



HAL
open science

Boîte à outils pour les illusions visuo-haptiques

Benoît Geslain, Bruno Jartoux, Gilles Bailly

► **To cite this version:**

Benoît Geslain, Bruno Jartoux, Gilles Bailly. Boîte à outils pour les illusions visuo-haptiques. 2024. hal-04487250

HAL Id: hal-04487250

<https://hal.science/hal-04487250>

Preprint submitted on 3 Mar 2024

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

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

Boîte à outils pour les illusions visuo-haptiques

The Visuo-Haptic Illusions Toolkit

BENOÎT GESLAIN, Groupe SII, France

BRUNO JARTOUX, Groupe SII, France

GILLES BAILLY, ISIR, France

Les illusions visuo-haptiques introduisent un décalage entre le corps de l'utilisateur et sa représentation dans le monde virtuel afin de préserver la qualité de l'expérience utilisateur face aux contraintes matérielles : petite arène de réalité virtuelle, peu d'objets physiques, etc. Dans cet article, nous présentons une boîte à outils open-source pour intégrer ces illusions dans des environnements de réalité virtuelle sous Unity. Elle vise à en promouvoir l'utilisation par les professionnels de réalité virtuelle et en faciliter l'étude par les chercheurs. Nous décrivons l'architecture de la boîte à outils, les 14 techniques d'interaction implémentées, les mécanismes permettant de les combiner et l'utilisation pratique de la boîte à outils.

Visuo-haptic illusions introduce a discrepancy between the user's body and its representation in virtual reality (VR) in order to maintain a high level of immersion in constrained environments: limited-size VR arena, few physical objects, etc. In this article, we present an open-source toolkit for integrating these illusions in VR scenes implemented in Unity. It aims to promote their use among VR professionals and help researchers study them. We describe the toolkit architecture, the 14 implemented interaction techniques, the mechanisms for combining them and toolkit use in practice.

CCS Concepts: • **Human-centered computing** → **Virtual reality**; **Visualization toolkits**; *Interaction techniques*.

Mots Clés et Phrases Supplémentaires: illusion visuo-haptique, environnement virtuel, redirection de la main, redirection de la marche

Additional Key Words and Phrases: visuo-haptic illusion, virtual environment, hand redirection, world redirection

Reference:

Benoît Geslain, Bruno Jartoux, and Gilles Bailly. 2024. Boîte à outils pour les illusions visuo-haptiques

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

1 INTRODUCTION

Les illusions visuo-haptiques favorisent l'immersion en Réalité Virtuelle (RV) [16, 2]. Elles permettent par exemple de suggérer à l'utilisateur qu'il interagit avec plusieurs objets physiques alors qu'un seul est présent [2], ou qu'il manipule un objet aux propriétés (poids, taille, etc.) différentes de l'objet réellement manipulé [19, 24], ou encore qu'il se déplace dans un monde virtuel infini et non dans une arène physique de taille limitée [23]. Ces illusions utilisent la dominance visuelle [25] afin de tromper la perception de l'utilisateur en créant un décalage entre sa vue en RV et ses autres sens (haptique, proprioceptif). Deux principaux types d'illusions ont émergé : la redirection de la marche (*Redirected Walking*) [23] et de la main (*Hand Redirection*) [16, 2]. Bien

que leur efficacité soit démontrée, le code est rarement disponible et leur implémentation reste complexe. Ceci peut expliquer que ces illusions soient rarement déployées dans des applications de réalité virtuelle [1, 34], et en particulier peu accessibles aux praticiens hors du monde académique.

Dans cet article, nous présentons une boîte à outils pour intégrer les illusions visuo-haptiques dans les applications de réalité virtuelle sur Unity¹, disponible en *open source* sous licence MIT au lien suivant : <https://github.com/BenoitGeslain/Visuo-haptic-Illusions-Toolkit>.

Elle intègre 14 techniques d'interaction, des mécanismes pour combiner ces techniques, des outils de visualisation et de journalisation pour faciliter leur développement, leur utilisation et leur explication. Ces outils n'ont pas de dépendances et sont pleinement intégrés à l'écosystème de Unity où leurs fonctionnalités sont accessibles par l'interface ou programmatiquement. Ils ont été développés autant pour le milieu académique que professionnel (industrie, jeux vidéo, etc). Avec un wiki incluant des exemples, des tutoriels et une documentation, ces outils visent à accompagner les concepteurs novices et à offrir une structure flexible aux développeurs experts.

Dans la suite, nous décrivons les modules qui composent cette boîte à outils ainsi que deux cas d'utilisation réalistes.

2 ÉTAT DE L'ART

Les illusions visuo-haptiques sont étudiées depuis plus de 20 ans [19]. Nous distinguons quatre catégories d'illusions : la redirection de la main, la redirection du monde, la pseudo-haptique et l'interpolation 3D [17, 7]. La redirection de la main consiste à créer un décalage entre la main réelle de l'utilisateur et son avatar virtuel afin de réutiliser un même objet réel pour le retour haptique de plusieurs objets virtuels [2, 11]. De la même manière, la pseudo-haptique utilise ce décalage pour simuler ou modifier une sensation haptique comme la raideur d'un ressort [19] ou le poids [26]. L'interpolation 3D utilise également un décalage similaire pour faire correspondre des surfaces de courbure et d'orientation différentes [15, 14] ou des objets de formes différentes [36]. Enfin, la redirection du monde consiste à appliquer des gains sur la rotation et la translation de la tête de l'utilisateur ou de courber sa trajectoire lorsqu'il s'avance [23]. Ceci afin de maintenir l'utilisateur au sein d'un environnement réel restreint tout en lui laissant la liberté de se déplacer librement virtuellement (*Infinite Walking*). Les premières stratégies de redirection, dites prédictives, poussent l'utilisateur vers des points particuliers comme le centre de la pièce ou le long d'une orbite au centre de la pièce [23]. Cependant, ces algorithmes s'adaptent difficilement aux situations réels comme la présence d'obstacles ou une pièce réelle non-convexe. THOMAS et ROSENBERG propose d'utiliser des champs de potentiel artificiels pour éloigner l'utilisateur des murs et des obstacles [31]. Des techniques prédictives anticipent les mouvements des utilisateurs limiter les contacts avec les obstacles, limiter les gains de redirection appliqués à l'utilisateur ou réaligner les environnements réels et virtuels [13, 32, 37].

