



Titre: Un cockpit d'avion collaboratif en réalité virtuelle pour les
Title: évaluations de facteurs humains

Auteur: Francois Vidal
Author:

Date: 2022

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Vidal, F. (2022). Un cockpit d'avion collaboratif en réalité virtuelle pour les
Citation: évaluations de facteurs humains [Master's thesis, Polytechnique Montréal].
PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/10524/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/10524/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:** Benoît Ozell, & Philippe Doyon-Poulin
Advisors:

Programme: Génie informatique
Program:

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

**Un cockpit d'avion collaboratif en réalité virtuelle pour les évaluations de
facteurs humains**

FRANCOIS VIDAL

Département de génie informatique et génie logiciel

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*
Génie informatique

Août 2022

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

**Un cockpit d'avion collaboratif en réalité virtuelle pour les évaluations de
facteurs humains**

présenté par **Francois VIDAL**

en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*
a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Giovanni BELTRAME, président

Benoît OZELL, membre et directeur de recherche

Philippe DOYON-POULIN, membre et codirecteur de recherche

Christopher J. PAL, membre

DÉDICACE

À Lucette et Alessandra qui m'ont toujours soutenu malgré la distance...

REMERCIEMENTS

Je tiens avant tout à remercier Benoît et Philippe pour leurs conseils, leur soutien et leur patience.

Merci également à Hans pour m'avoir partagé son expertise.

Je remercie le CRIAQ et Mitacs pour avoir financé ce projet dans le cadre du projet MDO 1649 Holodeck ; ainsi que les autres acteurs du projet : Bombardier, Marinvent et BinariesLid.

Merci à Benoît Ouellette, Marie-Hélène Larose et Pratik Pradhan pour leurs conseils.

Merci à Léo de m'avoir aidé à collecter des données précieuses.

Merci aux habitants et amis du 4656 pour leur soutien moral constant.

RÉSUMÉ

Le développement des technologies de réalité virtuelle (RV) et la réduction des coûts associés ont ouvert de nombreuses portes à leur utilisation dans l'industrie pour la conception de prototypes. Dans l'industrie aéronautique, les évaluations de facteurs humains nécessitent des répliques physiques grandeur nature d'éléments du cockpit, l'accès à des simulateurs d'avion, à des pilotes et à des évaluateurs. L'utilisation de la RV permettrait de réduire les coûts associés à chacun de ces éléments en ayant recours à du matériel moins cher et facilement réutilisable (tel que des visiocasques) et en permettant aux différents acteurs d'y participer à distance. Notre projet étudie la possibilité d'utiliser un environnement entièrement en RV pour ces évaluations.

Nous avons développé un prototype d'environnement d'évaluation basé sur le simulateur X-Plane. Notre environnement permet à plusieurs utilisateurs distants de se connecter et de piloter un même avion. Par ailleurs, notre environnement intègre également des avatars de pilotes permettant aux utilisateurs de se voir et d'interagir. Nous avons évalué la capacité de pilotes professionnels à effectuer des vols dans notre environnement, de même que l'impact des avatars sur la communication non verbale, le sentiment de présence et la charge mentale.

Nos principales contributions à cet environnement sont la conception d'une architecture réseau permettant aux utilisateurs d'interagir dans un cockpit d'avion partagé et des avatars reproduisant les mouvements de leurs mains et de leur tête permettant des communications non verbales. Une étude avec deux pilotes professionnels a montré que notre environnement permet aux pilotes d'effectuer des tâches normales et anormales de façon réaliste. Par ailleurs, nous avons également montré un effet positif des avatars proposés sur le sentiment de présence des pilotes et sur leur communication non verbale, en particulier pour la détection d'erreurs.

Ces résultats permettent d'envisager de futures études sur la possibilité d'utiliser notre environnement pour des évaluations de facteurs humains dans l'industrie aéronautique.

ABSTRACT

The development of Virtual Reality (VR) technology and the cost reduction associated with it have opened the door to its widespread use in the industry for prototyping. In the aviation industry, human factors assessments require full-scale replicas of cockpit elements, access to flight simulators, airplane pilots, and assessors. The use of VR could help reduce costs associated with these elements by using cheaper and repurposable hardware, such as VR headsets, and allowing participants to be in different locations. Our project explores the possibility of using a full-VR environment to conduct these assessments.

We have developed an assessment environment prototype based on the flight simulator X-Plane. Our environment allows multiple distant users to connect and to fly the same plane. Our environment also includes pilot avatars that allow the users to see each other and interact. We have measured the ability of professional airplane pilots to fly using our environment, as well as the impact of pilot avatars on non-verbal communication, presence and mental workload.

Our main contributions to this environment are the network architecture allowing users to interact in a shared airplane cockpit, and avatars that reproduce the users' hands and head movements, thus allowing for non-verbal communication. A user study with two professional airline pilots showed that our environment allowed pilots to perform normal and non-normal tasks in a realistic manner. We also showed a positive effect of avatars on the pilots' presence in the environment, and on their non-verbal communication, particularly for error detection. These results invite future research on the possibility of using our environment for human factors assessments in the aviation industry.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	iii
REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ	v
ABSTRACT	vi
TABLE DES MATIÈRES	vii
LISTE DES TABLEAUX	x
LISTE DES FIGURES	xi
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xii
LISTE DES ANNEXES	xiii
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Contexte	1
1.1.1 Les facteurs humains dans l’aviation	1
1.1.2 L’évaluation du cockpit	1
1.1.3 Un environnement virtuel	2
1.1.4 Validité des évaluations	2
1.2 Plan du mémoire	2
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	3
2.1 Introduction	3
2.2 Simulateur de vol en réalité virtuelle	3
2.2.1 Simulateurs de vol	3
2.2.2 Mesures de performance	5
2.3 Les environnements virtuels	6
2.3.1 Présence	7
2.3.2 Environnements virtuels en réseau	9
2.3.3 Considérations sur la latence	11
2.4 Le rôle des pilotes	12

2.4.1	Communication non verbale entre pilotes d'avion	12
2.4.2	Avatars	13
2.5	Synthèse	16
2.6	But de ce projet	16
2.7	Hypothèses et objectifs	16
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE		18
3.1	Conception de l'environnement	18
3.1.1	Environnement de développement	18
3.1.2	Conception du cockpit partagé	20
3.1.3	Avatars et outils de collaboration	25
3.1.4	Produit fini	30
3.2	Tests de performance	32
3.3	Description de l'expérience	32
3.3.1	Scénarios de vol	33
3.3.2	Matériel utilisé	42
3.3.3	Plan expérimental	44
CHAPITRE 4 RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX		47
4.1	Tests de performance de l'environnement	47
4.1.1	Résultats	47
4.1.2	Discussion	47
4.2	Expérience avec les pilotes	49
4.2.1	Détection des erreurs	49
4.2.2	Présence et Charge cognitive	50
4.3	Discussion des résultats	51
4.3.1	Détection des erreurs	51
4.3.2	Présence et Charge cognitive	52
4.3.3	Commentaires des participants	53
CHAPITRE 5 CONCLUSION		55
5.1	Hypothèses et objectifs de recherche	55
5.1.1	Objectifs de recherche	55
5.1.2	Hypothèses de recherche	55
5.1.3	But du projet	56
5.2	Discussion de la méthodologie	56
5.2.1	Discussion et limites de l'environnement	57

5.2.2	Limites du protocole expérimental	58
5.3	Perspectives de recherche	59
5.3.1	Un simulateur pour les études de facteurs humains	59
5.3.2	Un simulateur en RV pour la formation des pilotes	60
5.3.3	Études sur la collaboration et la communication	60
	RÉFÉRENCES	62
	ANNEXES	64

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1	Messages envoyés au serveur par les utilisateurs	31
Tableau 3.2	Erreurs des scénarios	40
Tableau 3.3	Les spécifications techniques des ordinateurs utilisés	42
Tableau 3.4	Ordre de présentation des conditions expérimentales	45
Tableau 4.1	Performances de l'environnement proposé	47
Tableau 4.2	Temps de détection des erreurs du copilote par les participants	49
Tableau 4.3	Scores au questionnaire SUS	50
Tableau 4.4	Scores au questionnaire NASA-TLX	51

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	Les composantes du sentiment de présence.	8
Figure 3.1	Données échangées entre serveur et utilisateurs	23
Figure 3.2	Structure partagée contenant les messages reçus ou à envoyer	24
Figure 3.3	Capture d'écran de Planemaker.	26
Figure 3.4	Extrait des instructions pour l'animation d'un avatar de pilote	27
Figure 3.5	Capture d'écran d'un avatar vu par son copilote	28
Figure 3.6	Capture d'écran d'une situation de collaboration entre avatars	28
Figure 3.7	Le menu de l'extension permettant de changer la position de l'avatar	30
Figure 3.8	Données échangées entre le serveur et les utilisateurs, avatars compris	31
Figure 3.9	L'itinéraire du vol CYUL - CYYZ	33
Figure 3.10	La tablette AviTab affichant une procédure normale	35
Figure 3.11	Un manipulateur de fréquence radio	36
Figure 3.12	Le bas du cockpit, l'emplacement du manipulateur de fréquences radio du copilote est mis en évidence	37
Figure 3.13	L'avant du cockpit, l'emplacement des manipulateurs de vitesse, cap et altitude (de gauche à droite) est mis en évidence.	38
Figure 3.14	L'interrupteur à activer lors de la panne 'FLIGHT CONTROL LOW PRESSURE'	38
Figure 3.15	L'interrupteur à activer lors de la panne 'DRIVE'	39
Figure 3.16	La partie haute du cockpit indiquant l'emplacement des interrupteurs utilisés pour les pannes 'FLIGHT CONTROL LOW PRESSURE' et 'DRIVE'	39
Figure 3.17	Procédure anormale pour la panne 'FLIGHT CONTROL LOW PRESSURE'	41
Figure 3.18	Procédure anormale pour la panne 'DRIVE'	41
Figure 3.19	Le HTC Vive Pro Eye avec ses contrôleurs	43
Figure 3.20	Les pédales utilisées pour l'expérience	44

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

DLL	Bibliothèque de liens dynamique (<i>Dynamic Link Library</i>)
EVR	Environnement Virtuel en Réseau
FMS	<i>Flight Management System</i>
IPA	Interface de Programmation d'Application
KDL	Kit de Développement Logiciel
PC	Pilote aux Commandes
PNC	Pilote Non aux Commandes
RD	Référence de Données (<i>dateref</i>)
RV	Réalité Virtuelle
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
VRFS	Simulateur de Vol en Réalité Virtuelle (<i>Virtual Reality Flight Simulator</i>)

LISTE DES ANNEXES

Annexe A	Extension X-Plane "Hello World"	64
Annexe B	Fichier de configuration des RD	66
Annexe C	Fichier de configuration des commandes	73
Annexe D	Extrait de l'enregistrement des messages TCP d'un vol	83
Annexe E	Communications radio lors du déroulement d'un scénario	84
Annexe F	Plan de vol fourni aux participants	85
Annexe G	Questionnaire de présence fourni aux participants	86
Annexe H	Questionnaire de charge cognitive fourni aux participants	87

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Ce projet s'intéresse à l'utilisation des technologies de réalité virtuelle (RV) immersive pour faciliter la conception et l'évaluation de cockpits d'avion. Plus particulièrement on s'intéresse aux évaluations de facteurs humains, habituellement effectuées dans des simulateurs ou des répliques physiques du cockpit à évaluer. L'utilisation de la RV immersive permettrait de réduire les coûts matériels de ces évaluations et d'accélérer leur mise en place. Le principal problème théorique d'un tel système est celui de la validité des observations qui y sont effectuées, c'est-à-dire la capacité à séparer les problèmes dus au système utilisé de ceux dus au cockpit évalué.

1.1 Contexte

1.1.1 Les facteurs humains dans l'aviation

Dans le domaine de l'aviation et de l'industrie aéronautique, les erreurs d'origine humaine commises par l'équipage peuvent avoir des conséquences dramatiques. Pour prévenir ces erreurs, des formations aux facteurs humains ont commencé à être mises en place à partir des années 1980. Ces formations se concentraient sur les membres de l'équipage. Cependant, la notion de facteurs humains s'est peu à peu étendue à d'autres domaines dont la conception des avions.

1.1.2 L'évaluation du cockpit

Lors de la conception d'un cockpit d'avion, de nombreuses évaluations interviennent à chaque étape du processus. Les évaluations de facteurs humains visent à diminuer la possibilité pour l'équipage de commettre des erreurs lors d'un vol. Elles s'appuient sur les principes de l'ergonomie cognitive pour vérifier que les pilotes aient facilement accès aux informations et aux commandes nécessaires pour assurer la sécurité du vol.

Ces évaluations se déroulent généralement dans des simulateurs comportant un grand nombre d'éléments physiques reproduisant le cockpit à évaluer. Des pilotes effectuent un vol dans cet environnement sous le regard d'évaluateurs. Ces derniers observent le comportement des pilotes et leur utilisation des éléments du cockpit à évaluer dans des situations normales ou anormales. Cette nécessité de construire des répliques du cockpit et de recruter plusieurs pilotes et évaluateurs représente un coût non négligeable lors de la conception d'un nouvel élément.

1.1.3 Un environnement virtuel

Les progrès récents des technologies de RV et de réalité augmentée et leur utilisation de plus en plus répandue dans l'industrie pour la conception de prototypes, poussent à s'interroger sur leur utilité dans l'évaluation de cockpits d'avion. L'utilisation d'un environnement virtuel pour effectuer des évaluations de facteurs humains permettrait de réduire les coûts matériels et d'éliminer la nécessité de faire venir sur place un grand nombre de pilotes. En effet, un environnement en réseau permettrait d'effectuer les évaluations à distance et de gagner un temps non négligeable lors de la conception.

Un tel environnement pourrait intervenir lors des premières phases de conception pour valider certains éléments avant de procéder à leur construction physique. Il agirait comme un intermédiaire entre la phase de conception « sur papier » et la construction de répliques physiques pour leur évaluation, permettant un meilleur affinage des éléments proposés avant leur construction.

1.1.4 Validité des évaluations

Le principal problème posé par cette idée est celui de la validité des observations effectuées dans un tel environnement. Rien ne garantit que les erreurs effectuées par des pilotes, ou les difficultés d'utilisation d'un certain élément, ne soient pas dues à l'environnement virtuel lui-même. L'utilisation d'un tel environnement doit donc être précédée d'un certain nombre d'études visant à établir la possibilité d'y effectuer des évaluations.

Ce projet a donc pour objectif d'être une étape initiale de ce processus d'évaluation.

1.2 Plan du mémoire

Nous présentons dans le prochain chapitre une revue de la littérature existante concernant le sujet et l'introduction d'un certain nombre de concepts pertinents. Cette revue se concentre en particulier sur différentes mesures de qualité de l'environnement étudié. La fin du chapitre aboutit à la formulation du but de notre projet et des différentes hypothèses et objectifs qui nous permettront d'y répondre. Le chapitre suivant présente les solutions trouvées pour atteindre ce but. Il est constitué de deux parties : la première décrit la conception d'un prototype d'environnement virtuel et la deuxième la façon dont il a été évalué. Le chapitre suivant présente et analyse les résultats obtenus lors de cette évaluation. Enfin, la conclusion nous permet de revenir sur nos objectifs et nos hypothèses et de proposer des pistes pour les travaux de recherche futurs.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Introduction

Dans cette partie nous allons présenter une revue de la littérature correspondant aux différentes composantes de notre projet. Dans un premier temps, nous nous concentrerons sur les simulateurs de vol en RV sous le prisme de leur utilisation dans le cadre d'une évaluation de facteurs humains et de leur évaluation. Nous élargirons ensuite notre revue aux environnements virtuels, ce qui nous permettra d'introduire la notion de présence et les concepts et difficultés liés aux environnements en réseau et à la RV. Forts de ces concepts, nous nous intéresserons enfin au rôle des pilotes dans l'environnement envisagé et à la fonction des avatars dans leur collaboration.

2.2 Simulateur de vol en réalité virtuelle

Nous allons ici discuter des simulateurs de vol en RV existants et des moyens d'évaluation existants pour un simulateur de vol.

2.2.1 Simulateurs de vol

VRFS

Un simulateur de vol en réalité virtuelle (VRFS) pour l'évaluation de facteurs humains a déjà été proposé par Oberhauser et ses collègues [1]. L'objectif du VRFS est de proposer une fidélité supérieure à un simulateur sur écran d'ordinateur tout en restant plus flexible qu'un prototype à l'échelle. Le VRFS est conçu pour être hautement modulable : son architecture repose sur le *Robot Operating System* (ROS), un ensemble d'outils libres pour le développement de logiciels de robotique. Les différents éléments du simulateur, physiques ou logiciels, peuvent être enlevés ou remplacés indépendamment les uns des autres. La version présentée utilise le logiciel X-Plane pour la simulation et intègre plusieurs fonctionnalités dont le suivi vidéo de l'utilisateur et le suivi oculaire. Des données sont recueillies par différents capteurs et enregistrées pour être analysées.

Dans une étude ultérieure [2], le VRFS est comparé à un simulateur de vol standard. Les points de comparaison sont : le temps nécessaire pour effectuer les mêmes mouvements, la performance des pilotes (mesurée par la précision de la trajectoire de vol et de différentes orientations de l'avion), la charge de travail du pilote et la maladie de simulateur (ou cinétose

de simulation). Les résultats de l'article montrent pour tous ces points un désavantage du simulateur en réalité virtuelle par rapport au simulateur standard. Malgré cela, les tâches effectuées dans le simulateur standard pouvaient toutes être effectuées dans le VRFS, ce qui en fait donc a priori un modèle viable pour l'évaluation de facteurs humains, une fois ces limitations prises en compte.

X-Plane et SmartCopilot

Le simulateur de vol X-Plane¹, développé par Laminar Research, est l'un des simulateurs les plus populaires à destination du grand public. Le simulateur fournit des environnements et des comportements réalistes pour une utilisation sur ordinateur de bureau. X-Plane est compatible avec l'utilisation de casques RV. De plus, X-Plane autorise l'utilisation de contenu développé par des éditeurs tiers ou de simples utilisateurs. Par exemple, il est possible de créer ou modifier des avions et de proposer de nouvelles fonctionnalités. X-Plane est conçu à la base pour un seul utilisateur, sans avatar, pilotant l'avion dans un environnement réaliste.

On peut cependant utiliser une extension (*plugin*) développée par des tiers pour pouvoir jouer à plusieurs au sein du même avion : SmartCopilot² est une extension payante développée pour permettre de jouer à X-Plane avec un copilote. Elle utilise un modèle de partage de données donnant priorité à la simulation d'un des pilotes sur l'autre et sépare de façon explicite les rôles des deux pilotes entre pilote aux commandes et pilote non aux commandes (PC et PNC). L'expérience ne se veut pas complètement immersive puisque les pilotes ne peuvent pas se voir l'un l'autre, X-Plane ne fournissant pas d'avatars. Les pilotes peuvent simplement constater chacun l'effet des actions de l'autre. De plus, le changement de rôle entre PC et PNC se fait de façon explicite dans une fenêtre séparée du cockpit.

Aérospatial

Un article d'Osterlund et ses collègues [3] présente un système d'entraînement en RV pour des astronautes de la *United Space Alliance* (USA). Le système se base en particulier sur la représentation des astronautes par des avatars dans le monde virtuel au moyen de 26 caméras servant à la reconnaissance de mouvements des participants. Les participants interagissent dans des modèles simplifiés de l'environnement de mission. Cependant le projet n'intègre pas encore de casques RV en raison d'une technologie encore trop peu développée au moment du projet. La RV est donc utilisée pour modéliser les mouvements des participants dans un environnement virtuel plus complexe pour pouvoir a posteriori effectuer des analyses

1. <https://www.x-plane.com>

2. <https://sky4crew.com/smartcopilot/>

d'ergonomie et avoir des retours visuels sur les entraînements effectués.

Conclusions

Si le système d'entraînement pour astronautes présente des caractéristiques souhaitables, notamment la collaboration entre plusieurs utilisateurs dans l'espace virtuel, il fait appel à une quantité de matériel (notamment les caméras) qui ne serait pas justifiée dans un environnement de cockpit d'avion.

L'utilisation de X-Plane avec l'extension SmartCopilot requiert un matériel beaucoup moins conséquent tout en permettant une utilisation à plusieurs. Cependant, ce système n'est pas orienté vers l'étude de facteurs humains en l'absence d'avatars ou de capteurs dédiés.

Enfin, si le VRFS est effectivement un outil d'évaluation de facteurs humains, il n'est pas axé sur la collaboration au sein d'un espace virtuel, mais plutôt sur l'obtention d'un certain nombre de données objectives.

2.2.2 Mesures de performance

Pour pouvoir évaluer l'efficacité d'un simulateur de vol, il est nécessaire de se doter de mesures de performance. Ces mesures doivent permettre de rendre compte de la validité des observations effectuées à l'intérieur de ce simulateur par rapport à des observations effectuées dans des conditions de vol réelles, ou dans un autre simulateur. Les mesures proposées dans la recherche pour atteindre ces objectifs se basent sur la performance des pilotes comme indicateur de la validité du simulateur. L'apparition d'erreurs en nombre significatif lors de vols de pilotes expérimentés est donc interprétée comme une défaillance du simulateur qui ne reproduit pas de façon satisfaisante les conditions de vol ou ne permet pas aux pilotes d'effectuer les manœuvres nécessaires.

Des mesures de performance des pilotes utilisées pour la comparaison avec un simulateur réel sont présentées en détail dans l'étude de performance du VRFS [2]. Les chercheurs mesurent, lors d'un parcours de vol défini à l'avance, la déviation de l'appareil par rapport aux consignes et à la trajectoire 'idéale' de l'avion. Les participants avaient pour objectif de garder la direction de l'avion la plus stable possible lors de différentes phases du vol, puis de garder l'altitude de l'avion aussi constante que possible. La position de l'avion à l'atterrissage par rapport au centre de la piste et l'angle formé entre l'avion et la piste forment d'autres mesures de la performance des pilotes dans les simulateurs. Ce sont ces mesures qui sont utilisées pour comparer le VRFS à un simulateur standard.

Une approche pour déterminer les mesures de performance pertinentes est proposée par Stein

et ses collègues [4]. Elle consiste à relever un grand nombre de mesures lors de vols avec des pilotes plus ou moins expérimentés, puis à ne conserver que les mesures qui permettent effectivement de séparer les pilotes selon leur expérience. D'une quantité initiale de 62 variables réparties en 6 phases de vol différentes, l'étude sélectionne 24 mesures significatives pour évaluer les performances d'un pilote.

Il apparaît de cette étude que la phase de vol permettant le mieux d'évaluer les performances est la phase de vol dite 'en route' (qui correspond à la phase située entre la fin de l'ascension et le début de la descente) et dans une moindre mesure les phases d'ascension, de descente et d'atterrissage. La phase de décollage apparaît comme étant la moins discriminante du point de vue des performances.

Les mesures effectuées consistent principalement en des mesures de l'orientation de l'appareil (tangage, lacet, roulis), des mesures de déviation par rapport à la trajectoire (déviation verticale, horizontale, par rapport à un signal), des mesures de la cinématique de l'avion (vitesse, vitesse verticale, altitude) et des mesures de l'état de l'appareil (pression des moteurs, positions du train d'atterrissage et des volets).

2.3 Les environnements virtuels

Un environnement virtuel désigne une application informatique dans laquelle un ou plusieurs utilisateurs peuvent effectuer un certain nombre d'actions. Un simulateur d'avion est un environnement virtuel. Dans la suite, nous utiliserons le terme d'environnement virtuel pour nous référer plus précisément à un type d'environnement virtuel qui propose à l'utilisateur une interaction censée imiter un ou plusieurs aspects du monde réel.

Nous souhaitons également préciser ce que nous entendons par réalité virtuelle dans le contexte de ce projet. Le terme réalité virtuelle peut en effet s'appliquer à un certain nombre de concepts ou de technologies. Dans le cas présent nous désignerons par RV des environnements virtuels permettant une immersion visuelle totale du participant. L'exemple le plus utilisé et également le cas qui nous intéresse le plus, est celui des casques de réalité virtuelle, ou visiocasques, éventuellement associés à des télécommandes. On utilisera parfois le terme de RV immersive pour marquer la distinction avec des environnements virtuels non immersifs, par exemple affichés sur un écran d'ordinateur.

Le but de cette section est de présenter le concept de présence dans un environnement virtuel, puis d'étudier deux types d'environnements virtuels qui correspondent plus précisément aux objectifs de notre projet : les environnements en réseau et la RV immersive.

2.3.1 Présence

La présence nous intéresse ici en tant que critère de qualité d'un environnement virtuel. En effet, les mesures évoquées en 2.2.2 nous permettent d'évaluer la qualité d'un vol dans un simulateur d'avion et à partir de cela on peut être capable de comparer deux simulateurs entre eux. Cependant, pour pouvoir effectuer des observations relatives aux facteurs humains dans l'espace virtuel du simulateur, il faut que les comportements des pilotes dans le simulateur reproduisent leurs comportements réels. En d'autres mots que le passage à la virtualité ne fasse pas obstacle à leur comportement naturel. C'est dans cet objectif que nous introduisons ici la notion de présence qui remplira pour nous le rôle de ce critère de qualité.

Concepts

La présence est un concept largement utilisé dans la littérature relative aux environnements virtuels et est souvent définie de plusieurs façons différentes selon les articles considérés. En essayant d'être le plus général possible, on peut décrire la présence comme le sentiment d'être présent dans le monde virtuel. Pour affiner notre compréhension du concept, nous pouvons nous appuyer sur une revue des différents articles sur le sujet effectuée par Skarbez et ses collègues [5]. Cette revue met en évidence les différentes définitions et concepts qui se chevauchent parfois selon les articles.

Nous allons ici retenir la distinction faite par Slater et ses collègues [6] entre deux concepts proches de la présence, mais orthogonaux entre eux : l'illusion d'emplacement (PI) et l'illusion de plausibilité (PsI). La PI correspond à la sensation d'être présent dans le monde virtuel à un endroit précis, alors que la PsI correspond à la sensation que le monde virtuel dans lequel on se trouve est plausible. Dans un simulateur d'avion, par exemple, la PI pourrait être accrue par le réalisme des graphismes alors que la PsI pourrait être accrue par le réalisme du comportement de l'avion. La qualité associée à la PI est l'immersion et celle associée à la PsI est la cohérence. Ces deux concepts peuvent être vus comme deux composantes du sentiment de présence.

Une autre composante du sentiment de présence doit être considérée lorsque l'environnement virtuel considéré fait intervenir plusieurs participants simultanément : on peut alors s'intéresser au sentiment, pour un utilisateur, d'être en présence d'un autre utilisateur. On parle alors de co-présence ou de présence sociale (les deux termes sont utilisés de façon interchangeable dans la littérature). On peut alors considérer que, dans les environnements virtuels à plusieurs utilisateurs, PI, PsI et co-présence forment les trois composantes du sentiment de présence.

