



HAL
open science

Contributions optique et gravito-inertielle à la perception et au contrôle de la hauteur-sol de vol

François Denquin

► **To cite this version:**

François Denquin. Contributions optique et gravito-inertielle à la perception et au contrôle de la hauteur-sol de vol. Education. Université Montpellier, 2021. Français. NNT : 2021MONT4002 . tel-03346469

HAL Id: tel-03346469

<https://theses.hal.science/tel-03346469v1>

Submitted on 16 Sep 2021

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

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

THÈSE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER

En Sciences du Mouvement Humain

École doctorale SMH 463

EuroMov Digital Health in Motion (Univ. Montpellier) & DTIS (ONERA)

Contributions Optique et Gravito-Inertielle à la perception et au contrôle de la hauteur-sol de vol

Présentée par François DENQUIN
Le 2 juillet 2021

Sous la direction de Benoît BARDY
et Jean-Christophe SARRAZIN

Devant le jury composé de

Benoît BARDY	Professeur, EuroMov DHM, Université de Montpellier	Directeur
Brice ISABLEU	Professeur, Aix-Marseille Université	Examineur
Frank MARS	Directeur de recherche CNRS, LS2N, Nantes	Rapporteur
Gaëlle QUARCK	Professeure, Université de Caen Basse Normandie	Rapporteuse
Jean-Christophe SARRAZIN	Chercheur, ONERA, Salon de Provence	Directeur
Indira THOUVENIN	Professeure, Université de Technologie de Compiègne	Présidente du jury



UNIVERSITÉ
DE MONTPELLIER

« Pour réussir, il ne suffit pas de prévoir. Il faut aussi savoir improviser. »

Isaac Asimov

UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER

Résumé

Université de Montpellier

Doctor of Philosophy

**Contributions optique et gravito-inertielle à la perception et au contrôle de la
hauteur-sol de vol**

by François DENQUIN

Résumé français

Chaque année, près de 30% des accidents survenant dans l'aéronautique sont dus à des phénomènes de désorientation spatiale. Ces phénomènes impliquent une mauvaise perception de l'environnement ayant pour conséquence une modification (ou une absence de modification) des trajectoires de vol pouvant être dramatiques. Ces problèmes de perception viennent souvent de biais perceptifs, pouvant survenir pour diverses raisons : intensité infraliminaire des variations gravito-inertielles, mauvaises conditions météorologiques, variations incohérentes entre différentes modalités sensorielles... Au cours de cette thèse, nous nous sommes intéressés aux mécanismes de perception et de contrôle du mouvement propre, et plus particulièrement ceux impliqués lors du Vol à Basse Hauteur (VBH), manœuvre aérienne militaire courante mais risquée au cours de laquelle les pilotes doivent voler proche du sol à vitesse élevée. Deux lots d'expérimentations ont été menées aux laboratoires EuroMov de l'Université de Montpellier (participants non-pilotes) et Ames de la NASA (pilotes experts militaires), dans le but de tester l'impact des stimuli environnementaux sur les performances de perception et de contrôle de la hauteur-sol. Deux simulateurs de mouvement différents ont été utilisés, le simulateur iMose (Interactive Motion Simulator, EuroMov) et le simulateur VMS (Vertical Motion Simulator, Ames). Au cours de ces expérimentations, les participants devaient réaliser deux tâches : une tâche d'observateur d'un VBH simulé, dans laquelle ils devaient reporter leur hauteur-sol de vol, et une tâche de contrôleur lors d'un VBH simulé, où ils devaient contrôler cette hauteur-sol. Différentes combinaisons de stimuli visuo-vestibulaires ont été testées. Trois points principaux ont été mis en avant par les résultats des expérimentations menées : 1) la présence d'un environnement multimodal (visuo-vestibulaire) engendre un comportement plus stable et de meilleures performances qu'un environnement monomodal (uniquement visuel); 2) un environnement multimodal impacte différemment les performances de vol en fonction de la tâche à accomplir (Observateur vs. Contrôleur); 3) un environnement réaliste n'est pas forcément plus bénéfique pour les performances en vol qu'un environnement simplifié. Ces résultats sont importants pour le monde de la simulation, les performances des pilotes dépendant de l'environnement simulé et de son niveau de fidélité. La simulation d'environnements multimodaux cohérents et réalistes est nécessaire pour l'observation de comportements réalistes de la part des pilotes et

une meilleure confrontation à la réalité lors d'entraînements qu'avec des environnements simulés plus simplifiés.

