



Science Arts & Métiers (SAM)

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers Institute of Technology researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <https://sam.ensam.eu>
Handle ID: <http://hdl.handle.net/10985/13056>

To cite this version :

Cédric DI LORETO, Julien RYARD, Alain ROUSSEAU, Jean-Rémy CHARDONNET - Simulation de travail en hauteur en réalité mixte : étude de la présence et de l'anxiété - In: Journées J-RV, France, 2017-10-24 - Journées de l'Association Française de Réalité Virtuelle - 2017

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

Administrator : scienceouverte@ensam.eu



Simulation de travail en hauteur en réalité mixte : étude de la présence et de l'anxiété

Cédric Di Loreto*
Le2i, FRE2005, Arts et
Métiers, CNRS, Université
Bourgogne Franche-Comté,
HeSam, Institut Image
Enedis Bourgogne

Jean-Rémy Chardonnet†
Le2i, FRE2005, Arts et
Métiers, CNRS, Université
Bourgogne Franche-Comté,
HeSam, Institut Image

Julien Ryard‡
Le2i, FRE2005, Arts et
Métiers, CNRS, Université
Bourgogne Franche-Comté,
HeSam, Institut Image

Alain Rousseau§
Enedis Bourgogne

ABSTRACT

Dans cet article, nous proposons d'évaluer la performance d'un simulateur immersif de travail en hauteur en réalité mixte, en termes de sentiment de présence et de répercussion sur le sentiment d'anxiété liée à la hauteur. Le simulateur consiste en une échelle réelle fixée sur un support et synchronisée en position avec une échelle virtuelle placée à 11 mètres de hauteur sur un poteau électrique. La visualisation de l'environnement virtuel se fait à travers un casque immersif. Deux modalités ont été intégrées et comparées : l'une avec affichage de pieds et mains virtuels synchronisés en position avec les pieds et mains réels des utilisateurs, l'autre sans affichage des pieds et mains virtuels. Vingt-six sujets âgés de 22 à 55 ans ont pris part à une étude utilisateur pour la réalisation d'une simulation de tâche en hauteur, séparés en deux groupes, l'un avec la première modalité visuelle, l'autre avec la seconde. Le niveau d'anxiété est mesuré par leur activité électrodermale, tandis que la présence est mesurée à travers un questionnaire. Les résultats montrent que le simulateur est performant en termes de présence et d'anxiété qu'il génère chez des personnes ayant le vertige. L'apport visuel des mains et pieds virtuels dans ce contexte n'apparaît pas significatif sur le sentiment de présence. Ce simulateur ouvre des perspectives intéressantes pour une utilisation comme outil de prévention, de détection d'acrophobie de futurs travailleurs en hauteur ou de formation.

Index Terms: H.5.1 [Information interfaces and presentation]: Multimedia Information Systems—Artificial, augmented, and virtual realities; H.1.2 [Models and principles]: User/Machine Systems—Human factors

1 INTRODUCTION

La mise à disposition sur le marché de dispositifs de réalité virtuelle à coût abordable, tels que les casques immersifs HTC Vive ou Oculus Rift, a entraîné depuis plusieurs années une diffusion de ces technologies dans les entreprises. La réalité virtuelle permet en effet de placer un sujet dans un environnement virtuel, potentiellement dangereux en réel, sans le mettre en danger car contrôlé. Le travail en hauteur est une de ces situations dangereuses qui peut être reproduite en réalité virtuelle. Plusieurs applications telles que la formation, la prévention ou la vérification peuvent être imaginées.

Dans le présent papier, nous présentons un simulateur de travail en hauteur en réalité mixte transportable, destiné à être déployé dans les entreprises spécialisées dans le travail en hauteur (Fig. 1). Nous proposons d'évaluer sa performance en termes de sentiment de présence et de répercussion sur le sentiment d'anxiété liée à



Figure 1: Simulateur de travail en hauteur. L'utilisateur doit monter sur une échelle réelle synchronisée avec une échelle virtuelle placée en hauteur dans l'environnement virtuel et attraper un cerf-volant en lâchant ses mains de l'échelle.

la hauteur ; en particulier nous étudions l'impact de la présence d'un retour visuel des membres extrêmes (mains et pieds) dans l'environnement virtuel.

1.1 Travaux Antérieurs

1.1.1 Vertige : Aspects Psychologiques et Comportementaux

Le vertige a été étudié depuis de nombreuses années. L'équipe de Brandt [3,4] présente une théorie basée sur un modèle géométrique, expliquant l'apparition du vertige chez un individu. Une différence est établie entre l'acrophobie, peur du vide, de la hauteur émanant de l'expérience, et ce qui est appelé le "vertige des distances", basé sur le modèle géométrique évoqué. Ce modèle propose que le vertige apparaîtrait lorsque la distance yeux-références stables les plus proches devient critique, de par une augmentation de l'instabilité posturale. L'hypothèse d'une contradiction entre les informations visuelles reçues par un sujet et celles reçues par son système vestibulaire a été émise : l'être humain a besoin de repères stables autour de lui afin de procéder au maintien de sa posture, et ce de manière continue. La parallaxe induite par les micromouvements naturels de la tête est alors le facteur clef permettant d'assurer la stabilité posturale par le corps, de manière inconsciente. Lorsque le contraste stable s'éloigne de l'observateur, la parallaxe induite par ce type de mouvement passe en dessous du seuil perceptible par l'œil humain. En résultent un conflit entre les informations visuelles et vestibulaires et une augmentation du balancement du corps, car la stabilité posturale est plus difficile à obtenir. L'étude de Coelho et Wallis [7] permet d'aller plus loin dans cette théorie. C'est l'augmentation du balancement du corps qui générerait une peur de tomber et donc