La figure 2.1 montre les différentes composantes du sentiment de présence. Ce schéma est une version traduite et simplifiée de celui proposé par Skarbez et ses collègues [5]

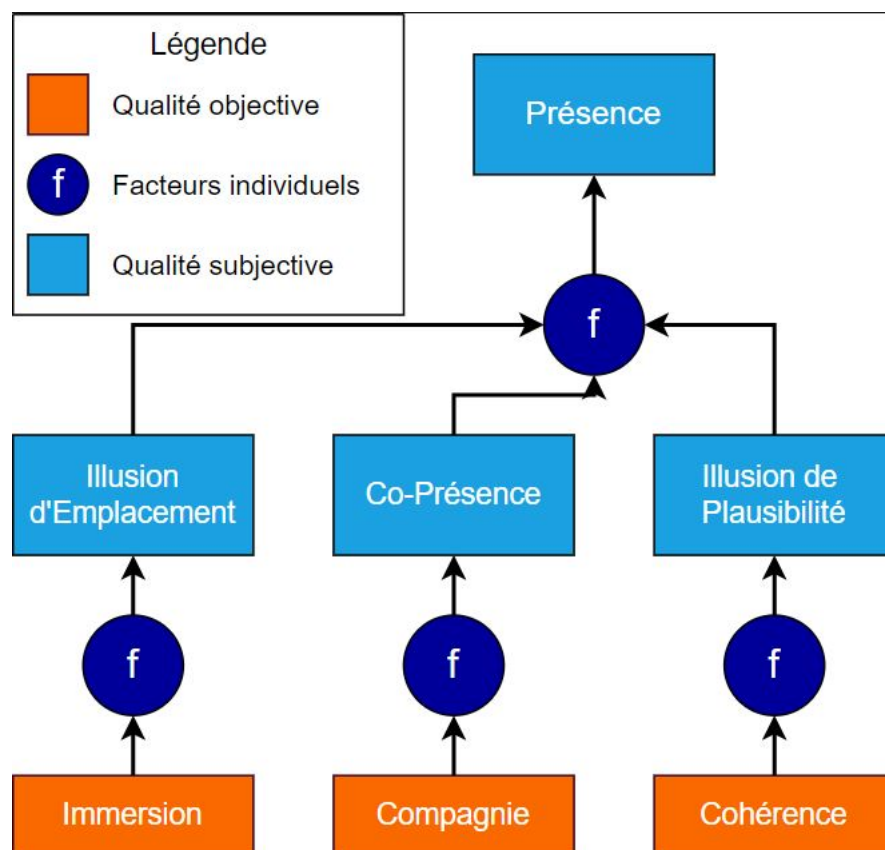


Figure 2.1 Les composantes du sentiment de présence.

Un dernier concept lié à la notion de présence est le sentiment d’incarnation (ou d’auto-présence). Il correspond à la sensation de posséder une existence physique au sein du monde virtuel. Ce sentiment apparaît notamment au travers d’un avatar. Nous reviendrons plus tard sur le rôle de l’avatar dans un environnement virtuel et sur ses liens avec notre projet.

Mesures

La revue mentionnée au paragraphe précédent [5] recense les différentes manières qui ont été proposées pour mesurer le sentiment de présence. Ces techniques peuvent être réparties en trois catégories.

- Les techniques les plus fréquemment utilisées reposent sur des questionnaires auxquels les participants à une expérience répondent à l’issue de ladite expérience. Si beaucoup de questionnaires ont été proposés, les auteurs de la revue ont trouvé de nombreuses

corrélations entre les différents questionnaires, ce qui semble indiquer qu'il suffit d'utiliser un seul questionnaire pour obtenir des résultats de l'état de l'art.

- Plusieurs articles proposent également des approches physiologiques pour mesurer la présence à travers l'excitation (*arousal*) du sujet. L'idée est de comparer l'excitation du sujet dans l'environnement virtuel, par rapport à une situation similaire dans un autre environnement ou dans le monde réel si c'est possible. Les données physiologiques utilisées sont généralement les battements du cœur et la conductance cutanée. Cette catégorie de mesures dépend donc de situations au sein du monde virtuel censées provoquer une excitation physiologique chez le sujet, ce qui restreint leur utilisation.
- Enfin, les méthodes comportementales consistent à analyser le comportement des sujets lors d'expériences pour en déduire leur niveau de présence. Ces méthodes présentent l'avantage de ne pas nécessiter d'intervention dans le processus expérimental et donc de ne pas entraver l'expérience des utilisateurs. Cependant, les comportements observés dépendent du type d'environnement considéré et il n'y a pas de consensus qui émerge sur les signes comportementaux à chercher.

2.3.2 Environnements virtuels en réseau

Le terme d'environnement virtuel en réseau (EVR) désigne un environnement virtuel distribué sur plusieurs systèmes. Évidemment cela implique généralement que l'environnement fasse intervenir plusieurs utilisateurs simultanément. L'exemple le plus courant aujourd'hui est celui des jeux-vidéo multijoueurs en ligne. Les EVR existent sous des formes extrêmement variées dans la façon dont les données sont partagées, dont les utilisateurs peuvent interagir avec l'environnement et entre eux, dans leurs utilisations. Une présentation du fonctionnement des EVR, des problèmes à résoudre dans leur conception et des différentes approches existantes est fournie dans le livre *Networked graphics : building networked games and virtual environments* [7].

Nous n'allons pas discuter ici de toutes les façons possibles de concevoir un EVR, nous nous bornerons à évoquer les principes généraux guidant la conception et l'évaluation d'un EVR.

Latence et cohérence

Nous allons commencer par introduire les concepts de latence et de cohérence qui sont les deux paramètres les plus importants et les plus généraux à prendre en compte lors de la conception ou de l'évaluation d'un EVR :

- La latence peut être définie comme le délai entre l'exécution d'une action par un usager et la réalisation de cette action dans l'environnement partagé. La réalisation d'une

action consiste ici en la mise à jour de l’environnement virtuel partagé en fonction des conséquences de cette action. Un EVR va chercher à réduire au maximum sa latence.

- La cohérence correspond au fait que les différents usagers aient tous accès aux mêmes données en même temps. Donc que l’environnement virtuel soit le même pour tous les utilisateurs. Un EVR va chercher à maximiser sa cohérence.

Lorsqu’un utilisateur effectue une action, cette action doit être traitée par le système et ses conséquences doivent être partagées aux autres utilisateurs. Il y a donc deux délais différents qui apparaissent nécessairement lors d’une action d’un des utilisateurs. Un délai de traitement par le système et un délai de communication entre les différents utilisateurs. Selon les choix qui auront été effectués lors de la conception, il peut par exemple y avoir plusieurs messages à échanger entre les différents utilisateurs avant qu’une action soit réalisée. La latence est principalement due à ces délais.

Pour réduire cette latence pour un utilisateur, on pourrait souhaiter que les conséquences d’une action soient directement appliquées sur son système sans prendre le temps de s’assurer qu’elles aient été partagées aux autres utilisateurs. On aurait dans ce cas une latence faible, mais une cohérence également faible. En effet, les utilisateurs n’auraient pas tous accès au même environnement au même moment. Pour augmenter la cohérence, il est alors nécessaire de s’assurer que chaque participant ait accès aux mêmes données, donc tout changement de données doit s’accompagner de messages de vérification, ce qui entraîne une augmentation de la latence.

On observe donc qu’il faut nécessairement faire un compromis entre une optimisation de la latence et une optimisation de la cohérence. L’équilibre à trouver dépend des objectifs de l’EVR : par exemple la latence ne sera généralement pas un critère important pour un simulateur d’échecs alors qu’elle le sera pour un jeu de tir. Les choix de conception de l’EVR visent donc à atteindre un certain objectif, ces choix concernent le rôle des différents systèmes impliqués, le format des données échangées, la fréquence des messages envoyés.

Recherche récente et EVR immersifs

Pour finir ce panorama sur les EVR nous allons brièvement évoquer la recherche récente sur les EVR, les évolutions à attendre et les liens avec la RV. On nomme ici EVR immersifs les EVR ayant recours aux technologies de RV immersive (par exemple des visiocasques).

La recherche récente concernant les EVR s’intéresse surtout aux environnements à très grande échelle, donc pouvant héberger un nombre très important d’utilisateurs. Le milieu des jeux-vidéo fournit de nombreux exemples de modèles et de techniques pour optimiser l’expérience des usagers d’un EVR. Les attentes croissantes en termes de jeu en ligne poussent la plupart

des développeurs de jeux-vidéo à créer des EVR de toutes sortes de niveaux de complexité. L'émergence des jeux en RV devrait permettre l'émergence de stratégies centrées sur les EVR immersifs.

Un jeu en ligne récent implémentant certains éléments pertinents pour notre projet est *Star Trek : Bridge Crew*, développé par Red Storm Entertainment et édité par Ubisoft. Il s'agit d'une simulation en réseau et en RV de l'équipage d'un vaisseau spatial issu de la franchise *Star Trek*. Les joueurs sont capables de voir leur avatar et celui des autres joueurs bouger en temps réel dans leur visiocasque. Les joueurs manipulent des éléments du vaisseau sur des écrans intégrés à l'environnement et doivent agir en concertation pour faire progresser le vaisseau sans faire d'erreurs. Un joueur est capable de voir ses coéquipiers interagir avec leurs écrans depuis sa position. Cependant, cet environnement est conçu avant tout comme un jeu-vidéo et n'essaie pas d'atteindre un réalisme ou des performances qui le rendraient apte à une utilisation en recherche pour l'industrie aéronautique.

2.3.3 Considérations sur la latence

Nous avons vu que la création d'un EVR nécessite de trouver un équilibre entre la latence et la cohérence de l'EVR. En particulier, une certaine latence est inévitable. Il est donc pertinent de s'intéresser aux effets de la latence sur des situations proches de notre projet pour mieux comprendre son rôle dans notre projet.

Effet de la latence sur la présence

Meehan et ses collègues [8] proposent une étude de l'effet de la latence, au sens du délai entre l'action d'un utilisateur et son effet au sein du monde virtuel, sur le sentiment de présence dans un environnement virtuel immersif. L'environnement utilisé consistait en deux salles : une première pour s'entraîner et s'habituer à l'environnement qui s'ouvrait sur une deuxième salle consistant en une petite plateforme située à 20 pieds de hauteur. Les participants effectuaient alors des tâches simples. La deuxième salle avait pour but d'induire une réaction de stress chez les participants de façon à obtenir une réaction physiologique. Les expériences ont lieu soit avec une latence de 50ms, soit avec une latence de 90ms. Les mesures effectuées consistent en des mesures de facteurs physiologiques (battements du cœur et conductance cutanée) et un questionnaire de présence. Les résultats montrent une augmentation des facteurs physiologiques et du sentiment de présence rapporté lorsque la latence est plus faible, ce qui semble indiquer une influence de la latence sur la présence dans un environnement en RV. Il est intéressant de noter que la latence ici n'est pas due à une mise en réseau mais simplement au matériel employé, ce qui permet de mieux contrôler cette variable lors de l'expérience.

Effet de la latence sur les performances des pilotes

Un lien entre la latence, au sens du délai entre une action et la perception de ses effets, dans un simulateur de vol et la performance du pilote est évoqué dans une étude de Bradley et ses collègues [9]. L'étude porte sur les simulateurs de vol et les performances des pilotes dans ces simulateurs. Pour expliquer que des pilotes expérimentés éprouvent des difficultés à faire atterrir un avion dans des simulateurs aux visuels détaillés, l'article propose que les chutes du taux de rafraîchissement (*framerate*) à l'approche du sol – dues à une charge plus importante pour le processeur – empêchent d'avoir un retour visuel immédiat. En effet, la phase de descente de l'avion requiert de suivre une trajectoire précise jusqu'à la piste d'atterrissage en corrigeant immédiatement les déviations à l'aide des contrôles de l'avion. Un décalage entre les actions du pilote et le retour visuel du simulateur entraîne donc des erreurs plus importantes. On a donc un lien direct entre la latence et les performances du pilote dans un simulateur de vol.

2.4 Le rôle des pilotes

Nous allons examiner dans cette section les travaux relatifs au rôle des pilotes - et surtout à leurs interactions - lors de la conduite d'un avion et à leur implémentation dans un simulateur en RV. En particulier, si la complémentarité des rôles des deux pilotes dans le pilotage et l'importance de leur communication orale semblent évidents, nous voulons explorer le domaine de la communication non verbale pour comprendre si et comment il doit être retranscrit dans l'environnement virtuel. Les résultats que nous trouverons sur la communication non verbale nous pousseront à nous intéresser à la notion d'avatar et à son rôle dans la communication.

2.4.1 Communication non verbale entre pilotes d'avion

La communication non verbale entre les pilotes d'un avion a été étudiée par Segal et ses collègues [10]. Cette étude compare les comportements non verbaux des pilotes en fonction du type de procédure (*checklist*) utilisée : papier, électronique manuel ou électronique automatique. Les comportements observés sont le fait de regarder l'affichage, de le toucher et de pointer quelque chose. Les auteurs constatent une répartition des comportements non verbaux correspondant aux rôles des pilotes : le pilote non aux commandes aura plus tendance à pointer quelque chose ou à toucher l'écran, alors que le pilote aux commandes va avoir tendance à surveiller l'écran de son partenaire. Ces comportements non verbaux sont observés quel que soit le type de procédure considéré. L'étude met également en évidence un lien entre communication verbale et non verbale selon la situation de vol : les participants passent

d'une situation de vol standard à une situation d'urgence. La communication non verbale est plus importante lors de la situation de vol normale, alors que lors de la situation d'urgence les auteurs observent une augmentation de la communication verbale avec une diminution des comportements non verbaux. Il résulte de l'étude que la communication non verbale joue un rôle important dans la répartition des tâches entre les deux pilotes, notamment lors de vols normaux.

L'effet de la communication non verbale sur les performances et la charge cognitive des pilotes est étudié dans une expérience de Lachter et ses collègues [11]. L'étude a pour but de mettre en évidence les différences entre un vol où le copilote se trouve dans le cockpit et un vol où le copilote est à distance et communique avec le pilote uniquement par la voix. Les pilotes sont forcés de changer de destination d'atterrissage au cours du vol pour voir si la distance a un effet sur la prise de décision au sein de l'équipage. Les résultats indiquent que l'absence de communication non verbale n'affecte pas les performances de l'équipage de façon significative. Cependant, les auteurs observent un plus grand nombre de situations de confusion pour le pilote – qui sont définies comme étant des situations où le pilote ne sait pas ce que fait son partenaire et cherche à le comprendre. De plus, à l'issue de l'expérience, les pilotes rapportent une charge cognitive plus élevée lors des vols 'à distance'.

Ces études indiquent donc que, lors d'un vol, la communication entre les pilotes passe en partie par les gestes : des mouvements de la tête, des bras et des mains. Ces gestes sont à la fois des communications explicites (pointer ou toucher quelque chose) ou un contrôle de l'activité du partenaire par le regard. Si l'absence de la possibilité de communiquer non verbalement n'affecte pas les performances de vol, elle semble affecter les comportements des pilotes en créant de la confusion et en augmentant la charge cognitive. Il apparaît donc que la communication non verbale est un facteur important à prendre en compte pour s'assurer d'un comportement normal des pilotes dans le simulateur.

2.4.2 Avatars

Pour permettre la communication non verbale entre pilotes il faut les munir d'un corps. Dans un environnement virtuel, on nomme avatar la représentation de l'utilisateur, donc son 'corps virtuel'. Nous nous intéresserons ici à la fois à l'effet de l'avatar dans les interactions entre utilisateurs dans un environnement virtuel, mais également à l'effet de l'avatar sur un seul utilisateur, ce qui renvoie à la notion d'incarnation évoquée en 2.3.1.

Effets de l'avatar sur un utilisateur

Nous allons commencer par nous pencher sur l'effet d'un avatar sur un utilisateur et notamment pour comprendre, en lien avec le but de notre projet, comment l'avatar peut permettre de prolonger le fonctionnement du corps réel dans le monde virtuel. En particulier, le rôle du corps dans l'accomplissement de tâches cognitives, par exemple de la mémorisation, est connu sous le nom de cognition incarnée. L'effet d'un avatar sur la capacité à accomplir des tâches cognitives en réalité virtuelle est étudié dans une expérience de Steed et ses collègues [12]. L'expérience consiste en un exercice de mémorisation de lettres apparaissant dans le casque de RV durant lequel les participants possèdent -ou non- un avatar pour leurs mains et sont autorisés -ou non- à déplacer leurs mains. Les résultats montrent que la présence de mains et la capacité à les déplacer augmentent les performances des participants dans l'exercice de mémorisation. La charge cognitive des participants est diminuée lorsqu'ils sont en mesure de voir leurs mains et de les déplacer durant l'expérience. Un avatar répondant aux mouvements de l'utilisateur en RV a donc un effet positif sur la réalisation de tâches cognitives. Cette étude montre que la cognition incarnée peut se faire à travers un corps virtuel dans un environnement en RV. L'avatar peut donc agir comme un vecteur efficace de la cognition incarnée.

L'effet de l'avatar sur la présence a également été étudié, mais hors du contexte de la RV. Lim et ses collègues [13] mesurent différents facteurs physiologiques sur des joueurs de *World of Warcraft* lorsqu'ils jouent accompagnés d'un autre personnage présenté soit comme un autre joueur, soit comme une intelligence artificielle, dans des contextes de coopération ou de compétition. Les résultats montrent une plus grande excitation physiologique des joueurs lorsque le personnage adverse ou allié est présenté comme étant l'avatar d'un autre joueur et non un personnage contrôlé par l'ordinateur. Les facteurs physiologiques sont une mesure de la présence de l'utilisateur et les résultats montrent l'effet de la co-présence qui est amplifiée par l'utilisation d'un avatar.

Une étude poussée sur l'identification d'un joueur à son avatar a été conduite par Li et ses collègues [14]. Elle propose quatre facteurs permettant de décrire l'identification d'un joueur à son avatar dans un jeu-vidéo ou un univers virtuel et un questionnaire permettant de mesurer ces facteurs. Ces facteurs consistent en :

- Les sentiments ressentis durant le jeu
- L'immersion dans le jeu
- L'attitude vis-à-vis de son avatar
- Le lien entre l'avatar et l'identité du joueur

Cependant cette étude s'attache beaucoup plus à décrire des avatars de joueurs assidus, donc

avec lesquels une longue 'relation' a été créée. Elle ne s'intéresse pas au rôle de l'avatar dans des contextes expérimentaux.

Ces études mettent en avant le rôle de l'avatar dans la facilitation de la cognition et l'augmentation de la présence dans un environnement virtuel.

Interactions entre avatars

Nous allons maintenant nous intéresser plus spécifiquement aux interactions entre participants à l'aide d'avatars.

Une étude de communication non verbale en RV a été conduite par Dodds et ses collègues [15]. Les expériences effectuées reposent sur un jeu consistant à décrire un mot pour le faire deviner à un autre participant. Les avatars des deux participants étaient animés soit en se basant sur leurs mouvements, soit avec des animations préenregistrées. Les résultats montrent que lorsque les deux avatars étaient animés, les participants parvenaient à deviner plus de mots. De plus, lorsque le participant chargé de faire deviner les mots se trouvait en face d'un avatar aux animations préenregistrées, ses performances diminuaient. Cela met en évidence l'importance d'une communication non verbale bidirectionnelle, dans laquelle un retour visuel permet d'améliorer les performances du participant. Enfin, la comparaison avec un exercice effectué hors de la RV montre que les participants réalisent des mouvements supplémentaires hors du monde virtuel.

L'effet d'un avatar sur les interactions entre utilisateurs d'un environnement virtuel a également été étudié hors du cadre de la RV. Par exemple, une étude de Greiner et ses collègues [16] compare les résultats pour un jeu de l'ultimatum entre deux participants dans la réalité et deux participants dans le jeu *SecondLife*. Le jeu de l'ultimatum est un jeu qui se base sur des négociations entre deux participants pour se répartir une somme d'argent. Le jeu *SecondLife* est un EVR libre d'accès qui n'est pas compatible avec des technologies de RV. L'étude ne trouve pas de différences significatives dans la coopération dues à la communication avec des avatars dans ce contexte.

Le rôle de l'avatar dans les interactions entre utilisateurs semble donc être celui d'un vecteur de communication efficace, tout du moins en RV. On a donc finalement un double effet potentiel de l'avatar dans un simulateur en RV qui est à la fois d'augmenter la présence et de diminuer la charge cognitive des participants, tout en facilitant la communication et en la rapprochant du réel.

2.5 Synthèse

La réalité virtuelle est fréquemment utilisée dans l'industrie, entre autres pour fournir des environnements de travail immersifs et collaboratifs et pour tester des prototypes à moindre coût. Si des environnements permettant l'évaluation de facteurs humains pour un cockpit d'avion en réalité virtuelle ont été proposés, l'idée d'un environnement tirant pleinement avantage de sa virtualité (collaboration à distance, avatars) pour ce type d'évaluation n'a pas encore été explorée dans la littérature.

En effet, nous avons vu dans un premier temps qu'aucun environnement proposé dans la littérature ne permet de reproduire le déroulement d'une évaluation de facteurs humains telle qu'elle se déroule dans le monde réel. Dans un second temps nous avons établi l'existence et l'importance d'un certain nombre de critères de qualité pour un simulateur d'avion (mesures de performance des pilotes), un environnement virtuel visant à reproduire des comportements réels (présence) et un EVR (latence et cohérence). Enfin, nous avons observé l'importance de la présence d'un deuxième pilote et des possibilités d'interaction et de communication non verbale lors d'un vol.

2.6 But de ce projet

Le but de notre projet est de concevoir un environnement de vol collaboratif en réalité virtuelle et en réseau, et d'y effectuer une étude prospective. Cette étude vise à évaluer la possibilité d'utiliser l'environnement proposé pour répondre aux questions suivantes :

- Est-ce qu'un environnement virtuel collaboratif en RV permet à deux pilotes d'effectuer un vol de façon réaliste ?
- Quel effet la présence d'avatars dans un tel environnement produit-il sur les pilotes ?
- Est-ce que les résultats obtenus lors d'une évaluation de facteurs humains dans un environnement entièrement en réalité virtuelle sont valables dans le monde réel ?

Les observations effectuées au cours de notre revue de littérature nous permettent d'affirmer que ces questions ne trouvent pour l'instant pas de réponse et qu'elles s'inscrivent dans la continuité des connaissances existantes ; et par ailleurs, qu'il n'existe pas dans la littérature d'environnement permettant d'y répondre de manière satisfaisante.

2.7 Hypothèses et objectifs

Pour atteindre ce but, nous souhaitons valider ou infirmer les hypothèses suivantes :

- H1 : Des pilotes sont capables d'effectuer un vol dans un cockpit collaboratif en RV.

- H2 : Le sentiment de présence des pilotes augmente dans un environnement avec avatars par rapport à un environnement sans avatar.
- H3 : La charge cognitive des pilotes diminue dans un environnement avec avatars par rapport à un environnement sans avatar.
- H4 : Les communications non verbales entre les pilotes sont facilitées dans un environnement avec avatars par rapport à un environnement sans avatar.

Pour atteindre ce but, nous proposons de compléter les objectifs de recherche suivants :

- O1 : Concevoir un environnement de vol en réalité virtuelle lié à X-Plane intégrant des avatars humanoïdes des deux pilotes.
- O2 : Développer un modèle de partage de données entre les utilisateurs du simulateur et l'intégrer à l'environnement pour le mettre en réseau.
- O3 : Élaborer un scénario de vol permettant d'évaluer le simulateur et les avatars.
- O4 : Effectuer une évaluation du prototype avec des pilotes d'avion.

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE

Pour répondre aux objectifs de recherche, nous avons créé un prototype de cockpit en RV et en réseau et nous avons réalisé une expérience avec des pilotes professionnels pour en tester les fonctionnalités.

3.1 Conception de l’environnement

Cette section présente les différentes composantes de l’environnement de l’expérience, les difficultés posées et les solutions employées lors de sa conception.

3.1.1 Environnement de développement

Notre environnement est basé sur le simulateur de vol X-Plane (version 1.50) présenté à la section 2.2.1. Le simulateur se charge de simuler le comportement de l’avion et de ses composantes (c’est-à-dire de mettre à jour les différentes variables concernées) et d’afficher l’environnement virtuel. Par ailleurs, X-Plane se charge également de gérer l’affichage et l’interactivité avec le matériel de RV. En effet, le logiciel est compatible de façon native avec la RV.

L’une des particularités de X-Plane est de posséder un kit de développement logiciel (KDL) fourni et documenté permettant de modifier différents aspects du logiciel et notamment de lire et d’écrire les données du simulateur en temps réel. On peut donc voir le simulateur muni de son kit de développement comme un moteur de jeu très spécialisé dans lequel on a réalisé notre prototype. Notre environnement correspond en fait à une version modifiée (ou *moddée*) de X-Plane.

Les extensions X-Plane

La modification de X-Plane se fait principalement via la création d’extensions (*plugins*). Ces extensions sont des bibliothèques de liens dynamiques (DLL) codées en C ou en C++ et faisant appel à un certain nombre de fonctions du KDL. Une extension X-Plane contient typiquement des fonctions exécutées à l’ouverture et à la fermeture d’X-Plane, à l’activation et à la désactivation de l’extension et lors de la réception de messages d’autres extensions.

Toutes les fonctions que l’on souhaite voir activées à d’autres moments doivent être enregistrées sous la forme de « *FlightLoops* » ou boucles de vol. Ces boucles sont des fonctions qui

sont appelées à intervalles réguliers (précisés lors de leur création) par le logiciel. La fonction *Start* par exemple, va typiquement contenir la création des objets nécessaires à l'exécution de l'extension et l'enregistrement d'un certain nombre de boucles qui seront ensuite exécutées lors du vol. La fonction *End* servira typiquement à détruire les objets et boucles créés.

Le KDL donne accès à de nombreuses fonctions permettant de lire et d'écrire des données du simulateur, de créer des menus, d'instancier des objets, etc.

Pour donner une idée de la structure d'une extension X-Plane, le code de l'extension *Hello World* fourni sur le site d'X-Plane par les développeurs se trouve à l'annexe A.

Les données d'X-Plane

Nous allons brièvement présenter la façon dont X-Plane organise les données de la simulation du point de vue du KDL.

Toutes les données de la simulation sont stockées par l'application dans des structures appelées *datarefs* (pour références de données ou RD). Les RD consistent en un identifiant unique sous forme de chaîne de caractères liée aux données considérées. Ces données peuvent être de 6 types différents : *int*, *float*, *double*, *int array*, *float array* et *data array*. Ce dernier correspond à un vecteur d'octets, par exemple pour stocker une chaîne de caractères.

Les RD peuvent provenir directement d'X-Plane, du modèle d'avion utilisé ou d'une extension installée. L'état de l'ensemble des RD suffit à reproduire l'état du simulateur à un instant *t*. Les RD sont constamment mis à jour pour tenir compte de l'évolution de l'état de la simulation en réaction aux actions de l'utilisateur (par exemple la position d'un levier dans le cockpit) ou de l'environnement (évolution de la météo).

Par ailleurs, X-Plane utilise également un système de commandes pour gérer les actions d'un utilisateur. Une commande est, de la même façon qu'un RD, identifiée par une chaîne de caractères unique. Cependant, une commande correspond à une fonction exécutée par le simulateur en réaction à une action de l'utilisateur. Les développeurs du logiciel recommandent¹ l'utilisation des commandes à la place des RD pour répondre à des actions de l'utilisateur, puisque les commandes vont généralement entraîner la modification d'un certain nombre de RD liés qu'il serait plus difficile de trouver soi-même. Les RD ne devraient être utilisés que si l'on a besoin de lire ou d'écrire une valeur précise, ou s'il n'existe pas de commande liée à l'action considérée.

