



Open Archive Toulouse Archive Ouverte (OATAO)

OATAO is an open access repository that collects the work of some Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author's version published in: <https://oatao.univ-toulouse.fr/20976>

To cite this version :

Labedan, Patrice and Dehais, Frédéric and Peysakhovich, Vsevolod Évaluation de l'expérience de pilotage d'un avion léger en réalité virtuelle. (2018) In: ERGO'IA 2018, 3 October 2018 - 5 October 2018 (Biarritz, France).

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator:

tech-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr

Evaluation de l'expérience de pilotage d'un avion léger en réalité virtuelle

Patrice Labedan

patrice.labedan@isae-superaero.fr

ISAE-SUPAERO,
Université de Toulouse, France
10, avenue Édouard-Belin
31055 Toulouse

Frédéric Dehais

frederic.dehais@isae-superaero.fr

ISAE-SUPAERO,
Université de Toulouse, France
10, avenue Édouard-Belin
31055 Toulouse

Vsevolod Peysakhovich

vsevolod.peysakhovich@isae-superaero.fr

ISAE-SUPAERO,
Université de Toulouse, France
10, avenue Édouard-Belin
31055 Toulouse

ABSTRACT

In aviation, virtual reality (VR) cockpits are emerging, and can be applied for the pilot's training reducing its cost. However, there is a need to assess this technology because in some cases VR leads to mental overload which can be harmful to learning. In the present study, we evaluate the degree of presence, immersion, fatigue, and quality of interaction of a VR flight simulator. Five flight instructors performed traffic patterns in a Robin DR-400 at Lasbordes airfield (LFCL, Toulouse) in a virtual environment. The experience was evaluated using questionnaires. The results showed that the VR environment is positively evaluated by the pilots with regard to the immersion and the conduct of the flight. Pilots did not report fatigue or motion sickness. However, some of the limitations occurred during certain critical phases of flight (final landing) and the helmet resolution did not allow the reading of certain flight parameters.

RESUME

En aéronautique, les cockpits en réalité virtuelle (RV) commencent à émerger, et il est désormais possible d'imaginer une application pour la formation professionnelle des pilotes. Il est néanmoins nécessaire d'évaluer cette technologie puisqu'elle peut entraîner une surcharge mentale pouvant être délétère sur l'apprentissage. Dans la présente étude, nous évaluons le degré d'immersion, de fatigue et de qualité d'interaction d'un simulateur en RV. Cinq pilotes instructeurs ont réalisé un scénario de vol à bord d'un Robin DR-400 à l'aérodrome de Lasbordes (LFCL, Toulouse) en environnement virtuel. L'évaluation de ce simulateur est réalisée à partir du recueil de données subjectives et de questionnaires. Les premiers résultats montrent que l'environnement RV est évalué très positivement (immersion, conduite du vol; pas de fatigue ni mal des transports rapportés). Toutefois, des limites apparaissent dans certaines phases critiques de vol, et la résolution du casque ne facilite pas la lecture de certains paramètres de vol.

Mots Clés

Réalité virtuelle ; immersion ; formation ; pilotage ; simulateur de vol.

1 INTRODUCTION

La réalité virtuelle (RV) immersive est actuellement en plein essor, et connaît des utilisations très variées. Son potentiel dans le cadre de la formation professionnelle semble illimité [4, 12, 14]. Dans de nombreux domaines, cette technologie est déjà utilisée à cet effet, ou bien des études fleurissent pour évaluer son potentiel : industrie minière [19, 5], pompiers [1, 21].

Il est un domaine où la RV a aussi un grand potentiel en formation, qui fait l'objet de nombreuses études actuellement : le domaine médical [11], et particulièrement la chirurgie [8, 18]. Ces nouveaux environnements de simulation en RV immersive permettent aux résidents d'apprendre des compétences manuelles sans compromettre la sécurité des patients (laparoscopie [6, 7, 9, 13], ostéotomie maxillaire [16], ou résection des gliomes intracrâniens [2]). Les résultats obtenus montrent un très fort sentiment de présence, une efficacité de l'entraînement en RV, ou une

amélioration significative de la confiance en soi (elle-même précurseur de la performance). Ceci doit inciter à poursuivre les études avant de pouvoir généraliser ce système à la formation.