La variété d'illusions et leurs bénéfices motivent la création d'outils facilitant leur utilisation dans des applications.

À notre connaissance, plusieurs boîtes à outils spécifiques aux illusions visuo-haptiques ont été développées. Pour la redirection du monde, le *Redirected Walking Toolkit*² [1], n'ayant pas été maintenu depuis sa publication, n'est pas utilisable avec les mises à jour de Unity et des kits de développement de RV tels que SteamVR. Il existe deux versions plus récentes nommées OpenRDW³ [20] et OpenRDW²⁴. ZENNER et al. ont publié *HaRT – Hand Redirection Toolkit*⁵ [34], qui possède

1. <https://unity.com/>

2. Répertoire GitHub : <https://github.com/USC-ICT-MxR/RDWT>

3. <https://github.com/yaoling1997/OpenRDW>

4. Fourche de OpenRDW. Répertoire Github : <https://github.com/omegafantasy/OpenRDW2>

5. Répertoire GitHub : <https://github.com/AndreZenner/hand-redirection-toolkit>

de nombreuses fonctionnalités, telles que la visualisation et la journalisation des données, desquelles nous nous sommes inspirés pour les généraliser à d'autres illusions. Ni l'un ni l'autre n'intègre la variété des illusions que nous proposons et peut-être plus important encore ne permet d'utiliser ces illusions simultanément (pour la bi-manipulation, par exemple). En réponse à l'obsolescence rapide liée aux évolutions matérielles (casques, contrôleurs, traqueurs) et logicielles (moteurs graphiques 3D, kits de développement/APIs) affectant non seulement le *Redirected Walking Toolkit* mais aussi dans une moindre mesure le *Hand Redirection Toolkit*, lequel nécessite de s'adapter aux mises à jour importantes de SteamVR⁶, nos outils sont compatibles avec le standard OpenXR⁷ adopté ou en voie d'adoption notamment par Unity et SteamVR.

D'autres boîtes à outils pour le développement en réalité virtuelle ne visent pas spécifiquement les illusions visuo-haptiques mais d'autres tâches annexes. La plus notable pour ce projet est le « Interhaptics Haptics SDK » d'Interhaptics⁸ aidant à l'ajout de sensations haptiques en réalité virtuelle pour les jeux vidéos. Elles permettent par exemple d'ajouter des questionnaires d'expérience à l'environnement virtuel [6]⁹ ou de concevoir des expériences utilisateurs [4]¹⁰, mais n'intègrent pas les illusions visuo-haptiques.

Notre toolkit s'appuie sur ces différents travaux et vise à promouvoir l'intégration, l'utilisation et l'étude des techniques d'illusion visuo-haptiques.

3 LE TOOLKIT D'ILLUSIONS VISUO-HAPTQUES

Notre Toolkit d'illusions visuo-haptiques intègre 14 techniques de redirection de la main et du monde et de la pseudo-haptique. Conçu comme un plugin pour Unity¹¹, l'un des moteurs graphiques les plus utilisés dans le jeu vidéo et la RV, il est facilement intégrable dans un projet existant. En particulier, tous les paramètres des techniques d'interaction sont accessibles depuis l'inspecteur Unity, limitant ainsi les connaissances en programmation nécessaires. Notre toolkit est aussi compatible avec le nouveau standard libre *Open XR* et des kits de développement comme celui d'Oculus¹². Enfin, il est possible d'ajouter des fonctionnalités telles qu'une nouvelle technique de redirection ou une stratégie de « sélection de cible » pour la redirection de la marche. Nous décrivons maintenant l'architecture du toolkit, composé de cinq modules illustrés figure 1 :

3.1 Module Redirection

Ce module contient les implémentations de 14 techniques d'interaction organisées en deux catégories :

Redirection de la main ou du corps. Ces techniques manipulent la position de la main virtuelle de l'utilisateur par rapport à celle de sa main réelle. En désignant par M_r et M_v les positions réelle et virtuelle de la main de l'utilisateur et C_r , C_v les positions réelles et virtuelles de la cible (cf. figure 2), la redirection s'exprime par une équation vectorielle de la forme $\vec{M}_v = \vec{M}_r + \alpha \vec{C}_r - \alpha \vec{C}_v$, où le calcul du coefficient α dépend de la technique sélectionnée, avec $0 \leq \alpha \leq 1$ (cf. tableau 1).

Ce module contient 6 techniques de redirection de la main¹³ ainsi que trois procédés pour réinitialiser l'illusion, ce qui est important car la redirection n'est utile et correcte que pour une

6. <https://www.steamvr.com/fr/>

7. <https://www.khronos.org/openxr/>

8. <https://github.com/Interhaptics>

9. Répertoire GitHub : <https://github.com/MartinFk/VRQuestionnaireToolkit>

10. Répertoire GitHub : <https://github.com/immersivognition/unity-experiment-framework>

11. Anonymisé

12. <https://developer.oculus.com/downloads/>

13. La technique *Go-Go* (POUPYREV et al. [22]) n'est pas une illusion à proprement parler, mais une distorsion non-linéaire des distances qui étend la zone virtuelle à portée de main de l'utilisateur.