English abstract

Each year, one third of the accidents in aeronautics are due to Spatial Disorientation (SD) phenomena. Pilots subject to SD misperceived their environment, which might induce possible dramatic changes in the pilots trajectory. These misperceptions come from diverse reasons : infraliminary magnitude of the gravito-inertial variations, bad weather conditions, non-coherent variations between stimuli... In this thesis, we investigated the perception and control mechanisms of self-motion during a Low-Altitude Flight (LAF) maneuver, which is a common, yet dangerous, military procedure. In LAF, pilots have to fly the nearest to the ground, at high speed. Two sets of experiments were led at the EuroMov laboratory (University of Montpellier, non-pilot participants) and the Ames laboratory (NASA, military expert pilots), in order to evaluate the impact of the visuo-vestibular contribution on height flight perception and control performances. Two different motion simulators, the iMose simulator (EuroMov) and the VMS (Vertical Motion Simulator, Ames) were used. During the experiments, the participants had to complete two tasks. The first one was an observer task of a simulated LAF scenario, in which participants had to report their height above ground. The second one was a controller task, in which participants had to control their height above ground during a simulated LAF scenario. Participants experienced several visuo-vestibular combinations. We studied their impact on the pilots performances. The results enlightened three main items : 1) Participants had a globally more stable behaviour and better performances in a visuo-vestibular environment than in a visual-only one; 2) visuo-vestibular stimuli impact the two experimental tasks differently; 3) a high fidelity simulated environment induces not necessarily better performances than a low fidelity one. These results are important for the world of simulation, where pilots performances depends on the simulated environment and its fidelity level. It is thus necessary to simulate coherent multimodal environments to observe realistic pilots behaviour. It would ensure a better training for real flight than with simplified environments.

Remerciements

Je voudrais remercier toutes les personnes qui m'ont aidées au cours de cette thèse, que ce soit au travers d'une assistance directe sur cette étude ou via un soutien émotionnel. Toutes ces personnes ont contribué énormément à la réussite de ce travail.

Cette thèse n'aurait pas été possible sans le soutien de mes amis et collègues de l'ONERA salon-de-Provence avec qui j'ai passé une grande partie de mes années de thèses. Merci en particulier à Jean-Christophe Sarrazin, qui m'a donné l'occasion de cette thèse et qui m'a supervisé lorsque j'étais à l'ONERA. Je remercie également les doctorants que j'y ai croisé (Jonas, Bertille, Floriane, Raphael...), ainsi que les chercheurs et le personnel, qui m'ont aidés et soutenus durant cette thèse.

Je tiens également à remercier mes amis et collègues du laboratoire EuroMov qui m'ont également accueilli au cours de cette thèse. Un grand merci à Benoit Bardy, qui a dirigé cette thèse et apporté de précieux conseils. Merci également aux doctorants, chercheurs et personnels que j'y ai rencontré, en particulier Simon Pla et Jamilah Foucher qui m'ont supportés et grandement aidés au travers des expérimentations que l'on a mené.

Je remercie également l'équipe de la NASA avec laquelle j'ai travaillé au laboratoire Ames (USA), en particulier Martine, Ed et Nic, qui m'ont permis d'avoir accès à des dispositifs uniques ainsi que des conseils avisés.

Enfin, je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont portées jusqu'ici. Ma famille, mes amis et mon chat, qui ont été un soutien indéfectible durant toute ma scolarité. Merci aux professeurs que j'ai rencontré au cours de mon parcours scolaire et qui m'ont donné goût aux sciences, mes professeurs de lycée M. Bessonne, Mme. Graff et Mme. Lacroix, mes professeurs de classes préparatoire, M. Kaczmarek et Mme. Hervé, et bien sûr les professeurs rencontrés en école d'ingénieur, M. Picard, M. Gaussier, M. Melnyk et évidemment M. Mostafaoui.

J'aimerais dédicacer cette thèse à mon grand père Yves Thébaut (1922 - 2005) qui m'a appris l'importance et l'amour des sciences.

Table des matières

Remerciements	vii
1 Introduction	1
1.1 Perception du mouvement propre	1
1.2 Problématique des manoeuvres aériennes	1
1.3 Complexité de la réalité	2
1.4 Approches existantes	3
1.5 Objectifs de la thèse	3
1.6 Structure du document	3
2 Champ de recherche	5
2.1 Le Vol à Basse Hauteur	5
2.1.1 Contexte	5
2.1.2 Réalisation et contraintes	5
2.1.3 Risques inhérents	6
2.1.4 Identification du problème	6
2.2 Le système visuel	7
2.2.1 Fonctionnement	7
2.2.2 Informations lors d'un déplacement aérien	8
2.2.3 Exemples de paramètres optiques	9
2.2.4 Implication d'un mouvement réel	13
2.3 Le système vestibulaire	14
2.3.1 Fonctionnement	14
2.3.2 Etudes de l'impact des informations GI	14
2.3.3 Information GI lors d'un vol	16
2.3.4 Limitations du système	16
2.3.5 Multimodalité du système	17
2.4 Les théories de la perception multimodale	18

2.4.1	Approche cognitiviste	19
	Contexte	19
	Exemples : Etudes sur l'inférence causale	19
	Exemples : Etude "sensory weighted"	21
	Limites inhérentes à l'approche	22
2.4.2	Approche intermodale	23
	Contexte	23
	La spécificité	24
	La théorie du "Global Array"	25
	Exemples d'application	26
	Conclusions sur l'approche	28
2.5	Complexité des vols en environnement réel	29
2.5.1	Limitation des approches théoriques	29
	Mono- vs. Multi-modalité du mouvement propre	29
	Différences entre contrôleur et observateur	29
	Impact sur la structure informationnelle	30
2.5.2	Différences entre vol réel et vol simulé	31
	Fidélité de la simulation	32
3	Première étude - Expérimentation observateur - Pilotes novices	35
3.1	Méthodologie	36
3.1.1	Présentation des sujets et des questionnaires	36
3.1.2	Matériel	36
	Système de simulation mobile	36
	Système de simulation virtuelle	38
	Joystick d'aviation pour les performances	39
3.1.3	Stimuli	40
3.1.4	Modélisation de l'environnement	41
	Modélisation de l'environnement visuel	41
	Modélisation de la trajectoire	42
3.1.5	Procédure	44
3.1.6	Analyses et données	46
	Mesures	46
	Outils statistiques	47