Ces travaux ouvrent des perspectives intéressantes pour l'aéronautique. En effet, face à la croissance constante du trafic aérien, il ne s'agit pas simplement d'adapter les infrastructures aéroportuaires et d'augmenter la flotte mondiale (qui va doubler d'ici 2035), mais également de former de nouvelles générations de pilotes. De très forts besoins en recrutement par les compagnies aériennes devront se traduire par une forte augmentation de la capacité d'accueil dans les écoles de pilotage. Sans prendre en compte l'aspect théorique, la formation des pilotes qualifiés se déroule principalement dans des simulateurs de vol de haute qualité, et bien sûr dans des avions. Cette part de la formation pratique représente un budget important car des moyens onéreux sont nécessaires pour satisfaire ce besoin. Ces formations peuvent devenir chronophages dans le sens où elles nécessitent une organisation particulière autour de ces moyens rares, onéreux, et qui doivent être partagés.

Une solution qui permettrait de réduire significativement les coûts et les temps de formation au pilotage, consisterait à utiliser la RV immersive. C'est un moyen peu onéreux, qui pourrait être déployé très facilement lorsqu'il sera jugé efficace pour l'entraînement des pilotes. L'aspect sécurité doit aussi être pris en compte car les pilotes seraient dans ce cas-là formés sans aucun danger, contrairement à la formation en avion réel.

Néanmoins, plusieurs questions se posent. Est-ce que l'entraînement en RV est efficace ? Provoque-t-il une fatigue particulière du pilote ? Est-ce que les interactions demeurent naturelles ? Est-ce que le modèle de vol est assez fidèle ? Est-ce que l'immersion en RV améliore la confiance en soi et ainsi les performances, comme c'était le cas pour l'ostéotomie maxillaire [16] ? Ou au contraire génère-t-elle des effets de distraction, ou d'excès de confiance, et de surestimation des capacités (effet Dunning-krugger) comme le montrent certaines études [7, 16]. Des études montrent aussi dans certains cas que la RV entraîne une surcharge mentale qui peut être délétère sur l'apprentissage [10].

Peu d'études permettent actuellement de répondre à ces questions et il est nécessaire d'évaluer cette technologie en comparaison des moyens traditionnels d'apprentissage du pilotage.

Dans cette étude, nous allons évaluer la qualité (immersion, présence, interaction) de simulation de vol en RV immersive. Dans ce but, plusieurs sujets instructeur de vol ont réalisé un vol simulé en RV et ont évalué leur expérience via un questionnaire subjectif. L'objectif est de vérifier qu'un tel simulateur représente fidèlement l'avion réel et donc peut être utilisé pour la formation, sous certaines conditions. Nous évaluerons aussi d'autres conséquences que peut provoquer cette expérience en RV : la fatigue (cognitive et physique) et le mal des transports.

2 MATERIEL ET METHODE

2.1 VRtigo : La Plateforme de Simulation

Dans le cadre de nos expériences, nous avons utilisé la plate-forme VRtigo (cf. Figure 1) du DCAS (Département Conception et Conduite des véhicules Aéronautiques et Spatiaux), qui est composée de :

- Un logiciel de simulation de vol réaliste, et « RV compatible » ;
- Un kit de réalité virtuelle ;
- Un poste de commande de type cockpit, permettant d'interagir avec l'avion.



Figure 1: Plateforme VRtigo.

Logiciel

Nous avons utilisé le logiciel de simulation de vol Aero-fly2 FS2, qui est actuellement un des plus réalistes développés pour la RV. Il a l'avantage de proposer des SDK (Software Development Kit) permettant à l'utilisateur de créer ses propres scènes, avions, ou aéroports. Nous avons utilisé ces SDK pour créer les environnements spécifiques nécessaires à nos expériences. Le logiciel a été lancé sur PC portable Alienware 17 R4, Inter Core i7-7700HQ, avec carte graphique NVIDIA GeForce GTX 1070 (8 Go).