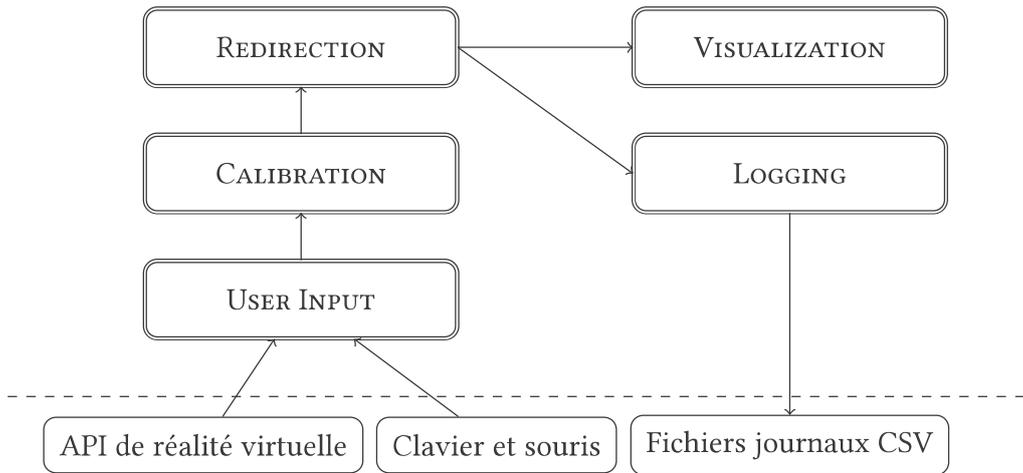


FIG. 1 – Architecture du Toolkit : flux de données entre les modules.

paire d'objets réel et virtuel. Si les utilisateurs veulent interagir avec un autre élément réel, il faut maintenir son immersion et de nouveau co-localiser ses mains réelle et virtuelle. Ces procédés sont les réinitialisations : instantanée, à vitesse constante, ou bien par une déformation graduelle des déplacements de la main de l'utilisateur.

Redirection du monde. Ces techniques manipulent la position et l'orientation de l'utilisateur par rapport à ses position et orientation réelles, par exemple en atténuant ou accentuant ses mouvements, typiquement pour contrôler indirectement ses déplacements dans l'espace réel. Ce module contient une type d'illusion (8 au total) illustrée figure 2-droite. Pour plus de détails, voir l'annexe A.

Pseudo-haptique. Le module inclut aussi des techniques pseudo-haptiques comme *swamp illusion* [19] ou *pseudo-haptic weight* [26]. Ces techniques modifient subtilement le déplacement d'objets virtuels pour changer la perception de propriétés physiques, telles que la raideur ou le poids.

TABLE 1 – Choix du coefficient pour les méthodes de redirection de la main. $\text{clamp}(x)$ désigne $\max(0, \min(x, 1))$. Le point O est l'origine du repère. β est un paramètre numérique.

Référence	Nom de la méthode	Coefficient α
HAN et al. [11]	<i>Translational Shift</i>	1
HAN et al. [11]	<i>Interpolated reach</i>	$\max\left(1 - \frac{ M_r C_r }{ OC_r + \beta}, 0\right)$
AZMANDIAN et al. [2]	<i>Body warping</i>	$\text{clamp}\left(\frac{\overrightarrow{OC_r} \cdot \overrightarrow{OM_r}}{ OC_r ^2}\right)$
CHENG et al. [5]	<i>Sparse haptic</i>	$\frac{ OM_r }{ OM_r + M_r C_r }$
GESLAIN et al. [8]	<i>Polynomial redirection</i>	$f(M_r C_r)$, f polynôme du second degré.

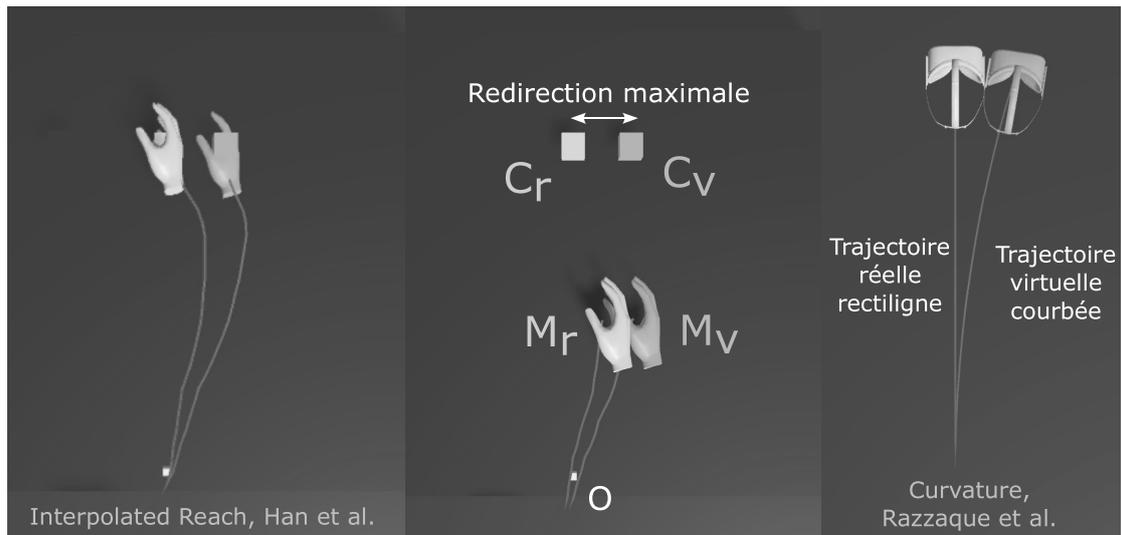


FIG. 2 – Deux exemples de techniques de redirection. À gauche, redirection de la main (Interpolated Reach [11]). En jaune (M_R), la position réelle de la main et de la tête de l'utilisateur et en bleu (M_V), la représentation virtuelle. L'écart entre les deux mains évolue au cours du mouvement pour s'assurer que lorsque la main virtuelle touche la cible virtuelle C_V , la main réelle touche la cible physique correspondante. À droite. Redirection du monde (Curvature [23]). Lorsque l'utilisateur avance, une rotation est appliquée à l'environnement virtuel ce qui rend sa trajectoire courbée. Les visualisations des trajectoires et des éléments réels et virtuels sont intégrées dans le toolkit permettant, par exemple, au public de voir et comprendre sur un écran externe les techniques de redirection que l'utilisateur est en train d'expérimenter.