Par exemple, la commande "laminar/B738/autopilot/altitude_up" incrémente l'altitude en-

1. <https://developer.x-plane.com/2009/04/datarefs-vs-commands-ii-which-one-should-i-use/>

trée dans l'autopilote pour l'avion Boeing 737-800. Pour ce faire, elle modifie la valeur des RD suivants : "laminar/B738/autopilot/mcp_alt_dial", "sim/cockpit/autopilot/altitude" et "sim/cockpit2/autopilot/altitude_dial_ft" qui sont tous des entiers.

3.1.2 Conception du cockpit partagé

Architecture réseau

Notre prototype est organisé selon une architecture client-serveur. Chaque instance d'X-Plane utilisée est connectée à un serveur qui se charge de rediriger les messages entre elles. Cette architecture nous permet d'augmenter le nombre d'utilisateurs du prototype sans que les performances d'X-Plane en soient affectées. En effet, le volume de messages à traiter par utilisateur reste fixe et la charge de travail associée à la transmission des messages entre les différents utilisateurs est reportée sur le serveur. Les utilisateurs peuvent donc se concentrer sur l'exécution de la simulation et éviter de ralentir X-Plane. Cette architecture nous permet donc, si besoin est, d'utiliser le prototype pour plus d'utilisateurs qu'un pilote et un copilote.

Données envoyées

Nous avons dit plus haut que l'ensemble des RD utilisés par le simulateur à un instant t est équivalent à l'état de la simulation à cet instant t . En réalité, comme de nombreux RD sont redondants suite à des mises à jour, ou ne sont pas utiles pour certains modèles d'avion, une liste plus réduite de RD suffit à reproduire la simulation.

Nous pouvons séparer ces RD en trois catégories :

- Les RD dont la valeur change continuellement de façon indépendante des actions ponctuelles de l'utilisateur. Par exemple, la position de l'avion est mise à jour à chaque rafraîchissement de l'écran (*frame*) par le logiciel en fonction d'autres données comme la vitesse.
- Les RD dont la valeur ne change que lors d'une action de l'utilisateur et qui peuvent être modifiés par une commande. Par exemple, lorsque l'utilisateur change la position d'un interrupteur dans le cockpit, X-Plane appelle une commande qui va modifier tous les RD concernés.
- Les RD dont la valeur ne change que lors d'une action de l'utilisateur mais qui ne sont pas modifiés par une commande. En effet, certaines interactions avec l'environnement modifient directement la valeur des données sans passer par une commande. Cela est dû à l'apparition tardive des commandes dans les versions successives d'X-Plane.

Chacune de ces catégories appelle une méthode différente pour l'envoi des données.

Pour les RD modifiés continuellement, les simulations ne sont synchronisées que si les valeurs restent les mêmes pour toutes les simulations. Ces données sont donc transmises en continu d'un utilisateur (dit principal) aux autres utilisateurs (secondaires). Il y a donc une hiérarchie entre les utilisateurs qui fait que la simulation de l'utilisateur principal est en quelque sorte la simulation principale. La position du manche étant modifiée de façon continue lorsqu'il est en cours d'utilisation, la simulation principale correspond à celle du PC, sans quoi il lui serait impossible de piloter l'avion.

En ce qui concerne les RD modifiés ponctuellement par des commandes, il suffit de transmettre la commande en question aux autres utilisateurs lorsqu'elle est activée. Pour ce faire, le KDL permet d'ajouter à des commandes des fonctions qui se déclenchent à leur activation. Il suffit donc d'ajouter à toutes les commandes considérées une même fonction qui se déclenche lors de leur activation. Cette fonction ajoute l'identifiant de la commande activée aux messages à envoyer au serveur. Cette catégorie ne nécessite ni de hiérarchie entre les utilisateurs, ni d'envoi de données en continu.

De même, pour la troisième catégorie, il suffit de transmettre les nouvelles valeurs des RD en question lorsqu'elles sont modifiées. Comme le KDL ne permet pas de savoir automatiquement quand un RD est modifié, on garde en mémoire une liste des valeurs de tous les RD appartenant à cette catégorie et on vérifie à chaque rafraîchissement de l'écran quelles valeurs ont changé. Cette catégorie ne nécessite également ni hiérarchie, ni envoi en continu.

Les données envoyées prennent donc la forme d'un flux presque continu de données du pilote au serveur, puis du serveur aux autres utilisateurs et ponctuellement de données envoyées par un utilisateur au serveur, puis à tous les autres utilisateurs.

Les listes des RD et des commandes de chaque catégorie sont fournies aux annexes B et C. On utilise au total 81 RD envoyés via UDP, 228 RD via TCP et 789 commandes. Ces listes sont basées sur des listes fournies sur le site de l'extension SmartCopilot présentée dans la revue de littérature. En effet, comme les RD à considérer dépendent du modèle d'avion considéré, l'utilisation de l'extension nécessite l'élaboration d'une liste propre à chaque avion. Des listes sont donc élaborées par des utilisateurs de l'extension et mises en libre accès sur le site. Nous nous sommes basés sur la liste de Claude Roullier pour le Boeing 737-800.²

Protocoles utilisés

Pour les données envoyées en continu, on utilise le protocole UDP. UDP est un protocole rapide mais peu fiable. Cependant ce manque de fiabilité n'est pas un problème pour notre

2. <https://sky4crew.com/download/zibo-737-800x/>

environnement. En effet, les données étant mises à jour continuellement, en cas de perte d'un paquet, les simulations ne sont désynchronisées que jusqu'à la réception du paquet suivant.

Pour les données envoyées ponctuellement et correspondant à des RD modifiés ou des commandes, nous avons utilisé le protocole TCP. Il s'agit d'un protocole fiable, mais plus lent qu'UDP. En effet, comme ces données ne sont transmises qu'une fois, la perte d'un paquet pourrait ne jamais être corrigée et entraînerait une décohérence. Cela est particulièrement vrai pour les commandes qui ne contiennent pas la valeur exacte d'une donnée mais simplement une instruction pour l'incrémentatation ou la décrémentatation d'une valeur.

Encodage des données

L'extension a été conçue pour des utilisateurs employant tous les mêmes fichiers de configuration. Ces fichiers de configuration correspondent à la liste des RD séparés par catégorie et à la liste des commandes. En particulier, l'extension s'attend à ce que les RD et commandes des fichiers de configuration y figurent dans le même ordre pour tous les utilisateurs. De cette manière, les RD et commandes envoyés peuvent être codés d'une façon simple :

- Pour les RD envoyés continuellement, on se contente d'envoyer les valeurs des données les unes à la suite des autres dans l'ordre dans lequel elles apparaissent sur leur fichier de configuration.
- Pour les RD et les commandes envoyés ponctuellement, chacun est associé à un identifiant chiffré à trois chiffres correspondant à leur position dans le fichier de configuration, suivi de la nouvelle valeur. Ainsi chaque message est constitué de l'identifiant chiffré correspondant au RD ou à la commande. Par ailleurs, les messages envoyés par TCP contenant des RD sont précédés du caractère 'T' (pour *Trigger*) et ceux contenant des commandes du caractère 'C'. Le message "T0450.333333/1151" signifie que le 45^e RD de la liste doit prendre la valeur 0.333333 et que le 115^e RD doit prendre la valeur 1. Le message "C1360/1372" signifie que la 136^e commande doit être activée et que l'activation de la 137^e commande doit se terminer.

Par ailleurs, les RD modifiés continuellement sont séparés en deux catégories. La première concerne ceux qui changent de façon rapide et en réaction à des actions des utilisateurs (par ex. l'altitude et la vitesse). La seconde concerne ceux qui changent lentement ou de façon complètement indépendante des utilisateurs (par ex. la position des volets hypersustentateurs ou les RD liés à la météo).

La première catégorie est envoyée au rythme le plus rapide possible. Dans notre cas et avec le matériel utilisé (décrit plus loin), les messages sont envoyés toutes les 0.1s environ. Cette fréquence correspond environ à 5 rafraîchissements d'X-Plane, toujours avec notre matériel.

Lors de nos essais, des fréquences d'envoi plus rapides ont entraîné des ralentissements ou des erreurs du logiciel. En pratique, la fréquence d'envoi est en fait d'environ 9 messages par seconde (soit un message toutes les 0.111s).

La deuxième catégorie est envoyée à un rythme plus lent. Les messages lents sont envoyés environ toutes les 5 secondes. Cette séparation permet de réduire la taille des messages envoyés continuellement pour ne pas surcharger le réseau et les instances du simulateur avec des informations superflues.

Un message rapide envoyé par le pilote a typiquement une taille de 2155 octets. La taille varie de 5 octets tout au plus selon les valeurs prises par les RD. Cette taille correspond à un débit de 0,155 Mbit/s. Ce débit est très faible pour la plupart des réseaux professionnels ou domestiques. Pourtant, on a constaté lors de nos essais des ralentissements avec des tailles de messages supérieures à 3000 octets (soit 0,240 Mbit/s). Le principal facteur limitant de la taille et de la fréquence d'envoi des messages est donc la capacité du simulateur à les traiter sans que ses performances ne soient affectées. La taille d'un message lent est de 1253 octets, ce qui correspond à un débit de 2 kbit/s. Le débit total pour la communication est de 157 kbit/s.

Les messages rapides sont précédés du caractère 'P' (pour Pilote) et les messages lents du caractère 'L'. Voici un exemple de message, tronqué après quelques RD par souci d'espace et de lisibilité :

```
"L0.000000/29.920000/0.000000/0.000000/0.000000/8.307400/-56.599998/11100.000000/"
```

La figure 3.1 représente les données échangées entre le serveur et les utilisateurs.

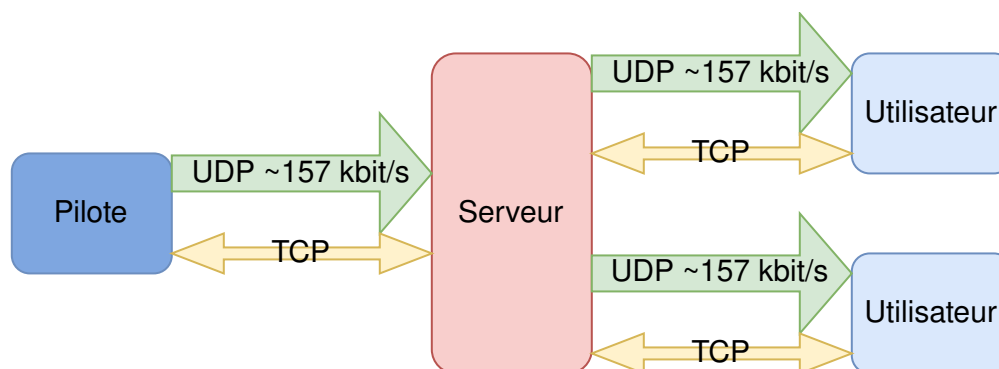


Figure 3.1 Données échangées entre serveur et utilisateurs

Implémentation dans X-Plane

Notre extension s'appuie sur winsock, une bibliothèque de Windows pour la création et la gestion de *sockets*. L'envoi et la réception de messages par les *sockets* se font dans des fils d'exécution différents pour éviter de gêner l'exécution du fil principal de X-Plane. On utilise deux protocoles différents, selon les données envoyées. On a donc au total quatre fils différents en plus du principal. Chaque protocole ayant deux fils dédiés : un pour l'envoi et un pour la réception.

Comme les fonctions du KDL ne peuvent être utilisées que dans le fil principal, les données à envoyer et les données reçues sont placées dans des structures partagées auxquelles tous les fils ont accès. Ces structures consistent en un pointeur vers un tableau de caractères et un sémaphore sous la forme d'un booléen précisant si les données doivent être lues ou si elles peuvent être écrites. La figure 3.2 correspond au code de la structure en question.

```

struct message {
    char msg[DEFAULT_BUFLLEN];
    bool flag = false;
};

```

Figure 3.2 Structure partagée contenant les messages reçus ou à envoyer

Une donnée est donc lue dans un RD dans le fil principal, puis le message associé est placé dans la structure correspondant à sa méthode d'envoi. Le fil d'envoi lit le message dans la structure et l'envoie au serveur. Lors de la réception, le fil qui reçoit le message l'écrit dans la structure correspondante. Le message est ensuite lu et décodé par le fil principal qui écrit les valeurs reçues dans les RD correspondants.

Le serveur

Le serveur est un fichier exécutable depuis l'invite de commandes Windows. Il a été codé en C++ en s'appuyant également sur la bibliothèque winsock. Le serveur se charge simplement de retransmettre les messages qu'il reçoit d'un utilisateur à tous les autres utilisateurs connectés. Le serveur utilise le port 27015 pour UDP et TCP.

Lors de la première connexion via TCP, il se charge également d'attribuer les différents rôles (pilote, copilote ou observateur) aux clients, en fonction de celui qui a été demandé par chacun. Si deux utilisateurs demandent le rôle de pilote, c'est le premier à s'être connecté qui le reçoit et le deuxième est forcé de prendre celui du copilote s'il est disponible, ou celui d'un observateur.

Le serveur est également capable d'enregistrer et de rejouer certaines parties d'un vol. L'enregistrement consiste à enregistrer tous les messages reçus par le serveur dans un fichier texte, accompagnés de l'instant de leur réception. Rejouer une partie d'un vol consiste à envoyer les messages contenus dans un tel fichier à tous les utilisateurs connectés. On se contente d'enregistrer et de renvoyer les messages reçus via TCP, ce qui nous permet d'automatiser certaines parties de la configuration de l'avion qui peuvent être trop longues ou trop laborieuses en RV. Un exemple d'enregistrement est donné à l'annexe D.

3.1.3 Avatars et outils de collaboration

Les avatars des pilotes sont directement intégrés au modèle 3D de l'avion utilisé. En effet, les modèles d'avion utilisés par X-Plane sont faits pour être modifiables par les utilisateurs et comportent un certain nombre de parties mobiles à l'intérieur du cockpit, par exemple des leviers pouvant changer de position. Les avatars sont donc traités (et animés) par X-Plane de la même façon que n'importe quel autre élément du cockpit.

Le fait de placer les avatars directement dans le modèle d'avion permet d'éviter d'utiliser les méthodes d'instanciation d'objets 3D du KDL qui sont peu stables et peuvent entrer en conflit avec l'affichage du cockpit.

PlaneMaker et le format OBJ8

X-Plane fournit à ses utilisateurs un éditeur d'avion intégré appelé PlaneMaker. PlaneMaker permet entre autres d'ajouter et de placer différents objets 3D dans le modèle d'avion. Ces objets doivent cependant être dans un format spécifique au logiciel nommé OBJ8 ou *X-Plane Object*.

Le format OBJ8 consiste en un fichier texte contenant les informations nécessaires à X-Plane pour afficher et animer l'objet en question. Ces informations prennent la forme de données (par exemple la liste de tous les triangles composant l'objet) et de commandes qui servent à afficher et animer l'objet, en spécifiant par exemple quelles données doivent être rendues et dans quel ordre, quelles sont les propriétés du matériau ou comment l'objet doit être animé. En particulier, les instructions concernant l'animation de l'objet sont contenues dans le fichier sous forme de commandes. La figure 3.4 donne un extrait des commandes d'animation des avatars du prototype.

Ce format étant spécifique à X-Plane il n'est pris en compte nativement par aucun logiciel de modélisation 3D. X-Plane propose donc également une extension pour le logiciel de

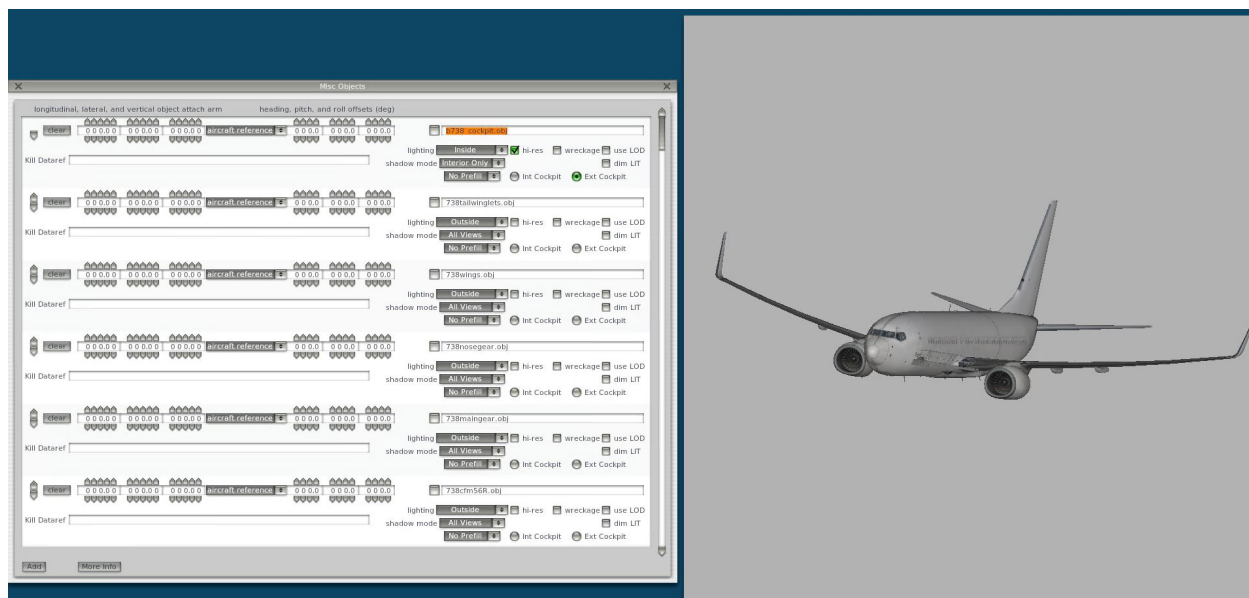


Figure 3.3 Capture d'écran de Planemaker.

modélisation et d'animation 3D Blender appelée *xplane2blender*³.

Les animations se font à l'aide d'images clé (*keyframes*). L'animation consiste à lier certaines valeurs d'un RD donné aux images clé de l'objet. Par exemple, on peut associer la valeur 0 d'un RD à une certaine position de l'objet et la valeur 1 à une position différente. X-Plane se charge automatiquement de l'interpolation pour les valeurs du RD comprises entre 0 et 1. Il en résulte que les seules animations possibles avec cette méthode sont des rotations et des translations.

Implémentation des avatars dans XPlane

Nos avatars ont été créés et animés dans le logiciel Blender avec l'aide de l'extension *MakeHuman*⁴ et exportés avec l'extension *xplane2blender*. Ils sont constitués d'une tête et de mains animées. Ces parties du corps correspondent aux différents éléments du matériel de RV (visiocasque et contrôleurs). Les figures 3.5 et 3.6 présentent des avatars des pilotes lors de vols dans notre environnement.

Les avatars sont animés à l'aide des valeurs de certains RD explicitement nommés dans le fichier OBJ8 (voir figure 3.4). Ces RD sont créés et mis à jour dans une extension de X-Plane grâce au KDL. Au total, on utilise 8 RD par pilote, soit 16 RD créés au total. Ces 8 RD

3. <https://developer.x-plane.com/tools/blender/>

4. <http://www.makehumancommunity.org/content/plugins.html>


```

ANIM_begin
ANIM_trans_begin      OpenVR/C1T[0]
ANIM_trans_key  5      7      0      -0
ANIM_trans_key -5     -3      0      -0
ANIM_trans_end
  ANIM_begin
  ANIM_trans      -2      0      -0      -2      0      -0
  ANIM_trans_begin      OpenVR/C1T[2]
  ANIM_trans_key -5      0      0      -7
  ANIM_trans_key  5      0      0      3
  ANIM_trans_end
    ANIM_begin
    ANIM_trans      0      0      2      0      0      2
    ANIM_trans_begin      OpenVR/C1T[1]
    ANIM_trans_key -5      0      7      -0
    ANIM_trans_key  5      0      -3      -0
    ANIM_trans_end
      ANIM_begin
      ANIM_trans      0      -2      -0      0      -2      -0
      ANIM_rotate_begin      0      0      -1      OpenVR/C1R[2]
      ANIM_rotate_key -3.1400001      0
      ANIM_rotate_key -1.5700001      90.000207
      ANIM_rotate_key 0      179.99985
      ANIM_rotate_key 1.5700001      270.00006
      ANIM_rotate_key 3.1400001      0
      ANIM_rotate_end
      ANIM_rotate_begin      0      1      -0      OpenVR/C1R[2]
      ANIM_rotate_key -3.1400001      0
      ANIM_rotate_key -1.5700001      0
      ANIM_rotate_key 0      0
      ANIM_rotate_key 1.5700001      0
      ANIM_rotate_key 3.1400001      360.00026
      ANIM_rotate_end
      ANIM_begin

```

Figure 3.4 Extrait des instructions pour l'animation d'un avatar de pilote

correspondent aux données suivantes :

- Trois RD de type *float array* pour les positions respectives de la tête et des deux mains ;
- Trois RD de type *float array* pour les rotations respectives de la tête et des deux mains ;
- Deux RD de type *float* pour l'état de la gâchette de chaque contrôleur, qui est utilisée pour l'interaction avec l'environnement. Ces RD permettent d'animer les mains des pilotes lorsque ceux-ci interagissent avec un élément du cockpit. La valeur correspondant à la position de la gâchette est un flottant compris entre 0 et 1 et X-Plane considère le bouton comme étant appuyé au-delà d'une certaine valeur (réglable dans les options du logiciel). Pour notre expérience, cette valeur était de 0.85.



Figure 3.5 Capture d'écran d'un avatar vu par son copilote



Figure 3.6 Capture d'écran d'une situation de collaboration entre avatars

Les valeurs des RD sont mises à jour grâce à OpenVR, l'interface de programmation d'application (IPA) fournie par SteamVR. Cette IPA permet d'obtenir des données sur la position et l'état des différents éléments (visiocasque et contrôleurs) en temps réel.

Les coordonnées obtenues grâce à OpenVR sont exprimées dans un référentiel correspondant à une aire de jeu de RV configurée lors de la première utilisation. Elles sont donc indépendantes de la position de l'utilisateur. On peut cependant réinitialiser cette configuration avec une fonction de l'IPA et prendre la position et l'orientation du casque de l'utilisateur au moment de l'exécution comme références.

Les objets 3D dans X-Plane sont animés selon un référentiel propre à l'avion. La direction de l'avion peut être modifiée par l'utilisateur via les contrôleurs RV. Cette modification replace l'utilisateur dans le siège de son choix en tournant l'avion selon la direction du visiocasque.

Notre extension X-Plane comporte une procédure d'initialisation activée manuellement par un utilisateur extérieur. Cette procédure permet de réajuster le référentiel d'OpenVR pour l'aligner avec la direction du casque de l'utilisateur. Cette procédure doit être activée juste après la réorientation du référentiel de l'avion décrite au paragraphe précédent, lorsque le visiocasque est orienté exactement dans la même direction. Cela permet de faire en sorte que les coordonnées extraites d'OpenVR et les données écrites dans les RD soient exprimées dans le même référentiel et donc que l'animation soit faite correctement.

L'extension comporte également l'affichage d'un menu (figure 3.7) permettant de déplacer chaque partie des avatars (tête, main gauche et main droite) individuellement. Cette option permet de corriger d'éventuelles erreurs humaines lors de la procédure d'initialisation.

Envoi des positions des avatars

Les RD créés pour l'animation des avatars appartiennent à la catégorie des RD modifiés continuellement par le simulateur et qu'il faut envoyer à un rythme élevé puisqu'ils changent en fonction des actions des utilisateurs. Par ailleurs, les RD contenant les informations pour l'animation du copilote doivent être envoyés par la simulation du copilote. Ces RD sont donc envoyés via UDP par les deux pilotes.

En ce qui concerne le pilote, ils sont simplement ajoutés à la liste des RD envoyés continuellement par l'extension qui se charge des communications réseau. Ils sont donc codés et envoyés exactement de la même façon que les autres RD envoyés continuellement par l'utilisateur principal.

Pour le copilote, ils sont codés de la même façon, avec simplement l'ajout du caractère 'C' en début de message précisant que le message provient du copilote. De cette façon, un utilisateur

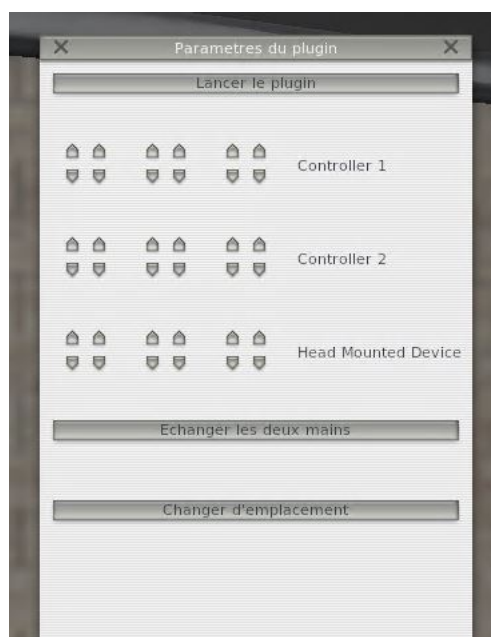


Figure 3.7 Le menu de l'extension permettant de changer la position de l'avatar

qui reçoit le message sait qu'il ne doit attendre que les valeurs de 8 RD. Ces messages ont une taille de 227 octets.

3.1.4 Produit fini

Le prototype développé dans le cadre de cette maîtrise consiste en les éléments suivants :

- une extension (bibliothèque de liens dynamiques) X-Plane gérant la lecture, l'envoi, la réception et l'écriture des données nécessaires à synchroniser les simulations des utilisateurs ;
- une extension X-Plane mettant à jour les valeurs des RD permettant d'animer les différentes parties des avatars avec les données extraites du matériel RV ;
- un serveur (exécutable depuis l'invite de commandes) s'occupant de rediriger les messages reçus d'un utilisateur vers les autres utilisateurs concernés, assurant ainsi la synchronisation des simulations ;
- deux modèles d'avatar animés au format OBJ8 comprenant une tête et deux mains ;
- un fichier texte contenant la liste des RD à envoyer et la catégorie à laquelle ils appartiennent (UDP rapide, UDP lent, UDP copilote, TCP) (Annexe B) ;
- un fichier contenant la liste des commandes à envoyer (Annexe C).

Au final, le flux de données entre le serveur et les différents utilisateurs est le suivant :

- un flux constant et volumineux de données du pilote au serveur, puis du serveur aux

- autres utilisateurs ;
- un flux de données continu réduit du copilote au serveur, puis du serveur aux autres utilisateurs ;
- des messages ponctuels d'un utilisateur au serveur, puis du serveur aux autres utilisateurs.

La figure 3.8 montre le flux total de données entre le serveur et les utilisateurs.