3.2	Résultats	48
3.3	Discussion	51
4	Deuxième étude - Expérimentation contrôleur - Pilotes novices	53
4.1	Méthodologie	53
4.1.1	Présentation des sujets et questionnaires	53
4.1.2	Matériel	54
	Système de simulation mobile	54
	Système de simulation visuelle	54
	Joystick	55
4.1.3	Stimuli	55
4.1.4	Modélisation de l'environnement	56
4.1.5	Procédure	58
4.1.6	Analyses et données	61
	Mesures	61
	Outils statistiques	64
4.2	Résultats	64
4.3	Discussion	68
5	Troisième étude - Expérimentation observateur - Pilotes experts	71
5.1	Méthodologie	72
5.1.1	Présentation des sujets	72
5.1.2	Matériel	72
	Système de simulation mobile	72
	Système de simulation visuelle	73
5.1.3	Stimuli	73
5.1.4	Modélisation de l'environnement	74
	Modélisation de la trajectoire	75
5.1.5	Procédure	75
5.1.6	Analyses et données	77
	Mesures	77
5.2	Résultats	79
	5.2.1 Erreur de suivi	79
5.3	Discussion	85

6	Quatrième étude - Expérimentation contrôleur - Pilotes experts	87
6.1	Méthodologie	87
6.1.1	Présentation des sujets	87
6.1.2	Matériel	88
	Système de simulation mobile	88
	Système de simulation visuelle	88
6.1.3	Stimuli	88
6.1.4	Modélisation de l'environnement	89
	Modélisation de la trajectoire	90
6.1.5	Procédure	90
6.1.6	Analyses et données	91
	Mesures	91
	Outils statistiques	93
6.2	Résultats	94
6.3	Discussion	100
6.3.1	Expérimentation "Contrôleur"	100
7	Discussion	103
7.1	Environnement mono-modal vs. multimodal	103
7.2	Impact du bruit gravito-inertiel - Expérimentations EuroMov	106
7.3	Observateur vs. Contrôleur	108
7.4	Naïfs vs. Experts	110
7.5	Analyse du DIMSS	112
7.6	Fidélité des simulateurs	113
7.7	Limitations et perspectives de l'étude	114
7.8	Conclusion	116
A	Tableau récapitulatif - Observateur EuroMov	119
B	Tableau récapitulatif - Contrôleur EuroMov	121
C	Tableau récapitulatif - Observateur NASA	123
D	Tableau récapitulatif - Contrôleur NASA	125
	Bibliographie	127

Table des figures

2.1	Splay angle et depression angle	10
2.2	pground	12
2.3	Voiture qui freine	13
2.4	MCD	20
2.5	Nappe énergétique freinage	27
2.6	Simulateur de Liverpool	32
2.7	Simulateur VMS	33
3.1	Schéma iMose	37
3.2	Exemple visuels exp1	39
3.3	Exemple brouillard exp1	40
3.4	Récapitulatif essais	41
3.5	Terrain expérimental	42
3.6	Schéma récapitulatif	43
3.7	TR exp1	49
3.8	DIMSS exp1	50
3.9	StdJ exp1	51
4.1	Récapitulatif essais	56
4.2	Terrain expérimental	57
4.3	Schéma récapitulatif	59
4.4	exemple trajectoire	62
4.5	doExp2	65
4.6	corrélation Exp2	67
4.7	DIMSS Exp2	67
4.8	StdJ et NIC	68
5.1	VMS	73
5.2	jauge 2	74

5.3	Cycles	77
5.4	TR	80
5.5	MBE N1 Pert	81
5.6	MBE N1 Vis Mot	82
5.7	MBE N1 Cycle Pert	82
5.8	MBE N1 Up Vis Mot	84
5.9	MBE N1 Down Cycle Mot	84
5.10	MAE N1 Up Vis Mot	85
6.1	MBE N2 Mot	95
6.2	MBE N2 Vis	95
6.3	MBE N2 Cycle	96
6.4	RoC N2 Vis	96
6.5	MbgS N2 Vis	97
6.6	ClearLocus N2 Vis	97
6.7	ClearLocus N2 Mot	98
6.8	MBE N2 Vis Mot	98
6.9	negPos N2 Vis	99
6.10	negPos N2 Mot	99
6.11	clearDval N2 Vis	100
6.12	negPos N2 Vis	100
6.13	negPos N2 Mot	101

Liste des abréviations

VBH	Vol à Basse Hauteur
OER	Optical Edge Rate
GOFR	Global Optical Flow Rate
2D/3D	2-dimensions / 3-dimensions
VOR	Vestibulo Ocular Reflex
SSQ	Simulator Sickness Questionary
IRB	Institutionnal Review Board
DIMSS	Dynamic Interface Modeling and Simulation System
RH	Ratio en Hauteur (à changer)
TR	Temps de Réaction
DO	Déviation de l' Objectif
EVN	Environnement Visuel Normal
EVD	Environnement Visuel Dégradé
Mvt	Mouvement
GI	Gravito-Inertial