*e-mail: cedric.di-loreto@ensam.eu

†e-mail: jean-remy.chardonnet@ensam.eu

‡e-mail: julien.ryard@ensam.eu

§e-mail: alain-r.rousseau@enedis.fr

la sensation de vertige. Les individus acrophobiques seraient des personnes chez qui les informations visuelles sont trop importantes, ou bien des personnes ayant des troubles du système vestibulaire. L'article permet d'établir également une distance de saturation des repères visuels de cinq mètres, à partir de laquelle le balancement du corps n'augmente plus.

D'autres travaux se sont également intéressés au traitement de l'acrophobie. C'est le cas de Cohen [9], qui propose dans son article, une méthode subjective d'évaluation du caractère acrophobique d'une personne : un questionnaire d'acrophobie. L'étude révèle une corrélation entre les niveaux d'anxiété atteints et le score d'acrophobie issu de ce questionnaire. Le questionnaire, contenant 30 questions, permet donc de juger à quel point une personne est acrophobique.

L'étude de Coelho et al. [6] met en lumière un autre paramètre influençant l'anxiété ressentie par des sujets dans une situation de hauteur : le déplacement. L'étude montre que l'anxiété de sujets acrophobiques augmente lorsqu'on leur demande de se déplacer en hauteur. Il a été montré, dans le cadre de cette étude, que les déplacements les plus anxiogènes sont les déplacements latéraux.

1.1.2 Réalité virtuelle et perception de la hauteur

Depuis l'apparition de la réalité virtuelle, de nombreux travaux ont été réalisés sur la perception de la hauteur en environnement virtuel, et par extension sur la possibilité d'un traitement de l'acrophobie par cet outil. C'est notamment le cas de Cleworth et al. [5] qui proposent dans leur article de comparer l'influence de l'environnement sur les signaux physiologiques. Dans le cadre de l'étude, 17 sujets ont été exposés à des faibles et hautes hauteurs, à la fois en environnement réel et en environnement virtuel. Il a été établi que l'activité électrodermale, l'anxiété, la peur et la fréquence des mouvements du centre de pression augmentent avec la hauteur, de même que la stabilité perçue, la confiance et l'amplitude des mouvements du centre de pression diminuaient avec la hauteur. Ces changements ont pu être remarqués à la fois en réel et en virtuel, mais se sont révélés moins importants en virtuel. L'article conclut sur le potentiel de la réalité virtuelle à reproduire les effets d'une exposition à la hauteur, dans le cadre d'études, d'habilitations ou de prévention. L'étude de Simeonov et al. [18] arrive à la même conclusion quant au potentiel de la réalité virtuelle à reproduire les réponses physiologiques d'une exposition à la hauteur, cette fois-ci en utilisant un système de type CAVE. La fréquence cardiaque a été rajoutée à la liste des paramètres physiologiques étudiés et connaît aussi des évolutions lors d'une simulation virtuelle. L'étude conclut elle aussi sur la possibilité d'utiliser la réalité virtuelle comme moyen d'évaluation de personnel en matière de performance dans le cadre de travaux en hauteur en toute sécurité, comme moyen d'identifier les risques de chutes ou encore comme moyen de trouver de nouvelles stratégies de prévention de chute.

Les nombreuses études attestant de l'efficacité de la réalité virtuelle à reproduire les symptômes physiologiques d'une exposition réelle à la hauteur ont invité les chercheurs à s'intéresser au traitement de l'acrophobie grâce à cette même technologie. Emmekamp et al. [10], ainsi que Coelho et al. [6] démontrent l'efficacité d'une thérapie par exposition virtuelle à la hauteur. Dans chacune de ces études, deux groupes de personnes reconnues acrophobiques ont reçu un traitement par expositions virtuelles pour l'un, réelles pour l'autre. Le groupe qui a suivi une thérapie par réalité virtuelle a pu faire des progrès au moins aussi importants contre leur acrophobie que l'autre groupe. Dans une autre étude de Coelho et al. [8], un bilan de l'utilisation de la réalité virtuelle comme thérapie contre l'acrophobie est dressé. L'étude établit qu'il est préférable d'exposer les utilisateurs à la hauteur associée à des mouvements latéraux plutôt qu'à la hauteur seule pour avoir de meilleurs résultats.

Ici, nous ne proposons pas un simulateur pour le traitement de l'acrophobie, mais comme outil de détection d'acrophobie et de

formation à des situations de travail en hauteur.

