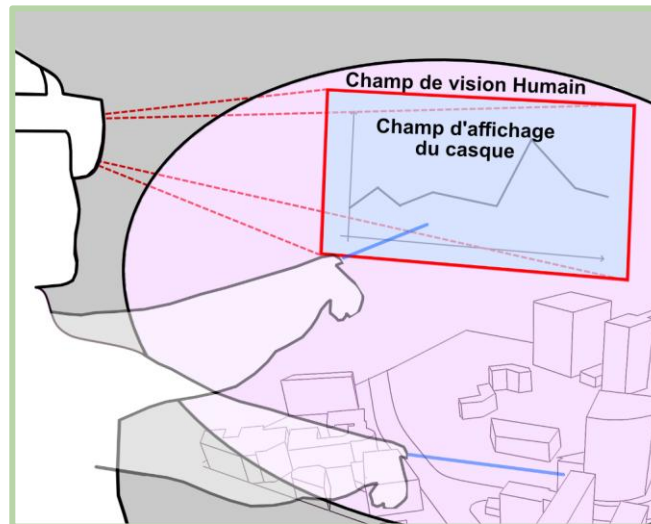
- Pointage Direct
- Arm
- Head-To-Finger

PERSPECTIVES

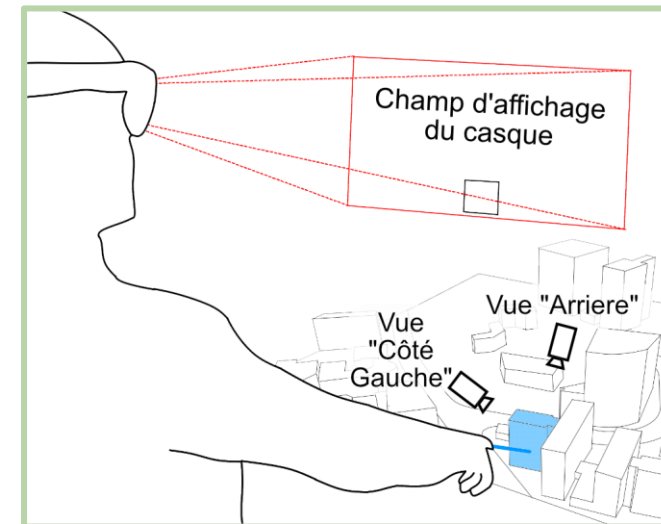
Une Focus View mobile



Enchaînement du pointage dans et autour du champ d'affichage du casque



Niveau acceptable de décalage entre les points de vue



OBJECTIF DE LA THÈSE ET VERROUS

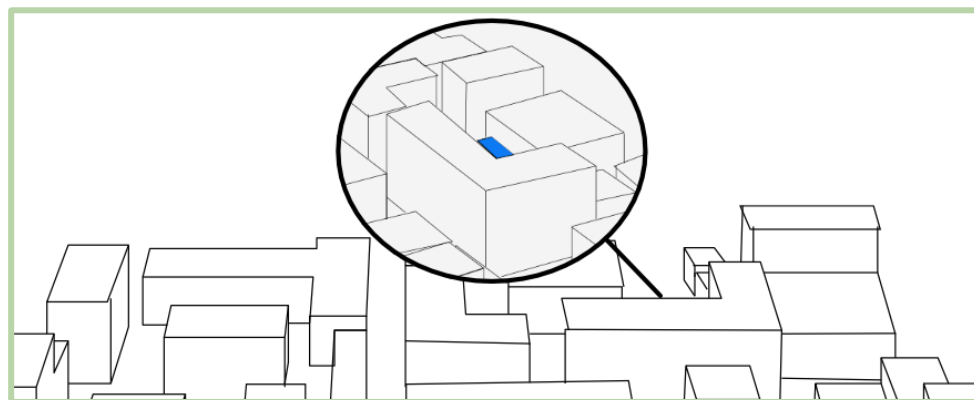
Etudier l'interaction avec des référents physiques
pour la visualisation située en RA
basée sur des casques semi-transparents



Pointage des référents physiques autour
du champ d'affichage du casque



Réduction de l'occultation des référents
physiques en Réalité Augmentée



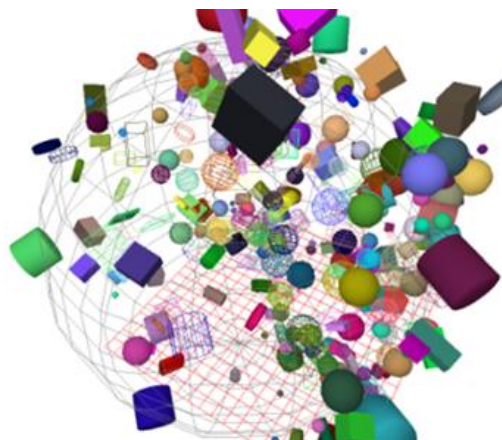
REDUCTION DE L'OCCULTATION EN RÉALITÉ VIRTUELLE

Evaluating the effectiveness of occlusion reduction techniques for 3D virtual environments, *Elmqvist et Tudoreanu, VRST'06*

Mouvement des Objets

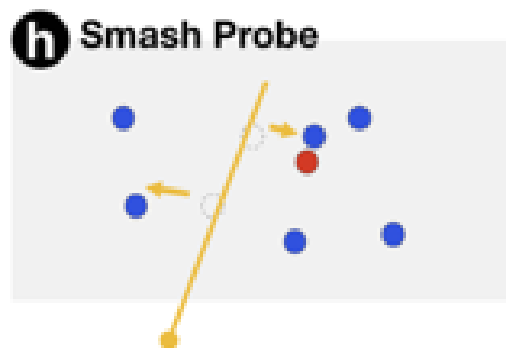
BalloonProbe

[Elmqvist and Niklas, 2005]



SmashProbe

[Yu et al., 2020]



3D Explosion Probe

[Sonnet et al., 2004]



Preserve les relations spatiales entre les objets
Effet local du mouvement des objets

REDUCTION DE L'OCCULTATION EN RÉALITÉ VIRTUELLE

Evaluating the effectiveness of occlusion reduction techniques for 3D virtual environments, *Elmqvist et Tudoreanu, VRST'06*

Mouvement des Objets

Limpid Desk

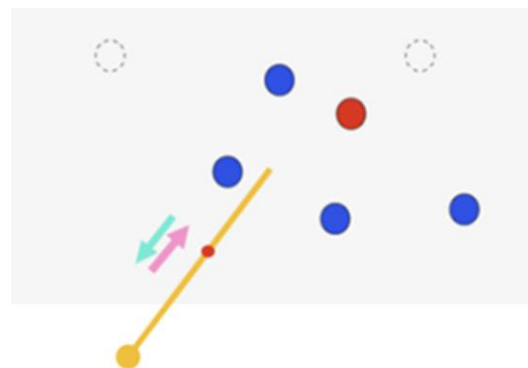
[Iwai et Sato, 2011]



Transparence

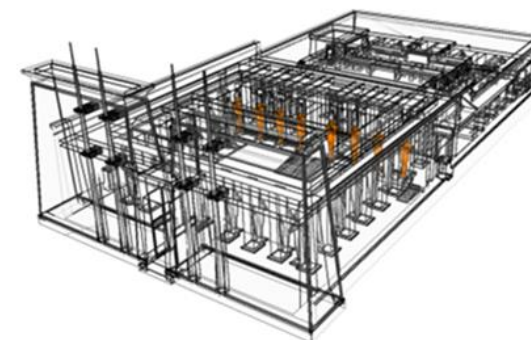
alphaCursor

[Yu et al., 2020]



Blueprints

[Iwai and Sato, 2004]



Offre une exploration rapide et progressive de l'environnement
Evite une surcharge virtuelle du monde physique

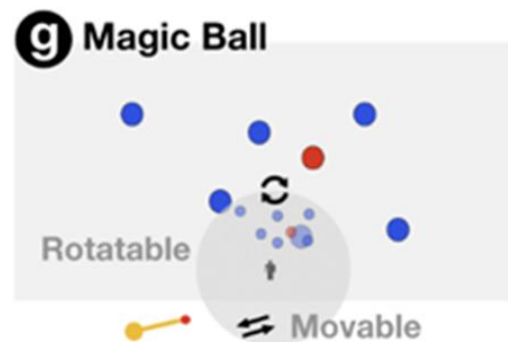
REDUCTION DE L'OCCULTATION EN RÉALITÉ VIRTUELLE

Evaluating the effectiveness of occlusion reduction techniques for 3D virtual environments, *Elmqvist et Tudoreanu, VRST'06*

Mouvement des Objets

Magic Ball

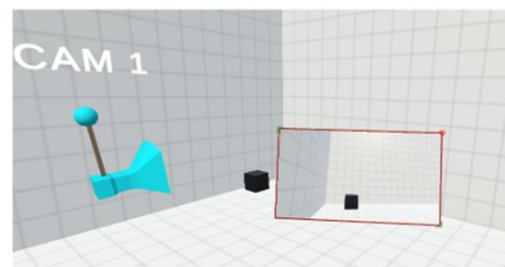
[Yu et al., 2020]



Transparence

Virtual Multiviews

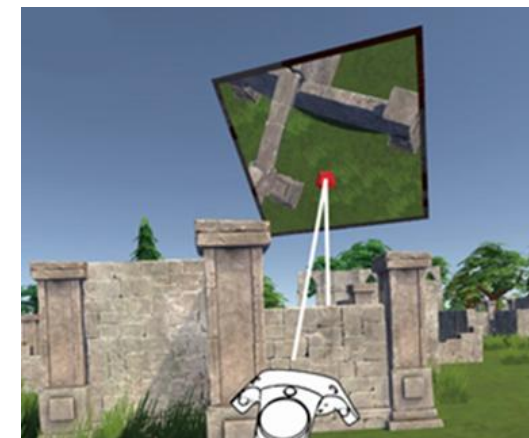
[Berwaldt et al., 2023]



Vue Multiples

vMirror

[Li et al., 2021]



Utilise une métaphore du miroir
Interaction plus directe vers les cibles

REDUCTION DE L'OCCULTATION EN RÉALITÉ VIRTUELLE

Mouvement des Objets

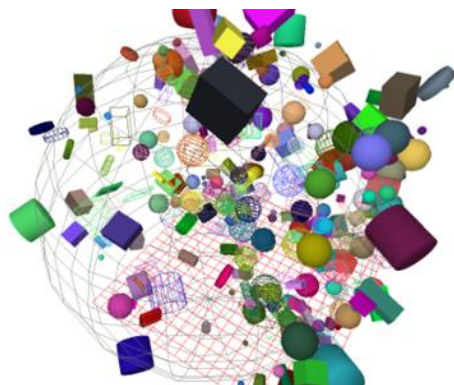
Transparence

Vue Multiples

Ces techniques sont-elles applicables en Réalité Augmentée* ?