Kit de Réalité Virtuelle

L'ensemble réalité virtuelle qui équipe VRtigo est un HTC Vive composé d'un casque et de 2 stations laser pour le suivi du mouvement en temps réel. La résolution du casque est de 2160×1200 , le taux de rafraîchissement de 90 Hz, et le champ de vision de 110° .

Organes de Commande

Les pilotes sont installés dans un poste de pilotage, qui comprend un siège et les organes de commandes essentiels du DR400 auxquels ils sont habitués : manche, palonnier, manette des gaz et levier des volets.

2.2 Participants

Cinq pilotes instructeurs expérimentés (âge 50.2 ± 3.84 , nombre d'heures de vol 8094 ± 4212.8) ont participé à l'étude après avoir donné leur consentement écrit.

2.3 Protocole Expérimental

L'expérience consistait à reproduire une procédure de vol spécifique dans un monde virtuel.

Contrôle de Vol

Le contrôle du vol s'effectue par l'intermédiaire des organes de commande depuis le poste de commande de VRtigo.

Le Monde Virtuel

Pour nos expériences, il était indispensable que les pilotes puissent effectuer des vols dans un environnement déjà connu afin qu'ils puissent comparer l'expérience avec leur activité quotidienne. Pour ce faire, nous devons reproduire le mieux possible les 3 éléments suivants : l'avion, l'aérodrome, et les repères visuels. Nous avons pour cela utilisé le SDK d'Aerofly FS2.

Concernant l'avion, nous avons modélisé le Robin DR400 immatriculé F-GTPZ de la flotte de l'ISAE-SUPERO. Cet avion est déjà utilisé par nos pilotes dans le cadre de la formation au PPL (Private Pilot Licence) à l'ISAE-SUPAERO. Le modèle DR400 de base du simulateur Aerofly FS2 existait, mais comportait des différences dans le cockpit avec le DR400 F-GTPZ.

Le cockpit virtuel a été modifié afin de présenter aux pilotes l'essentiel des informations de la même manière que sur le DR400 F-GTPZ (cf Figure 2).

L'aérodrome de Lasbordes fut lui aussi en grande partie modélisé avec une cartographie HD (Haute Définition) et les bâtiments principaux (tour de contrôle, hangar). Ces repères proches sont importants lors de la phase d'atterrissage par exemple, car de façon indirecte, ils aident les pilotes à avoir une meilleure sensation de hauteur.

D'autres repères importants ont dû être ajoutés. Les pilotes se servent effectivement de certains repères pour la navigation autour de l'aérodrome. Ces repères sont spécifiques à chaque aérodrome. Après discussion avec les pilotes, nous avons identifié la liste des principaux éléments, comme des bâtiments commerciaux aux couleurs vives, des bâtiments remarquables ou même la Cité de l'Espace de Toulouse (cf. Figure 3).

Le Scénario de Vol

Un scénario de vol, défini avec les pilotes instructeurs, consistait en une succession de tours de pistes. Un tour de piste, qui dure environ 8mn, est composé des phases suivantes : décollage, montée initiale, virage en montée, mise en palier, virage en palier, préparation machine (action volets), virage en descente, descente stabilisée, interception d'un axe et d'un plan pour le dernier virage, préparation de l'avion à l'atterrissage (action volets), atterrissage. Nous demandons aux pilotes d'effectuer 3 tours de pistes consécutifs, avec 2 poser-et-décoller, et l'atterrissage complet au dernier tour sur la piste R33 de l'aérodrome de Lasbordes. Ce scénario présente l'avantage d'être standardisé et de nous permettre ultérieurement de pouvoir comparer la performance en conditions VR et réelles de vol.



Figure 2: Cockpit DR400 F-GTPZ de Lasbordes (haut), cockpit DR400 Aerofly2 modifié (bas).