3.2 Module VISUALIZATION

Ce module ajoute des outils de visualisation (figure 2) pour faciliter la compréhension, le test et le débogage des illusions visuo-haptiques, mais aussi pour réaliser des démonstrations auprès du public. Il illustre simultanément les environnements réel et virtuel. De plus, pour les techniques de redirection de la main, une ligne uniquement visible à l'expérimentateur et au public indique la quantité de redirection appliquée aux mains et la redirection maximale, c'est-à-dire la distance entre les cibles. Une aide couleur indique si ces grandeurs sont comprises entre les seuils de détection déterminés empiriquement [35].

3.3 Module LOGGING

Le module de logging et d'analyse écrit dans un fichier CSV tous les paramètres importants d'une scène à chaque image calculée par Unity. Par exemple, les positions des mains réelles et virtuelles sont enregistrées afin de sauvegarder la trajectoire parcourue par l'utilisateur. Tous ces paramètres sont compris dans une seule classe afin qu'il soit simple d'ajouter des colonnes au fichier. Ce module facilite par exemple la création d'études utilisateur.

3.4 Module USER INPUT

Ce module fournit des scripts et outils pour l'intégration de la boîte à outils aux kits de développement OpenXR de Unity et SteamVR. Il permet également le test sans matériel de RV, l'utilisateur pouvant se déplacer et s'orienter à l'aide du clavier et de la souris. Ainsi, dans le cas de la redirection de la main, l'expérimentateur peut déplacer la « main réelle » d'un utilisateur fictif grâce aux flèches directionnelles ou en cliquant sur la main et en la glissant avec sa souris.

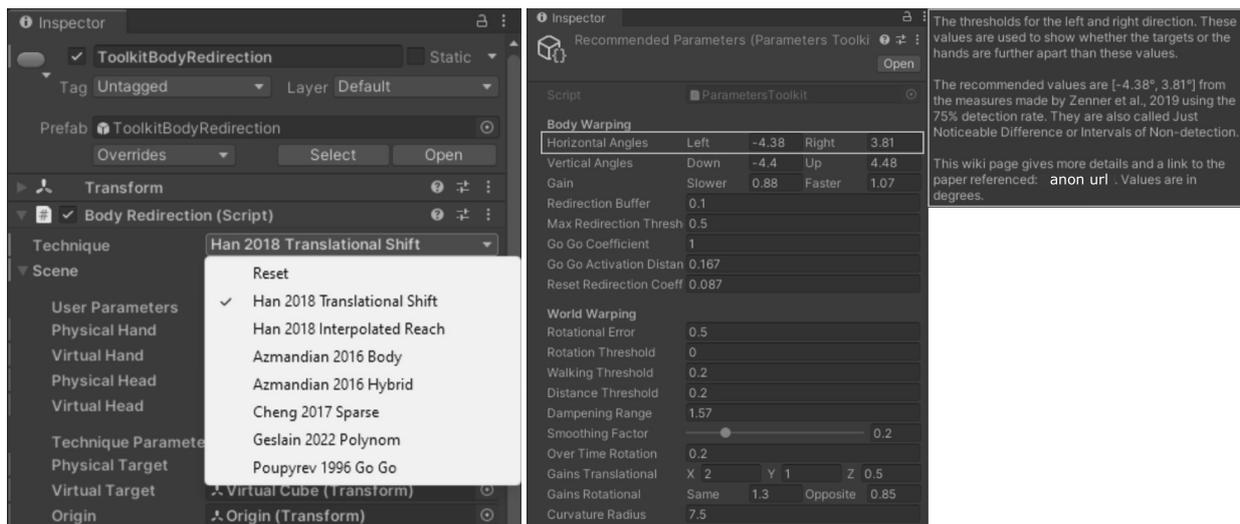


FIG. 3 – Présentation du toolkit dans Unity. Gauche : Une liste déroulante (*prefab*) permet d’inclure une technique d’illusion dans une scène RV. Le designer fait ensuite un glisser-déposer des objets représentant les mains et cibles réelles et virtuelles et l’origine pour initialiser la technique. Milieu : Exemples de paramètres modifiables pour une technique d’illusion, p.ex seuil de détection. Techniquement, c’est un *ScriptableObject* dans Unity accessible depuis n’importe quel script grâce à un *Singleton*. Droite : Tooltip fournissant des informations sur le paramètre sélectionné ainsi qu’un lien vers wiki pour plus d’explications.

3.5 Module CALIBRATION

Ces illusions peuvent bénéficier d’une phase de calibration afin de les adapter aux caractéristiques perceptuelles des individus [18, 7]. Ce module contient plusieurs calibrations. Par exemple, à partir des données d’un utilisateur faisant une tâche de pointage sans redirection, il permet d’approximer ses seuils de détection de la redirection de la main [18].