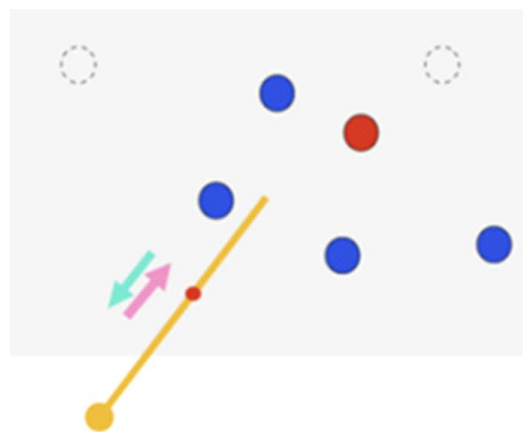
BalloonProbe

[Elmqvist and Niklas, 2005]



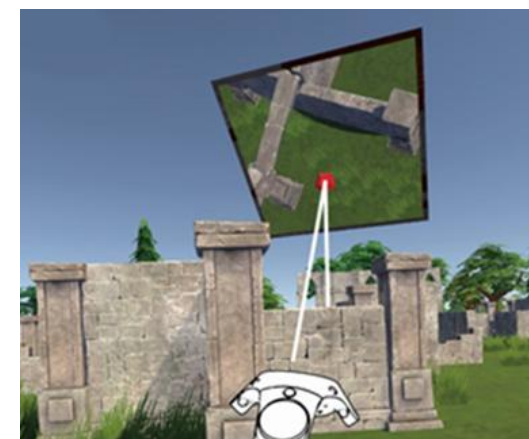
alphaCursor

[Yu et al., 2020]

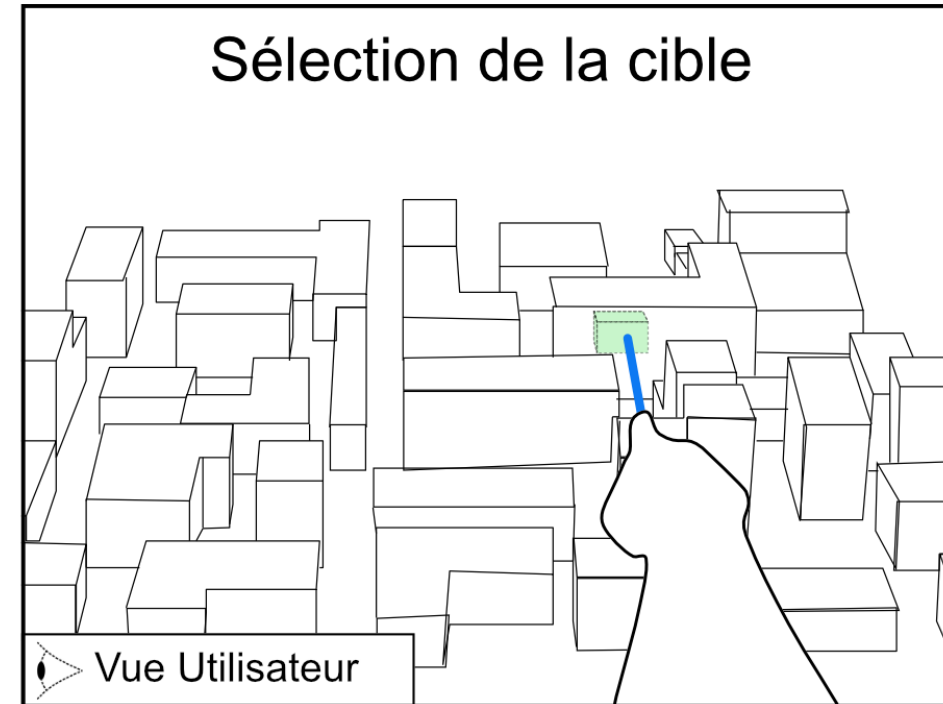
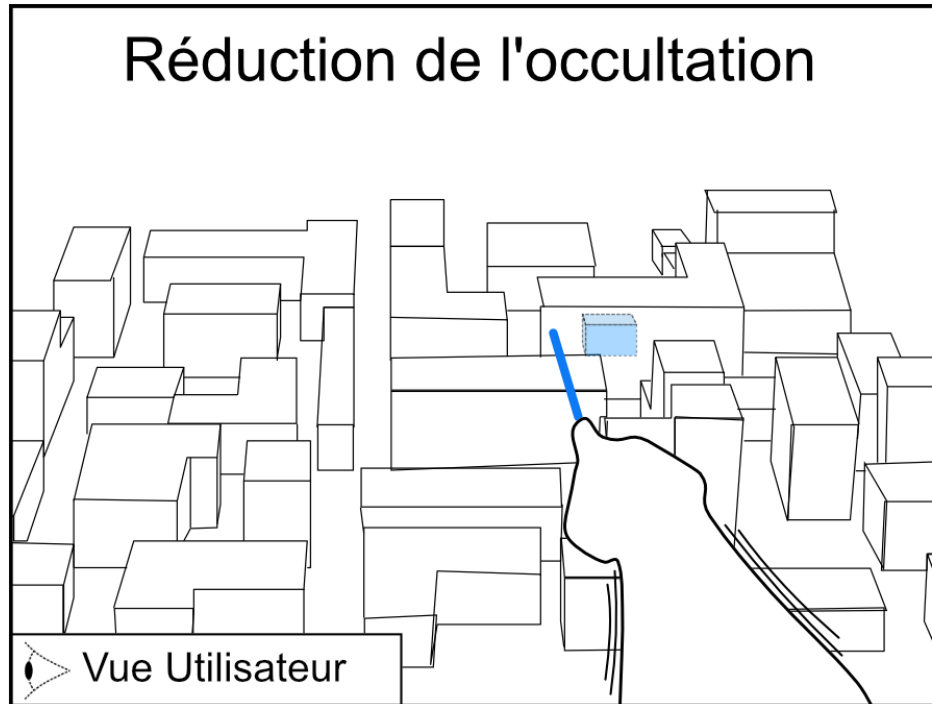


vMirror

[Li et al., 2021]

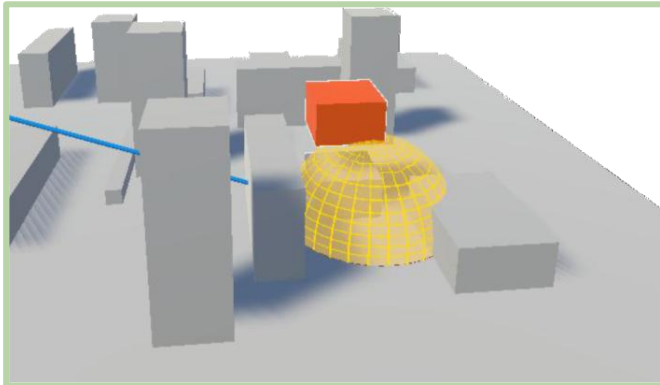


ADAPTATION ET ANALYSE DE TECHNIQUES DE LA LITTÉRATURE POUR LA RÉDUCTION D'OCCULTATIONS DE RÉFÉRENTS PHYSIQUES EN RA



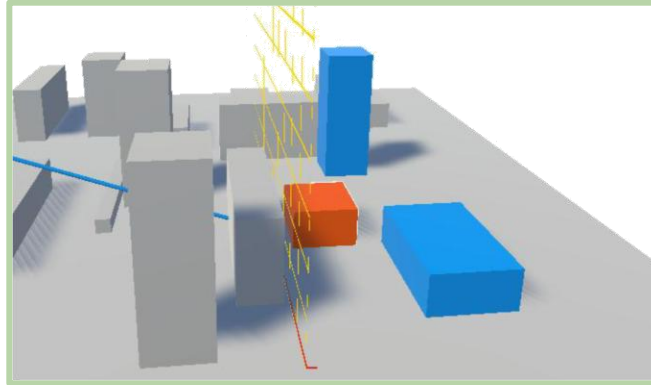
ADAPTATION DES TECHNIQUES À LA RÉALITÉ AUGMENTÉE

BalloonProbeAR



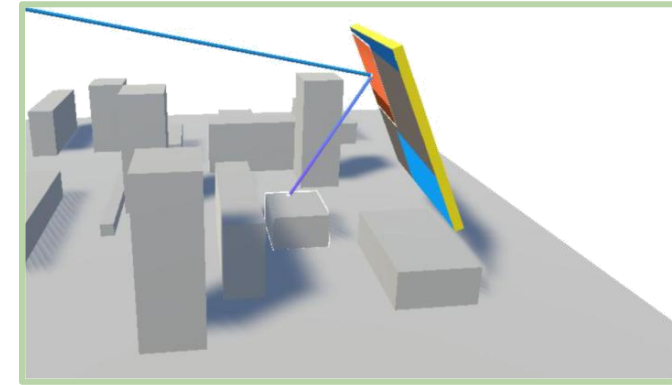
Hémisphère poussant des clones virtuels des objets physiques vers le haut