Chapitre 1

Introduction

1.1 Perception du mouvement propre

L'habilité à contrôler son attitude et son mouvement propre est l'une des compétences les plus importantes partagées par les humains et virtuellement tous les animaux. Indépendamment du type de déplacement - marcher, ramper, nager, conduire ou même voler -, nous devons continuellement réguler notre mouvement propre pour atteindre nos objectifs, en considérant tant les contraintes internes que les contraintes environnementales. Les mécanismes de perception et de contrôle de l'action sont ici évidemment d'une importance cruciale et reposent sur la récupération par nos organes sensoriels d'une vaste quantité d'informations nous renseignant sur notre interaction avec l'environnement. Les motifs optiques spécifient la position et la vélocité relative des objets distants ((GIBSON, 1950); (BERTHIER et al., 1996); (JURGENS et BECKER, 2011)), les variations de notre mouvement impactent le champ gravito-inertiel ((STOFFREGEN et RICCIO, 1988); (WRIGHT, DIZIO et LACKNER, 2005); (FETSCH, TURNER et al., 2009)), des événements extérieurs peuvent générer des transformations acoustiques ((HOUIX, 2003); (EWERTSEN et NIELSEN, 1971))... Chaque variation, ou absence de variation, dans l'environnement est donc ainsi captée et traitée par nos organes sensoriels, permettant de percevoir les causes et effets des événements environnants et de notre interaction avec celui-ci.

1.2 Problématique des manoeuvres aériennes

Habituellement, nous évoluons dans un environnement restreint (gravité autour de 1g, déplacement de l'ordre de quelques dizaines de km/h, faibles vitesses de rotations...) auquel nos capacités perceptives sont adaptées. Cependant, l'aéronautique impose un cadre perceptif excédant les capacités biologiques habituelles des

individus et bien plus contraignant. Alors que lors d'une marche, une erreur de perception du mouvement propre risque principalement d'entraîner une simple chute ou de rentrer en collision avec un obstacle, les conséquences peuvent être bien plus dramatiques dans le cadre d'un vol en hélicoptère. Il est donc nécessaire pour les pilotes d'avoir une perception et un contrôle précis de leurs déplacements et attitudes.

1.3 Complexité de la réalité

Néanmoins, le vol en hélicoptère implique de fortes variations des informations sensorielles. Alors que dans la vie de tous les jours, la perception et le contrôle de son déplacement repose principalement sur les informations optiques, l'aéronautique implique de prendre en compte d'autres modalités sensorielles. Les pilotes sont soumis à des stimulations dépassant le domaine de fonctionnement usuel des organes sensoriels et pouvant entraîner d'importantes erreurs perceptives. On peut par exemple citer le cas des désorientations spatiales, qui représenteraient environ 30% des accidents graves en aéronautique chaque année. On peut citer le phénomène de « Brown-Out », subi par les pilotes d'hélicoptère tentant d'atterrir sur un terrain poussiéreux ou sablonneux (dans le cadre de neige, on parle de « White-Out »). Lorsque l'hélicoptère se rapproche du sol, des volutes de particules s'envolent autour de l'appareil. Si elles sont suffisamment denses pour masquer l'horizon visuel du pilote, cela peut entraîner une incapacité de ce dernier à percevoir efficacement l'attitude de son hélicoptère. Il pourra ainsi vouloir appliquer des manœuvres correctives potentiellement dangereuses pouvant entraîner le crash de l'appareil. Un autre exemple est celui de la manœuvre du « Go Around » (ou « Remise des Gaz » en français). C'est une manœuvre classique pendant laquelle les pilotes d'avion annulent une tentative d'atterrissage pour une raison quelconque (présence d'un obstacle sur la piste d'atterrissage...), redressent le nez de leur appareil (« Pitch up ») et remettent les gaz. La combinaison de la forte accélération linéaire et de la rotation angulaire vers le haut peut entraîner une perception erronée de l'orientation de l'appareil (donnant l'impression que l'appareil est plus redressé qu'en réalité). Comme précédemment, une mauvaise correction de l'orientation peut entraîner des situations critiques.

1.4 Approches existantes

De nombreuses approches ont été proposées pour modéliser ces phénomènes perceptifs. Bien que certaines études se soient intéressées à la question de la perception et du contrôle du mouvement propre d'un point de vue uniquement visuel, les phénomènes de désorientation spatiale présentés précédemment démontrent la nécessité de l'étude des interactions et environnements multimodaux. Deux principales approches ont été avancées. D'un côté, la perception a été étudiée au niveau du fonctionnement du cerveau et au niveau du traitement inhérent des entrées sensorielles, avec les théories dites cognitivistes. Le fonctionnement complexe du cerveau et la difficulté à étudier les signaux induits obligent donc avec cette approche un contrôle strict de l'environnement d'étude et des informations sensorielles captées par l'individu. De l'autre, les théories écologiques se sont intéressées à l'étude de l'interaction entre l'individu et son environnement. Dans ce cas, le fonctionnement interne du cerveau n'est pas étudié directement, permettant des études dans des environnements moins contrôlés et plus réalistes.

1.5 Objectifs de la thèse

Au cours de cette thèse, nous avons cherché à comprendre l'impact de stimuli multisensoriels sur la perception et le contrôle du mouvement propre dans le contexte spécifique du Vol à Basse Hauteur (VBH). Deux simulateurs de mouvement différents, iMose (laboratoire EuroMov) et le VMS (Vertical Motion Simulator, laboratoire Ames, NASA), ont été utilisés pour tester différentes combinaisons de stimuli optiques et gravito-inertiels au cours d'un Vol à Basse Hauteur en hélicoptère simulé. Deux groupes de participants (novices et experts) ont participé aux expérimentations dans le but d'étudier les possibles différences d'impact sur les performances en cours de vol.