3.6 Paramètres du Toolkit

Les techniques implémentées ont des paramètres dont les valeurs par défaut proviennent des articles de recherche correspondants. Il est facile de les modifier (figure 3) pour tester des comportements plus permissifs ou plus restrictifs. Afin de guider le designer, nous avons augmenté chaque paramètre (1) d’une explication courte affichée dans un tooltip et (2) d’informations plus détaillées sur un Wiki accessible directement depuis le tooltip du paramètre (figure 3).

4 SCÉNARIO D’UTILISATION

Cette section précise comment utiliser notre boîte à outils dans une scène de RV. Nous considérons que le kit de développement utilisé est le plugin OpenXR de Unity¹⁴. (Si SteamVR semble plus utilisé dans la recherche, son développeur a annoncé son adoption future du standard OpenXR.)

Ajouter une technique de redirection à une scène. Alice est développeuse et souhaite intégrer une illusion de redirection de la main dans son projet car elle a trois « clés à main » virtuelles dans sa scène, mais une seule physique à sa disposition. Ne sachant pas quelle technique utiliser, elle souhaite les comparer. Elle part d’abord des articles de recherche, pour implémenter ces techniques elle-même, mais réalise d’une part l’effort d’implémentation nécessaire et d’autre part que de nombreuses informations sont manquantes dans les articles. Alice se dirige alors vers le « toolkit

14. <https://docs.unity3d.com/560/Documentation/Manual/VRDevices-OpenVR.html>
 Répertoire GitHub : <https://github.com/ValveSoftware/unity-xr-plugin>

d'illusions visuo-haptiques » disponible sur le *Unity Assets Store*. Elle importe notre *prefab* (patron Unity pour les objets de jeu) « *BodyRedirectionManager* » dans sa scène et, après avoir glissé-déposé les représentations réelles et virtuelles des mains de l'utilisateur, des cibles et de l'origine (8 éléments à glisser-déposer), elle teste les différentes techniques en les sélectionnant dans un menu déroulant (cf. figure 3-gauche). Les deux techniques *Han 2018 Interpolated Reach* et *Azmandian 2016 Body* lui semblent pertinentes. Elle s'appuie sur le wiki accessible directement depuis Unity pour en apprendre plus sur ces techniques et choisit finalement *Han 2018 Interpolated Reach*.

Tester une technique d'illusion sans matériel. Alice est maintenant dans le train et n'a pas de casque de réalité virtuelle. Elle souhaite tout de même profiter du trajet pour découvrir les techniques de redirection de la marche. Elle sélectionne une technique, puis simule le déplacement d'un utilisateur réel grâce au module *USER INPUT* et observe le résultat dans le monde virtuel grâce au module *VISUALIZATION*. Elle réalise qu'elle peut déployer sa démonstration dans une arène physique deux fois plus petite grâce à cette technique.

Démonstration devant un public. Alice arrive à Toulouse pour faire une démonstration à ses clients des possibilités des techniques d'illusion pour la formation en RV. L'un des clients fait la démo et pense vraiment qu'il interagit avec les trois clés à main physiques. Pendant ce temps, ses collègues observent sur un écran externe la vue de l'utilisateur ainsi que des vues complémentaires indiquant simultanément la position de la main réelle et de la main virtuelle.

Créer une nouvelle technique de redirection. De retour à Paris, Alice souhaite créer une nouvelle technique de redirection du monde pour répondre aux besoins de ses clients qui disposent d'un casque de RV avec suivi des yeux. Elle ajoute un champ à l'objet « *Scene* » et le met à jour à chaque image calculée dans le script « *WorldRedirection.cs* ». Ensuite, elle crée un nouveau script C# à partir de notre patron de conception dans la catégorie *Illusion Toolkit*. Ce script contient une classe dont la fonction « *Redirect()* » sera appelée à chaque image calculée. Afin que la technique apparaisse dans l'inspecteur, elle ajoute une valeur à l'énumération « *WRTechnique* » et ajoute le cas de cette nouvelle technique au fichier « *WorldRedirection.cs* ». La nouvelle technique est sélectionnable et s'applique correctement à la scène.

Évaluation utilisateur. Alice souhaite tester cette technique. Elle réalise qu'un module *LOGGING* permet d'enregistrer toutes les informations nécessaires pour voir les trajectoires de ses utilisateurs. Elle demande alors à un collègue de passer l'expérience et analyse les résultats lui permettant de définir les paramètres par défaut de la technique.

5 DÉMONSTRATION

Nous proposons de faire une démonstration à l'occasion de la nuit des démos.

6 DISCUSSION

Nous avons présenté une boîte à outils *open source* dédiée aux illusions visuo-haptiques, compatible avec les standards du domaine, comprenant 14 techniques et divers mécanismes d'extension, de test et de journalisation. Nous avons illustré son utilisation à travers plusieurs scénarios.

6.1 Travaux Futurs

Module Redirection. Nous voulons non seulement continuer d'intégrer nous-mêmes de nouvelles techniques mais aussi ouvrir cette possibilité à la communauté. Ceci inclut principalement des techniques de redirection du monde réactives comme les champs de potentiels artificiels [31] et des techniques prédictives comme la cinématique inverse [32] et l'extraction de graphes [33]. Nous souhaitons également implémenter des techniques de redirection comme *Redirected touching* avec

son interpolation 3D (KOHLI et al. [16]) et les travaux qui ont suivi [36], des techniques utilisant du matériel spécifique, p.ex. la redirection du monde pendant les saccades oculaires [30], ou des techniques nécessitant des calculs en amont, trop lourds pour être réalisés en temps réel [29].

Module User Input. Nous envisageons également de rendre plus réaliste la simulation de trajectoires d'utilisateurs (pour tester les techniques de redirection) en s'appuyant sur des modèles du comportement humain [9, 10].