Figure 3: Aérodrome de Toulouse-Lasbordes et ses repères

Questionnaires

Un questionnaire global sur l'expérience de conduite d'un aéronef dans un environnement virtuel a été établi. Celui-ci peut être décomposé en 4 questionnaires en fonction des thèmes suivants :

- Questionnaire sur la fatigue et l'anxiété, à répéter 2 fois (avant et après le vol), composé de 3 questions ;
- Questionnaire sur l'usage de technologie (ex tablettes), composé de 12 questions ;
- Questionnaire principal pour recueillir les impressions subjectives, largement inspiré du « Presence Questionnaire » de Witmer et Singer [20]. Celui-ci est composé de 32 questions, dont 17 générales et 15 spécifiques à la conduite d'un aéronef.

3 RESULTATS

La Figure 4 résume l'ensemble des réponses au questionnaire principal. La réponse à chaque question suivait l'échelle en 7 points.

4 DISCUSSION

Le but de cette étude était de recueillir l'avis de pilotes instructeurs expérimentés sur une expérience de vol en réalité virtuelle. L'objectif général était d'évaluer la technologie de RV pour valider scientifiquement l'approche de formation au pilotage par ce moyen. Est-ce que toutes les manœuvres peuvent être simulées en RV ? Quel est l'effet de l'immersion ? Est-ce que la RV fatigue physiquement ou cognitivement ?

Nous allons d'abord analyser les résultats du questionnaire principal en deux parties : les questions générales, puis les questions spécifiques au vol. Nous ferons ensuite un point sur le degré de fatigue et du mal des transports qu'ont pu ressentir les pilotes. Enfin, nous consacrerons une partie sur les améliorations à apporter à la plateforme VRtigo pour continuer les études sur la formation au pilotage en RV.