AlphaCursorAR



Rendu virtuel des objets situés derrière le plan de coupe

vMirrorAR

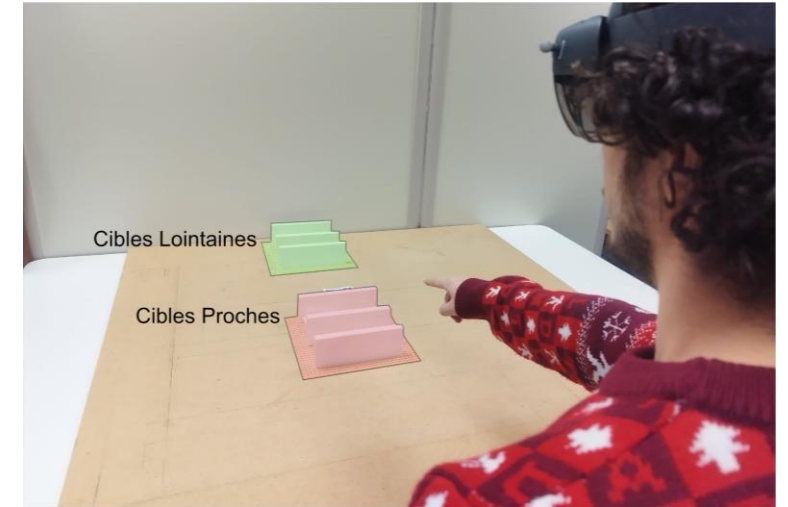


Utilisation d'un miroir virtuel, ajustable par l'utilisateur

ÉTUDE DES TECHNIQUES ISSUES DE LA LITTÉRATURE ADAPTÉES À LA RA

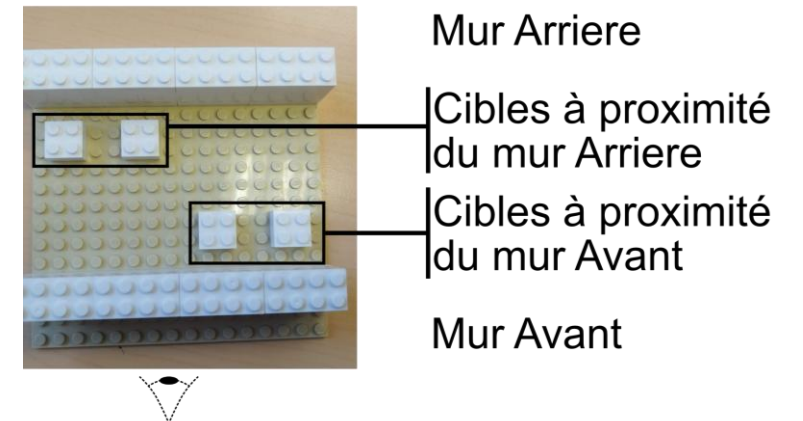
Facteurs

- Techniques
- Distance de la cible à l'utilisateur
- Position de la cible



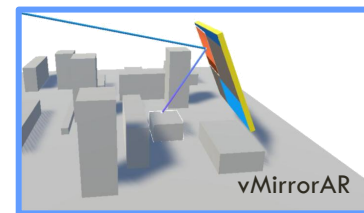
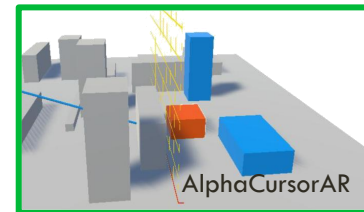
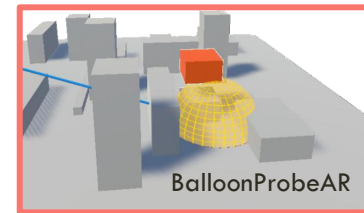
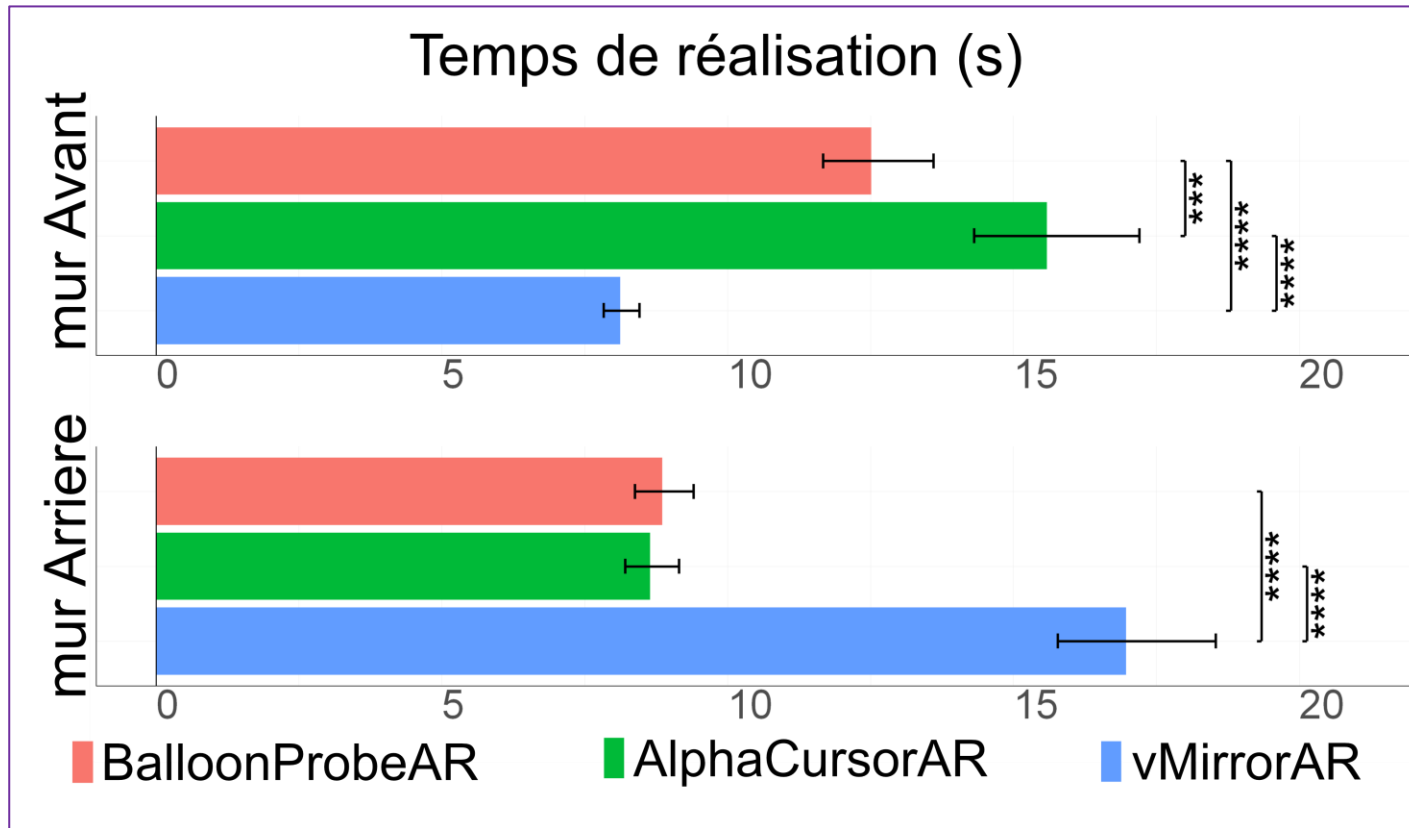
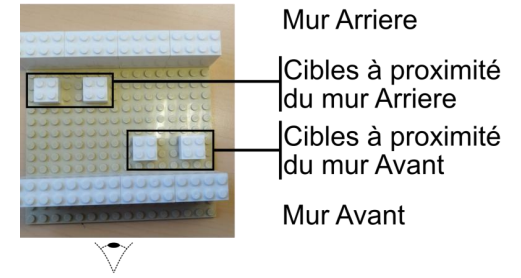
Tâche

- Sélectionner le plus rapidement et précisément possible chaque cible physique occultée

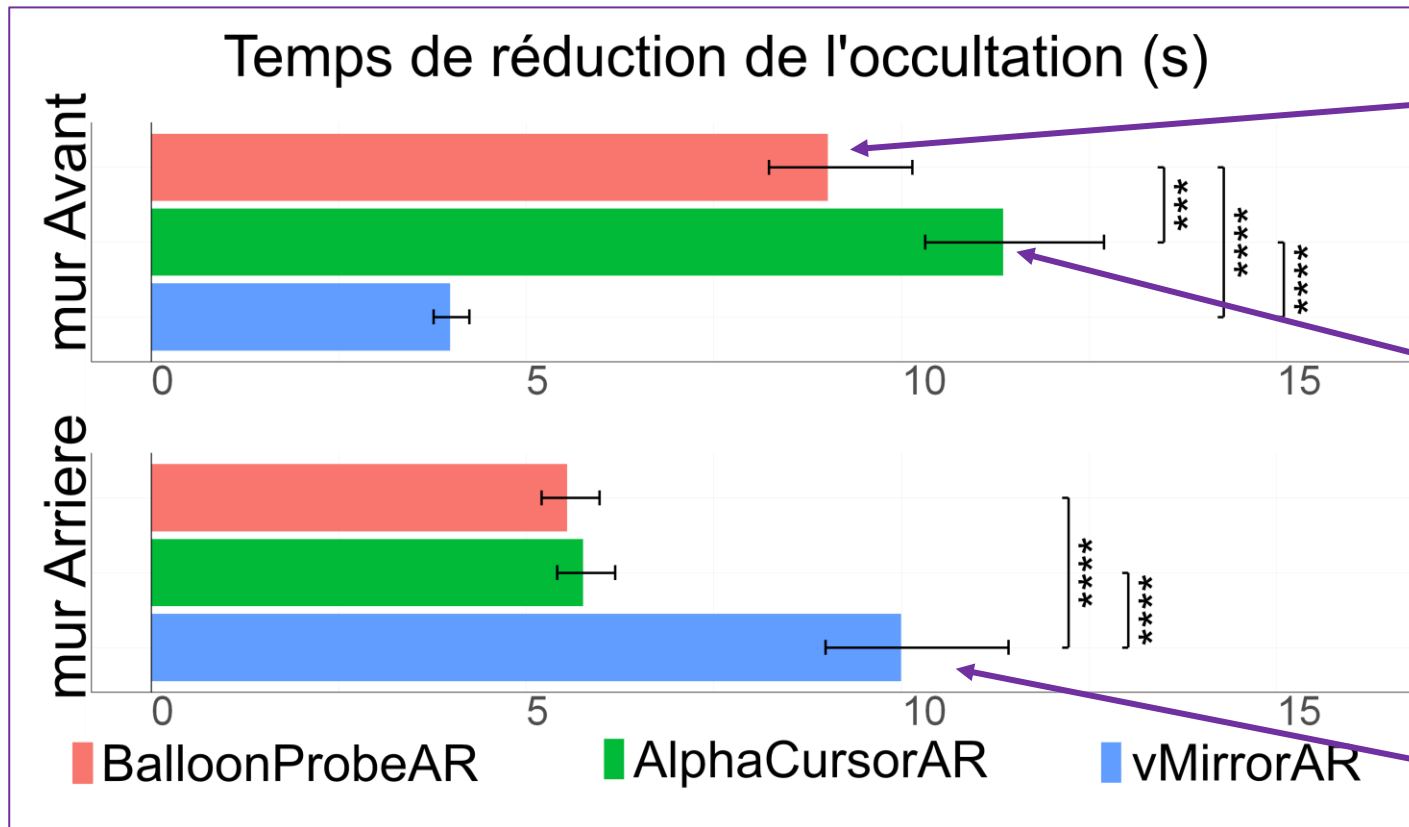
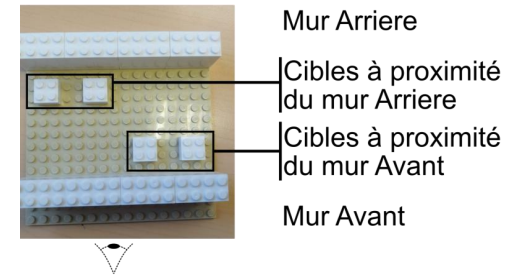


12 Participants

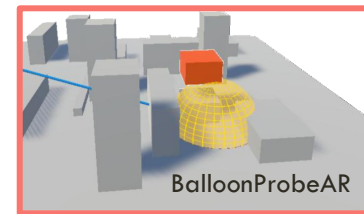
RÉSULTATS DE L'ÉTUDE



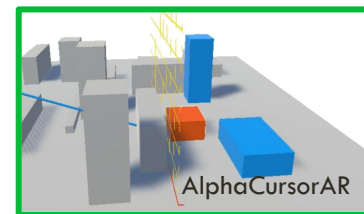
RÉSULTATS DE L'ÉTUDE



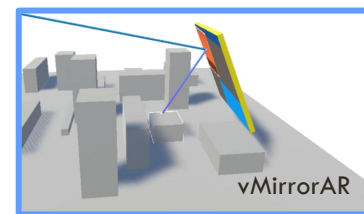
Difficulté de séparer la cible de l'occultant



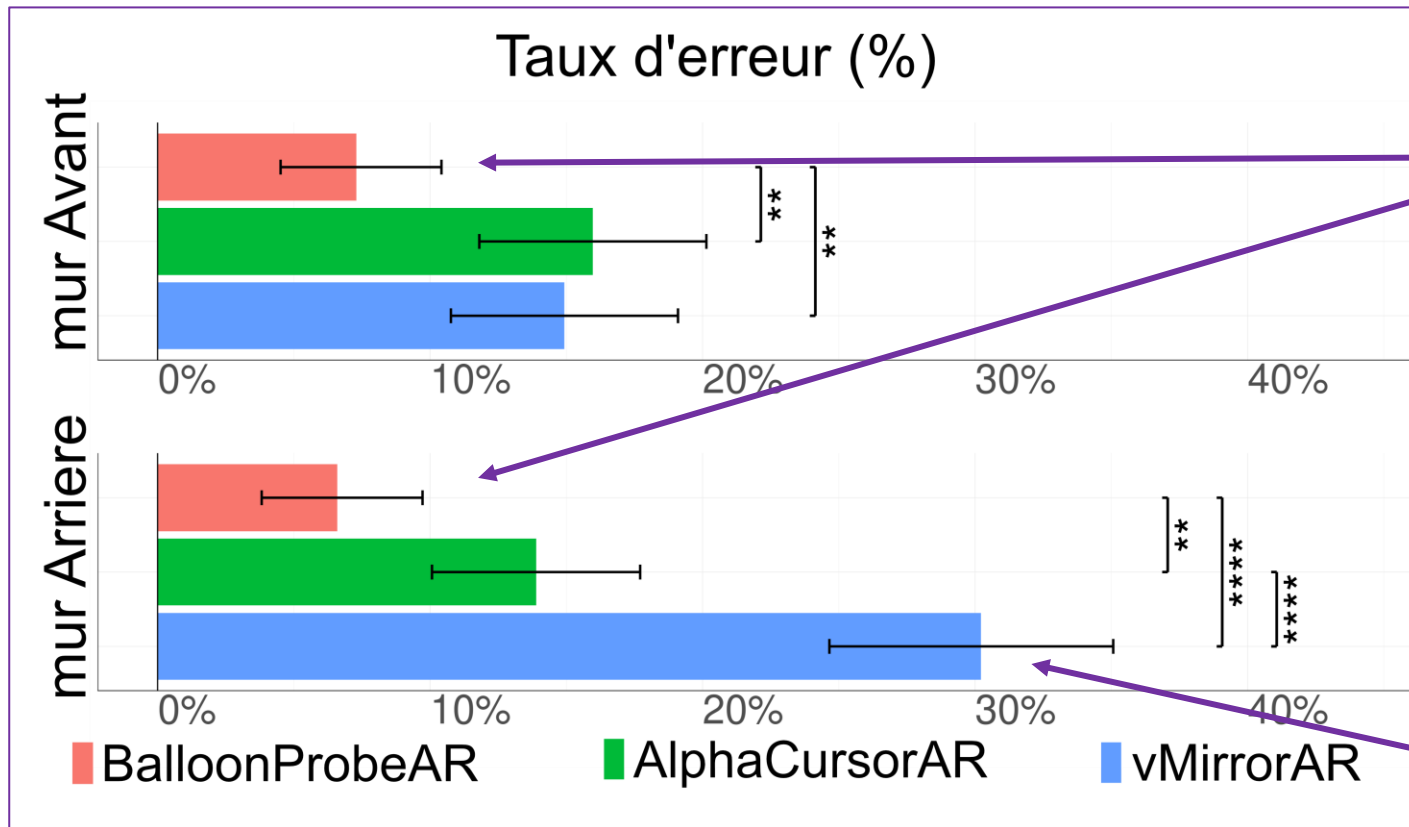
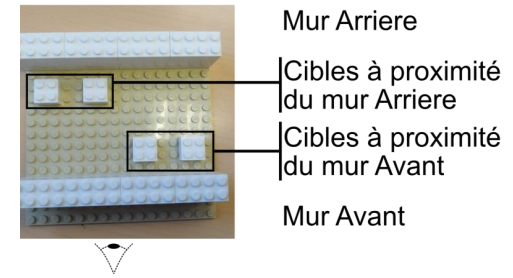
Fatigue musculaire