1.6 Structure du document

Les différentes études menées et résultats obtenus sont compilés dans ce document dans l'ordre chronologique de leur réalisation.

Le chapitre 2, nommé "Champ de recherche", est un résumé de la littérature à l'heure actuelle sur la manoeuvre aérienne du Vol à Basse Hauteur (VBH) et sur le domaine

de recherche des théories de la perception et du contrôle du mouvement propre. Les chapitres 3 et 4, nommés respectivement "Première étude - Expérimentation observateur - Pilotes novices" et "Deuxième étude - Expérimentation contrôleur - Pilotes novices", décrivent les deux expérimentations menées au laboratoire EuroMov (Montpellier, France). Au cours de celles-ci, des participants non-pilotes (novices) ont réalisé une tâche d'observation et une tâche de contrôle de la hauteur-sol de vol dans une situation de VBH simulé. L'environnement était simulé avec un casque de réalité virtuelle (Oculus Rift DK2) et le simulateur de mouvement iMose, permettant de recréer de manière limitée un environnement visuo-vestibulaire cohérent. Ces deux chapitres contiennent un descriptif des protocoles expérimentaux ainsi que les différents résultats obtenus.

Les chapitres 5 et 6, nommés respectivement "Troisième étude - Expérimentation observateur - Pilotes experts" et "Quatrième étude - Expérimentation contrôleur - Pilotes experts", décrivent les deux expérimentations menées au laboratoire Ames de la NASA (Mountain View, USA). Des pilotes militaires (experts) ont réalisé, dans la même idée que les deux expérimentations précédentes, une tâche d'observation et une tâche de contrôle de la hauteur-sol de vol dans un contexte de VBH simulé. Cette fois-ci, le VMS (Vertical Motion Simulator) a été utilisé pour générer un environnement visuo-vestibulaire cohérent de haute fidélité. Une description des protocoles expérimentaux est donnée, ainsi que les résultats obtenus.

Le chapitre 7, nommé "Discussion", revient sur les résultats des quatre expérimentations menées. Ces résultats sont remis dans le contexte de la thèse et des questions posées. Plusieurs grands points sont discutés au regard de la littérature existante et des perspectives de recherche, issues à la fois des résultats obtenus et des limitations des différentes études, y sont décrites.

Chapitre 2

Champ de recherche

2.1 Le Vol à Basse Hauteur

2.1.1 Contexte

Comme nous l'avons dit en introduction, l'étude de la perception et du contrôle du mouvement propre en aéronautique est motivée par des questionnements théoriques et pratiques. Au cours de cette thèse, nous avons étudié les mécanismes perceptivo-moteurs impliqués dans la réalisation de la manœuvre de « Vol à Basse hauteur (VBH) » (en anglais « Low-Altitude Flight »). De toutes les tâches perceptivo-motrices effectuées par les pilotes militaires, le VBH est l'une des plus exigeantes, et potentiellement la plus dangereuse, comme le montre la relation entre le nombre d'heures de vols des pilotes et le nombre d'accidents (cf. (WIENER et NAGEL, 1988), (LEWKOWICZ et BIERNACKI, 2020)). La particularité de ce vol est de permettre la réalisation d'une vaste gamme de missions, allant de la surveillance d'une zone donnée à l'évitement d'un radar ennemi. Il s'agit d'un vol à vitesse élevée à basse altitude. Du fait de la complexité de la tâche, la moindre erreur de perception peut entraîner de dramatiques accidents. Voler trop bas peut entraîner une collision avec le sol ou un obstacle, tandis que voler trop haut peut amener à être détecté par les radars ennemis. Cette manœuvre requiert donc des pilotes expérimentés et spécialement entraînés pour acquérir les compétences nécessaires sa réalisation.

2.1.2 Réalisation et contraintes

Pour réaliser un VBH en hélicoptère, les pilotes doivent voler le plus près possible du sol (moins de 20m au-dessus du sol et/ou des obstacles) et à vitesse élevée (jusqu'à 150 km/h), et accomplir différentes tâches allant du contrôle de l'aérodynamique de l'appareil à la supervision du mouvement propre. L'exécution de cette

manœuvre repose sur la capacité à percevoir et réguler rapidement et précisément les informations optiques spécifiant la position, la vitesse et la taille d'objets distants par rapport à soi ((GIBSON, 1950); (BERTHIER et al., 1996)), ainsi que les informations gravito-inertielles spécifiant de l'orientation de l'aéronef et ses changements ((STOFFREGEN et RICCIO, 1988); (WRIGHT, DIZIO et LACKNER, 2005)). Les changements rapides de hauteur à vitesse élevée entraînent de très fortes variations dans les champs optiques et gravito-inertiels. La complexité de l'exécution d'un VBH ainsi que la très grande richesse des stimulations environnementales provoquent ainsi une importante charge de travail pour les pilotes.