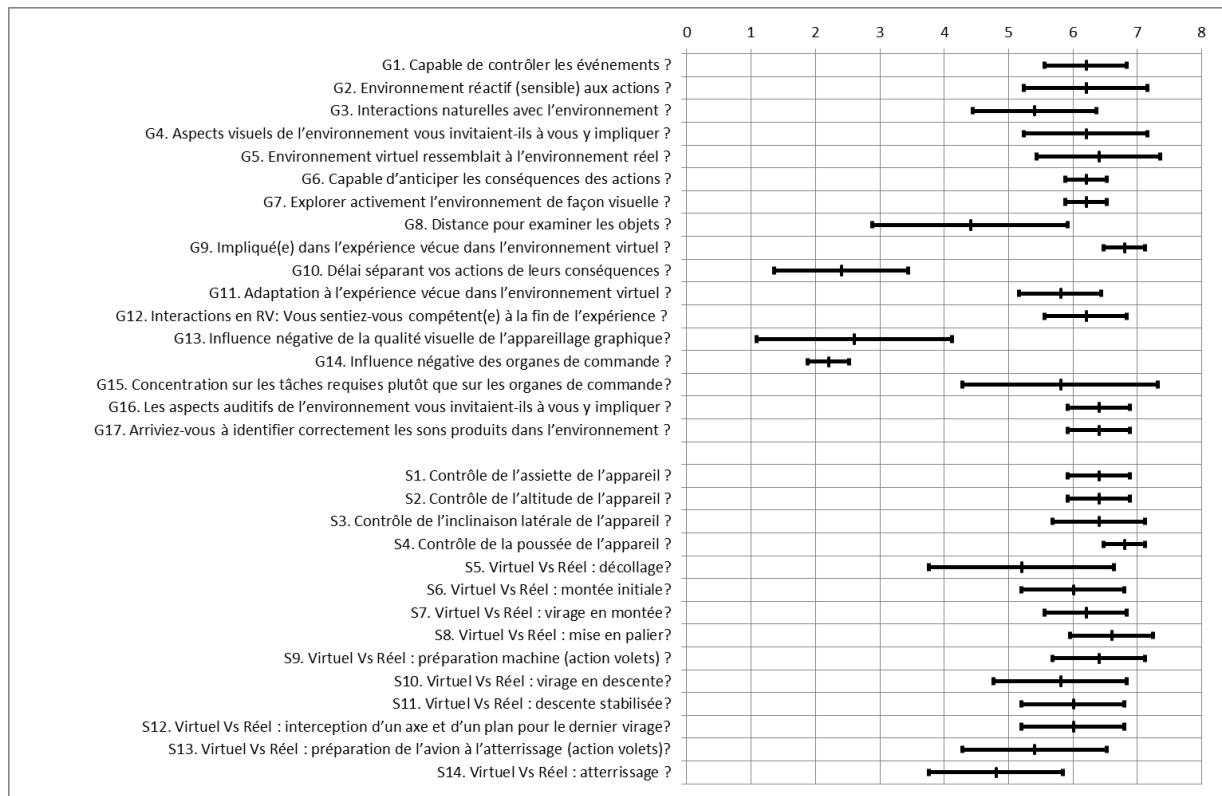


Figure 4 : Résultats du questionnaire.

4.1 Questions Générales

Concernant le questionnaire principal, l'analyse des réponses aux questions générales (G1—G17) a révélé plusieurs aspects positifs jouant sur l'immersion. Quelques points négatifs apparaissent aussi lors de ces résultats (définition trop faible des graphiques, quelques problèmes d'interaction).

Immersion

Tout d'abord, le sentiment d'immersion ressort de façon très positive lors des réponses. Plusieurs facteurs ont contribué à ce résultat : la qualité de l'environnement graphique global, la similitude avec un environnement réel connu, et le réalisme de l'environnement audio de la simulation. Les interactions avec l'aéronef ont aussi permis aux pilotes d'avoir très rapidement ce sentiment de maîtrise par l'intermédiaire des organes de commande proposés.

Les pilotes, en effectuant ce vol en environnement virtuel reproduit à l'identique, se sont sentis immédiatement à l'aise en se jugeant capable de contrôler les événements (G1). Ils ont eu l'impression d'être fortement impliqués grâce aux aspects visuels de l'environnement (G4). La ressemblance entre les deux mondes réel et virtuel (G5), ainsi que l'aisance à explorer l'environnement (G7), ont accentué le sentiment d'immersion. Les réponses à la question G9 confirment une très forte implication des pilotes dans l'expérience vécue dans l'environnement virtuel.

Au niveau des interactions avec le simulateur (G12), le fort sentiment de compétence ressenti en fin d'expérience montre aussi qu'ils ont été rapidement à l'aise. De plus, tous les pilotes ont trouvé très représentatif l'environnement audio et se sont sentis très à l'aise à ce niveau (G16 et G17).

Tous ces facteurs (qualité de l'interface, réalisme, et interactions) ont permis aux pilotes d'éprouver un sentiment d'immersion très important, ce qui a favorisé une grande confiance en soi. Les manœuvres ont été parfaitement réalisées par les pilotes. On peut constater que cette forte

immersion n'a pas généré de distraction particulière, et donc n'a pas eu d'impact négatif sur la concentration comme l'avaient montré certaines études [16].

Faiblesses

Quelques points négatifs ont pu être observés, notamment à cause de la qualité graphique de certains instruments du cockpit (G8 et G13). Nous avons pu constater que la résolution graphique demeurait trop faible pour certaines phases de vol. Il était en effet difficile de lire correctement la vitesse sur l'anémomètre. Ceci a rendu le vol virtuel plus compliqué que le vol réel.

Un autre point perturbateur est le fait de ne pas voir ses mains dans la réalité virtuelle lors de certaines actions. S'il est relativement facile d'actionner le manche positionné entre les jambes (et souvent déjà en main), ou facile d'actionner le palonnier (déjà en contact avec les pieds), il est en revanche plus difficile de manipuler la manette des gaz ou le levier des volets sans savoir où sont exactement les mains (G14 et G15).