1.1.3 Présence et Anxiété

Slater et Wilbur [20] définit les deux concepts que sont immersion et présence en environnement virtuel. Un système est dit immersif lorsqu'il est capable d'imiter une situation réelle à travers les sens de l'utilisateur. L'immersion est quelque chose de quantifiable et objectif. La présence est le sentiment d'être présent au sens psychologique, purement subjectif. L'idée est que si des sujets ressentent un sentiment de présence extrêmement fort, ils devraient agir dans l'environnement virtuel de la même manière qu'ils le feraient dans l'environnement réel, et ainsi, le souvenir que laisserait l'expérience virtuelle en eux devrait être des souvenirs de lieux visités et non de photographies. Pour mesurer la présence, Witmer et Singer [22] ont proposé un questionnaire permettant de quantifier la présence ressentie par un sujet lors d'une simulation virtuelle. Ce questionnaire est constitué de 24 questions partagées en sept catégories (ou sous-échelles) qui permettent d'analyser plus finement les résultats pour ce qui est de la présence lors de la simulation et d'en déceler ainsi des résultats plus aboutis.

Juan et Pérez [11] rapportent une étude comparant le niveau de présence et d'anxiété dans un environnement de hauteur avec un casque de réalité virtuelle et un CAVE. Les résultats montrent que les deux systèmes induisent un niveau de présence relativement bon, ainsi que de l'anxiété chez les sujets. Leur étude révèle cependant un écart significatif entre le casque et le CAVE, avec une préférence pour le CAVE, sur les niveaux de présence et d'anxiété atteints par les sujets, la présence et l'anxiété apparaissant ici corrélées. Cependant, le casque utilisé possédait un faible champ de vision (40°), ce qui n'est pas comparable aux casques de réalité virtuelle d'aujourd'hui. Le CAVE, en plus d'offrir un champ de vision égal à celui des yeux des sujets, présente aussi l'avantage de permettre aux sujets de voir leur corps, ce qui peut également expliquer ces différences. Dans leur étude, Krijn et al. [13] rendent compte eux aussi du lien entre présence et anxiété dans le cas de l'acrophobie. Cependant aucune corrélation entre présence et anxiété n'a été trouvée dans le cadre de cette étude. Les auteurs émettent toutefois l'hypothèse qu'un certain niveau de présence est nécessaire pour générer de l'anxiété, mais que plus de présence n'engendre pas forcément plus d'anxiété chez les sujets. L'article de Schäfer et al. [17] relate, comme celui de Juan et Pérez [11], une augmentation du caractère immersif d'une expérience se traduisant par une augmentation de la présence et de l'anxiété ressentie par les participants. Alsina-Jurnet et al. [1] ont proposé de trouver un consensus sur le rôle que joue la présence sur l'anxiété dans des environnements stressants. Plus de 210 sujets ont participé à l'étude, ce qui en fait l'étude la plus large du genre. Il est suggéré que la présence et l'anxiété ne sont pas liées dans des environnements non stressants mais que la relation existe dans des environnements stressants. Cette relation serait d'autant plus forte chez des personnes phobiques. La relation entre présence et anxiété dans des environnements stressants serait alors : présence croissante, anxiété croissante. Enfin, le principal facteur de la présence dans cette relation serait le réalisme perçu par les sujets (sous-échelle du questionnaire de présence de Witmer et Singer [22]).

1.1.4 Navigation Verticale et Visualisation d'un Avatar

Dans le cadre de la simulation de travail en hauteur, les sujets doivent pouvoir naviguer verticalement. La navigation verticale en environnement virtuel a été étudiée dans un certain nombre de travaux. Slater et al. [19] ont été les premiers à proposer une métaphore de navigation verticale, centrée sur le sujet, permettant de monter des escaliers et des échelles virtuels, dans le but de réduire le conflit entre les informations visuelles et proprioceptives, et ainsi le mal de simulateur, mal récurrent en réalité virtuelle. Lai et al. [14] proposent une autre métaphore de navigation pour monter sur une échelle virtuelle

consistant à marcher sur place. Dans notre étude, nous proposons d'utiliser une échelle réelle afin de s'affranchir de telles métaphores de montée d'échelle. Vasylevska et Kaufmann [21] proposent une étude comparant plusieurs métaphores d'ascension non interactives : le vol, la téléportation ou un ascenseur. Cette dernière apparaît comme la meilleure en termes de présence. Ici, nous adopterons une métaphore similaire pour une partie de notre simulateur.

Plusieurs travaux se sont portés sur les effets de la visualisation d'un avatar sur la présence. Cependant, peu d'entre eux ont considéré ces effets dans des milieux acrophobiques, et notamment avec un casque de réalité virtuelle avec lequel les sujets ne peuvent pas voir leur corps. Schäfer et al. [17] ont présenté un système permettant de visualiser un avatar dans un tel milieu en utilisant un système de suivi Kinect. Une augmentation significative de la présence et des comportements des sujets a pu être observée lors de cette expérience.

1.2 Contributions

Les études évoquées précédemment mettent en lumière le potentiel de la réalité virtuelle à reproduire des situations de hauteur, ainsi que les symptômes physiologiques et comportementaux chez les sujets. Nous proposons ainsi un simulateur reproduisant en réalité mixte une situation réelle de travail en hauteur. Nous intégrons dans la simulation la possibilité d'avoir un retour visuel sur les mains ainsi que sur les pieds des sujets. En effet, l'article de Schäfer et al. [17] laisse présager un gain au niveau de la présence, bien qu'ici, nous n'intégrons la visualisation que de certains membres et non d'un avatar complet. A contrario, le système utilisé ici induit une faible latence, ce qui renforce l'immersion lors de la simulation. L'objet de cette étude sera alors de savoir si cette modalité apporte significativement une amélioration au niveau de la présence et est susceptible de provoquer plus d'anxiété.