Module Visualization. Les informations enregistrées par le module LOGGING permettent de reconstituer la scène telle qu'elle s'est déroulée pendant l'enregistrement. Une direction de recherche est d'élaborer des outils pour faciliter la réalisation de vidéos, revoir des moments clés d'interactions et peut-être mieux comprendre le comportement des utilisateurs.

Technologie. Une limitation de notre boîte à outils est sa dépendance à un unique moteur 3D, Unity bien qu'ils fonctionnent avec différents kits de développement. Ceci s'explique par les différences d'architecture et de langage de programmation entre les différents moteurs. Dans un contexte où l'évolution de la politique de licence de Unity inquiète sa communauté [21], nous souhaiterions transposer notre travail à d'autres moteurs 3D comme l'*Unreal Engine*¹⁵ ou Godot¹⁶.

Évaluation. L'évaluation d'une boîte à outils est difficile car elle nécessite un temps d'appropriation par les utilisateurs. Nous envisageons de la tester auprès de chercheurs et d'industriels pour identifier ses avantages et les points à améliorer [34] et de partager des cas d'applications concrètes qui utilisent notre boîte à outils [3].

REMERCIEMENTS

Benoît Geslain et Bruno Jartoux sont employés par le Groupe SII.

RÉFÉRENCES

- [1]Mahdi AZMANDIAN, Timofey GRECHKIN, Mark BOLAS et Evan SUMA. 2016. The redirected walking toolkit: a unified development platform for exploring large virtual environments. In *2016 IEEE 2nd Workshop on Everyday Virtual Reality (WEVR)*. IEEE, Greenville, SC, USA, (mars 2016), 9-14. ISBN : 978-1-5090-0840-7. DOI : 10.1109/WEVR.2016.7859537.
- [2]Mahdi AZMANDIAN, Mark HANCOCK, Hrvoje BENKO, Eyal OFEK et Andrew D. WILSON. 2016. Haptic Retargeting: Dynamic Repurposing of Passive Haptics for Enhanced Virtual Reality Experiences. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '16*. ACM, Santa Clara, California, USA, 1968-1979. ISBN : 978-1-4503-3362-7. DOI : 10.1145/2858036.2858226.
- [3]Gilles BAILLY et Sylvain MALACRIA. 2013. MenuInspector: Outil pour l'analyse des menus et cas d'étude. In *Proceedings of the 25th Conference on l'Interaction Homme-Machine (IHM '13)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, (nov. 2013), 103-106. ISBN : 978-1-4503-2407-6. DOI : 10.1145/2534903.2534917.
- [4]Jack BROOKES, Matthew WARBURTON, Mshari ALGHADIER, Mark MON-WILLIAMS et Faisal MUSHTAQ. 2020. Studying human behavior with virtual reality: The Unity Experiment Framework. *Behavior Research Methods*, 52, 2, (avr. 2020), 455-463. DOI : 10.3758/s13428-019-01242-0.
- [5]Lung-Pan CHENG, Eyal OFEK, Christian HOLZ, Hrvoje BENKO et Andrew D. WILSON. 2017. Sparse Haptic Proxy: Touch Feedback in Virtual Environments Using a General Passive Prop. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '17)*. ACM, New York, NY, USA, 3718-3728. ISBN : 978-1-4503-4655-9. DOI : 10.1145/3025453.3025753.
- [6]Martin FEICK, Niko KLEER, Anthony TANG et Antonio KRÜGER. 2020. The Virtual Reality Questionnaire Toolkit. In *Adjunct Publication of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. ACM, (oct. 2020), 68-69. ISBN : 978-1-4503-7515-3. DOI : 10.1145/3379350.3416188.
- [7]Benoît GESLAIN. 2022. *Improving Visuo-haptic Illusions in Virtual Reality*. Thèse de doctorat. Sorbonne université, (déc. 2022). Visité le 26 juin 2023 depuis <https://www.theses.fr/2022SORUS495>.