4.2 Questions Spécifiques Au Vol

Dans la deuxième partie du questionnaire, consacrée à des caractéristiques spécifiques du vol (S1.. S14), on remarque tout d'abord que les pilotes ont éprouvé une très grande facilité à contrôler l'avion. Ceci leur a permis de maîtriser 7 des 10 phases de vol de la manœuvre de tour de piste. Les 3 phases restantes qui sont restées délicates sont celles qui sont proches du sol.

Contrôlabilité

Les pilotes ont trouvé que l'attitude, la position et la vitesse restaient très faciles à gérer dans l'environnement virtuel : l'assiette longitudinale (S1), l'inclinaison latérale (S3), l'altitude (S2) et la poussée (S4). Sur les 10 phases de vol composant la manœuvre de tour de piste, la plupart ont été facilement réalisées par les pilotes, tout comme dans la vie réelle : montée initiale (S6), virage en montée (S7), mise en palier (S8), action volets (S9), virage en descente (S10), descente stabilisée (S11), et interception d'un axe (S12).

Ce constat sur la contrôlabilité de l'aéronef est important ici dans notre cas du pilotage d'un avion léger en RV. En effet, grâce à ce fort sentiment d'immersion déjà discuté plus haut, qui génère des niveaux de présence plus élevés ([20]), les pilotes se sont sentis impliqués et performants (G9 et G12). Leur performance est confirmée puisqu'ils ont tous réussi leur scénario de vol. Ceci est très encourageant pour la formation au pilotage en RV et il faut poursuivre les études.

Phases Délicates en Lien Avec la Proximité du Sol

Néanmoins, 3 phases de vol ont été moins faciles à réaliser : le décollage (S5), la préparation de l'avion à l'atterrissage (S13), et l'atterrissage (S14).

Les difficultés sur les 2 phases les plus proches du sol, le décollage et l'atterrissage, sont dues à un problème d'appréciation des distances. Ici, nous n'avons modélisé que quelques bâtiments, placés sur une cartographie HD. Les lotissements ou les arbres par exemples ne sont pas modélisés. Même s'ils sont présents sur la cartographie HD, ils ne sont pas représentés en 3D. Cela n'est pas gênant quand l'avion vole à une altitude élevée, mais c'est au contraire perturbant lorsqu'on est près du sol. Cela empêche effectivement d'apprécier correctement les distances. Si l'on souhaite travailler sur ces 2 phases de vol, il serait nécessaire de modéliser plus finement en 3D un périmètre plus important autour de l'aérodrome.

La 3ème phase de vol délicate reste la préparation de l'avion à l'atterrissage. Il s'agit de provoquer la sortie des volets en bord de fuite par une action sur le levier de commande correspondant. Ne pas voir sa main droite alors que l'action à réaliser consiste à saisir un levier sur la droite du siège est perturbant. Aussi, d'un point de vue matériel, le levier n'étant pas parfaitement identique à celui de l'avion (taille et débattement), cela a pu perturber pendant cette phase de préparation à l'atterrissage.

Ceci contraste avec la précédente phase d'action sur les volets, entre le palier et le virage en descente. En effet, les pilotes n'avaient pas éprouvé de difficulté particulière à ce moment-là. Ceci peut s'expliquer simplement par le fait qu'ils sortaient d'une phase de palier, étape qui n'est pas aussi stressante qu'une préparation à l'atterrissage.

4.3 Fatigue et Mal des Transports

Il n'apparaît aucune différence significative concernant la fatigue (physique ou cognitive), entre l'état des pilotes avant et après l'expérience.

Même constat sur le mal des transports avec une question qui permettait de le quantifier sur une échelle allant de 1 (pas du tout malade) à 7 (complètement malade) : 2 ± 0.8 . Lors de débriefing après expérience, certains pilotes nous ont tout de même confirmé avoir été rapidement mal à l'aise juste lors de la prise en main. Pendant cette toute première phase de test, ils avaient exploré les pleins débattements sur le manche, ce qui n'était pas nécessaire pour le scénario de l'expérience.