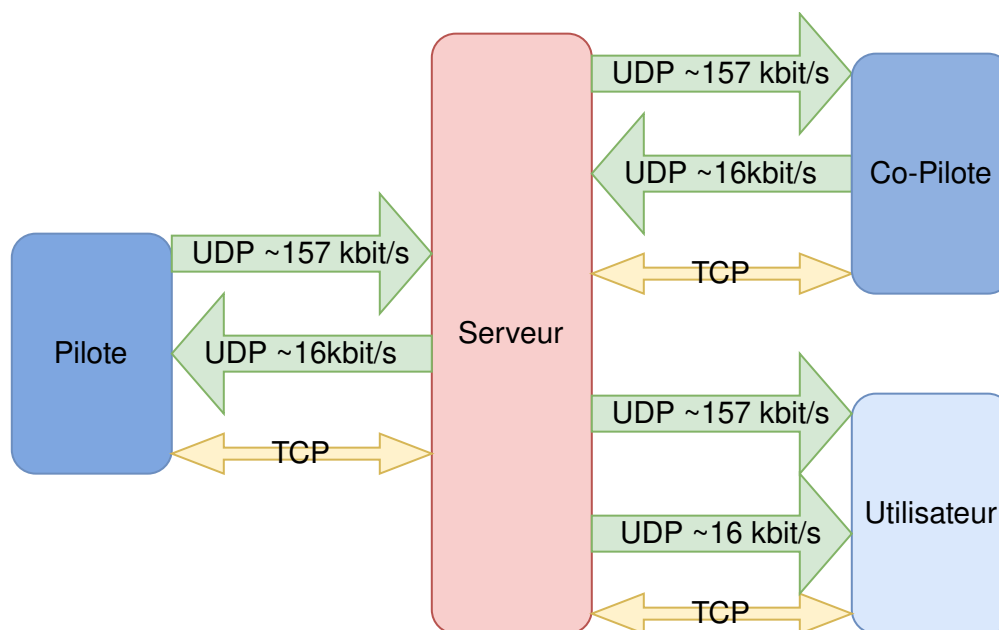


Figure 3.8 Données échangées entre le serveur et les utilisateurs, avatars compris

Le tableau 3.1 récapitule les différentes données envoyées et les tailles moyennes des messages correspondants. Les valeurs indiquées pour les messages envoyés en TCP correspondent aux tailles minimales et maximales de messages observées durant un vol, la taille du message peut potentiellement être plus grande. Les messages envoyés par TCP peuvent potentiellement être envoyés à chaque frame, leur taille généralement faible ne causant pas de ralentissement du logiciel.

Tableau 3.1 Messages envoyés au serveur par les utilisateurs

Protocole	Données	Provenance	Taille typique	Fréquence d'envoi
UDP	RD changeant rapidement	pilote	2155 octets	9 messages/s
	RD changeant lentement	pilote	1253 octets	12 messages/min
	RD de l'avatar du copilote	copilote	227 octets	9 messages/s
TCP	Commandes et autres RD	tous les util.	6 à 115 octets	ponctuel

3.2 Tests de performance

Pour évaluer les performances de notre EVR nous avons mesuré son impact sur les données suivantes :

- la charge ajoutée au CPU de l'ordinateur du pilote aux commandes ;
- la charge ajoutée au GPU de l'ordinateur du pilote aux commandes ;
- la latence du réseau entre le serveur et un utilisateur ;
- la charge du réseau au niveau du serveur.

Ces mesures nous renseignent sur les deux principales sources possibles de latence dans notre environnement : une latence due à une surcharge de l'ordinateur qui doit gérer la simulation et une latence due à une surcharge du réseau. La première se traduit par des ralentissements de l'environnement et des interactions de l'utilisateur. La deuxième, par des délais dans la transmission des informations d'un utilisateur à l'autre.

Les mesures sur les processeurs ont été effectuées pour une utilisation d'X-Plane sans nos extensions, puis pour une utilisation en réseau avec nos extensions. De même, la latence du réseau a été mesurée d'abord avant qu'une connexion ne soit établie entre les utilisateurs et le serveur, puis elle a été mesurée pendant une utilisation en réseau du simulateur.

De plus, les mesures de latence et de charge du réseau ont été effectuées dans une configuration locale et dans une configuration distante. La configuration locale correspond à une situation où le serveur et les utilisateurs sont tous connectés au même réseau ; en l'occurrence un WiFi universitaire. Dans la configuration distante, le serveur se trouvait à une distance de 2,5km des utilisateurs et était connecté à un réseau domestique.

Les mesures ont été effectuées lors de vols courts (environ 5 minutes) dans le simulateur. Les charges des processeurs ont été obtenues avec l'analyseur de performances de Windows. La latence a été mesurée par des ping successifs du serveur à l'utilisateur lors du vol. La charge du réseau a été obtenue avec l'application Wireshark.

Ces données sont présentées à la section 4.1.

3.3 Description de l'expérience

Le but de l'expérience est d'évaluer l'effet des avatars dans notre environnement sur la collaboration entre les deux membres d'équipage. Pour ce faire, des pilotes professionnels ont participé à deux scénarios de vol réalistes en compagnie d'un membre de l'équipe de recherche, une fois avec les avatars et l'autre fois sans les avatars. Cette expérience a obtenu l'autorisation du Comité d'éthique de la recherche de Polytechnique Montréal (CER-2122-

34-D).

3.3.1 Scénarios de vol

Les deux scénarios de vol utilisés consistent en un décollage depuis l'Aéroport international Pierre-Elliott-Trudeau de Montréal (YUL) en direction de l'Aéroport international Pearson de Toronto (YYZ). Il s'agit d'un vol court relativement commun pour des pilotes basés à Montréal. Le vol débute lors de la phase de roulage (*taxiing*) de l'avion et se termine vers la fin de la phase d'ascension.



Figure 3.9 L'itinéraire du vol CYUL - CYYZ

Deux spécialistes en aviation ont validé le déroulement des scénarios et les communications entre les membres d'équipage. Le premier est un capitaine d'avion avec plus de 10 000 heures de vol sur plusieurs modèles, dont le Boeing 737-800 et l'Airbus A330. Le second est un spécialiste des facteurs humains en aviation avec plus de 10 ans d'expérience professionnelle dans le domaine.

Modèle d'avion

Pour cette expérience, nous utilisons le modèle d'avion Boeing 737-800. Ce choix s'appuie sur deux éléments. Tout d'abord, il s'agit d'un avion relativement commun pour les vols de ligne, ce qui facilite la recherche de pilotes expérimentés capables de participer à l'expérience. Ensuite, comme il s'agit d'un avion de ligne récent, il possède un cockpit avec des écrans de vol, un gestionnaire de plan de vol (*Flight Management System* ou FMS) et un système d'autopilotage. Cette automatisation requiert des interactions continues entre les deux pilotes.

Le modèle du Boeing 737-800 pour X-Plane est fourni gratuitement par l'utilisateur zibo sur les forums en ligne d'X-Plane.⁵ Il s'agit d'une version améliorée du modèle inclus de base dans le simulateur, qui augmente les interactions possibles avec des éléments du cockpit et leur réalisme. Nous utilisons également les extensions gratuites suivantes :

- TerrainRadar⁶ permet d'améliorer l'affichage des radars dans le cockpit ;
- AviTab⁷ ajoute à l'intérieur du cockpit une tablette, posée à côté de chaque pilote, qui permet d'effectuer certains réglages et de consulter des procédures ou des cartes. (voir figure 3.10)

Rôles

Le participant joue le rôle du pilote et le rôle du copilote est endossé par un membre de l'équipe de recherche. Ce membre de l'équipe de recherche, ou complice, a également pour fonction de commettre volontairement des erreurs pour obtenir une réaction du pilote. Il agit donc comme un acteur suivant le scénario de vol comme un script.

Par ailleurs, le scénario comporte un certain nombre de communications radio avec l'aéroport. Ces communications sont effectuées par le copilote et les réponses sont données par un autre membre de l'équipe de recherche, qui n'est pas présent dans la simulation. Le script suivi pour les communications radio est fourni à l'annexe E.

Erreurs du complice

Les erreurs commises par le copilote peuvent être séparées en deux catégories : les erreurs mineures et les erreurs majeures. Les erreurs mineures ont un impact assez faible sur le

5. <https://forums.x-plane.org/index.php?/forums/topic/138974-b737-800x-zibo-mod-info-installation-download-links/>

6. <https://forums.x-plane.org/index.php?/files/file/37864-terrain-radar-vertical-situation-display/>

7. <https://forums.x-plane.org/index.php?/files/file/44825-avitab-vr-compatible-tablet-with-pdf-viewer-moving-maps-and-more/>



Figure 3.10 La tablette AviTab affichant une procédure normale

déroulement du vol et peuvent être corrigées après avoir été commises. Les erreurs majeures peuvent être irréversibles ou avoir des conséquences dramatiques sur la suite du vol, elles doivent être détectées avant qu'elles ne soient commises pour pouvoir être évitées.

Le complice effectue deux erreurs mineures par scénario et une erreur majeure. L'erreur majeure marque la fin du vol, qu'elle soit empêchée ou non. Chaque scénario comporte des erreurs différentes, il y a donc au total quatre erreurs mineures et deux erreurs majeures.

Les erreurs mineures sont les suivantes :

- L'entrée de la mauvaise fréquence pour contacter le sol.
- L'entrée de la mauvaise fréquence pour contacter les départs.
- La modification de la vitesse de l'avion au lieu du cap, après que la tour de contrôle ait demandé de modifier le cap.
- L'entrée de la mauvaise altitude, après que la tour de contrôle ait demandé un changement de l'altitude de croisière.

Les deux erreurs dans l'entrée de la fréquence radio entraînent un échec lors de la tentative de communication radio. Cela se traduit par l'absence de réponse de la part du membre de l'équipe de recherche jouant le rôle de l'interlocuteur. La manipulation des fréquences radio est effectuée par le copilote sur une partie du cockpit peu surveillée par le pilote. Par ailleurs,

l'erreur ne devient évidente que lors de la tentative de communication avec l'aéroport et non lorsque la fréquence est entrée. On ne s'attend donc pas à ce que la présence d'un avatar permette d'accélérer la réaction du pilote. Les figures 3.11 et 3.12 montrent l'apparence et l'emplacement dans le cockpit des manipulateurs de fréquence radio.



Figure 3.11 Un manipulateur de fréquence radio



Figure 3.12 Le bas du cockpit, l'emplacement du manipulateur de fréquences radio du copilote est mis en évidence

Les commandes à manipuler pour modifier la vitesse, l'altitude et le cap de l'avion se trouvent sur le tableau de bord à un endroit bien visible par les deux pilotes. Ces manipulations consistent en fait à régler les paramètres de l'autopilote lorsque celui-ci est enclenché. Ici, on s'attend à ce que la présence des avatars ait un impact sur les réactions du participant aux erreurs du copilote. La figure 3.13 montre l'emplacement des trois manipulateurs en question dans le cockpit.

Les erreurs majeures sont toutes les deux commises à la suite d'une panne d'un système critique de l'avion. Dans un cas il s'agit de la perte d'une des deux génératrices électriques déclenchant le message de panne DRIVE, dans l'autre il s'agit de la perte d'un des deux systèmes hydrauliques déclenchant le message de panne FLIGHT CONTROL LOW PRESSURE. La résolution de ces deux pannes implique d'activer un interrupteur situé sur le tableau supérieur. Dans les deux cas, cet interrupteur est recouvert d'un capuchon de protection et se trouve à côté d'un autre interrupteur similaire. L'interrupteur à actionner est signalé par un voyant lumineux. Avant de l'activer, le copilote pointe l'interrupteur et demande au pilote de confirmer la bonne présélection. Demander la confirmation est une procédure standard en vol dans ce genre de situation afin de prévenir l'activation du mauvais interrupteur. Dans cette expérience, l'erreur consiste, pour le copilote, à pointer le mauvais interrupteur et le pilote doit identifier la mauvaise sélection. Ici également, on s'attend à ce que la présence d'avatars ait un impact sur les temps de réaction des pilotes. Les figures 3.14, 3.15 et 3.16



Figure 3.13 L'avant du cockpit, l'emplacement des manipulateurs de vitesse, cap et altitude (de gauche à droite) est mis en évidence.

montrent l'apparence et l'emplacement des interrupteurs liés aux erreurs majeures.



Figure 3.14 L'interrupteur à activer lors de la panne 'FLIGHT CONTROL LOW PRESSURE'



Figure 3.15 L'interrupteur à activer lors de la panne 'DRIVE'



Figure 3.16 La partie haute du cockpit indiquant l'emplacement des interrupteurs utilisés pour les pannes 'FLIGHT CONTROL LOW PRESSURE' et 'DRIVE'

Les erreurs composant les deux scénarios sont présentées dans le tableau 3.2. Il est important de noter que les deux scénarios ont le même niveau de complexité et de priorité des pannes, ce qui permettra de balancer l'ordre de présentation entre les participants.

Tableau 3.2 Erreurs des scénarios

	Scénario 1	Scénario 2
Erreur mineure 1	Mauvaise fréquence avec les départs	Mauvaise fréquence avec le sol
Erreur mineure 2	Modification de la vitesse au lieu du cap	Erreur dans la modification de l'altitude
Erreur majeure	Erreur suite à une panne du système électrique	Erreur suite à une panne du système hydraulique

Procédures

Lors d'un vol, les deux pilotes doivent suivre un certain nombre de procédures (*checklist*). Il s'agit de listes d'actions à accomplir par l'un ou l'autre pilote afin de configurer l'avion correctement et interagir avec divers éléments du poste de pilotage. À chaque phase du vol correspond une procédure dite « normale », alors qu'à chaque message de panne correspond une procédure dite « anormale ». La figure 3.10 comporte un extrait de procédure normale.

L'exécution de ces procédures est le moment où la collaboration entre les deux pilotes est la plus importante. En effet, le copilote a la responsabilité de lire la procédure et de l'exécuter, alors que le pilote aux commandes vérifie que chaque élément de la liste a bien été exécuté pour éviter des problèmes lors de la phase de vol considérée. Cette vérification peut se faire par le biais de communications verbales à la suite de l'exécution des actions. Cependant, dans certains cas, la vérification se fait de façon non verbale : par le regard du pilote sur les actions du copilote.

Les deux erreurs majeures que nous avons mentionnées plus haut se produisent lors de l'exécution de procédures anormales en réaction à des pannes, soit DRIVE pour la panne électrique ou FLIGHT CONTROL LOW PRESSURE pour la panne hydraulique. Les procédures impliquent une vérification visuelle par les deux pilotes de l'interrupteur sélectionné. Le pilote doit vérifier la position de la main du copilote posée sur l'interrupteur avant que celui-ci ne l'actionne. Les deux procédures sont fournies dans les figures 3.17 et 3.18.

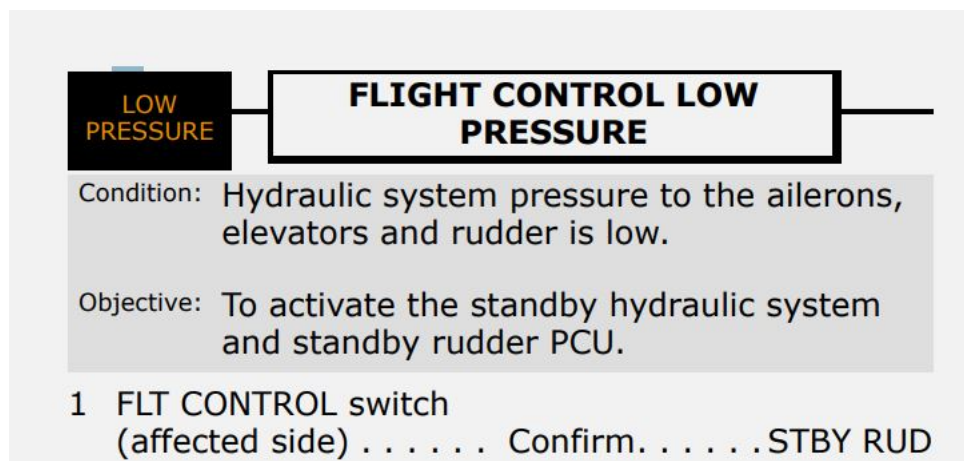


Figure 3.17 Procédure anormale pour la panne 'FLIGHT CONTROL LOW PRESSURE'

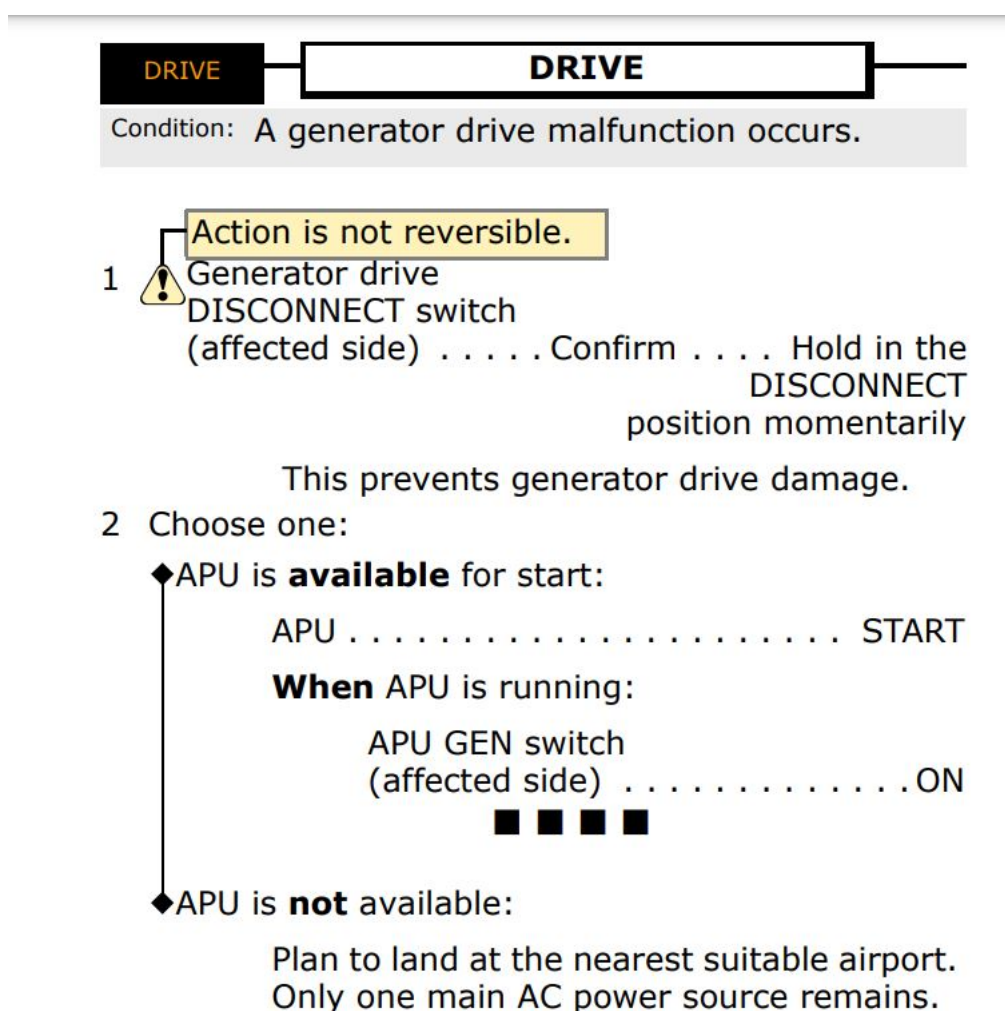


Figure 3.18 Procédure anormale pour la panne 'DRIVE'

Déroulement du vol

Le déroulement du vol pour les deux scénarios comporte les étapes suivantes :

- Arrivée dans le cockpit des pilotes. Les moteurs sont déjà allumés, l’avion est prêt à rouler. Les pilotes exécutent la procédure d’avant roulage et le copilote demande à la radio l’autorisation de rouler.
- Phase de roulage. Le pilote conduit l’avion dans l’aéroport jusqu’au bout de la piste. Les pilotes exécutent la procédure d’avant décollage. Le copilote demande à la radio l’autorisation de décoller.
- Décollage. Le pilote effectue le décollage et pilote l’avion manuellement jusqu’à l’enclenchement de l’autopilote par le copilote.
- Ascension. L’avion monte par paliers jusqu’à l’altitude de croisière. Les pilotes effectuent la procédure d’après décollage. Le copilote demande l’autorisation de monter au palier suivant. La radio demande aux pilotes d’effectuer un changement soit de cap, soit d’altitude.
- Avant d’atteindre l’altitude de croisière, une panne survient. Après sa résolution, le vol se termine.

Au total l’exécution d’un scénario dure entre 30 et 40 minutes. Les erreurs de fréquence se produisent soit durant la phase de roulage, soit juste après le décollage.

3.3.2 Matériel utilisé

Ordinateurs

L’expérience utilisait trois ordinateurs. Deux ordinateurs étaient utilisés pour faire fonctionner les instances de X-Plane et le visiocasque RV de chaque pilote. Un autre ordinateur était utilisé pour héberger le serveur. Les ordinateurs étaient tous connectés via le WiFi de l’École Polytechnique de Montréal. Les spécifications techniques de chaque ordinateur sont fournies dans le tableau 3.3. Tous les ordinateurs utilisaient Windows 10 Entreprise.

Tableau 3.3 Les spécifications techniques des ordinateurs utilisés

Ordinateur	CPU	GPU	RAM	Carte réseau
Pilote	Intel Core i7-10700KF	NVIDIA GeForce RTX 3070	32GB	Realtek 8821CE
Copilote	Intel Core i9-9000K	NVIDIA GeForce RTX 2080 SUPER	64GB	Intel AC-9560
Serveur	Intel Core i5-7500	NVIDIA GeForce GTX 1070	16GB	Intel I219-LM

Matériel RV

Le visiocasque utilisé pour l'expérience est un HTC Vive Pro Eye (voir figure 3.19). Il possède un écran dual OLED avec une diagonale de 3,5 pouces possédant une résolution de 1440 x 1600 pixels par œil, un taux de rafraîchissement de 90 Hz et un champ de vision de 110 degrés. Le visiocasque est muni d'un système audio amovible composé d'écouteurs à haute résolution. Il possède une sangle se plaçant au-dessus de la tête et la possibilité d'ajuster la position des lentilles pour permettre d'accommoder la plupart des utilisateurs, résultant en une utilisation plus confortable. Nous avons deux visiocasques, un pour chaque pilote.



Figure 3.19 Le HTC Vive Pro Eye avec ses contrôleurs

Les participants utilisaient les contrôleurs *HTC Vive Controller* fournis avec le casque pour interagir avec l'environnement. En plus de ces contrôleurs, le PC utilisait des pédales physiques pour diriger l'avion lors de la phase de roulage. Les pédales utilisées sont les Saitek Pro Flight Rudder Pedals (voir figure 3.20).

Organisation de l'expérience

Lors de l'expérience, le participant et les deux membres de l'équipe de recherche se trouvaient dans la même pièce. Pour éviter une influence de cette proximité réelle sur les communications entre le participant et le copilote dans l'environnement virtuel, les pilotes étaient installés dans des positions physiques différentes de celles occupées dans l'environnement virtuel.



Figure 3.20 Les pédales utilisées pour l'expérience

De plus, grâce aux écouteurs du visiocasque, les participants ne pouvaient pas entendre de bruits extérieurs à l'environnement. Les communications étaient effectuées via les micros des visiocasques et un système de transmission vocale. Le système de transmission vocale utilisé est Discord, un service largement utilisé pour les communications dans des jeux en réseau.

Cette disposition a permis de reproduire les conditions d'un EVR immersif car les pilotes ne pouvaient échanger entre eux que par le microphone, tout en permettant à l'expérimentateur d'intervenir rapidement avec les participants en cas de difficultés liées à l'utilisation du visiocasque.

3.3.3 Plan expérimental

Participants

Deux participants ont pris part à l'expérience. Il s'agit de deux pilotes ayant réalisé plus de 1000 heures de vol et qui sont qualifiés à piloter le Boeing 737-800. Ils ont aussi une expérience avec d'autres modèles d'avion (ex. Airbus 320). Les participants sont également familiers avec les études en facteurs humains en simulateur de vol. Aucun participant n'avait eu d'expérience préalable en RV.

Un plan de vol généré sur le site `simbrief.com` et contenant les informations nécessaires pour les pilotes leur a été fourni avant l'expérience. Le plan de vol est fourni à l'annexe F.

Variable indépendante

L'expérience a une variable indépendante, soit la présence des avatars des pilotes. Chaque participant effectue deux vols, l'un avec des avatars et l'un sans. Par ailleurs, chaque vol se déroule selon l'un des deux scénarios détaillés dans la section scénario de vol. L'ordre de présentation des avatars et des scénarios est balancé entre les participants afin d'éviter un effet d'apprentissage (voir Tableau 3.4).

Tableau 3.4 Ordre de présentation des conditions expérimentales

	Vol 1		Vol 2	
	Avatars	Scénario	Avatars	Scénario
Participant 1	Sans	Scénario 1	Avec	Scénario 2
Participant 2	Avec	Scénario 1	Sans	Scénario 2

Variabes dépendantes

Les variables dépendantes mesurées durant l'expérience portaient sur le sentiment de présence, la charge cognitive et la communication non verbale.

Questionnaires de présence et de charge cognitive

L'évaluation du sentiment de présence et de la charge cognitive se fait grâce à des questionnaires. En effet, comme décrit dans notre revue de littérature, il s'agit d'une méthode non invasive facilement applicable à tous les environnements virtuels.

Pour la charge cognitive, le questionnaire utilisé est le NASA-TLX [17]. Il s'agit d'un questionnaire subjectif largement utilisé pour mesurer la charge cognitive. Il mesure six critères différents : la charge mentale, la charge physique, la charge temporelle, le niveau d'effort, le niveau de frustration et la performance perçue. Par ailleurs, chacun de ces critères est affecté d'un poids déterminé par une série de comparaisons entre ces différents critères. Le participant effectue ces comparaisons lorsqu'il remplit le questionnaire après le premier vol. On garde ensuite les mêmes poids pour le second questionnaire.

Pour le sentiment de présence, il s'agit du questionnaire Slater-Usuh-Steed [18]. Ce questionnaire évalue le sentiment de présence en fonction de six critères auxquels le participant doit attribuer une valeur de 1 à 7. Nous avons fait le choix d'utiliser un questionnaire de présence

général et non spécifique à la collaboration pour mesurer les changements dans le sentiment de présence global du participant. Nous reviendrons dans la discussion sur la pertinence de ce choix.

Les participants ont répondu aux questionnaires à la fin de chaque scénario de vol. Les deux questionnaires sont fournis aux annexes G et H.

Communication non verbale

Nous utilisons les réactions du pilote aux erreurs du complice pour évaluer la communication non verbale et la collaboration entre les pilotes. En effet, une partie de la communication non verbale entre membres d'équipage passe par la vérification des actions de l'autre pilote. Nous mesurons donc les temps de réaction du participant aux erreurs de son copilote comme indicateur de non verbalité entre les membres d'équipage. Un temps de détection plus rapide indique une plus grande facilité à surveiller les actions du copilote, donc une plus grande capacité pour les deux pilotes à communiquer non verbalement.

Par ailleurs, nous avons relevé dans la revue de littérature que l'étude de Stein et al. [4] trouvait que la phase la plus discriminante est la phase de vol 'en route'. Cette phase n'est pas incluse dans notre scénario. Cela est dû au fait que l'utilisation d'erreurs déclenchées par un complice risque de provoquer trop de variations dans le déroulement des vols. Les mesures objectives telles que la déviation par rapport à une trajectoire sont donc difficilement compatibles avec notre expérience. La détection des erreurs sert donc également d'indicateur de performance des pilotes. La détection et la prévention des erreurs indiquant une plus grande capacité à être performant dans l'environnement proposé.

CHAPITRE 4 RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Cette section présente les principaux résultats obtenus pour valider notre EVR. Ces résultats sont séparés en deux catégories : les performances de l’environnement (présentées à la section 3.2) et l’expérience avec les pilotes (décrite à la section 3.3). La présentation des résultats est suivie de leur discussion.