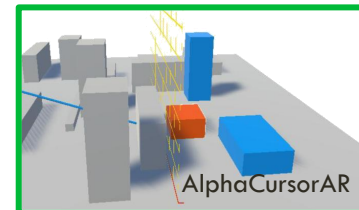
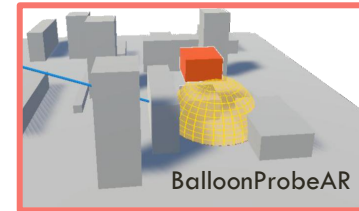
Ajustement du miroir chronophage



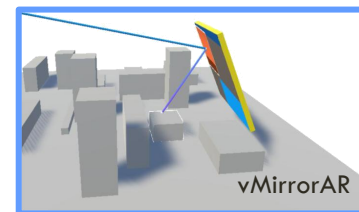
RÉSULTATS DE L'ÉTUDE



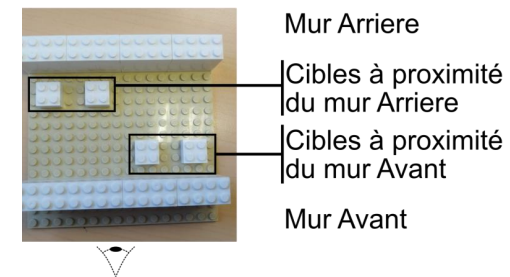
BalloonProbeAR a le taux d'erreur le plus faible



Orientation du miroir non optimale



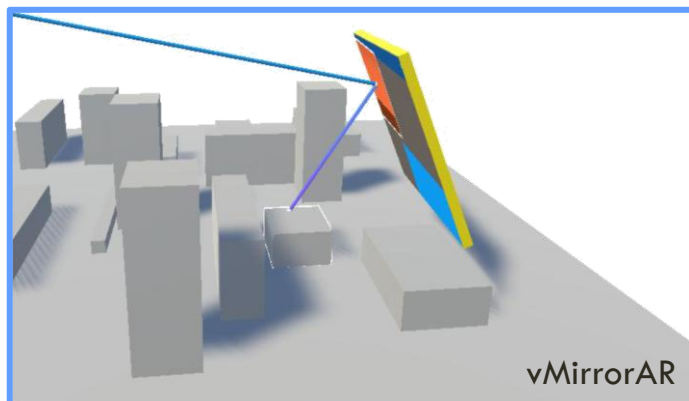
SYNTHÈSE DES RÉSULTATS



Cibles à proximité du mur Avant

Technique plus adaptée : **vMirrorAR**

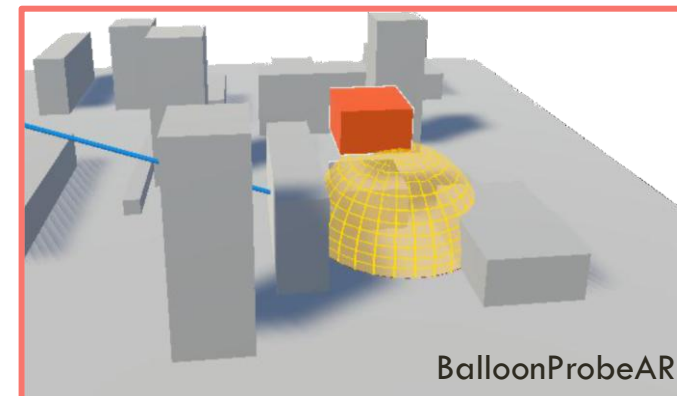
- La plus performante en temps
- Appréciee par les utilisateurs pour atteindre les cibles



Cibles à proximité du mur Arrière

Technique plus adaptée : **BalloonProbeAR**

- La plus performante en temps
- Minimise le taux d'erreur



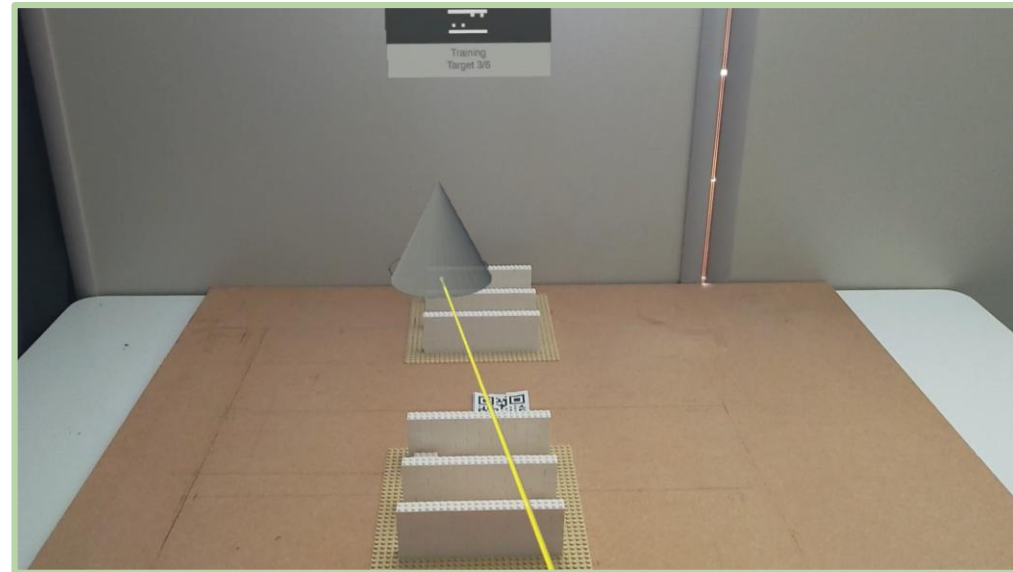
BALLOONPROBEAR : CHANGER D'ARTÉFACT → CONEPROBEAR

BalloonProbeAR

Faiblesses significatives pour les cibles à proximité du mur **Avant**

- Les cibles ne sont pas assez séparées de leurs occultants
 - Augmenter la hauteur de l'artéfact
 - Changer la pente de l'artéfact

ConeProbeAR

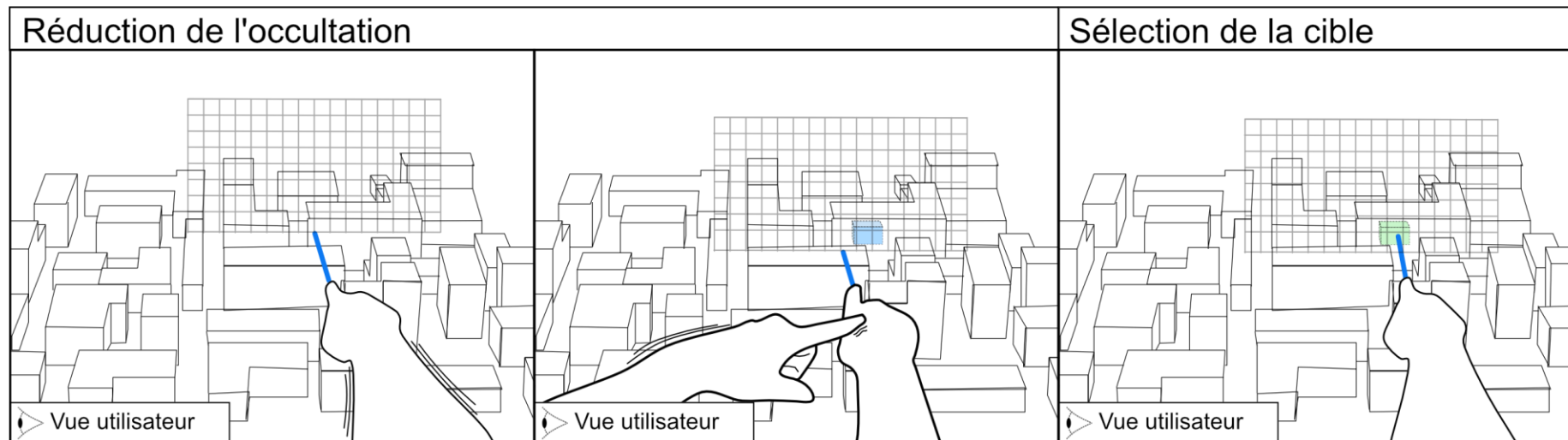


ALPHACURSORAR : PAS DE PISTES D'OPTIMISATIONS CONVAINCANTES

Faiblesses significatives pour les cibles à proximité du mur **Avant**

Fatigue musculaire lors de la **réduction de l'occultation**

→ **Décomposition de l'étape de réduction de l'occultation** (TapTap, Roudault et al.)