4.4 Améliorations

Suite à ces analyses, nous dégagons plusieurs pistes pour améliorer la plateforme et ainsi pouvoir continuer des études plus poussées sur l'utilisation de la RV en formation au pilotage.

Pour améliorer la résolution graphique et ainsi mieux voir les détails du cockpit, nous pouvons augmenter la résolution physique de casques réalité virtuelle. Nos casques actuels HTC Vive ont une résolution de 2160×1200, mais il existe maintenant des casques HTC Vive Pro de 2880×1440.

Nous souhaitons également améliorer l'interaction dans l'environnement virtuel en utilisant des gants virtuels. Enfin la plateforme VRtigo sera couplée avec un mouvement 6 axes, ce qui permettra de dissiper le mal des transports et aider le pilote à mieux ressentir certaines phases (ex arrondi, roulage).

5 CONCLUSION

L'objectif de notre étude était de réaliser une première évaluation par des pilotes experts d'un simulateur VR de Robin DR-400. Le faible échantillon de pilotes (5) limite la portée de l'étude, cependant les premiers résultats tendent à confirmer l'intérêt et le potentiel d'immersion de ce moyen pour le pilotage. L'analyse du questionnaire permet de dégager des caractéristiques importantes et des recommandations suivantes qui peuvent se généraliser à tout type d'avion léger et d'aérodrome :

- Organes de commandes de base suffisamment réalistes (manche, palonnier, moteurs, volets).
- Modèle de vol représentatif (cockpit et comportement de l'avion),
- Analogie entre aérodrome virtuel et réel,
- Environnement 3D détaillé autour de l'aérodrome (avec les repères visuels), très important pour les phases d'atterrissage et de décollage,
- Système audio représentatif,
- Casque VR Haute Résolution (meilleure lecture des informations sur les cadrans du cockpit),
- Utilisation de gants virtuels,
- Restitution du mouvement pour limiter le mal de transport

La présente étude s'insère dans un projet de recherche à plus long terme qui consiste à vérifier scientifiquement si la technologie de RV peut être utilisée dans le cadre de la formation au pilotage. Les améliorations citées plus haut seront effectuées et l'objectif final consistera à comparer des données issues de vols réels avec des données issues de vols en réalité virtuelle (paramètres de

l'avion, mouvements oculaires et mesure cardiaque), sur des scénarios de vols qui restent à définir. Les études pourront ensuite être généralisées sur un nombre plus important de pilotes car les élèves en formation PPL pourront participer à ces études. L'ambition sera de développer des outils de formation du circuit visuel comme proposé par Peysakhovich [15]. En effet, des études en eye tracking [3, 17] montrent que ce point est particulièrement crucial pour l'amélioration de la sécurité des vols.

REMERCIEMENTS

Nous remercions l'ensemble du personnel de l'aérodrome de Lasbordes (Stéphane Juaneda, Bruno Duffaut, Philippe Minier, Frédéric Pierron, Etienne Perrin, Fabrice Bazelot, Franck Yvars), mais aussi Guillaume Garrouste pour le développement de l'environnement virtuel de Lasbordes, et Jérôme Dartigues pour la plateforme VRtigo.