4.1 Tests de performance de l’environnement

4.1.1 Résultats

Les résultats des tests de performance de l’EVR sont présentés dans le tableau 4.1. Les charges des processeurs sont exprimées en pourcentages des charges maximales. La latence est exprimée en millisecondes et correspond à la durée d’un ping du serveur à l’utilisateur, c’est-à-dire la durée d’un trajet aller-retour entre les deux. La charge du réseau est exprimée en kbit/s.

Tableau 4.1 Performances de l’environnement proposé

		CPU	GPU	Latence			Réseau
				min	moy.	max	
Local	Non connecté	43%	36%	1ms	2ms	7ms	N/A
	Connecté	86%	35%	1ms	3ms	11ms	354kbit/s
Distant	Non connecté	43%	36%	10ms	65ms	142ms	N/A
	Connecté	87%	37%	16ms	64ms	136ms	358kbit/s

4.1.2 Discussion

On constate que l’utilisation de l’environnement double la charge du CPU par rapport à une utilisation normale d’X-Plane. La charge du GPU n’est cependant pas affectée. Cette disparité provient de l’implémentation de l’environnement qui ne fait pas appel au GPU. On peut expliquer cette augmentation de la charge par le fait que X-Plane s’appuie essentiellement sur le CPU pour toutes les opérations liées au modèle d’avion.¹ Notre environnement demande la vérification constante des valeurs de certains RD et la lecture et l’écriture très fréquentes

1. <https://developer.x-plane.com/2017/05/three-performance-optimizations-for-x-plane-11-02/>

d'autres RD. Toutes ces opérations sont effectuées par X-plane sur un seul fil de programmation sur le CPU. A cela s'ajoute la gestion de quatre fils de programmation supplémentaires pour l'envoi et la réception de messages.

La charge observée pour le CPU est relativement élevée et pourrait engendrer des ralentissements du simulateur. La performance du CPU semble donc être un facteur limitant pour notre environnement. Pour réduire cette charge, on pourrait réduire la fréquence à laquelle les messages sont envoyés, ce qui réduirait le nombre de lectures et écritures de grands nombres de RD par X-Plane. On pourrait également réduire la liste de RD surveillés. Cependant, ces deux solutions pourraient causer des décohérences.

Par ailleurs, les charges des processeurs ne semblent pas être affectées par la distance à laquelle se trouve le serveur. C'est un résultat attendu puisque la distance entre utilisateurs n'influence ni le nombre de RD à surveiller, à envoyer ou à écrire, ni le nombre de fils d'exécution à gérer. Les résultats ne montrent pas non plus d'effet important de la distance sur la charge du réseau.

La latence observée dans la configuration locale correspond à la durée d'un aller-retour entre deux ordinateurs connectés au même réseau universitaire. Dans la configuration à distance, elle correspond à un aller-retour entre deux ordinateurs connectés à des réseaux différents, avec le client connecté à un réseau universitaire, et le serveur situé sur un réseau domestique à une heure de forte utilisation (milieu de soirée). La distance entre les réseaux, et le fait d'utiliser un réseau domestique fortement utilisé contribuent tous deux à augmenter la latence. À une heure de moins forte utilisation du réseau, on aurait normalement observé une différence moins importante entre les latences.

Notre serveur n'effectue aucun traitement des données, il les redirige simplement vers les autres clients dès leur réception. La latence ajoutée par le serveur est donc négligeable, et le principal contributeur à la latence dans notre environnement sera l'état du réseau entre le serveur et les clients. C'est pourquoi on peut considérer que le ping est représentatif de la latence réelle subie par les utilisateurs dans notre environnement.

L'utilisation de l'environnement ne semble pas avoir d'impact sur la latence du réseau. Ce résultat est cohérent avec les valeurs obtenues pour la charge du réseau. Le débit typique d'un réseau domestique internet haut débit est de l'ordre de la dizaine de Mbit/s. La charge représentée par notre environnement est donc extrêmement faible et n'est pas en mesure de surcharger le réseau ou de le ralentir. La surcharge du réseau ne semble donc pas être un facteur limitant pour les performances de notre environnement.

Ces résultats sont obtenus pour deux clients connectés au serveur. Le débit de données

envoyées augmentera avec le nombre d'utilisateurs puisque cela augmentera le nombre de destinataires des messages redirigés. En se basant sur les chiffres obtenus dans ce tableau, on devrait atteindre un débit de l'ordre du Mbit/s à partir de 6 utilisateurs, et de la dizaine de Mbit/s au-delà de 55 utilisateurs. Un débit de l'ordre de la dizaine de Mbit/s reste acceptable pour un réseau universitaire ou professionnel.

4.2 Expérience avec les pilotes

Les principaux résultats des tests de facteurs humains avec les pilotes dans le simulateur portent sur la détection des erreurs faites par le copilote, le sentiment de présence et la charge cognitive.

4.2.1 Détection des erreurs

Le tableau 4.2 présente les temps de détection des erreurs du copilote par les participants. On rappelle également quels vols impliquaient la présence d'avatars, pour une lecture plus aisée.

Tableau 4.2 Temps de détection des erreurs du copilote par les participants

Participant	1		2	
Vol	1	2	1	2
Avatars	Sans	Avec	Avec	Sans
Erreur fréquence	Non Détectée	Non Détectée	Non Détectée	Non Détectée
Erreur autopilote	5s	15s	N/A	N/A
Erreur majeure	7s	Non Détectée	2s	15s

Erreurs d'entrée de fréquence radio

Dans tous les cas, les erreurs d'entrée de fréquence radio n'ont pas été détectées par les participants. Lors de l'entrée de la mauvaise fréquence, aucun participant n'a porté son regard vers le cadran de la fréquence radio. Lors de la tentative de communication radio, l'absence de réponse n'a pas été relevée par les participants. Même après que le copilote complice ait attiré verbalement l'attention du pilote sur l'absence de réponse de la radio, il n'y a pas eu de vérification visuelle de la réponse. On expliquera dans la discussion nos interprétations de ce résultat.

Erreurs de réglage de l'autopilote

Ces erreurs n'ont pu être détectées que par un seul participant. En effet, lors du déroulement du scénario, un des participants a pris de vitesse le copilote et a procédé lui-même à l'entrée des valeurs. Puis lors du deuxième vol, il a enclenché le mode de l'autopilote qui gère la vitesse et le cap automatiquement, empêchant le copilote de les modifier et donc de commettre l'erreur. Nous avons marqué ces temps comme N/A.

Erreurs majeures

Le temps de détection de l'erreur finale est mesuré à partir du moment où le copilote demande la confirmation au pilote et jusqu'à ce que le pilote lui demande de changer d'interrupteur. L'erreur a été détectée dans tous les cas, sauf durant l'un des vols de l'un des participants (indiquée par Non Détecté). Dans ce cas, le participant n'a pas détecté l'erreur même après que la gaine de sûreté ait été soulevée par le copilote.

4.2.2 Présence et Charge cognitive

Questionnaire de présence

Les résultats du questionnaire de présence sont donnés dans le tableau 4.3. Un score plus élevé traduit un sentiment de présence plus fort.

Tableau 4.3 Scores au questionnaire SUS

Participant	1		2	
	1	2	1	2
Avatars	Sans	Avec	Avec	Sans
Score (1 à 7)	3.83	4.33	7	7

L'un des participants a attribué le score maximal à tous les critères du questionnaire et ce pour les deux vols.

Questionnaire de charge cognitive

Les résultats du questionnaire de charge cognitive sont donnés dans le tableau 4.4. Les résultats sont les moyennes pondérées des scores attribués à chaque critère. La méthode de pondération est brièvement décrite à la section 3.3.3. Un score plus élevé traduit une charge cognitive plus élevée pour le participant.

Tableau 4.4 Scores au questionnaire NASA-TLX

Participant	1		2	
	1	2	1	2
Vol				
Avatars	Sans	Avec	Avec	Sans
Score (sur 100)	61.43	27.86	53.33	30.00

4.3 Discussion des résultats

4.3.1 Détection des erreurs

Erreurs d'entrée de fréquence radio

L'absence de détection des erreurs de fréquence est cohérente avec nos attentes. Les avatars n'ont eu aucun impact sur ces erreurs. Puisqu'il s'agit d'erreurs très mineures et relativement courantes, les pilotes ont laissé le complice résoudre tout seul l'erreur sans la relever. Par ailleurs, ces erreurs intervenaient soit lors de la phase de roulage, soit lors de la phase d'ascension initiale. Lors de ces deux phases l'attention du pilote se porte principalement sur ses commandes pour assurer la trajectoire de l'avion. Il n'est donc pas surprenant que ces erreurs n'aient pas été détectées.

Erreurs de réglage de l'autopilote

Pour le participant ayant été soumis à ces erreurs, les temps de réaction ne montrent aucun avantage des avatars. Au contraire, lors du vol avec des avatars la détection d'erreur a été environ trois fois plus lente. Ce fait contre-intuitif peut s'expliquer par une non-équivalence des deux erreurs employées. L'erreur du vol 1 était l'entrée d'une vitesse au lieu d'un cap, alors que celle du vol 2 correspondait à une erreur dans l'entrée de l'altitude à atteindre. Les erreurs se produisent donc à des endroits physiquement très proches et visuellement similaires, mais elles sont de natures différentes. Ce résultat pourrait donc plutôt indiquer qu'une erreur dans le choix de la valeur à manipuler est plus rapidement détectable qu'une erreur dans la valeur entrée.

Qui plus est, la relative difficulté à manipuler certains boutons avec les contrôleurs RV entraînait une imprécision non prévue par le scénario lors de certaines manipulations, ce qui a pu augmenter le seuil de tolérance de certains participants à l'égard d'erreurs de ce type. Il n'est donc somme toute pas surprenant de constater une telle différence dans les temps de réaction aux erreurs.

Erreurs majeures

Pour le Participant 1, l'absence de détection de l'erreur majeure lors du vol avec avatars est difficile à expliquer. Un facteur d'explication est que, dans l'erreur du scénario de vol 2, les interrupteurs se trouvent juste au-dessus de la tête du pilote. Le complice doit alors tendre sa main le plus loin possible et il lui est plus difficile d'être précis dans le positionnement de sa main sur l'interrupteur. L'angle de vue du pilote, situé juste en dessous, rend également plus difficile la compréhension de la position exacte de la main.

Cependant, même après que le complice ait soulevé la protection du mauvais interrupteur et donc qu'il ait levé toute ambiguïté sur la position exacte de sa main, le participant n'a pas détecté l'erreur. On peut donc postuler soit une inattention, soit une mauvaise compréhension de la procédure.

Pour le Participant 2, les temps de réaction semblent indiquer un rôle positif des avatars pour la détection d'erreurs. Par ailleurs, le participant a manifesté des difficultés à localiser les interrupteurs en question lors du vol 2. En effet, sans avatars pour indiquer leur position, la communication strictement verbale entre les pilotes s'est montrée relativement inefficace pour lui permettre de trouver les interrupteurs. Cette réaction se rapproche de l'étude de Lachter et ses collègues [11], présentée à la section 2.4.1, dans laquelle ils relevaient des situations de confusion dans des vols où le copilote se trouvait à distance.

Performance des pilotes

Sur les quatre vols que comportait l'expérience, trois ont été menés à bon terme, c'est-à-dire sans qu'une erreur majeure se produise. Par ailleurs, les erreurs mineures concernant le réglage de l'autopilote ont toujours été détectées lorsqu'elles se sont produites. Les pilotes ont donc été, dans la majorité des cas, capables d'assurer un vol dans l'environnement proposé sans que leurs performances s'en trouvent affectées de façon importante.

4.3.2 Présence et Charge cognitive

Questionnaire de présence

La forte différence entre les scores attribués par les participants est due au fait que l'évaluation de la présence par un questionnaire reflète le ressenti subjectif des participants. Cette différence pourrait s'expliquer par une compréhension différente des questions, ou de l'échelle fournie, par des attentes différentes par rapport à l'environnement, ou même par une volonté d'être généreux avec les expérimentateurs, ou au contraire de se montrer critique envers l'en-

vironnement proposé. L'intérêt principal du questionnaire repose plutôt sur la comparaison des scores d'un même participant dans des environnements virtuels différents.

Les scores du Participant 1 semblent montrer un effet positif des avatars sur le sentiment de présence. Cette amélioration a été perçue par le participant sur trois critères différents :

- La sensation, lors de l'expérience, que le cockpit représentait la réalité pour le participant.
- L'impression d'être à l'intérieur du cockpit plutôt que dans la salle d'expérimentation.
- La « structure en mémoire » du souvenir d'être à l'intérieur du cockpit.

Le Participant 2 a répondu avec la valeur maximale à tous les critères après chaque vol. Ses scores ne montrent donc pas d'effet des avatars sur son sentiment de présence. Il faut cependant se garder de les interpréter comme une absence d'effet des avatars. L'attribution du score maximal à l'environnement semble plutôt signifier qu'une limite subjective de sensibilité au questionnaire de présence a été atteinte par l'environnement, indépendamment de la présence d'avatars.

Dans les deux cas, les scores sont au-dessus de la moyenne, ce qui semble indiquer de bonnes performances de l'environnement virtuel proposé. Notre contribution concernant principalement la collaboration avec le copilote, il faut noter qu'une partie de cette performance est certainement due à la qualité de l'environnement proposé par X-Plane, en particulier le réalisme du rendu graphique, de la simulation et des interactions.

Questionnaire de charge cognitive

Les scores relatifs à la charge cognitive montrent une importante diminution de la charge cognitive lors du deuxième vol pour les deux participants. Cela semble indiquer que, plus que les avatars, c'est la familiarité avec l'environnement qui cause cette diminution de la charge cognitive. Et que c'est la découverte de l'environnement, et du scénario, qui était le facteur principal contribuant à la charge cognitive des participants lors du premier vol.

4.3.3 Commentaires des participants

À l'issue de l'expérience, les participants étaient invités à donner oralement leur appréciation subjective du prototype. Les deux participants ont formulé des commentaires similaires.

Tous les participants ont considéré leur expérience comme étant positive et ont remarqué la facilité avec laquelle ils étaient capables d'effectuer les actions requises pour piloter l'avion. Le réalisme de la simulation a également été remarqué par les deux participants. Enfin, la possibilité de voir l'autre pilote et de communiquer avec lui est apparue comme un point

positif pour les deux participants. Les deux pilotes ont, à l'issue des deux vols, considéré être capables d'effectuer un vol complet dans l'environnement.

Les participants ont toutefois relevé des points négatifs. Le manque de sensations du manche lors du décollage, donc l'absence de retour haptique, a posé problème à l'un des participants qui a considéré que cela participait à diminuer le réalisme de la simulation et que cela rendait la phase de décollage plus difficile à exécuter. De même, l'un des participants a trouvé que la manipulation de la barre franche lors de la phase de roulage demandait plus d'attention que dans la réalité, ce qui empêchait de surveiller le reste du cockpit. Enfin, tous les participants ont noté la difficulté à manipuler certains boutons avec les contrôleurs, ce qui entraînait des pertes de temps ou des imprécisions.

Enfin, les deux participants ont souligné l'intérêt qu'un système de ce genre pourrait avoir dans le cadre de la formation des pilotes. Ils ont tous les deux manifesté leur intérêt à voir des systèmes de RV collaborative développés pour l'apprentissage et la formation.

CHAPITRE 5 CONCLUSION

Cette section conclut notre mémoire en revenant d’abord sur nos objectifs et nos hypothèses définis à la section 2.7. Ensuite, nous reviendrons sur notre méthodologie pour en montrer les limites. Enfin, nous concluons en détaillant les perspectives de recherche ouvertes par notre étude.

5.1 Hypothèses et objectifs de recherche

5.1.1 Objectifs de recherche

Pour atteindre notre but, nous avons conçu un cockpit en RV basé sur X-Plane auquel nous avons intégré des avatars animés des pilotes (O1). Nous avons également créé une architecture réseau pour permettre la collaboration de deux pilotes au sein d’un même cockpit (O2). Puis nous avons élaboré un protocole expérimental nous permettant d’évaluer l’environnement sur les différents points voulus (O3). Enfin, nous avons conduit une évaluation de notre environnement virtuel avec des pilotes professionnels (O4). Nous avons donc rempli tous les objectifs de recherche que nous avions fixés.

5.1.2 Hypothèses de recherche

H1

Les participants ont été dans la majorité des cas capables de terminer leur vol sans problème majeur et les procédures et communications ont toutes été menées à terme sans difficulté. Par ailleurs, les participants qui sont des pilotes expérimentés ont considéré que l’environnement leur avait permis de voler de façon normale, malgré quelques réserves sur des points précis. Si ces résultats vont dans le sens de l’hypothèse H1, le nombre réduit de participants ne nous permet pas de la confirmer.

H2

Les réponses des participants à notre questionnaire de présence semblent indiquer un effet positif de la présence d’avatars sur le sentiment de présence des pilotes. Cependant, ce résultat se base sur l’étude d’un seul participant, les résultats du deuxième participant ne permettant pas de conclure à un effet, ou à une absence d’effet des avatars. Il ne nous semble donc pas possible de confirmer ou d’infirmer l’hypothèse H2 avec nos résultats.

H3

La mesure de la charge cognitive des participants a révélé une influence beaucoup plus forte de l'ordre dans lequel les vols ont été effectués par rapport à la présence d'avatars. À cause de cette interférence, il nous est impossible de confirmer ou d'infirmer l'hypothèse H3.

H4

La mesure des temps de réaction des participants semble indiquer une légère amélioration de la détection des erreurs avec la présence d'avatars. Par ailleurs, lors du déroulement de l'expérience, on a constaté l'apparition de communications non verbales qui n'étaient pas prévues dans le scénario, uniquement dans les vols avec avatars. Au contraire, lors des vols sans avatar, on a constaté des difficultés à communiquer sur l'emplacement de certaines commandes. Si ces résultats vont dans le sens de l'hypothèse H4, le nombre réduit de participants ne nous permet pas de la confirmer.

5.1.3 But du projet

Les résultats de nos expériences indiquent que notre environnement est adapté à la tenue d'expériences impliquant des pilotes professionnels dans des situations de vol réalistes. Par ailleurs, l'expérience et les résultats obtenus dans le but d'évaluer les hypothèses H2, H3 et H4 indiquent que notre environnement permet d'étudier l'effet d'avatars sur des pilotes d'avion.

Le but de notre projet a donc été atteint : nous avons proposé un environnement de vol en réalité virtuelle et en réseau et nous y avons effectué une étude prospective avec deux pilotes professionnels. Les résultats de l'étude montrent que cet environnement est adapté à la tenue d'études futures permettant de répondre aux questions présentées à la section 2.6. Par ailleurs, la tenue de cette étude a permis de tirer des enseignements pour ces études futures que nous développons dans les sections suivantes.

5.2 Discussion de la méthodologie

Le déroulement des expériences nous a permis de porter un regard plus critique sur notre méthodologie. Nous allons développer ici les observations que nous en avons tirées et mettre en avant les limites de notre solution.

5.2.1 Discussion et limites de l'environnement

Durée de vol et cybermalaise

Aucun des participants n'a eu à se plaindre d'un cybermalaise ou d'un symptôme associé. De plus, il s'agissait d'un premier contact avec la RV immersive pour les participants. Cela pourrait indiquer que notre environnement est peu sujet au cybermalaise. En effet, le cockpit d'un avion étant un environnement relativement statique, les risques de décalage entre l'environnement virtuel et les perceptions physiques de l'utilisateur sont plus faibles.

On peut cependant nuancer cette observation, déjà par le faible nombre de participants, ensuite par le fait que les participants sont tous des pilotes d'avion de ligne, ce qui pourrait entraîner une certaine résistance naturelle ou acquise à des phénomènes proches du cybermalaise ; par exemple, le mal des transports.

Limites du développement dans X-Plane

Le développement du prototype comme une version modifiée de X-Plane a permis de tirer avantage de la qualité réaliste du rendu de la simulation. Cette qualité est certainement un facteur majeur dans le ressenti des participants et donc dans leurs réponses aux questionnaires.

Cependant, l'utilisation d'un logiciel de simulation aéronautique comme un moteur de jeu pour l'affichage d'avatars humanoïdes a également ses limites. X-Plane ne permet pas l'affichage et l'animation réaliste de modèles humains à l'intérieur du cockpit. Il est possible que l'apparence des avatars, tranchant avec le réalisme de la simulation, ait réduit leur impact sur les participants. Une étude voulant mesurer l'impact de la qualité des avatars, ou simplement implémenter des avatars plus avancés, devrait utiliser une méthode d'animation différente et peut-être se passer d'utiliser X-Plane pour l'affichage des avatars.

Limites du matériel utilisé

La résolution des visiocasques utilisés a été relevée par les deux participants comme étant un frein à l'immersion. En effet, certains affichages du cockpit pouvaient parfois être difficiles à lire sans s'approcher, par exemple l'écran de navigation et le gestionnaire de plan de vol, ce qui a pu gêner notamment pour la détection de certaines erreurs. L'utilisation de casques à la résolution plus élevée permettrait de résoudre ce problème.

De même, la difficulté d'utilisation de certaines parties de l'avion avec les contrôleurs RV a parfois posé problème. La manipulation de la barre franche pour conduire l'avion sur le sol

demandait une attention supérieure à la normale aux pilotes et les empêchait de surveiller le reste du cockpit lors du roulage. Par ailleurs, la manipulation de boutons tournants, tels que ceux utilisés pour le réglage des fréquences radio, de la vitesse, du cap ou de l'altitude, était particulièrement longue et imprécise.

Enfin, le manque de retours haptiques, lors de l'utilisation du manche notamment, a été évoqué comme un point pouvant réduire la sensation d'immersion. Une étude comparative utilisant différents contrôleurs pourrait mettre en évidence quels types de retours seraient pertinents à intégrer à un simulateur pour l'étude de facteurs humains.

5.2.2 Limites du protocole expérimental

Scénarios de vol

Le déroulement de l'expérience a montré que les scénarios de vol utilisés n'étaient pas parfaitement équivalents. En particulier, les erreurs mineures concernant les réglages de l'autopilote (cap, vitesse et altitude), pourraient avoir été trop différentes dans leur nature pour pouvoir être comparées. Une exploration plus poussée des réactions des pilotes à des erreurs d'un membre d'équipage pourrait s'intéresser à différencier ces erreurs et à dégager des temps de réaction typiques dans un environnement donné. Cette base permettrait la conception de scénarios mieux balancés.

Mesures de communication non verbale

Si la surveillance des actions de l'autre pilote fait partie des expressions de non verbalité entre membres de l'équipage, elle n'est pas la seule. D'autres instances de communication non verbale entre les pilotes ont eu lieu lors du déroulement de l'expérience. Par exemple, l'un des pilotes pointant la valeur de l'altitude de décision avec sa main pour attirer l'attention du copilote. Ces interactions ne sont pas capturées par notre protocole expérimental, qui se concentrait uniquement sur la détection des erreurs. Notre expérience ne concerne donc qu'une partie limitée des instances de communication non verbale entre membres d'équipage.

Un nouveau protocole expérimental pourrait s'intéresser à d'autres mesures objectives ou subjectives de communication non verbale, ou de collaboration entre les pilotes.

Questionnaire de présence

Le fait d'utiliser un questionnaire de présence ne comportant pas de questions sur la coprésence avait pour but de pousser les participants à considérer l'expérience dans son en-

semble, sans se focaliser sur les avatars, pour pouvoir mieux apprécier l'effet de ces derniers. Si pour un participant le résultat semble indiquer une augmentation du sentiment de présence lors du vol avec avatars, les scores du deuxième participant semblent indiquer une inadéquation de l'outil de mesure utilisé. L'utilisation d'un questionnaire supplémentaire portant sur la co-présence aurait peut-être permis d'obtenir des résultats plus parlants sur l'impact des avatars.

Nombre de participants

Le nombre de participants à notre expérience était limité à deux. Ce nombre est suffisant pour constater que notre prototype permet à des pilotes d'accomplir des tâches telles que décoller, exécuter des procédures, communiquer verbalement et non verbalement avec un autre utilisateur, résoudre des pannes et corriger des erreurs perçues. Par ailleurs, on a pu montrer que notre prototype peut être utilisé pour étudier le sentiment de présence ou la charge cognitive sur des participants.

Cependant, ce nombre reste trop faible pour pouvoir tirer des conclusions sur l'impact des avatars dans notre environnement. Une étude centrée sur ce sujet devrait comporter a minima une quinzaine de participants.

5.3 Perspectives de recherche

Notre travail ouvre plusieurs perspectives de recherche liées à notre prototype et à nos résultats expérimentaux.

En premier lieu, le prototype conçu est fonctionnel et peut aisément être modifié ou amélioré. Il semble donc utile de poursuivre son utilisation dans des activités de recherche ultérieures. En particulier, l'étude de l'impact des avatars sur les pilotes pourrait être poursuivie de façon plus complète. C'est-à-dire en revoyant le protocole expérimental à la lumière des observations effectuées plus haut, notamment concernant le nombre de participants.

5.3.1 Un simulateur pour les études de facteurs humains

Notre prototype peut également servir de base pour étudier d'autres fonctionnalités potentiellement utiles à une étude de facteurs humains. Des fonctionnalités qui nous semblent pertinentes à implémenter et à évaluer dans ce cadre sont :

- un retour visuel sur la direction du regard des pilotes, via un système de suivi oculaire ;
- une mise en évidence de certaines parties du cockpit, par exemple lors de certaines

- interactions des pilotes avec l'environnement ;
- un système de prise de notes en temps réel en RV pour des observateurs qui ne pilotent pas l'avion ;
- une combinaison de composants physiques (*joystick*, boutons etc.) intégrés en partie à l'environnement virtuel pour un meilleur retour haptique.

En particulier, notre prototype est capable d'accueillir plus d'utilisateurs que deux pilotes dans le cockpit. Dans le cadre d'une évaluation de facteurs humains, ces utilisateurs supplémentaires pourraient être des évaluateurs entièrement immergés dans l'environnement en RV. Dans cette optique, il pourrait être intéressant d'étudier leur capacité à effectuer des évaluations dans cet environnement. Cette expérience pourrait faire suite à l'implémentation des fonctionnalités listées ci-dessus.

5.3.2 Un simulateur en RV pour la formation des pilotes

Outre l'utilisation et l'amélioration du prototype pour des études liées aux évaluations de facteurs humains, notre prototype pourrait également être utilisé dans des formations. Notre environnement pourrait s'intégrer dans un programme de formation : entre les séances de cours théoriques accompagnées simplement d'images et une formation pratique dans un simulateur physique. Les avantages de notre environnement sont son faible coût de déploiement et sa possibilité d'utilisation à l'extérieur d'un centre de formation, par exemple dans les bureaux d'une compagnie aérienne. Ces points ont également été notés par les participants à notre expérience.

Une étude future pourrait se pencher sur la capacité pour des pilotes et des formateurs, à apprendre dans un simulateur entièrement virtuel et sur les différentes fonctionnalités qui pourraient participer à faciliter cet apprentissage.

5.3.3 Études sur la collaboration et la communication

La possibilité d'observer deux utilisateurs interagir dans un environnement virtuel complexe tel qu'un cockpit d'avion présente un intérêt pour l'étude de la collaboration au sein d'un environnement virtuel. Un environnement tel que celui proposé dans ce mémoire pourrait servir de base pour étudier les différents moyens de communication dans un environnement virtuel.

En particulier, des variations dans les moyens mis à disposition (avatars, pointeurs, communication orale) et dans le niveau d'expertise des utilisateurs pourraient permettre d'observer différentes modalités de communication et de collaboration émergentes dans un environne-

ment virtuel complexe.