Mais **impact** sur le temps total et impose une **manipulation à deux mains**

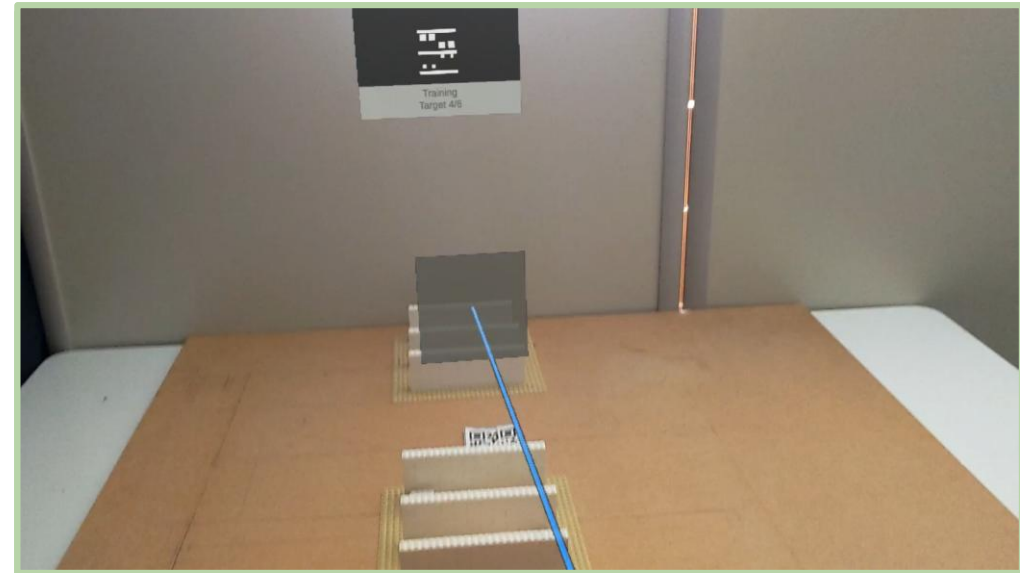
vMIRRORAR : PASSER DU MIROIR AU PORTAIL → ARPORTAL

vMirrorAR

Faiblesses significatives pour les cibles à proximité du mur **Arrière**

- Temps de réduction de l'occultation
 - Ajustements du miroir chronophage
 - Effet du miroir « qui complique les choses »
 - **Adopter une vue de dessus (#1)**
- Temps de sélection de la cible
 - Zone de sélection distante de la maquette
 - **Placer la vue sur le rayon (#2)**

ARPortal



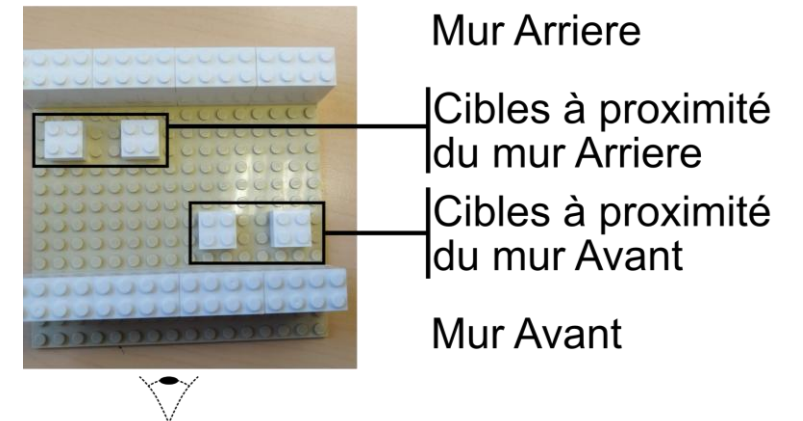
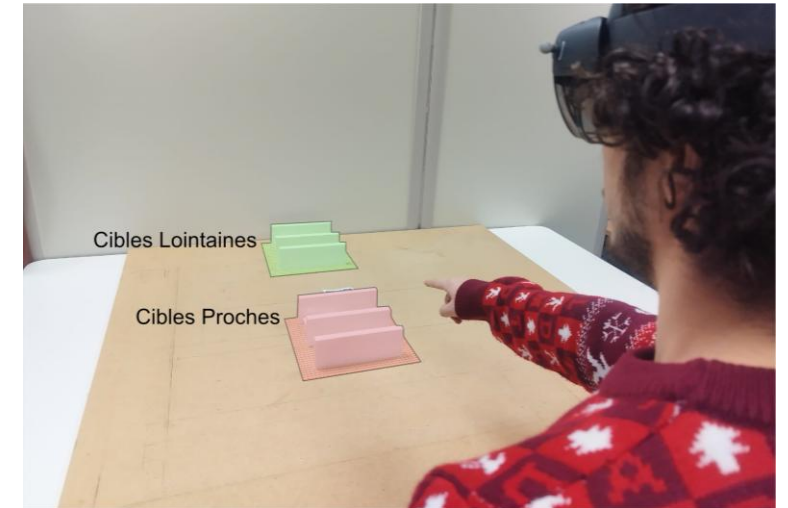
ÉTUDE 2 : ÉVALUATION DES NOUVELLES TECHNIQUES

Facteurs

- Techniques (BalloonProbeAR, ConeProbeAR, vMirrorAR, ARPortal)
- Distance de la cible à l'utilisateur
- Position de la cible

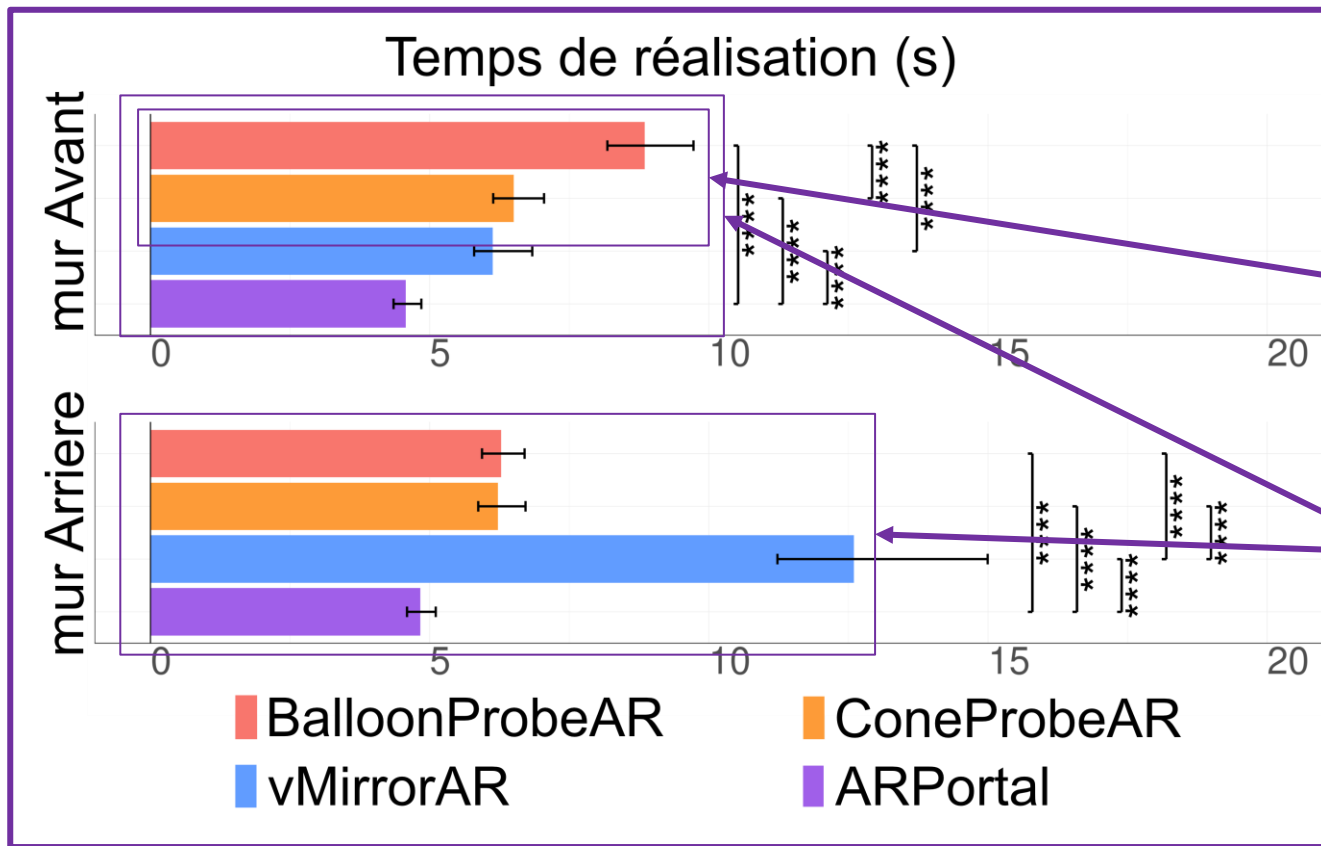
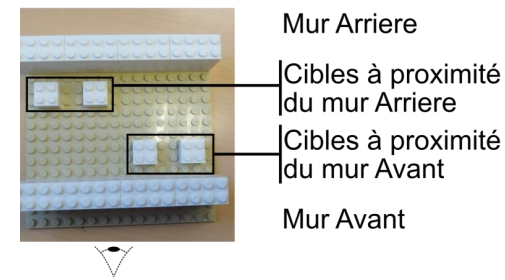
Tâche

- Sélectionner le plus rapidement et précisément possible chaque cible physique occultée



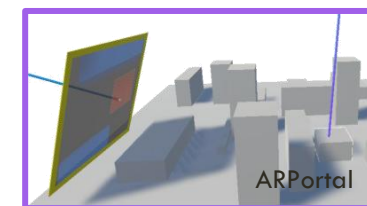
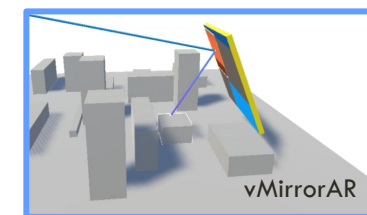
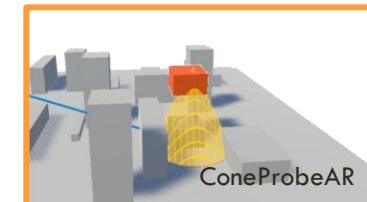
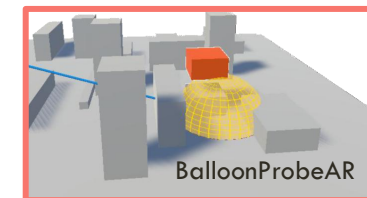
12 Participants

RÉSULTATS DE L'ÉTUDE

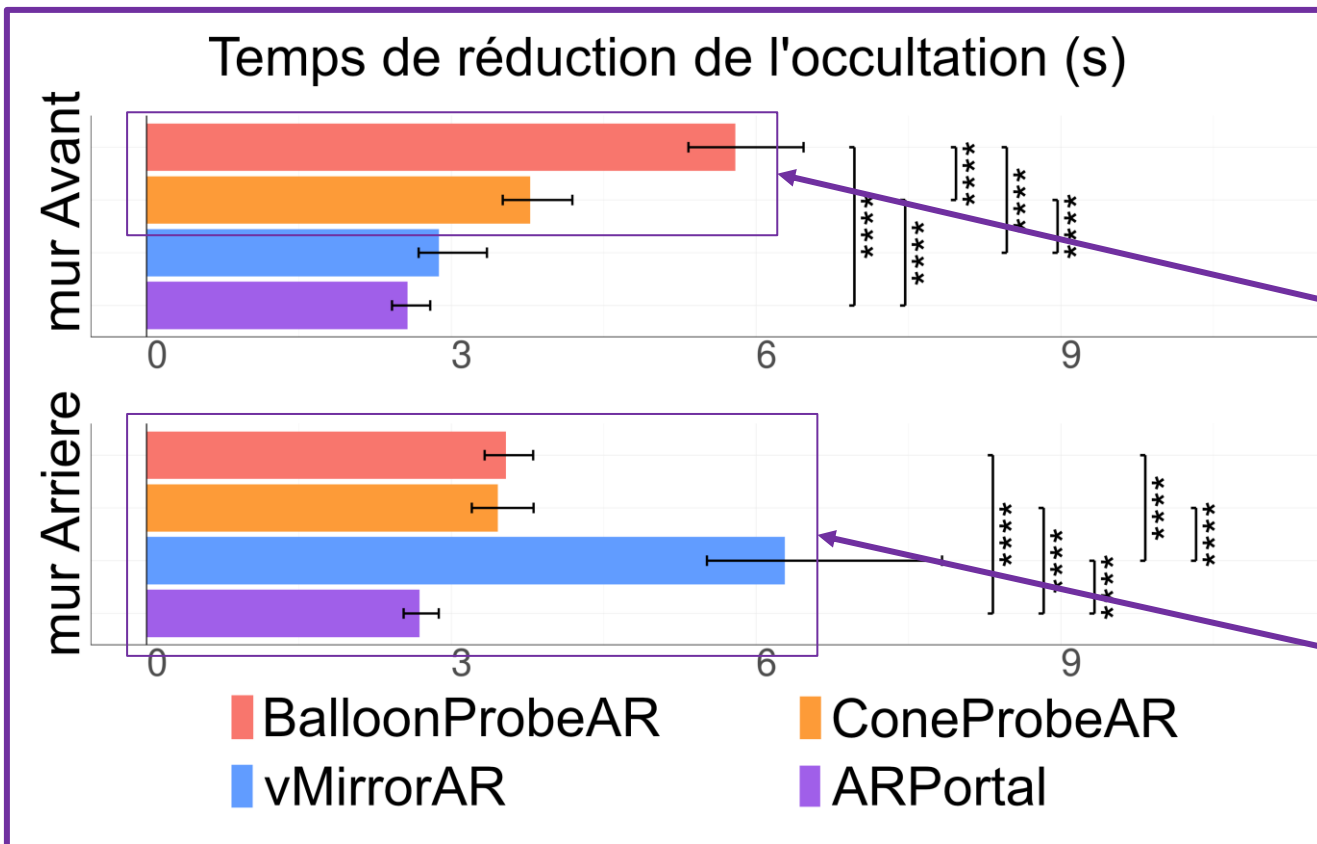
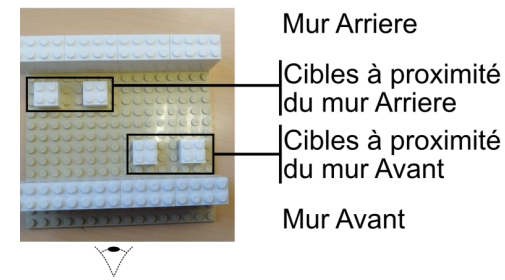