BIBLIOGRAPHIE

1. Cha, M., Han, S., Lee, J., and Choi, B. A virtual reality based fire training simulator integrated with fire dynamics data. *Fire Safety Journal* 50 (2012), 12–24.
2. Dakson, A., Hong, M., and Clarke, D. B. Virtual reality surgical simulation: Implications for resection of intracranial gliomas. *Progress in neurological surgery* 30 (2018), 106–116.
3. Dehais, F., Behrend, J., Peysakhovich, V., Causse, M., and Wickens, C. D. Pilot flying and pilot monitoring's aircraft state awareness during go-around execution in aviation: A behavioral and eye tracking study. *The International Journal of Aerospace Psychology* 27, 1-2 (2017), 15–28.
4. Freina, L., and Ott, M. A literature review on immersive virtual reality in education : state of the art and perspectives. In *The International Scientific Conference eLearning and Software for Education* (2015), vol. 1, pp. 133–141.
5. Grabowski, A., and Jankowski, J. Virtual reality-based pilot training for under-ground coal miners. *Safety science* 72 (2015), 310–314.
6. Grantcharov, T. P., Kristiansen, V., Bendix, J., Bardram, L., Rosenberg, J., and Funch-Jensen, P. Randomized clinical trial of virtual reality simulation for laparoscopic skills training. *British journal of surgery* 91, 2 (2004), 146–150.
7. Huber, T., Paschold, M., Hansen, C., Wunderling, T., Lang, H., and Kneist, W. New dimensions in surgical training : immersive virtual reality laparoscopic simulation exhilarates surgical staff. *Surgical Endoscopy* 31, 11 (Nov 2017), 4472–4477.
8. Kruglikova, I., Grantcharov, T. P., Drewes, A. M., and Funch-Jensen, P. The impact of constructive feedback on training in gastrointestinal endoscopy using high-fidelity virtual-reality simulation : a randomised controlled trial. *Gut* 59, 2 (2010), 181–185.
9. Larsen, C. R., Oestergaard, J., Ottesen, B. S., and Soerensen, J. L. The efficacy of virtual reality simulation training in laparoscopy : a systematic review of randomized trials. *Acta obstetricia et gynecologica Scandinavica* 91, 9 (September 2012), 1015–1028.
10. Makransky, G., Terkildsen, T. S., and Mayer, R. E. Adding immersive virtual reality to a science lab simulation causes more presence but less learning. *Learning and Instruction* (2017).
11. McCloy, R., and Stone, R. Science, medicine, and the future : Virtual reality in surgery. *BMJ : British Medical Journal* 323, 7318 (2001), 912.
12. McLellan, H. Virtual realities. In *Handbook of research for educational communications and technology*, D. Jonassen, Ed. New York : Macmillan Library Reference, 1996, pp. 457–487.

13. Palter, V. N., and Grantcharov, T. P. Individualized deliberate practice on a virtual reality simulator improves technical performance of surgical novices in the operating room : a randomized controlled trial. *Annals of surgery* 259, 3 (2014), 443–448.
14. Pantelidis, V. S. Reasons to use virtual reality in education and training courses and a model to determine when to use virtual reality. *Themes in Science and Technology Education* 2, 1-2 (2010), 59–70.
15. Peysakhovich, V., Lefrançois, O., Dehais, F., and Causse, M. The neuroergonomics of aircraft cockpits: The four stages of eye-tracking integration to enhance flight safety. *Safety* 4, 1 (2018), 8.
16. Pulijala, Y., Ma, M., Pears, M., Peebles, D., and Ayoub, A. Effectiveness of immersive virtual reality in surgical training—a randomized control trial. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery* (2017).
17. Reynal, M., Colineaux, Y., Vernay, A., and Dehais, F. Pilot flying vs. pilot monitoring during the approach phase : An eye-tracking study. In *Proceedings of the International Conference on Human-Computer Interaction in Aerospace* (New York, NY, USA, 2016), HCI-Aero '16, ACM, pp. 7 :1–7 :7.
18. Silverstein, J. C., Dech, F., Edison, M., Jurek, P., Helton, W. S., and Espot, N. J. Virtual reality : Immersive hepatic surgery educational environment. *Surgery* 132, 2 (2002), 274–277.
19. Van Wyk, E., and De Villiers, R. Virtual reality training applications for the mining industry. In *Proceedings of the 6th international conference on computer graphics, virtual reality, visualisation and interaction in Africa* (2009), ACM, pp. 53– 63.
20. Witmer, B. G., and Singer, M. J. Measuring presence in virtual environments : A presence questionnaire. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments* 7, 3 (1998), 225–240.
21. Xu, Z., Lu, X., Guan, H., Chen, C., and Ren, A. A virtual reality based fire training simulator with smoke hazard assessment capacity. *Advances in engineering software* 68 (2014), 1–8.