RÉFÉRENCES

- [1] M. Oberhauser, R. Braunstingl, D. Dreyer et I. V. Koglbauer, “Pilots’ flight performance in a virtual reality flight simulator,” dans *Proceedings of the 32nd Conference of the European Association for Aviation Psychology*, 2016.
- [2] M. Oberhauser, D. Dreyer, R. Braunstingl et I. Koglbauer, “What’s real about virtual reality flight simulation ? comparing the fidelity of a virtual reality with a conventional flight simulation environment.” *Aviation Psychology and Applied Human Factors*, vol. 8, n° 1, p. 22, 2018.
- [3] J. Osterlund et B. Lawrence, “Virtual reality : Avatars in human spaceflight training,” *Acta Astronautica*, vol. 71, p. 139–150, 2012.
- [4] E. S. Stein, “The measurement of pilot performance : A master-journeyman approach,” FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION TECHNICAL CENTER ATLANTIC CITY NJ, Rapport technique, 1984.
- [5] R. Skarbez, F. P. Brooks, Jr et M. C. Whitton, “A survey of presence and related concepts,” *ACM Computing Surveys (CSUR)*, vol. 50, n° 6, p. 1–39, 2017.
- [6] M. Slater, B. Lotto, M. M. Arnold et M. V. Sánchez-Vives, “How we experience immersive virtual environments : the concept of presence and its measurement,” *Anuario de Psicología*, 2009, vol. 40, p. 193-210, 2009.
- [7] A. Steed et M. F. Oliveira, *Networked graphics : building networked games and virtual environments*. Elsevier, 2009.
- [8] M. Meehan, S. Razzaque, M. C. Whitton et F. P. Brooks, “Effect of latency on presence in stressful virtual environments,” dans *IEEE Virtual Reality, 2003. Proceedings*. IEEE, 2003, p. 141–148.
- [9] D. R. Bradley et S. B. Abelson, “Desktop flight simulators : Simulation fidelity and pilot performance,” *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, vol. 27, n° 2, p. 152–159, 1995.
- [10] L. D. Segal, “Effects of checklist interface on non-verbal crew communications,” NASA Ames Research Center, Rapport technique, 1994.
- [11] J. Lachter, V. Battiste, M. Matessa, Q. V. Dao, R. Koteskey et W. W. Johnson, “Toward single pilot operations : the impact of the loss of non-verbal communication on the flight deck,” dans *Proceedings of the international conference on human-computer interaction in aerospace*, 2014, p. 1–8.

- [12] A. Steed, Y. Pan, F. Zisch et W. Steptoe, “The impact of a self-avatar on cognitive load in immersive virtual reality,” dans *2016 IEEE virtual reality (VR)*. IEEE, 2016, p. 67–76.
- [13] S. Lim et B. Reeves, “Computer agents versus avatars : Responses to interactive game characters controlled by a computer or other player,” *International Journal of Human-Computer Studies*, vol. 68, n^o. 1-2, p. 57–68, 2010.
- [14] D. D. Li, A. K. Liau et A. Khoo, “Player–avatar identification in video gaming : Concept and measurement,” *Computers in Human Behavior*, vol. 29, n^o. 1, p. 257–263, 2013.
- [15] T. J. Dodds, B. J. Mohler et H. H. Bühlhoff, “Talk to the virtual hands : Self-animated avatars improve communication in head-mounted display virtual environments,” *PloS one*, vol. 6, n^o. 10, p. e25759, 2011.
- [16] B. Greiner, M. Caravella et A. E. Roth, “Is avatar-to-avatar communication as effective as face-to-face communication ? an ultimatum game experiment in first and second life,” *Journal of Economic Behavior & Organization*, vol. 108, p. 374–382, 2014.
- [17] S. G. Hart et L. E. Staveland, “Development of nasa-tlx (task load index) : Results of empirical and theoretical research,” dans *Advances in psychology*. Elsevier, 1988, vol. 52, p. 139–183.
- [18] M. Slater, M. Usoh et A. Steed, “Depth of presence in virtual environments,” *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, vol. 3, n^o. 2, p. 130–144, 1994.

ANNEXE A EXTENSION X-PLANE "HELLO WORLD"

```

1  #include "XPLMDisplay.h"
2  #include "XPLMGraphics.h"
3  #include <string.h>
4  #if IBM
5      #include <windows.h>
6  #endif
7  #if LIN
8      #include <GL/gl.h>
9  #elif __GNUC__
10     #include <OpenGL/gl.h>
11 #else
12     #include <GL/gl.h>
13 #endif
14
15 #ifndef XPLM300
16     #error This is made to be compiled against the XPLM300 SDK
17 #endif
18
19 // An opaque handle to the window we will create
20 static XPLMWindowID g_window;
21
22 // Callbacks we will register when we create our window
23 void draw_hello_world(XPLMWindowID in_window_id, void * in_refcon);
24 int dummy_mouse_handler(XPLMWindowID in_window_id, int x, int y, int
is_down, void * in_refcon) { return 0; }
25 XPLMCursorStatus dummy_cursor_status_handler(XPLMWindowID in_window_id, int x,
int y, void * in_refcon) { return xplm_CursorDefault; }
26 int dummy_wheel_handler(XPLMWindowID in_window_id, int x, int y, int
wheel, int clicks, void * in_refcon) { return 0; }
27 void dummy_key_handler(XPLMWindowID in_window_id, char key,
XPLMKeyFlags flags, char virtual_key, void * in_refcon, int losing_focus) { }
28
29 PLUGIN_API int XPluginStart(
30     char * outName,
31     char * outSig,
32     char * outDesc)
33 {
34     strcpy(outName, "HelloWorld3Plugin");
35     strcpy(outSig, "xpsdk.examples.helloworld3plugin");
36     strcpy(outDesc, "A Hello World plug-in for the XPLM300 SDK.");
37
38     XPLMCreateWindow_t params;
39     params.structSize = sizeof(params);
40     params.visible = 1;
41     params.drawWindowFunc = draw_hello_world;
42     // Note on "dummy" handlers:
43     // Even if we don't want to handle these events, we have to register a
"do-nothing" callback for them
44     params.handleMouseClickedFunc = dummy_mouse_handler;
45     params.handleRightClickFunc = dummy_mouse_handler;
46     params.handleMouseWheelFunc = dummy_wheel_handler;
47     params.handleKeyFunc = dummy_key_handler;
48     params.handleCursorFunc = dummy_cursor_status_handler;
49     params.refcon = NULL;
50     params.layer = xplm_WindowLayerFloatingWindows;
51     // Opt-in to styling our window like an X-Plane 11 native window
52     // If you're on XPLM300, not XPLM301, swap this enum for the literal value 1.
53     params.decorateAsFloatingWindow = xplm_WindowDecorationRoundRectangle;
54
55     // Set the window's initial bounds
56     // Note that we're not guaranteed that the main monitor's lower left is at (0,
0)...
57     // We'll need to query for the global desktop bounds!
58     int left, bottom, right, top;
59     XPLMGetScreenBoundsGlobal(&left, &top, &right, &bottom);
60     params.left = left + 50;
61     params.bottom = bottom + 150;
62     params.right = params.left + 200;
63     params.top = params.bottom + 200;
64
65     g_window = XPLMCreateWindowEx(&params);
66
67     // Position the window as a "free" floating window, which the user can drag around

```

```

68     XPLMSetWindowPositioningMode(g_window, xplm_WindowPositionFree, -1);
69     // Limit resizing our window: maintain a minimum width/height of 100 boxels and
70     // a max width/height of 300 boxels
71     XPLMSetWindowResizingLimits(g_window, 200, 200, 300, 300);
72     XPLMSetWindowTitle(g_window, "Sample Window");
73     return g_window != NULL;
74 }
75
76 PLUGIN_API void XPluginStop(void)
77 {
78     // Since we created the window, we'll be good citizens and clean it up
79     XPLMDestroyWindow(g_window);
80     g_window = NULL;
81 }
82
83 PLUGIN_API void XPluginDisable(void) { }
84 PLUGIN_API int XPluginEnable(void) { return 1; }
85 PLUGIN_API void XPluginReceiveMessage(XPLMPluginID inFrom, int inMsg, void *
inParam) { }
86
87 void draw_hello_world(XPLMWindowID in_window_id, void * in_refcon)
88 {
89     // Mandatory: We *must* set the OpenGL state before drawing
90     // (we can't make any assumptions about it)
91     XPLMSetGraphicsState(
92         0 /* no fog */,
93         0 /* 0 texture units */,
94         0 /* no lighting */,
95         0 /* no alpha testing */,
96         1 /* do alpha blend */,
97         1 /* do depth testing */,
98         0 /* no depth writing */
99     );
100
101     int l, t, r, b;
102     XPLMGetWindowGeometry(in_window_id, &l, &t, &r, &b);
103
104     float col_white[] = {1.0, 1.0, 1.0}; // red, green, blue
105
106     XPLMDrawString(col_white, l + 10, t - 20, "Hello world!", NULL,
xplmFont_Proportional);
107 }

```

ANNEXE B FICHER DE CONFIGURATION DES RD

TCP

###Failures

```

sim/flightmodel/failures/smoking
sim/flightmodel/failures/window_ice

sim/operation/failures/rel_antice
sim/operation/failures/rel_APU_press
sim/operation/failures/rel_batter0
sim/operation/failures/rel_batter1
sim/operation/failures/rel_bird_strike
sim/operation/failures/rel_bleed_air_lft
sim/operation/failures/rel_bleed_air_rgt
sim/operation/failures/rel_depres_slow
sim/operation/failures/rel_esys
sim/operation/failures/rel_esys2
sim/operation/failures/rel_engfai0
sim/operation/failures/rel_engfai1
sim/operation/failures/rel_engsep0
sim/operation/failures/rel_engsep1
sim/operation/failures/rel_engfir0
sim/operation/failures/rel_engfir1
sim/operation/failures/rel_ex_power_on
sim/operation/failures/rel_fadec_0
sim/operation/failures/rel_fadec_1
sim/operation/failures/rel_ele_fuepmp0
sim/operation/failures/rel_ele_fuepmp1
sim/operation/failures/rel_ele_fuepmp2
sim/operation/failures/rel_ele_fuepmp3
sim/operation/failures/rel_ele_fuepmp4
sim/operation/failures/rel_ele_fuepmp5
sim/operation/failures/rel_gear_act
sim/operation/failures/rel_genera0
sim/operation/failures/rel_genera1
sim/operation/failures/rel_gls
sim/operation/failures/rel_gps
sim/operation/failures/rel_gps2
sim/operation/failures/rel_hydleak
sim/operation/failures/rel_hydleak2
sim/operation/failures/rel_hydroverp
sim/operation/failures/rel_hydroverp2
sim/operation/failures/rel_hydpmp
sim/operation/failures/rel_hydpmp2
sim/operation/failures/rel_hydpmp_ele
sim/operation/failures/rel_ice_inlet_heat
sim/operation/failures/rel_ice_inlet_heat2
sim/operation/failures/rel_ice_surf_heat
sim/operation/failures/rel_ice_surf_heat2
sim/operation/failures/rel_ice_pitot_heat1
sim/operation/failures/rel_ice_pitot_heat2
sim/operation/failures/rel_ice_window_heat

```

```

sim/operation/failures/rel_lbrakes
sim/operation/failures/rel_rbrakes
sim/operation/failures/rel_lites_beac
sim/operation/failures/rel_lites_land
sim/operation/failures/rel_lites_nav
sim/operation/failures/rel_lites_strobe
sim/operation/failures/rel_lites_taxi
sim/operation/failures/rel_loc
sim/operation/failures/rel_N1_ind0
sim/operation/failures/rel_N1_ind1
sim/operation/failures/rel_N2_ind0
sim/operation/failures/rel_N2_ind1
sim/operation/failures/rel_pass_o2_on
sim/operation/failures/rel_revers0
sim/operation/failures/rel_revers1
sim/operation/failures/rel_smoke_cpit
sim/operation/failures/rel_stall_warn
sim/operation/failures/rel_startr0
sim/operation/failures/rel_startr1
sim/operation/failures/rel_xpndr
sim/operation/failures/rel_wing2L
sim/operation/failures/rel_wing2R
sim/operation/failures/rel_trim_elv

```

###HUD

```
laminar/B738/HUD/HUD_stow
```

###Yokeschecklists

```
laminar/B738/capt/yoke_checklist
laminar/B738/fo/yoke_checklist
```

###EFIS

```

laminar/B738/EFIS_control/capt/map_mode_pos
laminar/B738/EFIS/capt/map_range
laminar/B738/EFIS_control/fo/map_mode_pos
laminar/B738/EFIS/fo/map_range
laminar/B738/EFIS_control/capt/exp_map
laminar/B738/EFIS_control/fo/exp_map
laminar/B738/toggle_switch/n1_set_adjust
laminar/B738/toggle_switch/n1_set_source
laminar/B738/pfd/dh_pilot
laminar/B738/pfd/dh_copilot
laminar/B738/EFIS_control/cpt/minimums
laminar/B738/EFIS_control/cpt/minimums_pfd
laminar/B738/EFIS_control/capt/minimums_dh_pfd
d
laminar/B738/EFIS_control/fo/minimums
laminar/B738/EFIS_control/fo/minimums_dh_pfd
laminar/B738/EFIS_control/fo/minimums_pfd
laminar/B738/test_glare
laminar/B738/test_test

```



```

laminar/B738/test_test2
laminar/B738/test_test3
laminar/B738/test_test4
laminar/B738/fms/test
laminar/B738/fms/test3
laminar/B738/fms/test4
laminar/B738/fms/test5
laminar/B738/fms/test6
laminar/B738/fms/test7
laminar/B738/fms/test8
laminar/B738/fms/fms_add_cmd
laminar/B738/fms/fms_add_data_num
laminar/B738/fms/gpu_test_enable
laminar/B738/fms/chock_status
laminar/B738/fms/toe_brakes_ovr
laminar/B738/FMS/descent_now
laminar/B738/FMS/detail_cl

##Audio
laminar/B738/comm/fo_audio_vol_com1
laminar/B738/comm/fo_audio_vol_com2
laminar/B738/comm/obs_audio_vol_com1
laminar/B738/comm/obs_audio_vol_com2
laminar/B738/comm/audio_vol_mark
laminar/B738/comm/audio_vol_nav1
laminar/B738/comm/audio_vol_nav2

##Controlsurfacesandbrakes
laminar/B738/flt_ctrls/speedbrake_lever
laminar/B738/flt_ctrls/speedbrake_lever_stop
laminar/B738/flt_ctrls/flap_lever
laminar/B738/handles/flap_lever/stop_pos

laminar/B738/switches/landing_gear
laminar/B738/controls/gear_handle_down
laminar/B738/toggle_switch/el_trim_lock_pos

##Lights
laminar/B738/electric/instrument_brightness
laminar/B738/electric/panel_brightness
laminar/B738/toggle_switch/logo_light
laminar/B738/toggle_switch/rwy_light_left
laminar/B738/toggle_switch/rwy_light_right
sim/cockpit2/switches/panel_brightness_ratio
sim/cockpit2/switches/generic_lights_switch

laminar/B738/adjust/capt/map_light/x_pos
laminar/B738/adjust/capt/map_light/y_pos
laminar/B738/adjust/fo/map_light/x_pos
laminar/B738/adjust/fo/map_light/y_pos

##Instruments
sim/cockpit2/engine/actuators/fadec_on
sim/cockpit2/radios/actuators/DME_slave_source
sim/cockpit/pressure/max_allowable_altitude

##Autopilot
laminar/B738/autopilot/course_pilot
laminar/B738/autopilot/course_copilot
laminar/B738/autopilot/mcp_hdg_dial
laminar/B738/autopilot/mcp_alt_dial
laminar/B738/autopilot/at_throttle_override
laminar/B738/autopilot/vnav_alt_mode
laminar/B738/fms/vnav_vvi_const
laminar/autopilot/fdir_pitch_active
laminar/B738/autopilot/fmc_climb_r_speed1
laminar/B738/autopilot/fmc_climb_r_speed2
laminar/B738/autopilot/fmc_climb_speed
laminar/B738/autopilot/fmc_climb_speed_mach
laminar/B738/autopilot/fmc_cruise_speed_mach
laminar/B738/autopilot/fmc_descent_r_speed1
laminar/B738/autopilot/fmc_descent_r_speed2
laminar/B738/autopilot/fmc_descent_speed_mach
laminar/B738/autopilot/fmc_mode
laminar/B738/autopilot/fmc_speed

laminar/B738/buttons/autopilot/alt_hld
laminar/B738/buttons/autopilot/alt_intv
laminar/B738/buttons/autopilot/app
laminar/B738/buttons/autopilot/cmd_a
laminar/B738/buttons/autopilot/cmd_b
laminar/B738/buttons/autopilot/co
laminar/B738/buttons/autopilot/cws_a
laminar/B738/buttons/autopilot/cws_b
laminar/B738/buttons/autopilot/hdg_sel
#laminar/B738/buttons/autopilot/lnav
laminar/B738/buttons/autopilot/lvl_chg
laminar/B738/buttons/autopilot/n1
laminar/B738/buttons/autopilot/spd_intv
laminar/B738/buttons/autopilot/speed
#laminar/B738/buttons/autopilot/vnav
laminar/B738/buttons/autopilot/vor_loc
#laminar/B738/buttons/autopilot/vs

##Overhead

###Handles
laminar/B738/adjust/capt/handle_pos
laminar/B738/adjust/fo/handle_pos

###Lights
sim/cockpit2/switches/landing_lights_on

```

```

sim/cockpit2/switches/landing_lights_switch
laminar/B738/switch/land_lights_left_pos
laminar/B738/switch/land_lights_right_pos

sim/flightmodel2/lights/generic_lights_brightness_
ratio

###FixedlandinglightRIGHT

###RunwayturnofflightsLEFTandRIGHT

###Wheelwelllight

###Anti-collisionlight
sim/cockpit/electrical/beacon_lights_on

###Wipers
sim/cockpit2/switches/wiper_speed

###Cabinpressurization

sim/cockpit2/pressurization/actuators/max_allowa
ble_altitude_ft
laminar/B738/pressurization/knobs/landing_alt
laminar/B738/air/cont_cab_temp/rheostat
laminar/B738/air/fwd_cab_temp/rheostat
laminar/B738/air/aft_cab_temp/rheostat

###Electrical

###APU-GPU
laminar/B738/electrical/gpu_pos
laminar/B738/electrical/apu_gen1_pos
laminar/B738/electrical/apu_gen2_pos
sim/cockpit/electrical/gpu_on

###Battery
laminar/B738/electric/battery_pos
laminar/B738/electric/standby_bat_pos

###Fuel
laminar/B738/fuel/fuel_tank_pos_lft1
laminar/B738/fuel/fuel_tank_pos_lft2

laminar/B738/fuel/fuel_tank_pos_rgt1
laminar/B738/fuel/fuel_tank_pos_rgt2

laminar/B738/fuel/fuel_tank_pos_ctr1
laminar/B738/fuel/fuel_tank_pos_ctr2

laminar/B738/toggle_switch/fuel_flow_pos

###Idle/Cutofflevers

laminar/B738/engine/mixture_ratio1
laminar/B738/engine/mixture_ratio2
laminar/B738/engine/starter1_pos
laminar/B738/engine/starter2_pos
laminar/B738/toggle_switch/bleed_air_1_pos
laminar/B738/toggle_switch/bleed_air_2_pos
laminar/B738/toggle_switch/bleed_air_apu_pos

###Radios
laminar/B738/comm/rtp_L/hf_sens_ctrl/rheostat
laminar/B738/comm/rtp_R/hf_sens_ctrl/rheostat

#sim/cockpit2/radios/actuators/com1_right_is_sel
ected
sim/cockpit2/radios/actuators/com1_frequency_h
z
sim/cockpit2/radios/actuators/com1_frequency_h
z_833
#sim/cockpit2/radios/actuators/com2_right_is_sel
ected
sim/cockpit2/radios/actuators/com2_frequency_h
z
sim/cockpit2/radios/actuators/com2_frequency_h
z_833

sim/cockpit2/radios/actuators/com1_standby_freq
uency_hz
sim/cockpit2/radios/actuators/com1_standby_freq
uency_hz_833
sim/cockpit2/radios/actuators/com1_standby_freq
uency_khz
sim/cockpit2/radios/actuators/com1_standby_freq
uency_hz
sim/cockpit2/radios/actuators/com1_standby_freq
uency_hz_833
sim/cockpit2/radios/actuators/com1_standby_freq
uency_khz
sim/cockpit2/radios/actuators/com2_standby_freq
uency_hz
sim/cockpit2/radios/actuators/com2_standby_freq
uency_hz_833

sim/cockpit2/radios/actuators/adf1_standby_freq
uency_hz
sim/cockpit2/radios/actuators/adf2_standby_freq
uency_hz
sim/cockpit2/radios/adf1_freq_hz

```

```

sim/cockpit/radios/adf2_freq_hz
laminar/B738/toggle_switch/off_on1
laminar/B738/toggle_switch/off_on2
laminar/B738/toggle_switch/adf_ant1
laminar/B738/toggle_switch/adf_ant2
sim/cockpit2/radios/actuators/RMI_left_use_adf_pilot
sim/cockpit2/radios/actuators/RMI_right_use_adf_pilot

laminar/B738/nav/gls_corr

##ATC
sim/cockpit/radios/transponder_code

laminar/B738/knob/transponder_mode_up
laminar/B738/knob/transponder_mode_dn
laminar/B738/knob/transponder_altoff
laminar/B738/knob/transponder_alton
laminar/B738/knob/transponder_stby
laminar/B738/knob/transponder_ta
laminar/B738/knob/transponder_tara
laminar/B738/knob/transponder_test

UDP

laminar/B738/autopilot/mcp_speed_dial_kts_mach
laminar/B738/autopilot/mcp_speed_dial_kts

sim/cockpit2/autopilot/airspeed_is_mach
sim/cockpit/autopilot/vertical_velocity
sim/cockpit2/autopilot/vvi_dial_fpm

sim/cockpit2/radios/actuators/nav_obs_deg_mag_pilot
sim/cockpit2/radios/actuators/nav_obs_deg_mag_copilot
sim/cockpit2/controls/rudder_trim
#sim/cockpit2/controls/elevator_trim
sim/cockpit2/controls/aileron_trim

sim/flightmodel/controls/parkbrake
laminar/B738/parking_brake_pos

laminar/B738/EFIS/baro_sel_in_hg_copilot
laminar/B738/EFIS/baro_sel_in_hg_pilot

sim/cockpit2/radios/actuators/nav1_right_is_selected

sim/cockpit2/radios/actuators/nav2_right_is_selected
sim/cockpit2/radios/actuators/nav1_frequency_hz
sim/cockpit2/radios/actuators/nav2_frequency_hz
sim/cockpit2/radios/actuators/nav1_standby_frequency_hz
sim/cockpit2/radios/actuators/nav2_standby_frequency_hz

###Failures

sim/flightmodel/failures/inlet_ice_per_engine
sim/flightmodel/failures/frm_ice
sim/flightmodel/failures/frm_ice2

sim/flightmodel/failures/over_g
sim/flightmodel/failures/over_vne
sim/flightmodel/failures/over_vfe
sim/flightmodel/failures/over_vle

sim/operation/failures/rel_collapse1
sim/operation/failures/rel_collapse10
sim/operation/failures/rel_collapse2
sim/operation/failures/rel_collapse3
sim/operation/failures/rel_collapse4
sim/operation/failures/rel_collapse5
sim/operation/failures/rel_collapse6
sim/operation/failures/rel_collapse7
sim/operation/failures/rel_collapse8
sim/operation/failures/rel_collapse9

sim/operation/failures/rel_tire1
sim/operation/failures/rel_tire2
sim/operation/failures/rel_tire3

laminar/B738/gpu_hide

##PB
bp/op_complete
bp/tug_name
bp/plan_complete

sim/joystick/yoke_pitch_ratio
sim/joystick/yoke_roll_ratio
sim/joystick/yoke_heading_ratio

sim/cockpit/autopilot/flight_director_roll

laminar/B738/axis/pitch
laminar/B738/axis/pitch2
laminar/B738/axis/roll

```

```

laminar/B738/axis/roll2
laminar/B738/axis/heading
laminar/B738/axis/heading2
laminar/yoke/pitch
laminar/yoke/pitch2
laminar/yoke/roll
laminar/B738/flt_ctrls/joy_heading
laminar/B738/flt_ctrls/joy_pitch
laminar/B738/flt_ctrls/joy_roll

laminar/B738/axis/left_toe_brake
laminar/B738/axis/right_toe_brake
sim/cockpit2/controls/left_brake_ratio
sim/cockpit2/controls/right_brake_ratio

laminar/B738/engine/thrust12_leveler
laminar/B738/engine/thrust1_leveler
laminar/B738/engine/thrust2_leveler
sim/flightmodel/engine/ENGN_EGT
sim/flightmodel/engine/ENGN_EGT_c
sim/flightmodel/engine/ENGN_thro
sim/flightmodel/engine/ENGN_thro_use
sim/flightmodel/engine/ENGN_propmode
sim/flightmodel/engine/ENGN_N1_
sim/flightmodel/engine/ENGN_FF_
sim/flightmodel/engine/ENGN_ITT_c
sim/flightmodel/engine/ENGN_CHT_c
sim/flightmodel/engine/ENGN_oil_temp_c

laminar/B738/axis/throttle1
laminar/B738/axis/throttle2
laminar/B738/flt_ctrls/reverse_lever1
laminar/B738/flt_ctrls/reverse_lever2

sim/flightmodel2/gear/tire_steer_actual_deg
sim/flightmodel2/gear/tire_steer_command_deg
laminar/B738/axis/nosewheel
laminar/B738/nosewheel_steer_ratio

sim/operation/failures/rel_flap_act

sim/cockpit2/controls/elevator_trim
laminar/B738/autopilot/servo_pitch_elev

#sim/operation/override/override_gearbrake
#sim/operation/override/override_fuel_flow
#sim/operation/override/override_prop_mode
#sim/operation/override/override_flightdir_roll
#sim/operation/override/override_itt_egt
#sim/operation/override/override_cht_oilt

#laminar/B738/nosewheel_steer_override
#laminar/B738/toe_brake_override
#laminar/B738/joy_override
#laminar/B738/flt_ctrls/joy_override
#laminar/B738/throttle_override
#sim/operation/override/override_engine_forces

#laminar/B738/comm/com1_audio_sel
#laminar/B738/comm/com2_audio_sel
#laminar/B738/comm/fo_com1_audio_sel
#laminar/B738/comm/fo_com2_audio_sel
#laminar/B738/comm/obs_com1_audio_sel
#laminar/B738/comm/obs_com2_audio_sel
#laminar/B738/audio/capt/mic_push1
#laminar/B738/audio/capt/mic_push2
#laminar/B738/audio/fo/mic_push1
#laminar/B738/audio/fo/mic_push2
#laminar/B738/audio/obs/mic_push1
#laminar/B738/audio/obs/mic_push2
#laminar/B738/comm/audio_vol_com1
#laminar/B738/comm/audio_vol_com2
#laminar/B738/comm/fo_audio_vol_com1
#laminar/B738/comm/fo_audio_vol_com2
#laminar/B738/comm/obs_audio_vol_com1
#laminar/B738/comm/obs_audio_vol_com2

LONG
sim/weather/shear_direction_deg
sim/weather/shear_speed_kt
sim/weather/wind_altitude_msl_m
sim/weather/wind_speed_kt

sim/weather/turbulence

sim/weather/barometer_sealevel_inhg
sim/weather/cloud_base_msl_m
sim/weather/cloud_coverage
sim/weather/cloud_tops_msl_m
sim/weather/rain_percent
sim/weather/runway_friction
sim/weather/runway_is_patchy

sim/weather/temperature_sealevel_c
sim/weather/temperature_tropo_c
sim/weather/tropo_alt_mtr
sim/weather/thermal_altitude_msl_m
sim/weather/thermal_percent
sim/weather/thermal_rate_ms
sim/weather/thunderstorm_percent

sim/weather/visibility_reported_m