2 SIMULATEUR DE TRAVAIL EN HAUTEUR

2.1 Matériel

Notre simulateur est destiné à être transportable. De ce fait, le choix du dispositif de visualisation s'est porté sur un casque immersif.

Dans le cadre de cette étude, nous utilisons un casque HTC Vive relié à un PC utilisant Windows 10. Le casque HTC Vive offre un champ de vision de 110° et une fréquence de rafraîchissement de 90 Hz. Un casque audio est rajouté afin d'augmenter l'immersion du système en isolant un peu plus les sujets de l'extérieur et en utilisant du son spatialisé. Quatre boîtiers de tracking Vive sont utilisés pour le retour visuel des mains et pieds. Ceux-ci sont placés sur les mains et les tibias des sujets grâce à des supports conçus pour l'occasion. Le choix du système de tracking s'est porté sur le coût et la latence. En effet, une faible latence est fortement appréciable dans le cadre d'environnements anxio-gènes [16].

Une échelle réelle est utilisée, du même type que celles présentes lors de travaux en hauteur, celle-ci est attachée à un poteau pour que le sujet puisse grimper dessus pour de vrai lors de la simulation. Cette échelle permet de renforcer l'immersion et le sens de présence, ainsi que d'obtenir une correspondance parfaite entre le réel et le virtuel en termes de sensations corporelles (par exemple, sensation de gravité) et d'efforts physiques. Les sujets sont équipés d'un harnais afin d'évoluer en sécurité sur l'échelle et de pouvoir lâcher les mains de l'échelle une fois harnachés à celle-ci. Une calibration de l'échelle est réalisée afin de synchroniser les positions de l'échelle réelle et son modèle virtuel.

La figure 2 montre le matériel utilisé ainsi que l'environnement dans lequel il a été installé pour les besoins de l'étude. L'avantage de notre simulateur est qu'il peut être installé dans n'importe quel endroit, sans nécessiter beaucoup d'espace.

2.2 Environnement Virtuel

Deux scènes différentes sont utilisées pour cette étude. La première est une scène de familiarisation dans laquelle les sujets sont im-



Figure 2: Matériel utilisé et environnement de test.

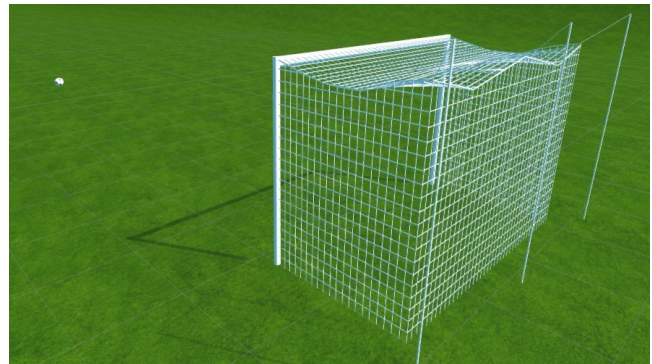


Figure 3: Scène de familiarisation.

mergés pendant 80 secondes. Ceux-ci sont placés dans des cages de football et sont invités à arrêter huit balles tirées à des positions aléatoires (Fig. 3). Le tracking des mains et des pieds des sujets rend possible cette interaction.

La seconde scène (Fig. 4) est la scène principale de l'étude. Le passage de la première scène à la seconde se fait par fondu au noir. L'environnement est celui d'une scène probable d'intervention en hauteur, en l'occurrence ici la maintenance de pylônes électriques. L'environnement est rendu dynamique et immersif grâce à certains éléments : voitures roulant sur une route, nuages, mouvements, vent... Aucun élément pouvant servir de référence n'est placé dans le champ proche des utilisateurs, lorsque ceux-ci se trouvent en hauteur, afin de provoquer la sensation de vertige [3,4]. Le mouvement des nuages dans le ciel renforce également cet effet. Dans cette scène, les sujets sont placés dans une nacelle élévatrice. La nacelle s'élève à 11 mètres de haut pour atteindre le haut d'un poteau électrique. L'élévation dure 52 secondes. Une fois arrivés à hauteur de l'échelle virtuelle, les sujets doivent franchir le vide séparant la nacelle du poteau pour venir grimper à l'échelle fixée sur le poteau. Ce franchissement vers l'échelle se fait aussi en réel, l'échelle réelle étant, comme indiqué plus haut, synchronisée en position avec celle virtuelle. Une fois sur l'échelle, les sujets sont harnachés par une tierce personne et la nacelle redescend à sa position initiale. Il est demandé alors aux sujets de venir décrocher un cerf-volant placé derrière eux à l'aide de leurs deux mains, ce qui les oblige à lâcher les deux mains de l'échelle et à faire confiance au matériel utilisé, renforçant davantage l'anxiété (Fig. 5).