ConeProbeAR est meilleur que **BalloonProbeAR**

ARPortal est la meilleure technique

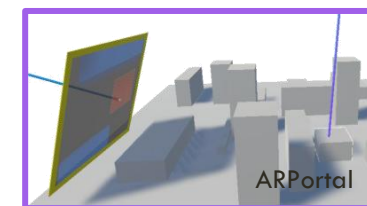
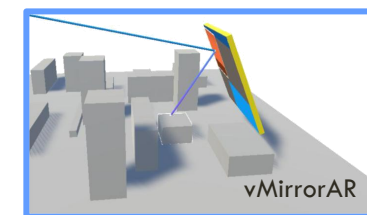
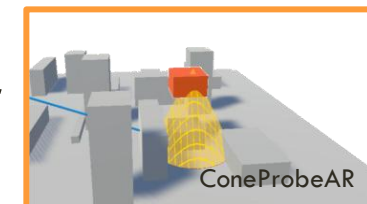
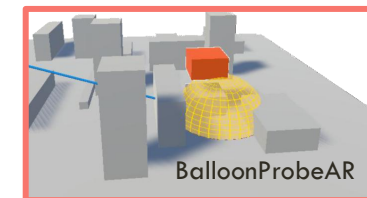


RÉSULTATS DE L'ÉTUDE

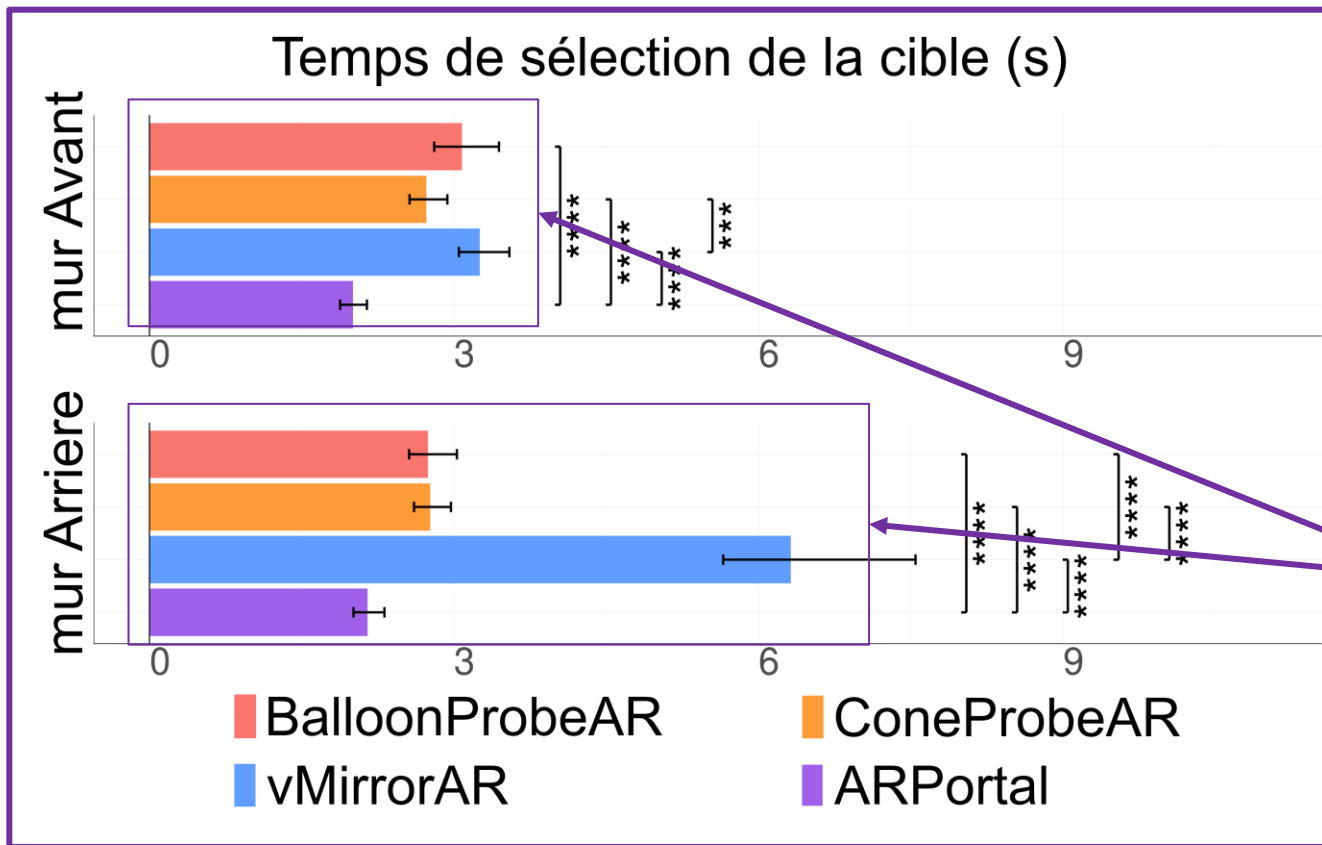
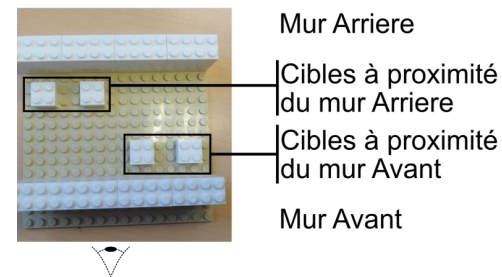


ConeProbeAR est meilleur que BalloonProbeAR

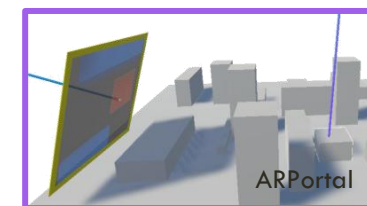
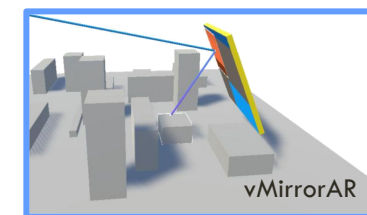
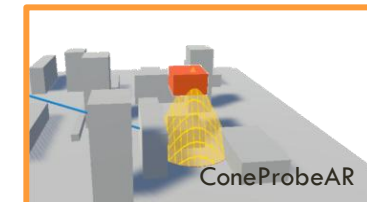
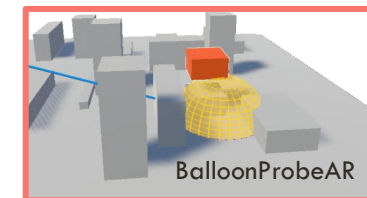
ARPortal est la meilleure technique



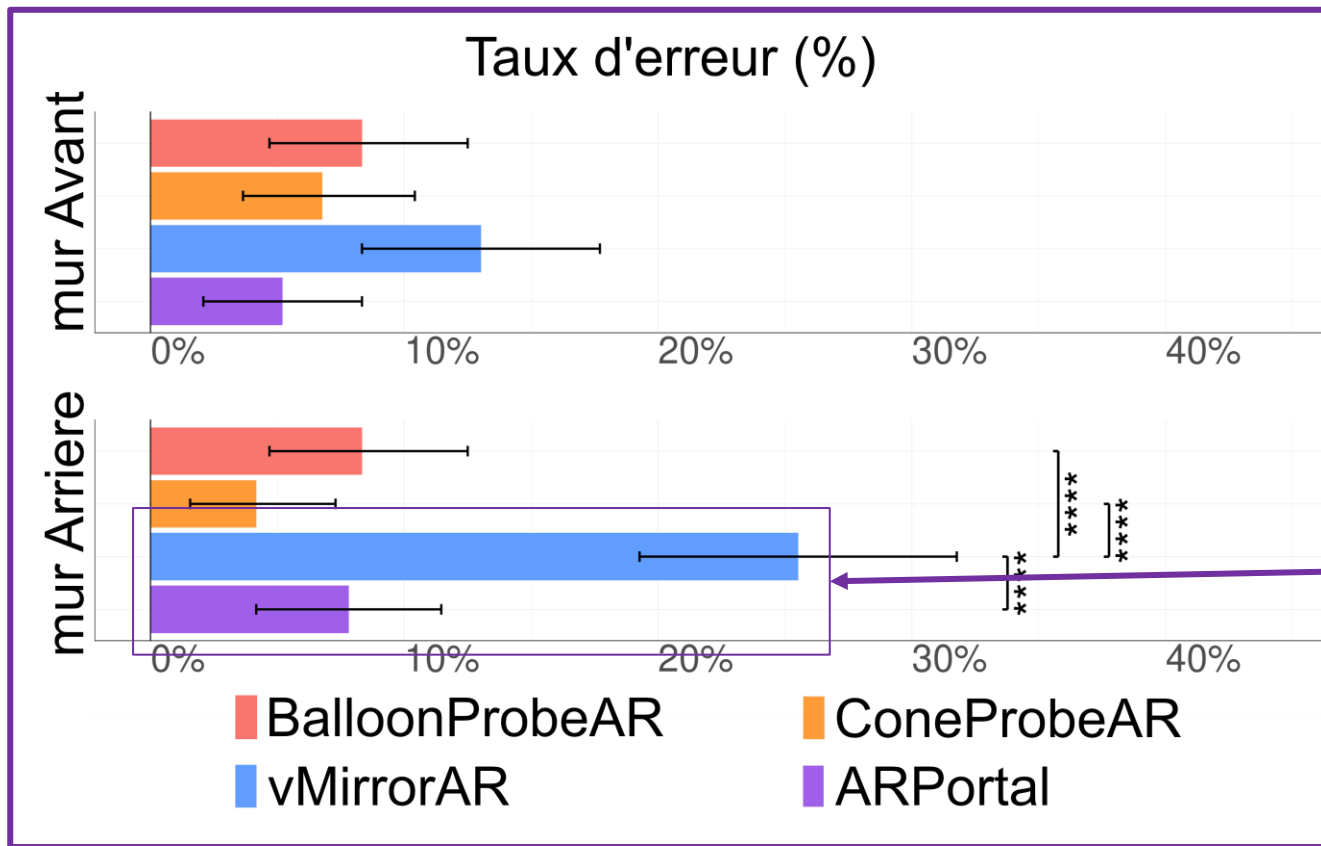
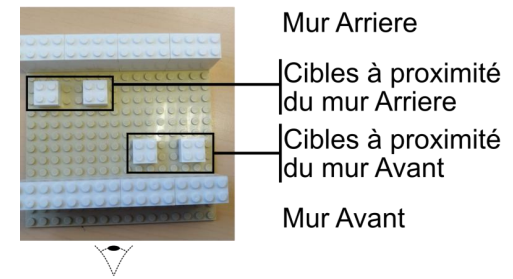
RÉSULTATS DE L'ÉTUDE