```

sim/weather/wave_amplitude	laminar/B738/plan_fuel
sim/weather/wave_dir	laminar/B738/ledLights
sim/weather/wave_length	laminar/B738/effects/pulse_lite
sim/weather/wave_speed	laminar/B738/effects/com_decimal
	laminar/B738/effects/smart_ap_knob
sim/weather/wind_turbulence_percent	laminar/B738/effects/sync_pilot
	laminar/B738/effects/prior_tx_com
sim/flightmodel/weight/m_fuel	laminar/B738/effects/fuelgauge
	laminar/B738/effect/nd_rings
sim/time/hobbs_time	laminar/B738/effects/flight_control
sim/time/total_flight_time_sec	laminar/B738/effects/brake_temp
sim/time/total_running_time_sec	laminar/B738/effects/irs_ding
	laminar/B738/effects/long_led_strobes
	laminar/B738/effect/tire_blownd
	laminar/B738/fms/aspirated_probe
sim/time/zulu_time_sec	laminar/B738/aoa_ra
sim/time/use_system_time	laminar/B738/pfd_fmc_flap_spd
sim/time/local_date_days	laminar/B738/takeoff_hdg
	laminar/B738/nd_tcas_range
sim/cockpit2/fuel/fuel_totalizer_sum_kg	laminar/B738/fms/vnav_alt_disable
sim/flightmodel/weight/m_fixed	laminar/B738/fms/vnavalt_althld
sim/flightmodel/misc/cgz_ref_to_default	laminar/B738/fd_cam_disable
	laminar/B738/selcal_disable
sim/time/timer_elapsed_time_sec	laminar/B738/gp_cable_connect
	laminar/B738/chrono_variant
##Metric	laminar/B738/init_ref_smart
sim/physics/metric_press	laminar/B738/fmodpack/disable_fo_callout
sim/physics/metric_temp	laminar/B738/yoke_to_center
	laminar/B738/effects/smart_ap_knob
##Options	laminar/B738/sam_enable
	laminar/B738/pax_layout
laminar/B738/fms/mmr	laminar/B738/std_pax_weight
laminar/B738/fms/mmr_colour	laminar/B738/oevw_kg
laminar/B738/fms/parkbrake_remove_chock	laminar/B738/fa_aft_kg
laminar/B738/fms/lock_thrust	laminar/B738/fa_fwd_kg
laminar/B738/FMS/align_time	laminar/B738/galley_aft_kg
laminar/B738/FMS/refuel_time	laminar/B738/galley_fwd_kg
laminar/B738/yoke_disco_ap	laminar/B738/def_accel_alt
laminar/B738/FMS/fmc_input_lag	laminar/B738/def_clb_alt
laminar/B738/parkbrake_set	laminar/B738/def_clb_alt2
laminar/B738/FMS/ap_yoke_tolerance	laminar/B738/def_cut_alt
laminar/B738/FMS/fmc_units	laminar/B738/def_eo_accel_alt
laminar/B738/fms/baro_in_hpa	laminar/B738/fms/ra_callout_disable
laminar/B738/fms/min_baro_radio	laminar/B738/plus_hundred
laminar/B738/fms/chock_on_startup	laminar/B738/fmc_type
laminar/B738/fms/engine_no_running_state	laminar/B738/raas
laminar/B738/fms/vor_radial	laminar/B738/autoland_install
laminar/B738/fms/track_up	laminar/B738/engine_start_auto
laminar/B738/fms/no_smoking	laminar/B738/not_airstairs
laminar/B738/fms/no_vcr_switch	laminar/B738/probe_heat_auto
laminar/B738/fms/gw_entry	laminar/B738/ian_install

laminar/B738/brakes_placard	OpenVR/coC2R
laminar/B738/cat3_placard	OpenVR/coT1
laminar/B738/fuel_pumps_off_placard	OpenVR/coT2
laminar/B738/nps_disable	
laminar/B738/ff_eicas	
laminar/B738/clock_variant	
laminar/B738/isfd_rmi	
laminar/B738/old_mcp	
laminar/B738/new_fuel_cutoff	
laminar/B738/yaw_damper	
laminar/B738/mute_switches	
laminar/B738/digital_press_panel	
laminar/B738/no_rte2	
laminar/B738/gs_on_pfd	
#laminar/B738/cfy_enable	
laminar/B738/alt_intv_but	
laminar/B738/spd_intv_but	
laminar/B738/rmi	
laminar/B738/pfd/at_wakeup	
laminar/B738/vorloc_lnav	
laminar/B738/oil_qty_pct_qts	
laminar/B738/vnav_wakeup_idle	
laminar/B738/nd_arpt_rw_lenght	
#laminar/B738/acp	
laminar/B738/ra_decision_height	
laminar/B738/ra_radio_altimeter	
laminar/B738/ra_500_1000_baro	
laminar/B738/high_alt_ldg	
laminar/B738/misssed_app_colour	
laminar/B738/ctr_fuel_pump_auto	
laminar/B738/vnav_common	
laminar/B738/fuel_cutoff_switches	

SEND

```
#OpenVR/Test1
OpenVR/HT
OpenVR/HR
OpenVR/C1T
OpenVR/C2T
OpenVR/C1R
OpenVR/C2R
OpenVR/T1
OpenVR/T2
```

RECV

```
#OpenVR/Test2
OpenVR/coHT
OpenVR/coHR
OpenVR/coC1T
OpenVR/coC2T
OpenVR/coC1R
```

ANNEXE C FICHER DE CONFIGURATION DES COMMANDES

```

[COMMANDS]

sim/operation/pause_toggle
sim/operation/freeze_toggle
sim/engines/thrust_reverse_toggle
sim/engines/thrust_reverse_toggle_1
sim/engines/thrust_reverse_toggle_2
sim/engines/thrust_reverse_hold
sim/instruments/timer_cycle
sim/systems/no_smoking_toggle
sim/engines/TOGA_power
sim/flight_controls/rudder_trim_left
sim/flight_controls/rudder_trim_right
sim/flight_controls/aileron_trim_left
sim/flight_controls/aileron_trim_right
sim/flight_controls/speed_brakes_down_one
sim/flight_controls/speed_brakes_up_one
laminar/B738/flight_controls/pitch_trim_down
laminar/B738/flight_controls/pitch_trim_up
laminar/B738/flight_controls/fo_pitch_trim_down
laminar/B738/flight_controls/fo_pitch_trim_up
sim/flight_controls/flaps_down
sim/flight_controls/flaps_up
laminar/B738/fms/set_flap_1
laminar/B738/fms/set_flap_10
laminar/B738/fms/set_flap_15
laminar/B738/fms/set_flap_2
laminar/B738/fms/set_flap_25
laminar/B738/fms/set_flap_30
laminar/B738/fms/set_flap_40
laminar/B738/fms/set_flap_5
laminar/B738/fms/set_flap_up

sim/annunciator/clear_master_caution
sim/operation/auto_board
sim/operation/auto_start

sim/starters/engage_starter_1
sim/starters/engage_starter_2

sim/radios/stby_nav1_coarse_down
sim/radios/stby_nav1_coarse_up
sim/radios/stby_nav1_fine_down
sim/radios/stby_nav1_fine_up
sim/radios/stby_nav2_coarse_down
sim/radios/stby_nav2_coarse_up
sim/radios/stby_nav2_fine_down
sim/radios/stby_nav2_fine_up

##Cabindoor
laminar/B738/toggle_switch/flt_dk_door_left

laminar/B738/toggle_switch/flt_dk_door_right
laminar/B738/toggle_switch/flt_dk_door_open
laminar/B738/fd_cam_act
laminar/B738/fd_cam_left
laminar/B738/fd_cam_right

##CargoandPaxdoors
sim/flight_controls/door_close_1
sim/flight_controls/door_close_2
sim/flight_controls/door_close_3
sim/flight_controls/door_close_4
sim/flight_controls/door_close_5
sim/flight_controls/door_close_6
sim/flight_controls/door_close_7
sim/flight_controls/door_close_8
sim/flight_controls/door_close_9
sim/flight_controls/door_close_10
sim/flight_controls/door_open_1
sim/flight_controls/door_open_2
sim/flight_controls/door_open_3
sim/flight_controls/door_open_4
sim/flight_controls/door_open_5
sim/flight_controls/door_open_6
sim/flight_controls/door_open_7
sim/flight_controls/door_open_8
sim/flight_controls/door_open_9
sim/flight_controls/door_open_10

###GPU
laminar/B738/toggle_switch/gpu_up
laminar/B738/toggle_switch/gpu_dn

###APU
laminar/B738/toggle_switch/apu_gen1_up
laminar/B738/toggle_switch/apu_gen1_dn
laminar/B738/toggle_switch/apu_gen2_up
laminar/B738/toggle_switch/apu_gen2_dn

###Electrical
laminar/B738/toggle_switch/gen1_up
laminar/B738/toggle_switch/gen1_dn
laminar/B738/toggle_switch/gen2_up
laminar/B738/toggle_switch/gen2_dn
laminar/B738/one_way_switch/drive_disconnect1
laminar/B738/one_way_switch/drive_disconnect2
laminar/B738/one_way_switch/drive_disconnect1_off
laminar/B738/one_way_switch/drive_disconnect2_off

```

laminar/B738/knob/ac_power_up
 laminar/B738/knob/ac_power_dn
 laminar/B738/knob/dc_power_up
 laminar/B738/knob/dc_power_dn
 sim/electrical/GPU_on
 sim/electrical/GPU_off
 #sim/electrical/APU_on
 laminar/B738/spring_toggle_switch/APU_start_pos_up
 laminar/B738/spring_toggle_switch/APU_start_pos_dn
 laminar/B738/push_button/tat_test
 laminar/B738/push_button/flaps_test
 laminar/B738/push_button/mach_warn1_test
 laminar/B738/push_button/mach_warn2_test
 laminar/B738/toggle_switch/yaw_dumper
 laminar/B738/toggle_switch/fuel_pump_lft1
 laminar/B738/toggle_switch/fuel_pump_lft2
 laminar/B738/toggle_switch/fuel_pump_ctr1
 laminar/B738/toggle_switch/fuel_pump_ctr2
 laminar/B738/toggle_switch/fuel_pump_rgt1
 laminar/B738/toggle_switch/fuel_pump_rgt2
 laminar/B738/toggle_switch/crossfeed_valve_on
 laminar/B738/toggle_switch/crossfeed_valve_off
 laminar/B738/toggle_switch/capt_probes_pos
 laminar/B738/toggle_switch/fo_probes_pos
 laminar/B738/toggle_switch/hydro_pumps1
 laminar/B738/toggle_switch/hydro_pumps2
 laminar/B738/toggle_switch/electric_hydro_pump_s1
 laminar/B738/toggle_switch/electric_hydro_pump_s2
 laminar/B738/toggle_switch/bleed_air_1
 laminar/B738/toggle_switch/bleed_air_2
 laminar/B738/toggle_switch/bleed_air_apu
 laminar/B738/push_button/bleed_trip_reset
 laminar/B738/push_button/stall_test1_press
 laminar/B738/push_button/stall_test2_press
 laminar/B738/knob/transponder_tcas_test
 laminar/B738/push_button/transponder_ident_dn
 laminar/B738/toggle_switch/xpndr_alt
 laminar/B738/toggle_switch/xpndr_atc
 laminar/B738/knob/eng1_start_left
 laminar/B738/knob/eng1_start_right
 laminar/B738/knob/eng2_start_left
 laminar/B738/knob/eng2_start_right
 laminar/B738/rotary/eng1_start_grd
 laminar/B738/rotary/eng1_start_off
 laminar/B738/rotary/eng1_start_cont
 laminar/B738/rotary/eng1_startflt
 laminar/B738/rotary/eng2_start_grd
 laminar/B738/rotary/eng2_start_off
 laminar/B738/rotary/eng2_start_cont
 laminar/B738/rotary/eng2_startflt
 laminar/B738/rotary/eng2_start_grd

laminar/B738/toggle_switch/air_temp_source_left
 #laminar/B738/toggle_switch/air_temp_source_left_700
 laminar/B738/toggle_switch/air_temp_source_right
 #laminar/B738/toggle_switch/air_temp_source_right_700
 #laminar/B738/toggle_switch/flt_dk_door_left
 #laminar/B738/toggle_switch/flt_dk_door_right
 laminar/B738/toggle_switch/main_pnl_du_fo_left
 laminar/B738/toggle_switch/main_pnl_du_fo_right
 laminar/B738/toggle_switch/lower_du_fo_left
 laminar/B738/toggle_switch/lower_du_fo_right
 laminar/B738/toggle_switch/main_pnl_du_capt_left
 laminar/B738/toggle_switch/main_pnl_du_capt_right
 laminar/B738/toggle_switch/lower_du_capt_left
 laminar/B738/toggle_switch/lower_du_capt_right
 laminar/B738/toggle_switch/dspl_source_left
 laminar/B738/toggle_switch/dspl_source_right
 laminar/B738/toggle_switch/spd_ref_left
 laminar/B738/toggle_switch/spd_ref_right
 laminar/B738/toggle_switch/spd_ref_adjust_left
 laminar/B738/toggle_switch/spd_ref_adjust_right
 laminar/B738/EFIS_control/fo/minimums_up
 laminar/B738/EFIS_control/fo/minimums_dn
 laminar/B738/EFIS_control/cpt/minimums_up
 laminar/B738/EFIS_control/cpt/minimums_dn
 laminar/B738/pfd/dh_pilot_up
 laminar/B738/pfd/dh_pilot_dn
 laminar/B738/pfd/dh_copilot_up
 laminar/B738/pfd/dh_copilot_dn
 laminar/B738/EFIS_control/capt/push_button/wxr_press
 laminar/B738/EFIS_control/capt/push_button/sta_press
 laminar/B738/EFIS_control/capt/push_button/wpt_press
 laminar/B738/EFIS_control/capt/push_button/arpt_press
 laminar/B738/EFIS_control/capt/push_button/data_press
 laminar/B738/EFIS_control/capt/push_button/pos_press
 laminar/B738/EFIS_control/capt/push_button/terr_press
 laminar/B738/EFIS_control/capt/push_button/rst_press

laminar/B738/EFIS_control/capt/push_button/ctr_press
 laminar/B738/EFIS_control/capt/push_button/tfc_press
 laminar/B738/EFIS_control/capt/push_button/std_press
 laminar/B738/EFIS_control/capt/push_button/mtrs_press
 laminar/B738/EFIS_control/capt/push_button/fpv_press
 laminar/B738/EFIS_control/capt/baro_in_hpa_up
 laminar/B738/EFIS_control/capt/baro_in_hpa_dn
 laminar/B738/EFIS_control/fo/baro_in_hpa_dn
 laminar/B738/EFIS_control/fo/baro_in_hpa_up
 laminar/B738/knob/standby_alt_baro_dn
 laminar/B738/knob/standby_alt_baro_up
 laminar/B738/toggle_switch/standby_alt_app
 laminar/B738/toggle_switch/standby_alt_baro_std
 laminar/B738/toggle_switch/standby_alt_hpin
 laminar/B738/toggle_switch/standby_alt_minus
 laminar/B738/toggle_switch/standby_alt_plus
 laminar/B738/toggle_switch/standby_alt_rst
 laminar/B738/toggle_switch/standby_alt_mode_down
 laminar/B738/toggle_switch/standby_alt_mode_up
 laminar/B738/pilot/barometer_up
 laminar/B738/pilot/barometer_down
 laminar/B738/copilot/barometer_up
 laminar/B738/copilot/barometer_down
 laminar/B738/EFIS_control/capt/vor1_off_up
 laminar/B738/EFIS_control/capt/vor1_off_dn
 laminar/B738/EFIS_control/capt/vor2_off_up
 laminar/B738/EFIS_control/capt/vor2_off_dn
 laminar/B738/EFIS_control/fo/push_button/wxr_press
 laminar/B738/EFIS_control/fo/push_button/sta_press
 laminar/B738/EFIS_control/fo/push_button/wpt_press
 laminar/B738/EFIS_control/fo/push_button/arpt_press
 laminar/B738/EFIS_control/fo/push_button/data_press
 laminar/B738/EFIS_control/fo/push_button/pos_press
 laminar/B738/EFIS_control/fo/push_button/terr_press
 laminar/B738/EFIS_control/fo/push_button/rst_press

laminar/B738/EFIS_control/fo/push_button/ctr_press
 laminar/B738/EFIS_control/fo/push_button/tfc_press
 laminar/B738/EFIS_control/fo/push_button/std_press
 laminar/B738/EFIS_control/fo/push_button/mtrs_press
 laminar/B738/EFIS_control/fo/push_button/fpv_press
 laminar/B738/EFIS_control/fo/vor1_off_up
 laminar/B738/EFIS_control/fo/vor1_off_dn
 laminar/B738/EFIS_control/fo/vor2_off_up
 laminar/B738/EFIS_control/fo/vor2_off_dn

###Autopilot

laminar/B738/autopilot/capt_disco_press
 laminar/B738/autopilot/fo_disco_press
 laminar/B738/autopilot/n1_press
 laminar/B738/autopilot/speed_press
 laminar/B738/autopilot/lvl_chg_press
 laminar/B738/autopilot/vnav_press
 laminar/B738/autopilot/change_over_press
 laminar/B738/autopilot/lnav_press
 laminar/B738/autopilot/vorloc_press
 laminar/B738/autopilot/app_press
 laminar/B738/autopilot/hdg_sel_press
 laminar/B738/autopilot/alt_hld_press
 sim/autopilot/altitude_hold
 laminar/B738/autopilot/vs_press
 laminar/B738/autopilot/disconnect_toggle
 laminar/B738/autopilot/autothrottle_arm_toggle
 laminar/B738/autopilot/flight_director_toggle
 laminar/B738/autopilot/flight_director_fo_toggle
 laminar/B738/autopilot/bank_angle_up
 laminar/B738/autopilot/bank_angle_dn
 laminar/B738/autopilot/cmd_a_press
 laminar/B738/autopilot/cmd_b_press
 laminar/B738/autopilot/cws_a_press
 laminar/B738/autopilot/cws_b_press
 sim/autopilot/control_wheel_steer
 #laminar/B738/autopilot/heading_dn
 #laminar/B738/autopilot/heading_up
 laminar/B738/autopilot/altitude_up
 laminar/B738/autopilot/altitude_dn
 #laminar/B738/autopilot/course_pilot_up
 #laminar/B738/autopilot/course_pilot_dn
 #laminar/B738/autopilot/course_copilot_up
 #laminar/B738/autopilot/course_copilot_dn
 laminar/B738/autopilot/spd_interv
 laminar/B738/autopilot/ife_pass_seat_toggle

laminar/B738/autopilot/cab_util_toggle
 laminar/B738/autopilot/alt_interv
 laminar/B738/autopilot/right_at_dis_press
 laminar/B738/autopilot/right_toga_press
 laminar/B738/autopilot/left_at_dis_press
 laminar/B738/autopilot/left_toga_press
 laminar/B738/push_button/ap_light_pilot
 laminar/B738/push_button/at_light_pilot
 laminar/B738/push_button/at_light_fo
 laminar/B738/push_button/ap_light_fo
 laminar/B738/push_button/fms_light_pilot
 laminar/B738/push_button/fms_light_fo
 laminar/B738/autopilot/disconnect_button
 sim/annunciator/clear_master_warning
 #sim/autopilot/vertical_speed
 sim/autopilot/vertical_speed_down
 sim/autopilot/vertical_speed_up
 sim/autopilot/pitch_sync
 #sim/autopilot/airspeed_down
 #sim/autopilot/airspeed_up
 sim/instruments/asi_bug_down
 sim/instruments/asi_bug_up

sim/flight_controls/brakes_toggle_max
 laminar/B738/control/toe_brake_axis_switch
 laminar/B738/push_button/toe_brake_both
 laminar/B738/push_button/toe_brake_left
 laminar/B738/push_button/toe_brake_right
 laminar/B738/brake_smoothly
 #laminar/B738/push_button/park_brake_on_off
 laminar/B738/toggle_switch/man_1ndgear
 laminar/B738/alert/gear_horn_cutout
 laminar/B738/gear_lock/override
 laminar/B738/switch/nose_steer_alt
 laminar/B738/push_button/gear_down
 laminar/B738/push_button/gear_up
 laminar/B738/push_button/gear_off
 laminar/B738/switch/nose_steer_norm

laminar/B738/toggle_switch/fdr
 laminar/B738/toggle_switch/vcr_auto
 laminar/B738/toggle_switch/vcr_on
 laminar/B738/push_button/grd_call
 laminar/B738/push_button/attend
 laminar/B738/push_button/acdc_maint
 laminar/B738/toggle_switch/vhf_nav_source_lft
 laminar/B738/toggle_switch/vhf_nav_source_rgt
 laminar/B738/LDU_control/push_button/MFD_SYS
 laminar/B738/LDU_control/push_button/MFD_ENG
 laminar/B738/LDU_control/push_button/MFD_CR

laminar/B738/toggle_switch/n1_set_source_left
 laminar/B738/toggle_switch/n1_set_source_right
 laminar/B738/toggle_switch/elt_on
 laminar/B738/toggle_switch/elt_arm
 laminar/B738/toggle_switch/el_trim
 laminar/B738/toggle_switch/el_trim_lock
 laminar/B738/toggle_switch/el_trim_w_guard_ne
 g
 laminar/B738/toggle_switch/bright_test_dn
 laminar/B738/toggle_switch/bright_test_up
 laminar/B738/toggle_switch/emer_exitLights_dn
 laminar/B738/toggle_switch/emer_exitLights_up
 laminar/B738/push_button/emer_exit_full_off
 laminar/B738/toggle_switch/exting_test_lft
 laminar/B738/toggle_switch/exting_test_rgt
 laminar/B738/push_button/cargo_fire_test_push
 laminar/B738/toggle_switch/fire_test_lft
 laminar/B738/toggle_switch/fire_test_rgt
 laminar/B738/toggle_switch/ap_disconnect_test1
 _up
 laminar/B738/toggle_switch/ap_disconnect_test1
 _dn
 laminar/B738/toggle_switch/ap_disconnect_test2
 _up
 laminar/B738/toggle_switch/ap_disconnect_test2
 _dn
 laminar/B738/toggle_switch/ap_trim
 laminar/B738/toggle_switch/ap_trim_lock
 laminar/B738/push_button/fire_bell_light1
 laminar/B738/push_button/fire_bell_light2
 laminar/B738/push_button/master_caution1
 laminar/B738/push_button/master_caution2
 laminar/B738/comm/obs_mark_audio_sel
 laminar/B738/comm/obs_nav1_audio_sel
 laminar/B738/comm/obs_nav2_audio_sel
 laminar/B738/comm/mark_audio_sel
 laminar/B738/comm/fo_mark_audio_sel
 laminar/B738/comm/nav1_audio_sel
 laminar/B738/comm/nav2_audio_sel
 laminar/B738/comm/fo_nav1_audio_sel
 laminar/B738/comm/fo_nav2_audio_sel

 laminar/B738/com3_dial_course_down
 laminar/B738/com3_dial_course_up
 laminar/B738/com3_dial_fine_down
 laminar/B738/com3_dial_fine_up
 laminar/B738/com3_dial_flip
 laminar/B738/comm/rst_selcal_com1
 laminar/B738/comm/rst_selcal_com2
 laminar/B738/comm/rst_selcal_com3
 laminar/B738/push_button/mic

 laminar/B738/push_button/mic_fo
 laminar/B738/audio/capt/mic_push3
 laminar/B738/audio/capt/mic_push4
 laminar/B738/audio/capt/mic_push5
 laminar/B738/audio/capt/mic_push6
 laminar/B738/audio/fo/mic_push3
 laminar/B738/audio/fo/mic_push4
 laminar/B738/audio/fo/mic_push5
 laminar/B738/audio/fo/mic_push6
 laminar/B738/audio/obs/mic_push3
 laminar/B738/audio/obs/mic_push4
 laminar/B738/audio/obs/mic_push5
 laminar/B738/audio/obs/mic_push6
 laminar/B738/toggle_switch/eng1_heat
 laminar/B738/toggle_switch/eng2_heat
 laminar/B738/toggle_switch/wing_heat
 laminar/B738/toggle_switch/window_heat_l_side
 laminar/B738/toggle_switch/window_heat_l_fwd
 laminar/B738/toggle_switch/window_heat_r_side
 laminar/B738/toggle_switch/window_heat_r_fwd
 laminar/B738/alert/alt_horn_cutout
 laminar/B738/rtp_D/am_sel_switch
 laminar/B738/rtp_D/freq_khz_sel_dial_dn
 laminar/B738/rtp_D/freq_khz_sel_dial_up
 laminar/B738/rtp_D/freq_MHz_sel_dial_dn
 laminar/B738/rtp_D/freq_MHz_sel_dial_up
 laminar/B738/rtp_D/freq_txfr_sel_switch
 laminar/B738/rtp_D/hf_1_sel_switch
 laminar/B738/rtp_D/hf_2_sel_switch
 laminar/B738/rtp_D/off_switch
 laminar/B738/rtp_D/vhf_1_sel_switch
 laminar/B738/rtp_D/vhf_2_sel_switch
 laminar/B738/rtp_D/vhf_3_sel_switch
 laminar/B738/rtp_L/off_switch
 laminar/B738/rtp_L/vhf_1_sel_switch
 laminar/B738/rtp_L/vhf_2_sel_switch
 laminar/B738/rtp_L/vhf_3_sel_switch
 laminar/B738/rtp_L/hf_1_sel_switch
 laminar/B738/rtp_L/am_sel_switch
 laminar/B738/rtp_L/hf_2_sel_switch
 laminar/B738/rtp_L/freq_txfr_sel_switch
 laminar/B738/rtp_L/freq_MHz_sel_dial_up
 laminar/B738/rtp_L/freq_MHz_sel_dial_dn
 laminar/B738/rtp_L/freq_khz_sel_dial_up
 laminar/B738/rtp_L/freq_khz_sel_dial_dn
 laminar/B738/push_button/switch_freq_adf1_pre
 ss
 laminar/B738/push_button/switch_freq_adf2_pre
 ss
 laminar/B738/push_button/switch_freq_nav1_pre
 ss