Des modèles de chaussures et de mains virtuelles (Fig. 6) sont utilisés pour donner au sujet un retour sur les positions réelles de ses membres. Les modèles de mains ne sont pas animés cinématiquement et ne servent donc qu'à fournir un repère spatial des membres, en particulier au moment de monter sur l'échelle (Fig. 7).

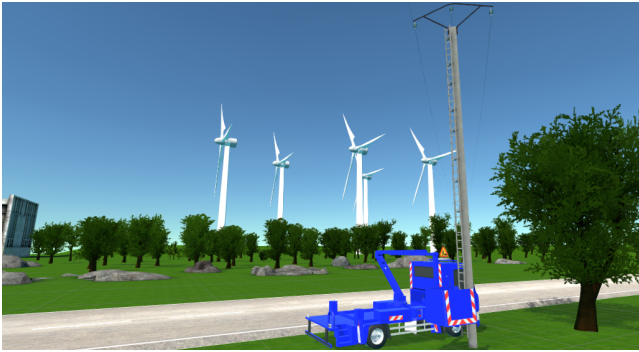


Figure 4: Vue de la scène principale.



Figure 5: Sujet lors de la simulation.

3 VALIDATION EXPÉRIMENTALE

3.1 Protocole

Un total de 26 participants (20 hommes et 6 femmes) ont pris part de manière volontaire et sans compensation financière à une étude expérimentale. Les participants étaient âgés de 22 à 55 ans (36,3 ans en moyenne). Tous étaient des employés de la même entreprise, dont quatre intervenaient régulièrement en hauteur sur des pylônes électriques. Parmi ces participants, 11 ont déjà eu une expérience de réalité virtuelle mais aucun d'eux n'était habitué à la technologie.

Chacun des participants s'est vu attribué une modalité différente : avec ou sans retour visuel sur les mains/pieds, constituant ainsi deux groupes indépendants de taille similaire (13 personnes dans chaque groupe). Le protocole expérimental a été le suivant :

1. Les participants ont d'abord dû remplir le questionnaire d'acrophobie de Cohen [9], ainsi qu'un questionnaire statistique permettant de connaître l'âge, le sexe, leur fréquence d'exposition à la hauteur (sur une échelle de 1 à 7) et s'ils avaient déjà eu une expérience de réalité virtuelle avant l'expérimentation. En fonction des réponses à cette dernière



Figure 6: A gauche : modèle de mains utilisé ; à droite : modèle de pieds utilisé, ici des chaussures.

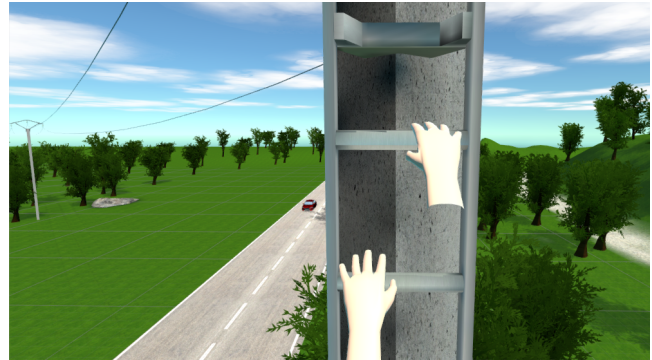


Figure 7: Vue depuis le point de vue de l'utilisateur.

question, les participants ont été répartis dans les groupes de manière à les équilibrer sur ce aspect-là, en l'occurrence deux participants régulièrement exposés à la hauteur dans chaque groupe. Le questionnaire d'acrophobie a révélé quant à lui que six participants étaient particulièrement sujets à l'acrophobie.

2. Les participants ont ensuite dû s'équiper du harnais, des boîtiers de tracking et d'un bracelet permettant de relever leur activité électrodermale. Le choix de mesurer l'activité électrodermale est motivé par le fait d'une part qu'elle représente une mesure objective du niveau d'anxiété ressentie par les utilisateurs [2], et d'autre part car il est possible d'en avoir une mesure continue. Le bracelet utilisé est un E4 Empatica permettant un contrôle en direct par Wifi de l'activité électrodermale, avec une fréquence d'échantillonnage de 4 Hz et une précision de l'ordre de $0,01 \mu S$ [15].
3. Les participants ont ensuite mis le casque HTC Vive et ont été immergés dans la scène de familiarisation puis la scène principale, comme indiqué précédemment.
4. A la fin de l'expérimentation, les participants ont été invités à remplir un questionnaire de mal de simulateur et un questionnaire de présence. Le questionnaire de mal de simulateur utilisé est le Simulator Sickness Questionnaire (SSQ) de Kennedy et al. [12], utilisé de manière récurrente en réalité virtuelle. Pour le questionnaire de présence, seule la sous-échelle "réalisme perçu" du questionnaire de présence de Witmer et Singer [22] a été évaluée, étant considérée dans la littérature comme le paramètre principal dans le cas de l'acrophobie [1]. Ce choix a également été motivé par le fait que les autres sous-échelles n'étaient pas les plus adaptées dans le cas du simulateur.

Pour chaque participant, l'expérimentation a duré en moyenne 10 minutes.

Table 1: Moyenne et écart-type pour chacune des mesures effectuées.