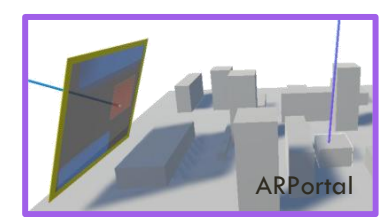
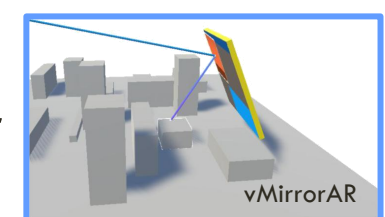
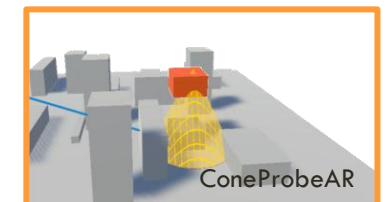
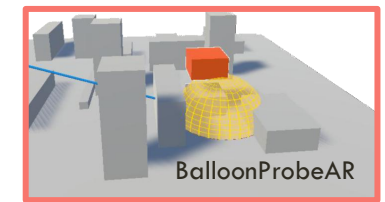
ARPortal est la meilleure technique



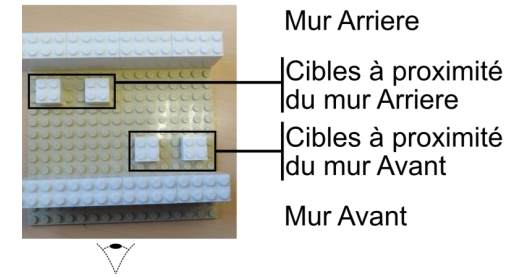
RÉSULTATS DE L'ÉTUDE



ARPortal meilleur que **vMirrorAR**

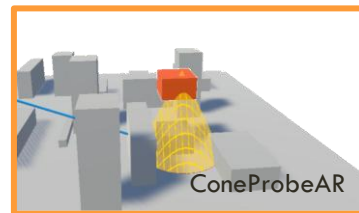
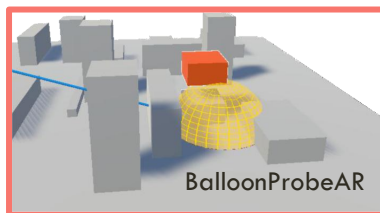


SYNTHÈSE DES RÉSULTATS



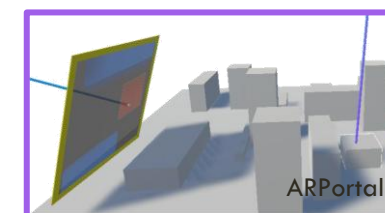
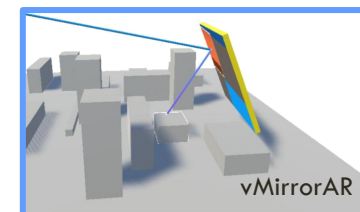
ConeProbeAR

- Meilleure que **BalloonProbeAR** pour les cibles à proximité du mur Avant
- Performances similaires à **BalloonProbeAR** sur les autres métriques



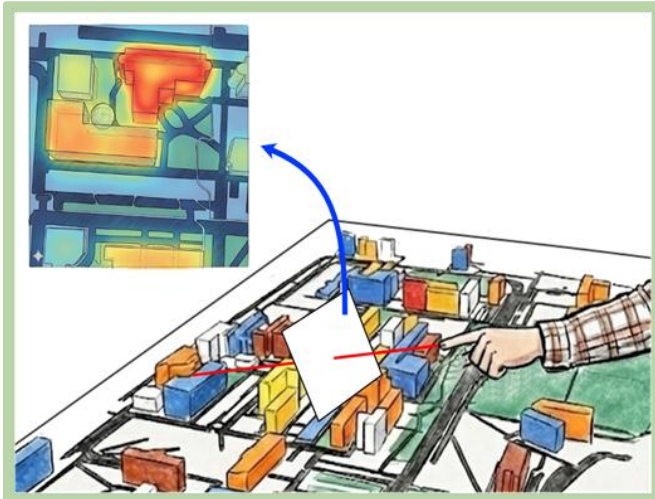
ARPortal

- Meilleure que **vMirrorAR** pour les cibles à proximité du mur Arrière
- Soit meilleure, soit similaire à **toutes les autres techniques** sur les autres métriques

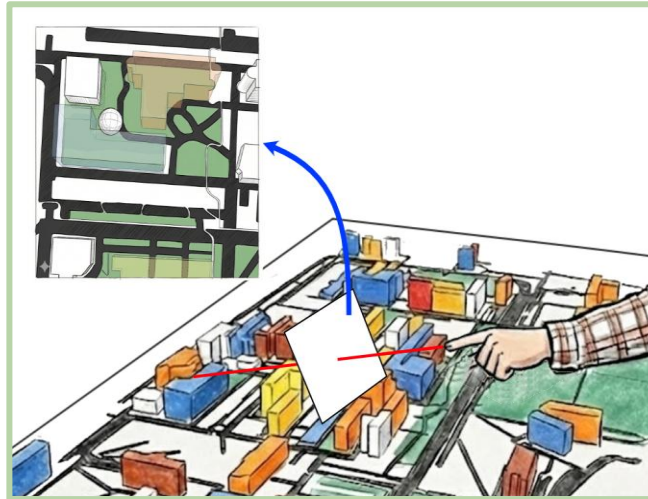


PERSPECTIVES AUTOUR D'ARPORTAL

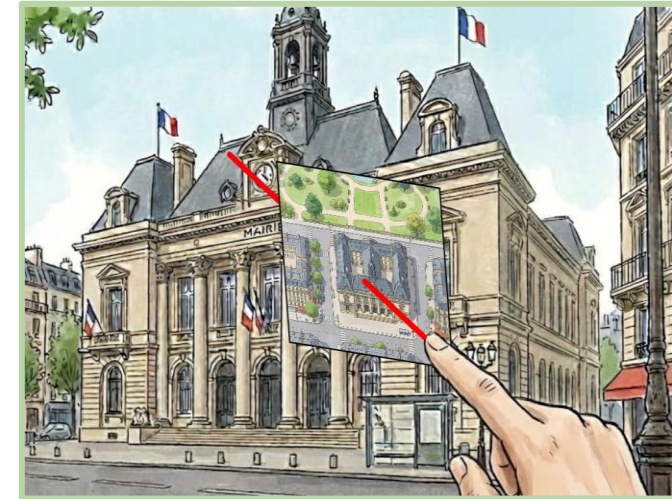
Prévisualiser les données
dans le portail



Une vue filtrée avec
MagicARPortal



ARPortal en
environnement réel



OBJECTIF DE LA THÈSE ET VERROUS

Étudier l'interaction avec des référents physiques
pour la visualisation située en RA
basée sur des casques semi-transparentes



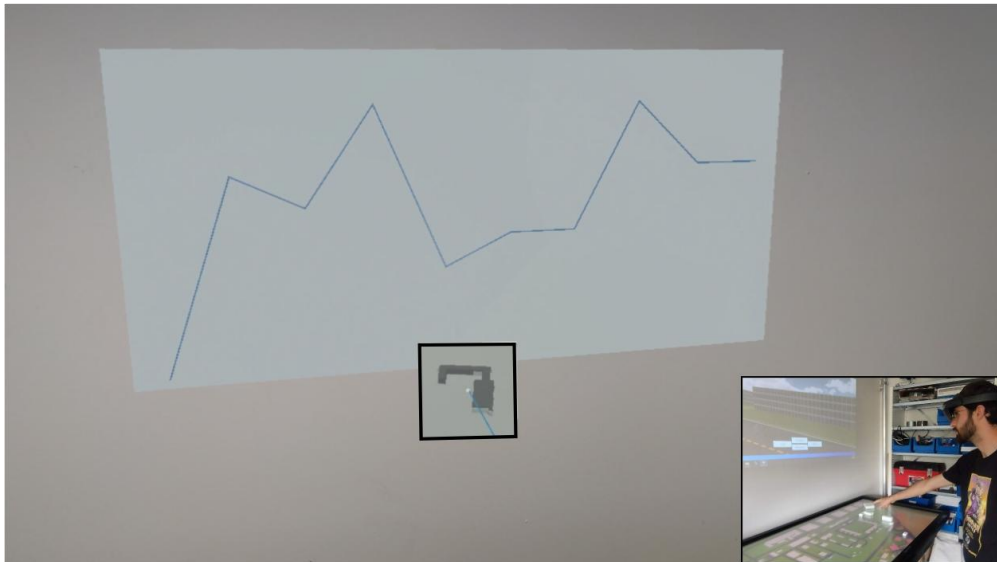
Pointage des référents physiques autour
du champ d'affichage du casque