laminar/B738/push_button/switch_freq_nav2_pre
 ss
 laminar/B738/rtp_R/off_switch
 laminar/B738/rtp_R/vhf_1/sel_switch
 laminar/B738/rtp_R/vhf_2/sel_switch
 laminar/B738/rtp_R/vhf_3/sel_switch
 laminar/B738/rtp_R/hf_1/sel_switch
 laminar/B738/rtp_R/am/sel_switch
 laminar/B738/rtp_R/hf_2/sel_switch
 laminar/B738/rtp_R/freq_txfr/sel_switch
 laminar/B738/rtp_R/freq_MHz/sel_dial_up
 laminar/B738/rtp_R/freq_MHz/sel_dial_dn
 laminar/B738/rtp_R/freq_khz/sel_dial_up
 laminar/B738/rtp_R/freq_khz/sel_dial_dn
 laminar/B738/fire/engine01/ext_switch_arm
 laminar/B738/fire/engine02/ext_switch_arm
 laminar/B738/fire/engine01/ext_switch_L
 laminar/B738/fire/engine01/ext_switch_R
 laminar/B738/fire/engine02/ext_switch_L
 laminar/B738/fire/engine02/ext_switch_R
 laminar/B738/fire/apu/ext_switch_L
 laminar/B738/fire/apu/ext_switch_R
 laminar/B738/fire/apu/ext_switch_arm
 laminar/B738/switch/land_lights_ret_left_up
 laminar/B738/switch/land_lights_ret_left_dn
 laminar/B738/switch/land_lights_ret_right_up
 laminar/B738/switch/land_lights_ret_right_dn
 laminar/B738/switch/land_lights_left_off
 laminar/B738/switch/land_lights_left_on
 laminar/B738/switch/land_lights_ret_left_off
 laminar/B738/switch/land_lights_ret_left_on
 laminar/B738/switch/land_lights_ret_left_ret
 laminar/B738/switch/land_lights_ret_right_off
 laminar/B738/switch/land_lights_ret_right_on
 laminar/B738/switch/land_lights_right_off
 laminar/B738/switch/land_lights_right_on
 laminar/B738/toggle_switch/position_light_up
 laminar/B738/toggle_switch/position_light_down
 laminar/B738/toggle_switch/compass_brightness_
 lft
 laminar/B738/toggle_switch/compass_brightness_
 rgt
 laminar/B738/toggle_switch/cockpit_dome_up
 laminar/B738/toggle_switch/cockpit_dome_dn
 laminar/B738/toggle_switch/taxi_light_brigh_toggl
 e
 laminar/B738/toggle_switch/taxi_light_brightness
 _pos_up
 laminar/B738/toggle_switch/taxi_light_brightness
 _pos_dn
 laminar/B738/spring_switch/landing_lights_all
 laminar/B738/toggle_switch/seatbelt_sign_up
 laminar/B738/toggle_switch/seatbelt_sign_dn
 laminar/B738/toggle_switch/no_smoking_up
 laminar/B738/toggle_switch/no_smoking_dn
 laminar/B738/toggle_switch/irs_source_left
 laminar/B738/toggle_switch/irs_source_right
 laminar/B738/toggle_switch/irs_L_left
 laminar/B738/toggle_switch/irs_L_right
 laminar/B738/toggle_switch/irs_R_left
 laminar/B738/toggle_switch/irs_R_right
 laminar/B738/toggle_switch/irs_sys_dspl
 laminar/B738/toggle_switch/irs_dspl_sel_left
 laminar/B738/toggle_switch/irs_dspl_sel_right
 laminar/B738/toggle_switch/irs_dspl_sel_brt_left
 laminar/B738/toggle_switch/irs_dspl_sel_brt_right
 laminar/B738/fms/update_factory
 laminar/B738/fms/msg_not_intcpt
 laminar/B738/button/align_analog_horiz
 laminar/B738/button/fmc1_1L
 laminar/B738/button/fmc1_2L
 laminar/B738/button/fmc1_3L
 laminar/B738/button/fmc1_4L
 laminar/B738/button/fmc1_5L
 laminar/B738/button/fmc1_6L
 laminar/B738/button/fmc1_1R
 laminar/B738/button/fmc1_2R
 laminar/B738/button/fmc1_3R
 laminar/B738/button/fmc1_4R
 laminar/B738/button/fmc1_5R
 laminar/B738/button/fmc1_6R
 laminar/B738/button/fmc1_0
 laminar/B738/button/fmc1_1
 laminar/B738/button/fmc1_2
 laminar/B738/button/fmc1_3
 laminar/B738/button/fmc1_4
 laminar/B738/button/fmc1_5
 laminar/B738/button/fmc1_6
 laminar/B738/button/fmc1_7
 laminar/B738/button/fmc1_8
 laminar/B738/button/fmc1_9
 laminar/B738/button/fmc1_period
 laminar/B738/button/fmc1_minus
 laminar/B738/button/fmc1_slash
 laminar/B738/button/fmc1_A
 laminar/B738/button/fmc1_B
 laminar/B738/button/fmc1_C
 laminar/B738/button/fmc1_D
 laminar/B738/button/fmc1_E
 laminar/B738/button/fmc1_F

laminar/B738/button/fmc1_G
laminar/B738/button/fmc1_H
laminar/B738/button/fmc1_I
laminar/B738/button/fmc1_J
laminar/B738/button/fmc1_K
laminar/B738/button/fmc1_L
laminar/B738/button/fmc1_M
laminar/B738/button/fmc1_N
laminar/B738/button/fmc1_O
laminar/B738/button/fmc1_P
laminar/B738/button/fmc1_Q
laminar/B738/button/fmc1_R
laminar/B738/button/fmc1_S
laminar/B738/button/fmc1_T
laminar/B738/button/fmc1_U
laminar/B738/button/fmc1_V
laminar/B738/button/fmc1_W
laminar/B738/button/fmc1_X
laminar/B738/button/fmc1_Y
laminar/B738/button/fmc1_Z
laminar/B738/button/fmc1_SP
laminar/B738/button/fmc1_clr
laminar/B738/button/fmc1_del
laminar/B738/button/fmc1_prev_page
laminar/B738/button/fmc1_next_page
laminar/B738/button/fmc1_init_ref
laminar/B738/button/fmc1_menu
laminar/B738/button/fmc1_n1_lim
laminar/B738/button/fmc1_rte
laminar/B738/button/fmc1_legs
laminar/B738/button/fmc1_fix
laminar/B738/button/fmc1_clb
laminar/B738/button/fmc1_crz
laminar/B738/button/fmc1_des
laminar/B738/button/fmc1_dep_app
laminar/B738/button/fmc1_hold
laminar/B738/button/fmc1_prog
laminar/B738/button/fmc1_exec
laminar/B738/button/fmc2_1L
laminar/B738/button/fmc2_2L
laminar/B738/button/fmc2_3L
laminar/B738/button/fmc2_4L
laminar/B738/button/fmc2_5L
laminar/B738/button/fmc2_6L
laminar/B738/button/fmc2_1R
laminar/B738/button/fmc2_2R
laminar/B738/button/fmc2_3R
laminar/B738/button/fmc2_4R
laminar/B738/button/fmc2_5R
laminar/B738/button/fmc2_6R
laminar/B738/button/fmc2_0
laminar/B738/button/fmc2_1
laminar/B738/button/fmc2_2
laminar/B738/button/fmc2_3
laminar/B738/button/fmc2_4
laminar/B738/button/fmc2_5
laminar/B738/button/fmc2_6
laminar/B738/button/fmc2_7
laminar/B738/button/fmc2_8
laminar/B738/button/fmc2_9
laminar/B738/button/fmc2_period
laminar/B738/button/fmc2_minus
laminar/B738/button/fmc2_slash
laminar/B738/button/fmc2_A
laminar/B738/button/fmc2_B
laminar/B738/button/fmc2_C
laminar/B738/button/fmc2_D
laminar/B738/button/fmc2_E
laminar/B738/button/fmc2_F
laminar/B738/button/fmc2_G
laminar/B738/button/fmc2_H
laminar/B738/button/fmc2_I
laminar/B738/button/fmc2_J
laminar/B738/button/fmc2_K
laminar/B738/button/fmc2_L
laminar/B738/button/fmc2_M
laminar/B738/button/fmc2_N
laminar/B738/button/fmc2_O
laminar/B738/button/fmc2_P
laminar/B738/button/fmc2_Q
laminar/B738/button/fmc2_R
laminar/B738/button/fmc2_S
laminar/B738/button/fmc2_T
laminar/B738/button/fmc2_U
laminar/B738/button/fmc2_V
laminar/B738/button/fmc2_W
laminar/B738/button/fmc2_X
laminar/B738/button/fmc2_Y
laminar/B738/button/fmc2_Z
laminar/B738/button/fmc2_SP
laminar/B738/button/fmc2_clr
laminar/B738/button/fmc2_del
laminar/B738/button/fmc2_prev_page
laminar/B738/button/fmc2_next_page
laminar/B738/button/fmc2_init_ref
laminar/B738/button/fmc2_menu
laminar/B738/button/fmc2_n1_lim
laminar/B738/button/fmc2_rte
laminar/B738/button/fmc2_legs
laminar/B738/button/fmc2_fix
laminar/B738/button/fmc2_clb
laminar/B738/button/fmc2_crz

laminar/B738/button/fmc2_des
 laminar/B738/button/fmc2_dep_app
 laminar/B738/button/fmc2_hold
 laminar/B738/button/fmc2_prog
 laminar/B738/button/fmc2_exec

#Tablet

laminar/B738/tab/back
 #laminar/B738/tab/entry_payload
 laminar/B738/tab/home
 laminar/B738/tab/info
 laminar/B738/tab/left
 laminar/B738/tab/line0
 laminar/B738/tab/line1
 laminar/B738/tab/line2
 laminar/B738/tab/line3
 laminar/B738/tab/line4
 laminar/B738/tab/line5
 laminar/B738/tab/line6
 laminar/B738/tab/line7
 laminar/B738/tab/line8
 laminar/B738/tab/line9
 laminar/B738/tab/menu1
 laminar/B738/tab/menu2
 laminar/B738/tab/menu3
 laminar/B738/tab/menu4
 laminar/B738/tab/menu5
 laminar/B738/tab/menu6
 laminar/B738/tab/menu7
 laminar/B738/tab/menu8
 laminar/B738/tab/numpad_0
 laminar/B738/tab/numpad_1
 laminar/B738/tab/numpad_2
 laminar/B738/tab/numpad_3
 laminar/B738/tab/numpad_4
 laminar/B738/tab/numpad_5
 laminar/B738/tab/numpad_6
 laminar/B738/tab/numpad_7
 laminar/B738/tab/numpad_8
 laminar/B738/tab/numpad_9
 laminar/B738/tab/numpad_close
 laminar/B738/tab/numpad_clr
 laminar/B738/tab/numpad_comma
 laminar/B738/tab/numpad_enter
 laminar/B738/tab/numpad_minus
 laminar/B738/tab/right
 laminar/B738/tab/spec
 laminar/B738/tab/perf1
 laminar/B738/tab/perf10
 laminar/B738/tab/perf11
 laminar/B738/tab/perf12

laminar/B738/tab/perf13
 laminar/B738/tab/perf14
 laminar/B738/tab/perf15
 laminar/B738/tab/perf16
 laminar/B738/tab/perf2
 laminar/B738/tab/perf3
 laminar/B738/tab/perf4
 laminar/B738/tab/perf5
 laminar/B738/tab/perf6
 laminar/B738/tab/perf7
 laminar/B738/tab/perf8
 laminar/B738/tab/perf9
 #laminar/B738/airstairs_toggle
 #laminar/B738/asu_toggle
 laminar/B738/system/rst_fail

laminar/B738/engine/mixture1_cutoff
 laminar/B738/engine/mixture1_idle
 laminar/B738/engine/mixture1_toggle
 laminar/B738/engine/mixture2_cutoff
 laminar/B738/engine/mixture2_idle
 laminar/B738/engine/mixture2_toggle
 sim/radios/obs_HSI_up
 sim/radios/obs_HSI_down
 sim/radios/copilot_obs_HSI_up
 sim/radios/copilot_obs_HSI_down
 laminar/B738/knob/left_wiper_dn
 laminar/B738/knob/left_wiper_up
 laminar/B738/knob/right_wiper_dn
 laminar/B738/knob/right_wiper_up
 laminar/B738/push_button/capt_six_pack
 laminar/B738/push_button/fo_six_pack
 laminar/B738/alert/below_gs_pilot
 laminar/B738/alert/below_gs_copilot

##Chrono

laminar/B738/push_button/chrono_disp_mode_capt
 laminar/B738/push_button/chrono_disp_mode_fo
 laminar/B738/push_button/chrono_capt_et_mode
 laminar/B738/push_button/chrono_fo_et_mode
 laminar/B738/push_button/chrono_cycle_capt
 laminar/B738/push_button/chrono_cycle_fo
 laminar/B738/push_button/et_reset_capt
 laminar/B738/push_button/et_reset_fo
 laminar/B738/push_button/chrono_bright_minus_cpt
 laminar/B738/push_button/chrono_bright_minus_fo
 laminar/B738/push_button/chrono_bright_plus_cpt

laminar/B738/push_button/chrono_bright_plus_fo

##Guards

laminar/B738/button_switch_cover00
 laminar/B738/button_switch_cover01
 laminar/B738/button_switch_cover02
 laminar/B738/button_switch_cover03
 laminar/B738/button_switch_cover04
 laminar/B738/button_switch_cover05
 laminar/B738/button_switch_cover06
 laminar/B738/button_switch_cover07
 laminar/B738/button_switch_cover08
 laminar/B738/button_switch_cover09
 laminar/B738/button_switch_cover10
 laminar/B738/toggle_switch/fdr_cover
 laminar/B738/toggle_switch/alt_flaps_cover
 laminar/B738/toggle_switch/flt_ctr_A_cover
 laminar/B738/toggle_switch/flt_ctr_A_dn
 laminar/B738/toggle_switch/flt_ctr_A_up
 laminar/B738/toggle_switch/flt_ctr_B_cover
 laminar/B738/toggle_switch/flt_ctr_B_dn
 laminar/B738/toggle_switch/flt_ctr_B_up
 laminar/B738/toggle_switch/gpws_flap_cover
 laminar/B738/toggle_switch/gpws_gear_cover
 laminar/B738/toggle_switch/gpws_terr_cover
 laminar/B738/toggle_switch/gpws_xraas
 laminar/B738/toggle_switch/gpws_xraas_cover
 laminar/B738/toggle_switch/man_Indgear_cover
 laminar/B738/toggle_switch/spoiler_A_cover
 laminar/B738/toggle_switch/spoiler_A
 laminar/B738/toggle_switch/spoiler_B_cover
 laminar/B738/toggle_switch/spoiler_B
 laminar/B738/toggle_switch/ap_trim_w_guard
 laminar/B738/toggle_switch/ap_trim_w_guard_ne
 g
 laminar/B738/toggle_switch/el_trim_w_guard

##GPWS

laminar/B738/push_button/gpws_test
 laminar/B738/toggle_switch/gpws_flap
 laminar/B738/toggle_switch/gpws_gear
 laminar/B738/toggle_switch/gpws_terr

##Oxy

laminar/B738/one_way_switch/pax_oxy_norm
 laminar/B738/one_way_switch/pax_oxy_on
 laminar/B738/push_button/oxy_test_cpt
 laminar/B738/push_button/oxy_test_cpt2
 laminar/B738/push_button/oxy_test_fo
 laminar/B738/push_button/oxy_test_fo2

laminar/B738/toggle_switch/oxy_mask_capt_off
 laminar/B738/toggle_switch/oxy_mask_capt_on
 laminar/B738/toggle_switch/oxy_mask_fo_off
 laminar/B738/toggle_switch/oxy_mask_fo_on

##IRS

laminar/B738/push_button/irs_key_0
 laminar/B738/push_button/irs_key_1
 laminar/B738/push_button/irs_key_2
 laminar/B738/push_button/irs_key_3
 laminar/B738/push_button/irs_key_4
 laminar/B738/push_button/irs_key_5
 laminar/B738/push_button/irs_key_6
 laminar/B738/push_button/irs_key_7
 laminar/B738/push_button/irs_key_8
 laminar/B738/push_button/irs_key_9
 laminar/B738/push_button/irs_key_clr
 laminar/B738/push_button/irs_key_ent

##MMR

laminar/B738/push_button/mmr1_0
 laminar/B738/push_button/mmr1_1
 laminar/B738/push_button/mmr1_2
 laminar/B738/push_button/mmr1_3
 laminar/B738/push_button/mmr1_4
 laminar/B738/push_button/mmr1_5
 laminar/B738/push_button/mmr1_6
 laminar/B738/push_button/mmr1_7
 laminar/B738/push_button/mmr1_8
 laminar/B738/push_button/mmr1_9
 laminar/B738/push_button/mmr1_act_stby
 laminar/B738/push_button/mmr1_clr
 laminar/B738/push_button/mmr1_mode_dn
 laminar/B738/push_button/mmr1_mode_up
 laminar/B738/push_button/mmr1_test
 laminar/B738/push_button/mmr2_0
 laminar/B738/push_button/mmr2_1
 laminar/B738/push_button/mmr2_2
 laminar/B738/push_button/mmr2_3
 laminar/B738/push_button/mmr2_4
 laminar/B738/push_button/mmr2_5
 laminar/B738/push_button/mmr2_6
 laminar/B738/push_button/mmr2_7
 laminar/B738/push_button/mmr2_8
 laminar/B738/push_button/mmr2_9
 laminar/B738/push_button/mmr2_act_stby
 laminar/B738/push_button/mmr2_clr
 laminar/B738/push_button/mmr2_mode_dn
 laminar/B738/push_button/mmr2_mode_up
 laminar/B738/push_button/mmr2_test

```
##BP
BetterPushback/start
BetterPushback/connect_first
BetterPushback/disconnect
BetterPushback/reconnect
```


ANNEXE D EXTRAIT DE L'ENREGISTREMENT DES MESSAGES TCP
D'UN VOL

111.221 C6070/|
111.349 C6072/|
112.355 C6430/|
112.427 C6432/|
113.423 C6200/|
113.501 C6202/|
114.701 C6210/|
114.775 C6212/|
115.509 C6120/|
115.581 C6122/|
115.691 C6120/|
115.762 C6122/|
115.873 C6120/|
115.943 C6122/|
117.305 C6060/|
117.378 C6062/|
118.252 C6220/|
118.326 C6222/|
119.786 C6120/|
119.897 C6122/|
119.991 C6120/|
120.064 C6122/|
121.042 C6060/|
121.116 C6062/|
122.342 C6240/|
122.432 C6242/|
123.475 C6110/|
123.547 C6112/|
124.954 C6070/|
125.026 C6072/|
129.268 C6230/|
129.336 C6232/|
130.082 C6200/|
130.137 C6202/|
131.473 C6110/|
131.562 C6112/|
134.096 C6190/|
134.171 C6192/|
135.226 C6290/|
135.298 C6292/|
135.751 C6360/|
135.844 C6362/|
136.472 C6280/|
136.564 C6282/|
136.675 C6280/|
136.747 C6282/|
136.858 C6280/|
136.916 C6282/|
137.689 T1031.000000/|
137.738 C6410/|
137.791 C6412/|
140.298 C6060/|
140.371 C6062/|
141.17 T1030.000000/|

ANNEXE E COMMUNICATIONS RADIO LORS DU DÉROULEMENT D'UN SCÉNARIO

Co-pilote (C-P) : Le tablier pour Poly33.

Radio (R) : Allez-y Poly33 pour le tablier.

C-P : On est prêt à circuler pour la piste 24 gauche.

R : Poly33 circulez via rampe nord et à l'écart du Delta contactez le sol sur 121.9

C-P : On circule via rampe nord et à l'écart du Delta on contacte le sol sur 121.9

R : bonne journée Poly33.

C-P : Le sol de Montréal, bon après-midi, Poly33 à l'écart du Delta.

R : Poly33, bon après-midi, continuez à circuler via l'Alpha 4 et l'Alpha, traversez le seuil de la piste 28. A l'écart de la piste 24 gauche contactez la tour sur 119.9, QNH 2992.

C-P : On continue à circuler via l'Alpha 4 et l'Alpha, on traverse le seuil de la piste 28, à l'écart de la piste 24 gauche on contacte la tour sur 119.9, QNH 2992.

R : Bonne journée Poly33.

C-P : La tour de Montréal, bon après-midi, Poly33 à l'écart de la piste 24 gauche, prêt à l'envol.

R : Poly33, bon après-midi, alignez-vous et attendez piste 24 gauche.

R : Poly33, les vents sont calmes, contactez les départs sur 124.65, autorisé à décoller piste 24 gauche bonne journée

C-P : Départs de Montréal, bon après-midi, Poly33 on libère x pour 5000 pieds au départ de la piste 24 gauche Montréal 1 départ.

R : Poly33, bon après-midi, vous êtes identifié radar, continuez la montée pour niveau 230 en quittant 3000 pieds procédez direct BOBKI

C-P : On continue la montée pour niveau 230, en quittant 3000 pieds on procède directement vers BOBKI.

« en passant 10000 pieds »

R : Poly33, contactez le centre de Montréal sur 132.35

C-P : Poly33, on contacte Montréal sur 132.35, bonne journée.

R : Bonne journée Poly33.

P : Centre de Montréal, bonjour, Poly33, on libère x pour niveau 230

M : Poly33 bonjour, vous êtes identifié radar, arrêtez la montée au niveau 210

P : On arrête la montée au niveau 210.

ANNEXE F PLAN DE VOL FOURNI AUX PARTICIPANTS

POL Y033/29 MAY/YUL-YYZ		Page 1	
[OFF]			

POLY033	29MAY2022	CYUL-CYYZ	B738 N806SB
OF 1	PIERRE ELLIOTT	TRUDE-LESTER B	PEARSON INTL
		WX PROG 2912 2915 2918	OBS 2912 2912 2912
ATC C/S	POLY033	CYUL/YUL	CYYZ/YYZ
29MAY2022	N806SB	1420/1440	1536/1544
B737-800 /	CFM56-7B26		STA 1550
		CTOT:....	
MAXIMUM	TOW 79016	LAW 66361	ZFW 62732
ESTIMATED	TOW 67789	LAW 65209	ZFW 61100
			CRZ SYS CI 7
			GND DIST 284
			AIR DIST 309
			G/C DIST 274
			AVG WIND 297/041
			AVG W/C M027
			AVG ISA P005
			AVG FF KGS/HR 2758
			FUEL BIAS P00.0
			TKOF ALTN
ALTN CYXU			
FL STEPS CYUL/0300/			

DISP RMKS	PLANNED OPTIMUM FLIGHT LEVEL		

PLANNED FUEL			

FUEL	ARPT	FUEL	TIME

TRIP	YYZ	2580	0056
CONT 15 MIN		690	0015
ALTN	YXU	1313	0032
FINRES		1106	0030

MINIMUM T/OFF FUEL		5689	0213

EXTRA		1000	0021

T/OFF FUEL		6689	0234
TAXI	YUL	227	0020

BLOCK FUEL	YUL	6916	
PIC EXTRA		
TOTAL FUEL		
REASON FOR PIC EXTRA		

FMC INFO:			
FINRES+ALTN		2419	
TRIP+TAXI		2807	

NO TANKERING RECOMMENDED (P)			

I HEREWITH CONFIRM THAT I HAVE PERFORMED A THOROUGH SELF BRIEFING ABOUT THE DESTINATION AND ALTERNATE AIRPORTS OF THIS FLIGHT INCLUDING THE APPLICABLE INSTRUMENT APPROACH PROCEDURES, AIRPORT FACILITIES, NOTAMS AND ALL OTHER RELEVANT PARTICULAR INFORMATION.			
DISPATCHER: WILLIE MILES		PIC NAME: VIDAL, FRANÇOIS	
TEL: +1 800 555 0199		PIC SIGNATURE:	

ANNEXE G QUESTIONNAIRE DE PRÉSENCE FOURNI AUX PARTICIPANTS

Presence questionnaire for pilot flying

I. Please rate your sense of being in the cockpit, on the following scale from 1 to 7, where 7 represents your normal experience of being in a cockpit.

I had a sense of "being there" in the cockpit

1. Not at all ... 7. Very much.

II. To what extent were there times during the experience when the cockpit was the reality for you?

There were times during the experience when the cockpit was the reality for me...

1. At no time ... 7. Almost all the time.

III. When you think back about your experience, do you think of the cockpit more as images that you saw, or more as somewhere that you visited?

The cockpit seems to me to be more like...

1. Images that I saw ... 7. Somewhere that I visited.

IV. During the time of the experience, which was strongest on the whole, your sense of being in the cockpit, or of being elsewhere?

had a stronger sense of...

1. Being elsewhere ... 7. Being in the cockpit.

V. Consider your memory of being in the cockpit. How similar in terms of the structure of the memory is this to the structure of the memory of other places you have been today? By "structure of the memory" consider things like the extent to which you have a visual memory of the cockpit, whether that memory is in colour, the extent to which the memory seems vivid or realistic, its size, location in your imagination, the extent to which it is panoramic in your imagination, and other such structural elements.

I think of the cockpit as a place in a way similar to other places that I've been today...

1. Not at all ... 7. Very much so.

VI. During the time of the experience, did you often think to yourself that you were actually in the cockpit?

During the experience I often thought that I was really standing in the cockpit...

1. Not very often ... 7. Very much so.

ANNEXE H QUESTIONNAIRE DE CHARGE COGNITIVE FOURNI AUX PARTICIPANTS

Participant: P12

NASA-TLX WORKLOAD RATING SHEET

Definition of Task Demand Factor

Mental demand

How much mental and perceptual activity was required (e.g., thinking, deciding, calculating, remembering, looking, searching, etc.)? Was the task easy or demanding, simple or complex, exacting or forgiving?

Physical demand

How much physical activity was required (e.g., pushing, pulling, turning, controlling, activating, etc.)? Was the task easy or demanding, slow or brisk, slack or strenuous, restful or laborious?

Temporal demand

How much time pressure did you feel due to the rate or pace at which the tasks or task elements occurred? Was the pace slow and leisurely or rapid and frantic?

Performance

How successful do you think you were in accomplishing the goals of the task set by the experimenter (or yourself)? How satisfied were you with your performance in accomplishing these goals?

Frustration level

How insecure, discouraged, irritated, stressed and annoyed versus secure, gratified, content, relaxed and complacent did you feel during the task?

Effort

How hard did you have to work (mentally and physically) to accomplish your level of performance?

Participant: P12

NASA-TLX Mental Workload Rankings

For each of the pairs listed below, circle the scale title that represents the more important contributor to workload in the display.

Mental Demand or Physical Demand

Mental Demand or Temporal Demand

Mental Demand or Performance

Mental Demand or Effort

Mental Demand or Frustration

Physical Demand or Temporal Demand

Physical Demand or Performance

Physical Demand or Effort

Physical Demand or Frustration

Temporal Demand or Performance

Temporal Demand or Effort

Temporal Demand or Frustration

Performance or Effort

Performance or Frustration

Effort or Frustration

Participant: P12

NASA-TLX Mental Workload Ratings

Please place an "X" along each scale at the point that best indicates your experience with the display.

Mental Demand: How much mental and perceptual activity was required (e.g., thinking, deciding, calculating, remembering, looking, searching, etc.)? Was the task easy or demanding, simple or complex, exacting or forgiving?



Physical demand: How much physical activity was required (e.g., pushing, pulling, turning, controlling, activating, etc.)? Was the task easy or demanding, slow or brisk, slack or strenuous, restful or laborious?



Temporal demand: How much time pressure did you feel due to the rate or pace at which the tasks or task elements occurred? Was the pace slow and leisurely or rapid and frantic?



Performance: How successful do you think you were in accomplishing the goals of the task set by the experimenter (or yourself)? How satisfied were you with your performance in accomplishing these goals?



Frustration level: How insecure, discouraged, irritated, stressed and annoyed versus secure, gratified, content, relaxed and complacent did you feel during the task?



Effort: How hard did you have to work (mentally and physically) to accomplish your level of performance?