	Avec retour visuel	Sans retour visuel
Cybermalaise	$M = 1,47, \sigma = 2,09$	$M = 3,62, \sigma = 3,74$
Présence	$M = 5,39, \sigma = 0,51$	$M = 5,71, \sigma = 0,61$
Activité électrodermale (μS)	$M = 1,24, \sigma = 2,29$	$M = 7,43, \sigma = 11,32$

3.2 Résultats

Parmi les participants, une personne a souhaité arrêter l'expérience une fois la nacelle arrivée en position haute. Les mesures pour ce participant n'ont pas été incluses dans les résultats. Ceux-ci sont donc exprimés sur 25 participants.

3.2.1 Cybermalaise

Les scores de cybermalaise ont été calculés à partir des SSQ en utilisant la méthode fournie par Kennedy et al. [12]. Les scores moyens de cybermalaise sont donnés pour les deux modalités dans le tableau 1. Comme constaté, les scores sont en moyenne très bas dans les deux modalités. La plupart des participants n'a effectivement pas indiqué ressentir de mal-être après la simulation. Les observations faites durant l'expérimentation montrent que très peu de participants ont semblé malades.

Un test de Shapiro-Wilk montre que pour les deux modalités, les données ne suivent pas une distribution normale (avec retour visuel : $p = .005$ et sans retour visuel : $p = .008$). Un test de Mann-Whitney a alors permis de ne révéler aucune différence significative entre les deux modalités ($p = .1132$).

3.2.2 Présence

Les scores moyens de présence sont donnés pour les deux modalités dans le tableau 1, en sachant que d'une part seule la sous-échelle "réalisme perçu" a été considérée ici, et d'autre part les scores sont notés sur une échelle de 7 points. Nous observons qu'en moyenne, le réalisme perçu est élevé, quelle que soit la modalité.

Un test de Shapiro-Wilk montre que pour les deux modalités, les données suivent une distribution normale (avec retour visuel : $p = .639$ et sans retour visuel : $p = .295$). Un t-test de Student a alors permis de ne révéler aucune différence significative entre les scores de présence avec et sans retour visuel sur les mains et pieds ($p = .182$).

3.2.3 Activité Electrodermale

L'évolution de l'activité électrodermale d'un participant ayant un score issu du questionnaire d'acrophobie élevé est représentée en figure 8. Nous remarquons que l'activité électrodermale augmente sensiblement lors de l'immersion dans la scène principale, et principalement au moment de monter sur l'échelle et d'attraper le cerf-volant en lâchant ses deux mains de l'échelle, traduisant bien le sentiment d'anxiété à ces moments.

Les valeurs moyennes de l'activité électrodermale sont données pour les deux modalités dans le tableau 1.

Un test de Shapiro-Wilk montre que pour les deux modalités, les données ne suivent pas une distribution normale (avec et sans retour visuel : $p < .0001$). Un test de Mann-Whitney a alors permis de ne révéler aucune différence significative de l'activité électrodermale entre les deux modalités ($p = .1693$).

4 DISCUSSION

Sur le cybermalaise, aucune différence significative n'a été observée entre les modalités avec et sans retour visuel des mains et des pieds. Etant donné que le retour visuel était surtout destiné à fournir un repère spatial des membres des participants et à avoir une influence sur le sens de présence et l'anxiété, son influence sur le cybermalaise

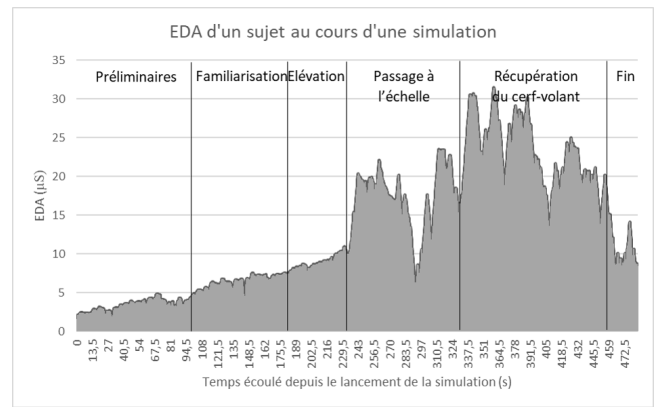


Figure 8: Evolution de l'activité électrodermale (EDA) pour un participant au cours de la simulation. Ce participant n'avait pas de retour visuel.

est normalement très faible. Par ailleurs, de très faibles scores de cybermalaise ont été relevés. D'une part, la latence du système de visualisation et de tracking est très faible (de l'ordre de 10 ms), ce qui limite fortement l'apparition d'un cybermalaise dû à la technologie. D'autre part, de la manière dont a été conçu notre simulateur, le cybermalaise ne devrait apparaître que lors de l'élévation de la nacelle, étant donné que les participants ne bougent pas durant cette période. Cependant, l'élévation étant de faibles durée et vitesse (52 secondes pour monter à 11 mètres), nous pouvons supposer que nous sommes sous le seuil critique de développement de cybermalaise. Après cette période d'élévation, les participants sont invités à bouger physiquement (franchissement du vide virtuel, positionnement sur l'échelle réelle). De fait, l'apparition d'un cybermalaise dû à un conflit visuo-vestibulaire, habituellement observé pendant la navigation en environnement virtuel, devrait être quasi-inexistante.