2.1.3 Risques inhérents

Cette manœuvre aérienne, exigeante sur le plan perceptivo-moteur, peut se dérouler en conditions environnementales dégradées qui peuvent affecter le prélèvement et la régulation des variables informationnelles et par voie de conséquence, les performances opérationnelles. La nuit ou le brouillard, par exemple, perturbent la fonction visuelle, tandis que des vents forts et une aérologie instable dégradent la fonction vestibulaire, ajoutant une charge de travail supplémentaire. Cette importante charge tout au long de la manœuvre, combinée à une multitude de signaux sensoriels d'amplitudes très variables, peut entraîner dans certaines situations une difficulté accrue des pilotes à percevoir et réguler leur mouvement propre, et provoquer des accidents. On appelle ces erreurs perceptives « Désorientations Spatiales » (DS). Les DS ont été, entre autre, définies par Benson ((BENSON, 1999)) ainsi : « Spatial Disorientation is a state characterized by an erroneous sense of position, attitude or motion of oneself or one's aircraft in relation to a fixed three dimensional co-ordinate system defined by a surface of the earth and the gravitational vertical. In addition, this also includes errors of perception by the aviator or of his own aircraft relative to other aircraft ».

2.1.4 Identification du problème

Il est donc d'importance cruciale de comprendre et de caractériser les mécanismes de perception et de contrôle inhérents à l'exécution d'un VBH. Il existe un certain nombre d'études s'étant intéressées à la question de la perception et du contrôle du mouvement propre. Ainsi, (BRITTEN, 2008) s'intéresse à la question de

L'impact du fonctionnement de différentes aires corticales sur la perception du mouvement propre, (DICHGANS et BRANDT, 1978) traite de l'impact de stimuli multimodaux et des possibles inférences impliquées dans le contrôle de la posture ou encore (FETSCH, TURNER et al., 2009) s'intéresse à l'intégration de multiples signaux sensoriels entre eux et à l'impact de leur fiabilité sur ces mécanismes d'intégration. Cependant, un faible nombre d'entre elles se sont intéressées à cette question de vol à basse-hauteur dans un environnement multimodal (comme dans l'article de (R. N. HABER et L. HABER, 2003), s'intéressant de manière générale au problème des stimuli visuo-vestibulaires et à différentes informations - sensorielles, symboliques, ... - pour la réalisation des VBH). Le VBH repose sur l'intégration de multiples informations sensorielles et la réalisation de différentes tâches exigeantes. D'une manière simplifiée, les pilotes doivent principalement percevoir et anticiper le terrain survolé, et donc contrôler la trajectoire de vol de l'hélicoptère. L'impact des stimulations sensorielles sur ces deux tâches, ainsi que l'impact de la possible dégradation de ces informations, restent encore à déterminer. Plusieurs points doivent donc être étudiés : d'une part, l'influence de stimuli multisensoriel sur la réalisation d'un VBH, comparée à un celle de stimuli uniquement visuels, d'autre part l'étude de l'influence de dégradations sensorielles sur les performances de réalisation d'un VBH et enfin l'étude des mécanismes de perceptions impliqués dans les différentes tâches à réaliser.

2.2 Le système visuel

2.2.1 Fonctionnement

La modalité sensorielle visuelle est la principale source d'information permettant de percevoir et de contrôler son mouvement propre. Le système visuel humain, système supportant le prélèvement d'informations dans le flot optique résultant du déplacement, est composé de deux sous-ensembles complémentaires (comme il a été proposé puis étudié dans nombre d'études, par exemple (GIBSON, 1950) et son étude de la perception visuelle de manière globale, ou encore l'étude de (HELMERT et al., 2005) s'intéressant à l'impact de ces deux sous-ensembles visuels durant une simulation de conduite). Ces études avancent que le système visuel focal permet de s'orienter relativement à un objet perçu et est responsable de la discrimination et de la reconnaissance des formes, et que le système visuel ambiant, ou périphérique,

permet l'orientation, relativement à son environnement et fonctionne en se référant à la taille réelle physique des objets, traitant les relations spatiales entre objets dans le champ visuel.

Il a été proposé ((HU et GOODALE, 2000); (KNOL, 2016)) que les mécanismes de perception visuelle différeraient selon le type de tâche à accomplir. Ainsi, (MISHKIN, UNGERLEIDER et MACKO, 1983), puis (GOODALE et D. A. MILNER, 1992) et ensuite (A. D. MILNER et GOODALE, 1995), mettent en avant des différences de mécanismes de perception à l'aide d'expérimentations sur des singes ayant subi des ablations au niveau du cortex visuel. Ils proposent que la perception d'un objet reposerait sur la voie ventrale du système visuel, terminant dans le cortex infero - temporal, tandis que le contrôle de l'action dans l'espace reposerait sur la voie dorsale, terminant dans la région postero - pariétale. Cela signifierait que les informations permettant d'identifier et de reconnaître les objets seraient traitées indépendamment des informations qui permettent les transformations sensorimotrices nécessaires pour diriger visuellement les actions envers ces objets.