15. <https://www.unrealengine.com/fr>

16. <https://godotengine.org/>

- [8]Benoit GESLAIN, Simon BESGA, Flavien LEBRUN et Gilles BAILLY. 2022. Generalizing the Hand Redirection Function in Virtual Reality. In *Proceedings of the 2022 International Conference on Advanced Visual Interfaces (AVI 2022)* (Frascati, Rome, Italy). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. ISBN : 978-1-4503-9719-3. DOI : 10.1145/3531073.3531100.
- [9]Eric J GONZALEZ, Elyse D. Z. CHASE, Pramod KOTIPALLI et Sean FOLLMER. 2022. A Model Predictive Control Approach for Reach Redirection in Virtual Reality. In *Proceedings of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '22)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1-15. ISBN : 978-1-4503-9157-3. DOI : 10.1145/3491102.3501907.
- [10]Eric J GONZALEZ et Sean FOLLMER. 2023. Sensorimotor Simulation of Redirected Reaching using Stochastic Optimal Feedback Control. In *Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '23)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1-17. ISBN : 978-1-4503-9421-5. DOI : 10.1145/3544548.3580767.
- [11]Dustin T. HAN, Mohamed SUHAIL et Eric D. RAGAN. 2018. Evaluating Remapped Physical Reach for Hand Interactions with Passive Haptics in Virtual Reality. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 24, 4, (avr. 2018), 1467-1476. DOI : 10.1109/TVCG.2018.2794659.
- [12]Eric HODGSON et Eric BACHMANN. 2013. Comparing Four Approaches to Generalized Redirected Walking: Simulation and Live User Data. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 19, 4, (avr. 2013), 634-643. DOI : 10.1109/TVCG.2013.28.
- [13]Sang-Bin JEON, Jaeho JUNG, Jinhyung PARK et In-Kwon LEE. 2023. F-RDW: Redirected Walking with Forecasting Future Position. arXiv:2304.03497 [cs]. (Avr. 2023). DOI : 10.48550/arXiv.2304.03497.
- [14]Luv KOHLI. 2013. *Redirected touching*. phd. University of North Carolina at Chapel Hill, USA. DOI : 10.17615/34cy-pt44.AAI3562754 ISBN-13: 9781303105593.
- [15]Luv KOHLI. 2010. Redirected touching: Warping space to remap passive haptics. In *2010 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*. IEEE, Waltham, MA, USA, (mars 2010), 129-130. DOI : 10.1109/3DUI.2010.5444703.
- [16]Luv KOHLI, M. C. WHITTON et F. P. BROOKS. 2013. Redirected Touching: Training and adaptation in warped virtual spaces. In *2013 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*. IEEE, Orlando, FL, USA, (mars 2013), 79-86. DOI : 10.1109/3DUI.2013.6550201.
- [17]Flavien LEBRUN. 2022. *Study of Visuo-Haptic Illusions in Virtual Reality : understanding and Predicting Illusion Detection*. These de doctorat. Sorbonne université, (déc. 2022). Visité le 3 jan. 2024 depuis <https://www.theses.fr/2022SORUS525>.
- [18]Flavien LEBRUN, Sinan HALIYO et Gilles BAILLY. 2021. A Trajectory Model for Desktop-Scale Hand Redirection in Virtual Reality. In *IFIP Conference on Human-Computer Interaction*. Springer, 105-124.
- [19]Anatole LÉCUYER, Sabine COQUILLART, Abderrahman KHEDDAR, Paul RICHARD et Philippe COIFFET. 2000. Pseudo-haptic feedback: can isometric input devices simulate force feedback? In *Proceedings IEEE Virtual Reality 2000 (Cat. No.00CB37048)*. IEEE, New Brunswick, NJ, USA, (mars 2000), 83-90. DOI : 10.1109/VR.2000.840369.
- [20]Yi-Jun LI, Miao WANG, Frank STEINICKE et Qinqing ZHAO. 2021. OpenRDW: A Redirected Walking Library and Benchmark with Multi-User, Learning-based Functionalities and State-of-the-art Algorithms. In ISSN: 1554-7868. IEEE Computer Society, (oct. 2021), 21-30. ISBN : 978-1-66540-158-6. DOI : 10.1109/ISMAR52148.2021.00016.
- [21]Ash PARRISH. 2023. Developers respond to Unity's new pricing scheme. *TheVerge*, (14 sept. 2023). <https://www.theverge.com/2023/9/14/23872330/unity-developers-react-new-pricing-model>.
- [22]Ivan POUPYREV, Mark BILLINGHURST, Suzanne WEGHORST et Tadao ICHIKAWA. 1996. The Go-Go Interaction Technique: Non-linear Mapping for Direct Manipulation in VR. In *Proceedings of the 9th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. ACM, Seattle, Washington, USA, 79-80.
- [23]Sharif RAZZAQUE, Zachariah KOHN et Mary C. WHITTON. 2001. Redirected Walking. In *Eurographics 2001 - Short Presentations*. Eurographics Association. DOI : 10.2312/egs.20011036.
- [24]Michael RIETZLER, Florian GEISELHART, Jan GUGENHEIMER et Enrico RUKZIO. 2018. Breaking the Tracking: Enabling Weight Perception Using Perceivable Tracking Offsets. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '18)*. ACM, New York, NY, USA, 128:1-128:12. ISBN : 978-1-4503-5620-6. DOI : 10.1145/3173574.3173702.
- [25]Irvin ROCK et Jack VICTOR. 1964. Vision and Touch: An Experimentally Created Conflict between the Two Senses. *Science*, 143, 3606, (fév. 1964), 594-596. DOI : 10.1126/science.143.3606.594.
- [26]Majed SAMAD, Elia GATTI, Anne HERMES, Hrvoje BENKO et Cesare PARISE. 2019. Pseudo-Haptic Weight: Changing the Perceived Weight of Virtual Objects By Manipulating Control-Display Ratio. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '19)*. ACM, New York, NY, USA, 320:1-320:13. ISBN : 978-1-4503-5970-2. DOI : 10.1145/3290605.3300550.
- [27]Frank STEINICKE, Gerd BRUDER, Jason JERALD, Harald FRENZ et Markus LAPPE. 2008. Analyses of Human Sensitivity to Redirected Walking. In *Proceedings of the 2008 ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST '08)* (Bordeaux, France). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 149-156. ISBN : 978-1-59593-951-7. DOI : 10.1145/1450579.1450611.