Concernant la présence, aucune différence significative n'a pu être observée, ce qui est assez inattendu car le sentiment de présence aurait dû être renforcé par l'affichage de pieds et mains virtuels [17]. Cependant, la non-adaptabilité des modèles virtuels aux sujets (par exemple en termes de taille, couleur) a peut-être causé un manque de réalisme ressenti par les participants. De plus, la méthode de tracking utilisée ne permet pas de faire du tracking des doigts, donc d'animer cinématiquement les mains, ce qui a pu entraîner une perte de réalisme peut-être plus grande chez des personnes non initiées à la réalité virtuelle, ce qui fut le cas de la majorité des participants. Cependant, notre simulateur a montré qu'il permettait en moyenne d'être immergé dans la simulation avec un sentiment de présence et en particulier de réalisme perçu élevé.

Sur l'activité électrodermale, les tests statistiques n'ont pas non plus montré de différence significative par rapport à la présence ou non d'un retour visuel des mains et pieds. Nous nous attendions à obtenir le contraire car, suivant la relation entre présence et anxiété proposée par Alsina-Jurnet et al. [1], nous avions hypothésé une augmentation du sentiment de présence chez les participants ayant eu un retour visuel sur leurs mains et pieds. Cependant, la majorité des participants n'ont jamais eu d'expérience de réalité virtuelle auparavant, ce qui peut expliquer ces résultats. En effet, comme notre simulateur utilise un casque immersif, nous pensons que les participants non initiés ont pu éprouver de l'anxiété simplement parce qu'ils ne voyaient pas leur propre corps et que donc, en particulier pour la modalité sans retour visuel, ils devaient se référer uniquement aux informations d'ordre proprioceptif pour pouvoir se repérer dans l'espace. Par ailleurs, en examinant les données :

1. Des niveaux élevés d'activité électrodermale ont pu être observés chez des participants ayant été détectés comme suscep-

tibles à l'acrophobie à la suite du questionnaire d'acrophobie (comme sur la figure 8), ce qui montre la potentialité de notre simulateur à générer effectivement un sentiment d'anxiété. Cependant, aucune corrélation n'a pu être trouvée entre le score d'acrophobie et le niveau d'activité électrodermale.

- Le jour de l'expérimentation, la température extérieure était élevée et la salle d'expérimentation n'était pas climatisée. Cela a entraîné pour certains participants une sudation naturelle, donc une activité électrodermale, plus élevée. Les résultats ont ainsi pu être biaisés pour ces participants. Cependant ces biais ont pu être limités par le fait que la plupart des participants détectés comme acrophobiques sont passés à un moment de la journée où la température n'était pas encore élevée.

Malgré ces observations, cette évaluation a démontré plusieurs points intéressants. Des changements de comportements ont été observés chez plusieurs personnes : trois participants ont eu un comportement très anxieux lorsqu'ils se sont trouvés sur l'échelle, traduit par des hésitations à réaliser la tâche demandée, des tremblements du corps à la fin de l'expérimentation et une augmentation très nette de leur activité électrodermale durant toute l'expérience. Par ailleurs, un participant a souhaité arrêter la simulation lorsque la nacelle s'est trouvée en position haute. Cela montre que le sentiment de présence a été suffisamment élevé pour générer de l'anxiété. Le simulateur a donc rempli son rôle : reproduire fidèlement un environnement de travail en hauteur et générer de l'anxiété chez les sujets. Le simulateur s'est donc montré performant pendant cette expérience.

5 CONCLUSION

Dans cet article, nous avons proposé un simulateur de travail en hauteur en réalité mixte que nous avons évalué en termes de performances sur 26 personnes, en mesurant le niveau de cybermalaise, le sens de présence et l'activité électrodermale. L'influence de la présence ou non d'un retour visuel sur les mains et pieds de l'utilisateur sur ces trois mesures a également été évaluée. Si l'influence d'un retour visuel des mains et pieds n'est pas significative pour les trois mesures, le simulateur s'est néanmoins révélé efficace, en permettant de reproduire fidèlement une situation de travail en hauteur.

Notre simulateur ouvrant des perspectives intéressantes, d'autres études sont planifiées pour intégrer d'autres modalités sensorielles (par exemple vibratoires) et évaluer leur influence sur le sens de présence et l'anxiété ressentie. D'autres mesures sont également envisagées pour mieux considérer le lien entre présence, anxiété et acrophobie, et davantage quantifier cette anxiété. En effet, si d'après la littérature, l'activité électrodermale est une mesure objective du niveau d'anxiété ressentie, cette mesure ne fonctionne pas chez les personnes non-réactives à l'électro-conductivité de la peau. Enfin, des mesures comparatives avec une situation réelle seront à réaliser.

REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent remercier Enedis Bourgogne pour avoir financé ce projet et ses employés pour leur participation volontaire à l'expérimentation.