2.2.2 Informations lors d'un déplacement aérien

La réussite d'une manœuvre aérienne repose principalement, d'un point de vue optique, sur la perception de l'espace, et plus particulièrement des distances et profondeurs visuelles, ainsi que des relations optiques perçues entre les différents objets de l'environnement. Différentes informations optiques sont prélevées en fonction de la tâche à accomplir. Ces informations peuvent être :

- La parallaxe binoculaire, qui représente la différence de perception apparente entre les deux yeux dans la position d'un objet (à tête fixe) (comme proposé dans (GIBSON, OLUM et ROSENBLATT, 1955) ou encore étudiée à l'aide d'insectes dans (KRAL, 1999)),
- La perception linéaire, telle que la taille apparente d'objets perçus dont la taille réelle est connue (comme proposé dans l'étude de (FLACH, HAGEN et LARISH, 1992)),
- Les paramètres intrinsèques aux manœuvres de vol, tels que le degré d'occlusion de surface et la superposition d'objets visuels (par exemple dans les travaux de (GRAY, 2007) basés sur le modèle de (LEUNG et MALIK, 1997)),
- Les mouvements relatifs apparents d'objets physiquement stationnaires les uns par rapport aux autres et par rapport à l'observateur, ou parallaxe de mouvement.

Ce dernier paramètre est l'un des plus importants dans la perception du mouvement propre de par son lien direct avec les déplacements de l'observateur. Il a été décrit en premier dans ((GIBSON, 1950)), puis dans de nombreuses autres études. Par exemple, dans (KOENDERINK et DOOM, 1981), la parallaxe de mouvement est subdivisée en 4 composantes, la translation, la divergence, la déformation et la courbure. La parallaxe de mouvement peut fournir aux pilotes des informations sur la vitesse par rapport au sol ou l'inclinaison du terrain survolé ((PERRONE, 1991); (JOHNSON et AWE, 1994)).

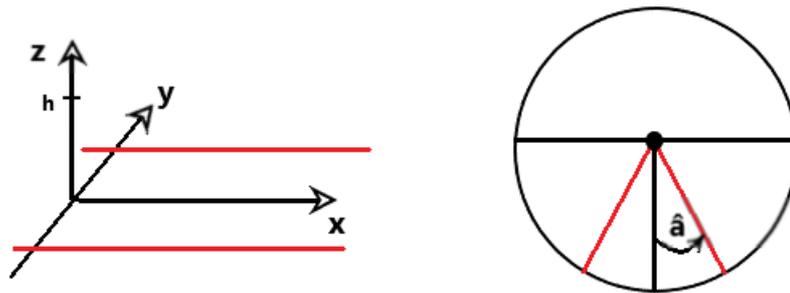
2.2.3 Exemples de paramètres optiques

Plusieurs études ont tenté de modéliser la perception et le contrôle de la hauteur de vol en aéronautique avec des modèles reposant uniquement sur des informations optiques.

Par exemple, Flach et al. ((FLACH, HAGEN et LARISH, 1992)) ont identifié deux paramètres visuels qui pourraient être utilisés par les pilotes pour maintenir leur altitude de vol : l'angle de dépression (en anglais «depression angle»), qui est l'angle visuel formé par l'horizon et le terrain, et l'angle d'écartement (en anglais «splay angle»), qui est l'angle visuel formé par la direction du mouvement et une texture du terrain orientée parallèlement à la direction du mouvement à son point de convergence à l'horizon (voir 2.1) ((FLACH, HAGEN et LARISH, 1992); (FLACH et R. WARREN, 1995)).

Des travaux se sont intéressés à la question de la perception et du contrôle du mouvement propre dans des environnements en 3 dimensions. Ainsi, Kleiss et Hubbard ((KLEISS et HUBBARD, 1993)) ont réalisé une étude sur une tâche de détection de changement d'altitude dans un environnement visuel peuplé d'arbres de tailles différentes. Warren et al. ((W. H. WARREN, YOUNG et LEE, 1986)) se sont également intéressés à la présence d'objets dans l'environnement et à la génération de parallaxe de mouvement et d'occlusion visuelle, étude ensuite reprise plusieurs fois (e.g. (LARISH et FLACH, 1990)). Ils identifient ainsi deux paramètres concomitants à la vitesse égocentrée dans la structure informationnelle optique : le OER (en anglais «Optical edge rate»), correspondant à la fréquence par unité de temps à laquelle des éléments optiques dépassent un point de référence dans l'environnement visuel, et le GOFR (en anglais «Global optical flow rate») qui est la vitesse perçue des objets

a.



b.

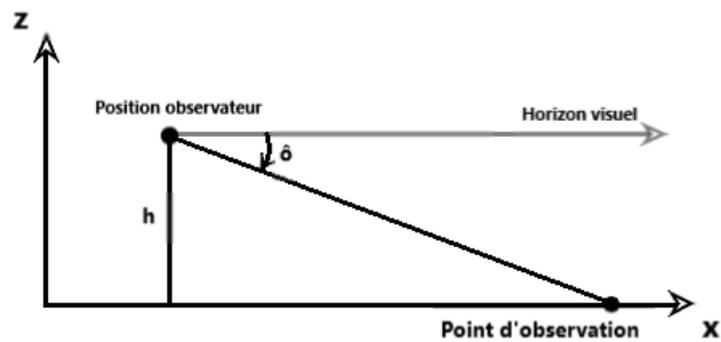


FIGURE 2.1 – a. Représentation de l'angle d'écartement (angle \hat{a}) à une hauteur donnée h vis-à-vis d'une texture parallèle au mouvement (en rouge). Cet angle est donc celui liant la trajectoire et la texture parallèle à l'infini. b. Représentation de l'angle de dépression (angle $\hat{\delta}$), formé entre la direction de l'horizon et la direction d'observation. ((FLACH, HAGEN et LARISH, 1992))

dans l'environnement visuel du pilote ramenée à sa hauteur de vol (en unité de hauteur des yeux ou «eye-height»). On a donc les deux relations suivantes :

$$OER = V_g/T_x \quad (2.1)$$

$$GOFR = V_g/h \quad (2.2)$$

où V_g représente la vitesse au sol de l'observateur, T_x représente la distance, par rapport au sol, entre les bords des éléments de texture ou objets et h l'altitude de l'observateur normalisée (en eye-height). Ainsi, en fonction de la tâche à effectuer, l'un ou l'autre de ces paramètres peut être invariant et spécifier la dite tâche efficacement ((JOHNSON et AWE, 1994)).