Réduction de l'occultation des référents
physiques en Réalité Augmentée

IMPACT SUR LE PROJET AMURB

Focus View



ARPortal

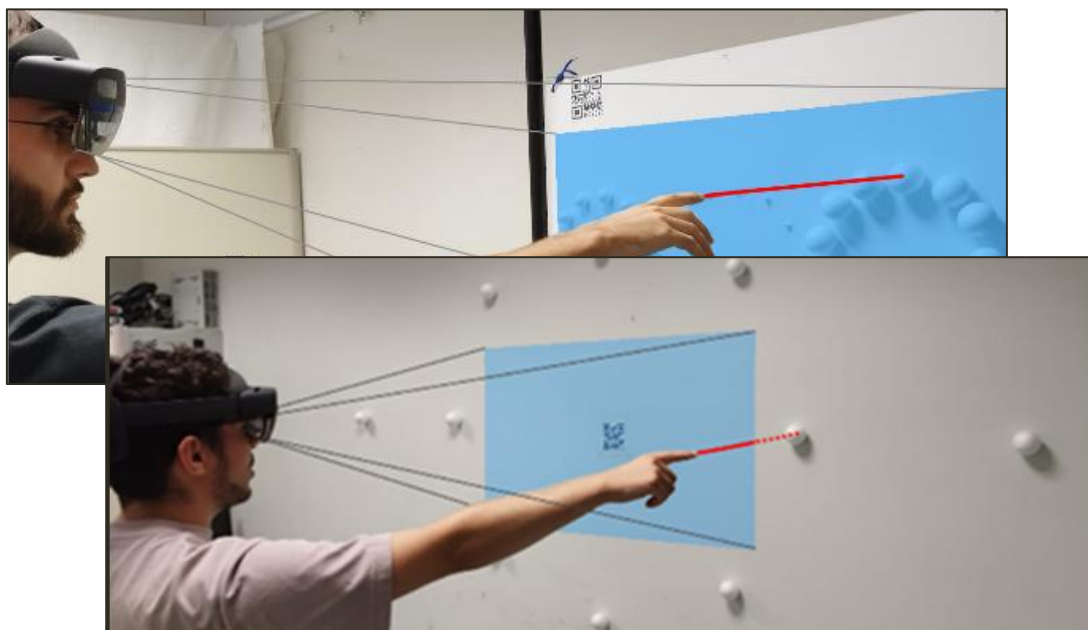


🏆 Meilleure démo IHM'25

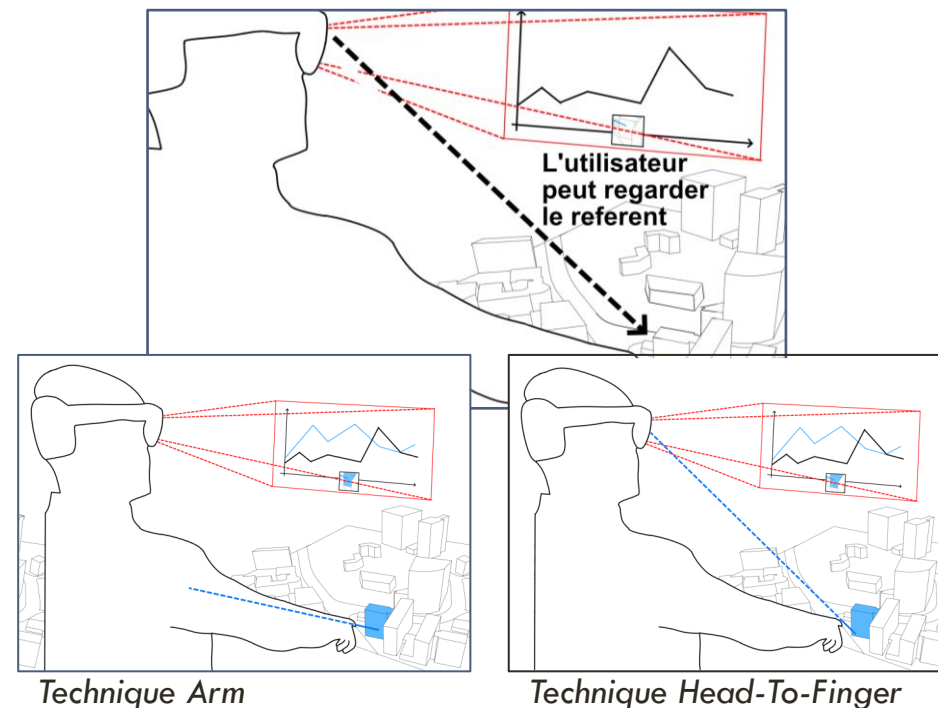


Pointage des référents physiques autour du champ d'affichage du casque

Caractérisation du pointage **dans** et **autour** du champ d'affichage du casque



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

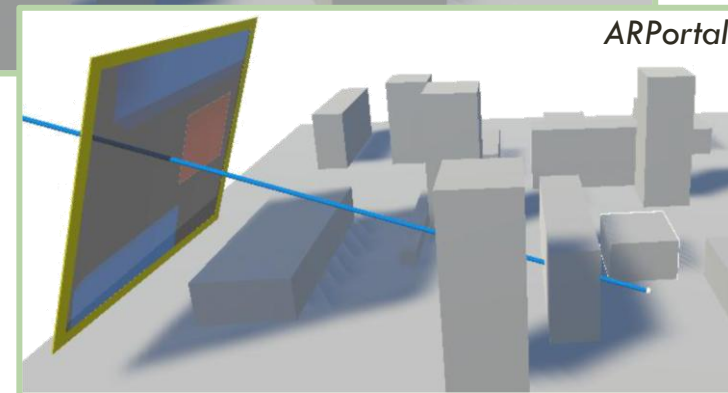
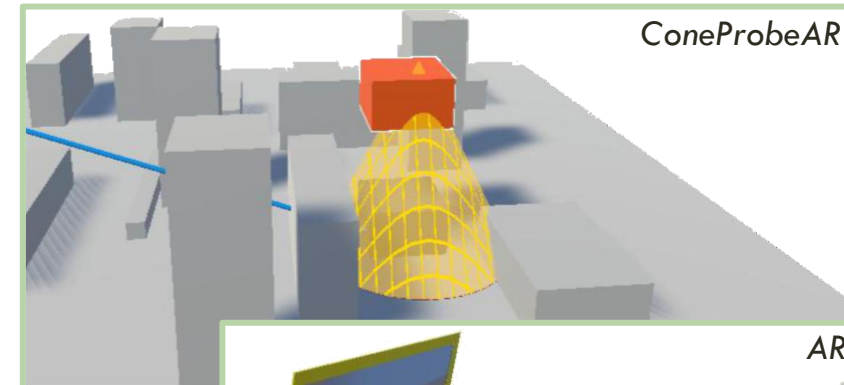
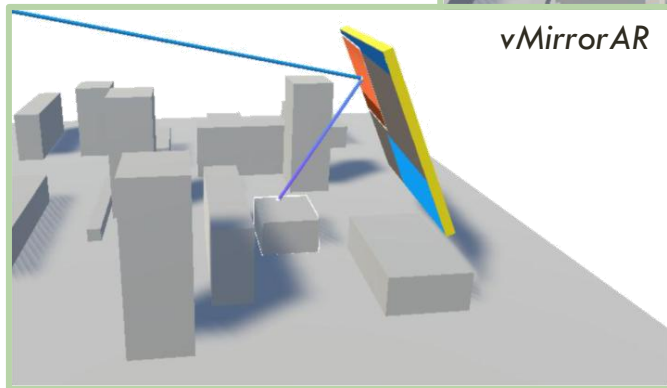
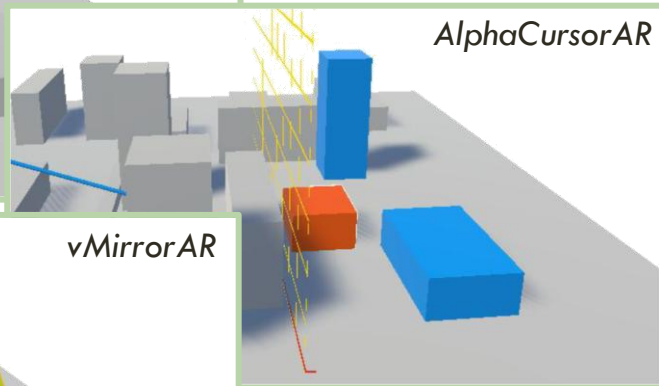
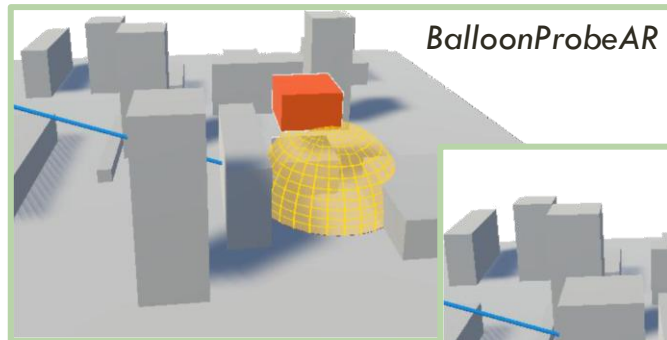




Réduction de l'occultation des référents physiques en Réalité Augmentée

Adaptation et analyse et de techniques de la littérature pour la **réduction de l'occultation**

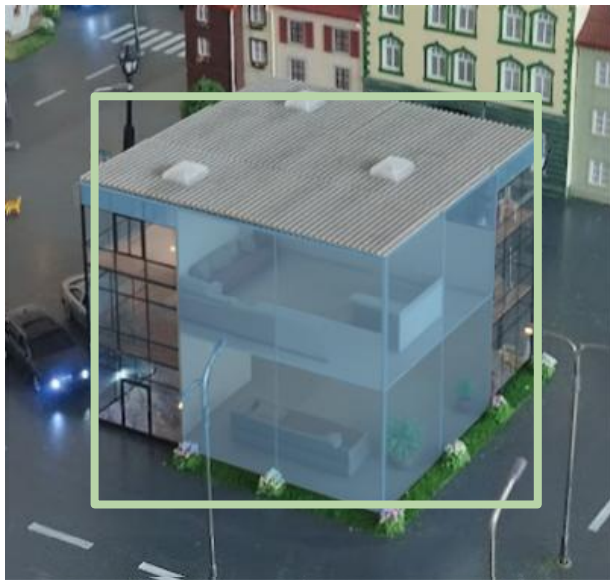
Conception d'**ARPortal**, une nouvelle technique de réduction de l'occultation



PERSPECTIVES À MOYEN TERME

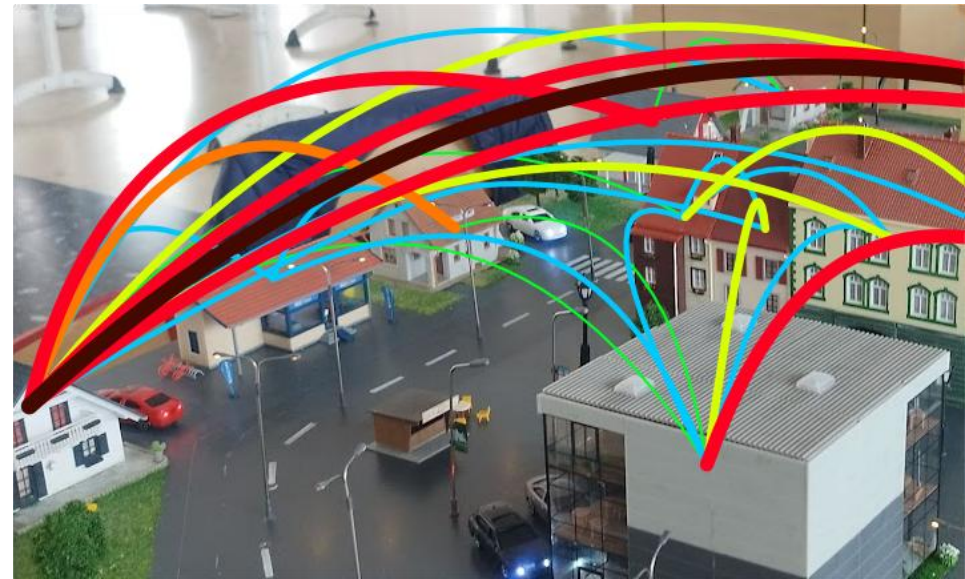
Voir à l'intérieur de référents physiques

Consommation électrique d'un appartement



Gestion de l'occultation située
d'éléments virtuels

Visualisation des flux de données dans un campus



PERSPECTIVES À LONG TERME



INTERACTION AVEC UNE MAQUETTE PHYGITALE : GESTION DES OCCULTATIONS PHYSIQUES ET NUMÉRIQUES

*ARPortal: a Novel Occlusion Reduction Technique for Selecting Physical Objects in Augmented Reality, [Truillet et al.](#), **en soumission***

Pointing at Physical Targets Around the Field of View of Optical See-Through Head-Mounted Displays, [Truillet et al.](#), INTERACT'25

Merci pour votre attention

- *Techniques de Réduction de l'Occultation pour la Sélection de Référents Physiques en Réalité Augmentée : Adaptation et Evaluation de Techniques de Réalité Virtuelle, [Truillet et al.](#), IHM'25*
- *Maquette urbaine augmentée : Techniques d'interactions pour des visualisations situées autour de multiples référents physiques, [Benkhelifa et al.](#), Démonstrations IHM'25 - 🏆 Meilleure démo*
- *Interaction avec des Référents Physiques Dans et Autour du Champ D'Affichage des Casques Semi-Transparents de Réalité Augmentée, [Truillet et al.](#), IHM'24 – 🏆 Mention Honorable*
- *Interaction avec une Maquette Phygitale : Techniques de Sélection Multi Cible, [Truillet](#), Rencontres Doctorales IHM'24*