REFERENCES

- I. Alsina-Jurnet, J. Gutiérrez-Maldonado, and M. V. Rangel-Gómez. The role of presence in the level of anxiety experienced in clinical virtual environments. *Computers in Human Behavior*, 27(1):504–512, 2011. doi: 10.1016/j.chb.2010.09.018
- M. Birket-Smith, N. Hasle, and H. H. Jensen. Electrodermal activity in anxiety disorders. *Acta Psychiatrica Scandinavica*, 88(5):350–355, 1993. doi: 10.1111/j.1600-0447.1993.tb03471.x
- W. Bles, T. S. Kapteyn, T. Brandt, and F. Arnold. The mechanism of physiological height vertigo. II. posturography. *Acta Oto-Laryngologica*, 89(5-6):534–540, 1980. doi: 10.3109/00016488009127171

- T. Brandt, F. Arnold, W. Bles, and T. S. Kapteyn. The mechanism of physiological height vertigo. I. theoretical approach and psychophysics. *Acta Oto-Laryngologica*, 89(5-6):513–523, 1980. doi: 10.3109/00016488009127169
- T. W. Cleworth, B. C. Horslen, and M. G. Carpenter. Influence of real and virtual heights on standing balance. *Gait & Posture*, 36(2):172–176, 2012. doi: 10.1016/j.gaitpost.2012.02.010
- C. M. Coelho, J. A. Santos, C. Silva, G. Wallis, J. Tichon, and T. J. Hine. The role of self-motion in acrophobia treatment. *CyberPsychology & Behavior*, 11(6):723–725, 2008. doi: 10.1089/cpb.2008.0023
- C. M. Coelho and G. Wallis. Deconstructing acrophobia: Physiological and psychological precursors to developing a fear of heights. *Depression and Anxiety*, 27(9):864–870, 2010. doi: 10.1002/da.20698
- C. M. Coelho, A. M. Waters, T. J. Hine, and G. Wallis. The use of virtual reality in acrophobia research and treatment. *Journal of Anxiety Disorders*, 23(5):563–574, 2009. doi: 10.1016/j.janxdis.2009.01.014
- D. C. Cohen. Comparison of self-report and overt-behavioral procedures for assessing acrophobia. *Behavior Therapy*, 8(1):17–23, 1977. doi: 10.1016/S0005-7894(77)80116-0
- P. M. Emmelkamp, M. Bruynzeel, L. Drost, and C. A. van der Mast. Virtual reality treatment in acrophobia: a comparison with exposure in vivo. *CyberPsychology & Behavior*, 4(3):335–339, 2001. doi: 10.1089/109493101300210222
- M. C. Juan and D. Pérez. Comparison of the levels of presence and anxiety in an acrophobic environment viewed via HMD or CAVE. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 18(3):232–248, 2009. doi: 10.1162/pres.18.3.232
- R. S. Kennedy, N. E. Lane, S. Kevin, and M. G. Lilienthal. Simulator Sickness Questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness. *The International Journal of Aviation Psychology*, 3(3):203–220, 1993. doi: 10.1207/s15327108ijap0303_3
- M. Krijn, P. M. G. Emmelkamp, R. Biemond, C. de Wilde de Ligny, M. J. Schuemie, and C. A. P. G. van der Mast. Treatment of acrophobia in virtual reality: The role of immersion and presence. *Behaviour Research and Therapy*, 42(2):229–239, 2004. doi: 10.1089/109493101300210222
- C. Lai, R. P. McMahan, and J. Hall. March-and-reach: A realistic ladder climbing technique. In *2015 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, pp. 15–18, 2015. doi: 10.1109/3DUI.2015.7131719
- C. McCarthy, N. Pradhan, C. Redpath, and A. Adler. Validation of the empatica E4 wristband. In *2016 IEEE EMBS International Student Conference (ISC)*, pp. 1–4, 2016. doi: 10.1109/EMBSISC.2016.7508621
- M. Meehan, S. Razaque, M. C. Whittton, and F. P. Brooks. Effect of latency on presence in stressful virtual environments. In *IEEE Virtual Reality*, pp. 141–148, 2003. doi: 10.1109/VR.2003.1191132
- P. Schäfer, M. Koller, J. Diemer, and G. Meixner. Development and evaluation of a virtual reality-system with integrated tracking of extremities under the aspect of acrophobia. In *2015 SAI Intelligent Systems Conference (IntelliSys)*, pp. 408–417, 2015. doi: 10.1109/IntelliSys.2015.7361173
- P. I. Simeonov, H. Hsiao, B. W. Dotson, and D. E. Ammons. Height effects in real and virtual environments. *Human Factors*, 47(2):430–438, 2005. doi: 10.1518/0018720054679506
- M. Slater, M. Usoh, and A. Steed. Steps and ladders in virtual reality. In *Proceedings of the Conference on Virtual Reality Software and Technology (VRST '94)*, pp. 45–54, 1994.
- M. Slater and S. Wilbur. A Framework for Immersive Virtual Environments (FIVE): Speculations on the role of presence in virtual environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 6(6):603–616, 1997. doi: 10.1162/pres.1997.6.6.603
- K. Vasylevska and H. Kaufmann. Influence of vertical navigation metaphors on presence. In *In Challenging Presence - Proceedings of 15th International Conference on Presence (ISPR 2014)*, pp. 205–212, 2014.
- B. G. Witmer and M. J. Singer. Measuring presence in virtual environments: A presence questionnaire. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 7(3):225–240, 1998. doi: 10.1162/105474698565686