- [28] Frank STEINICKE, Gerd BRUDER, Luv KOHLI, Jason JERALD et Klaus HINRICHS. 2008. Taxonomy and Implementation of Redirection Techniques for Ubiquitous Passive Haptic Feedback. In *2008 International Conference on Cyberworlds*. IEEE, Hanzhou, China, (sept. 2008), 217-223. ISBN : 978-0-7695-3381-0. DOI : 10.1109/CW.2008.53.
- [29] Qi SUN, Li-Yi WEI et Arie KAUFMAN. 2016. Mapping virtual and physical reality. *ACM Transactions on Graphics*, 35, 4, 1-12. DOI : 10.1145/2897824.2925883.
- [30] Qi SUN et al. 2018. Towards virtual reality infinite walking: dynamic saccadic redirection. *ACM Transactions on Graphics*, 37, 4, (juill. 2018), 1-13. DOI : 10.1145/3197517.3201294.
- [31] Jerald THOMAS et Evan Suma ROSENBERG. 2019. A General Reactive Algorithm for Redirected Walking Using Artificial Potential Functions. In *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*. ISSN: 2642-5254. (Mars 2019), 56-62. DOI : 10.1109/VR.2019.8797983.
- [32] Jerald THOMAS, Seraphina YONG et Evan Suma ROSENBERG. 2022. Inverse Kinematics Assistance for the Creation of Redirected Walking Paths. In *2022 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*. ISSN: 1554-7868. (Oct. 2022), 593-602. DOI : 10.1109/ISMAR55827.2022.00076.
- [33] Markus ZANK et Andreas KUNZ. 2017. Optimized graph extraction and locomotion prediction for redirected walking. In *2017 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*. (Mars 2017), 120-129. DOI : 10.1109/3DUI.2017.7893328.
- [34] André ZENNER, Hannah Maria KRIEGLER et Antonio KRÜGER. 2021. HaRT - The Virtual Reality Hand Redirection Toolkit. In *Extended Abstracts of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '21)* (Yokohama, Japan). ACM, New York, NY, USA. ISBN : 978-1-4503-8095-9. DOI : 10.1145/3411763.3451814.
- [35] André ZENNER et Antonio KRUGER. 2019. Estimating Detection Thresholds for Desktop-Scale Hand Redirection in Virtual Reality. In *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*. IEEE, Osaka, Japan, (mars 2019), 47-55. ISBN : 978-1-72811-377-7. DOI : 10.1109/VR.2019.8798143.
- [36] Yiwei ZHAO et Sean FOLLMER. 2018. A Functional Optimization Based Approach for Continuous 3D Retargeted Touch of Arbitrary, Complex Boundaries in Haptic Virtual Reality. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '18)*. ACM, New York, NY, USA, 1-12. ISBN : 978-1-4503-5620-6. DOI : 10.1145/3173574.3174118.
- [37] Michael A. ZMUDA, Joshua L. WONSER, Eric R. BACHMANN et Eric HODGSON. 2013. Optimizing Constrained-Environment Redirected Walking Instructions Using Search Techniques. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 19, 11, (nov. 2013), 1872-1884. Conference Name: IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. DOI : 10.1109/TVCG.2013.88.

A REDIRECTION DU MONDE

A.1 Techniques de redirection vers la cible

Ces techniques redirigent l'utilisateur vers un point de l'environnement réel, généralement afin d'éviter sortie de l'arène physique et collisions. En rotation, on *augmente* l'angle de déviation virtuel θ_v (cf. figure 4) de sorte que l'utilisateur compense en réduisant sa déviation réelle θ_r .

Nous proposons deux types de stratégies pour la mise à jour de la cible à chaque pas de temps : une ou plusieurs cibles prédéfinies, l'utilisateur étant dirigé vers celle qui forme le plus petit angle avec son regard (*Steer-To-Center*, *Steer-To-Multiple-Targets*, *Steer-To-Multiple-Targets-Center*) [23, 12], et des cibles se déplaçant sur une orbite circulaire (*Steer-To-Orbit*), visant à restreindre les déplacements de l'utilisateur à cette orbite [23].

A.2 Techniques de Redirection de la Marche

Une fois la cible choisie, on agrège (p. ex. par le maximum ou la somme pondérée) les trois composantes suivantes pour obtenir la rotation virtuelle [23] :

- Constante : rotation s'éloignant de la cible à vitesse constante, dès lors que l'angle formé entre le regard de l'utilisateur et la cible est au-dessus d'un certain seuil.
- Gain : atténuation linéaire des rotations vers la cible de redirection (resp. amplification, en direction opposée).
- Courbure : imprime à l'utilisateur une rotation sur lui-même à l'opposé de la cible de redirection proportionnelle à son déplacement en translation.

World warping (AZMANDIAN et al. [2]), aussi implémentée, est semblable au gain rotationnel seul. *Hybrid warping*[2] combine les effets de *body warping* et *world warping*, avec une pondération qui avantage le premier ou le second selon que la main est loin ou proche de sa cible.

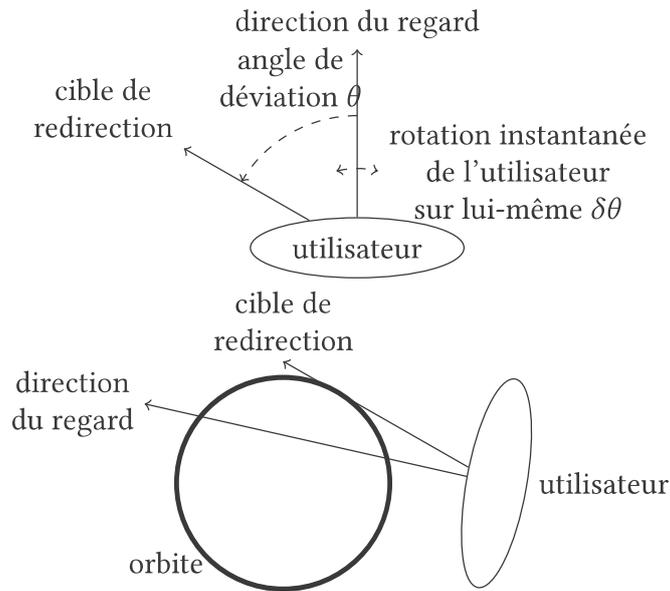


FIG. 4 – Gauche : redirection du monde vers une cible définie par une des techniques de choix de la cible. Droite : redirection vers une orbite circulaire, l'utilisateur est redirigé vers le point tangent à l'orbite.

Autres techniques de modification du monde, sans cible, présentes dans le toolkit.

- Gain translationnel [27, 28] : appliqué à toutes les translations dans le plan horizontal, mettant ainsi à l'échelle l'environnement virtuel par rapport au réel.
- Pour réinitialiser la position et l'orientation de l'utilisateur par rapport à l'environnement, nous utilisons la rotation constante et le gain rotationnel de RAZZAQUE et al. ainsi que le gain en translation de STEINICKE et al.