Également, Gray et al. ((GRAY et al., 2008)) se sont intéressés à la question du paramètre d'occlusion de surface en vol à basse-hauteur. Reposant principalement sur les travaux de Leung et Malik (cf. (LEUNG et MALIK, 1997)), les auteurs font le lien direct entre la hauteur-sol et la probabilité qu'un arbre dans l'environnement simulé en recouvre partiellement ou totalement un autre. Ainsi, si tous les arbres sont identiques et également répartis dans l'environnement, maintenir sa hauteur-sol de vol revient à maintenir constante la variation du degré d'occlusion de surface. Ce degré d'occlusion étant calculé, dans un environnement visuel peuplé d'arbres, par les équations :

Pour une pente positive,

$$p(occlusion) = e^{-2hdr \tan(\sigma-\theta)} - dr\pi\left(\frac{hrs \sin(\theta)}{2} + r\right) \quad (2.3)$$

Pour une pente négative,

$$p(occlusion) = e^{-2hdr \tan(\sigma+\theta)} + dr\pi\left(\frac{hrs \sin(\theta)}{2} + r\right) \quad (2.4)$$

où (r , h , d) représentent le rayon, la hauteur et la densité des arbres dans l'environnement, θ l'angle de la pente du terrain avec l'horizontale et σ l'angle entre la direction du regard et la verticale au sol (cf. 2.2). Les auteurs ont montré que la performance de maintien de l'altitude dépendait de la perception des changements dans l'amplitude de l'occlusion d'un objet 3D par un autre et de la densité de ces

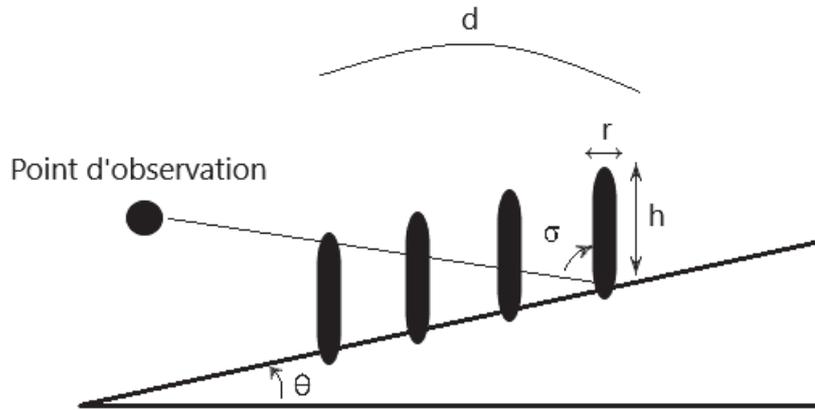


FIGURE 2.2 – Représentation de l’occlusion d’une surface par une texture 3D perpendiculaire au sol, en fonction du rayon, de la hauteur et de la densité de ces objets 3D, ainsi que de l’angle de la pente (ici positif) et de l’angle d’observation. ((LEUNG et MALIK, 1997))

objets 3D visuels (ils mettent en évidence que le paramètre $r * d$ est un prédicteur de la performance). Bien que ce paramètre d’occlusion de surface soit intéressant, il requiert que le terrain soit en pente constante et avec un rayon de courbure négligeable pour être applicable.

Enfin, certaines études se sont intéressées aux stratégies de contrôle de l’action et en particulier la théorie du tau-coupling ((LEE, 1998), (FAJEN, 2005)...), rendant compte de l’existence de paramètres environnementaux représentatifs du déplacement. Cette théorie repose sur l’observation et l’étude de l’évolution de la fermeture entre deux paramètres optiques spécifiques à une tâche donnée. Prenons l’exemple d’une voiture qui freine pour éviter un obstacle (cf. 2.3), le taux d’évolution de la distance entre la position de la voiture x_v et celle de l’obstacle x_o :

$$\tau(x_v) = \frac{x_v - x_o}{\dot{x}_v - \dot{x}_o} \quad (2.5)$$

Il a été montré ((LEE, 2008)) que, en posant $\dot{\tau}(x)$ comme étant la dérivée temporelle de $\tau(x)$, si $\dot{\tau}(x_v) = -0.5$, la voiture s’arrêtera au niveau du mur, si $\dot{\tau}(x_v) > -0.5$ la voiture freinera plus que nécessaire et s’arrêtera avant le mur et si $\dot{\tau}(x_v) < -0.5$ la voiture ne décélérera pas assez vite et rentrera dans le mur. Différentes études tendraient à montrer (e.g. (PADFIELD, LEE et BRADLEY, 2003)) que certaines manœuvres

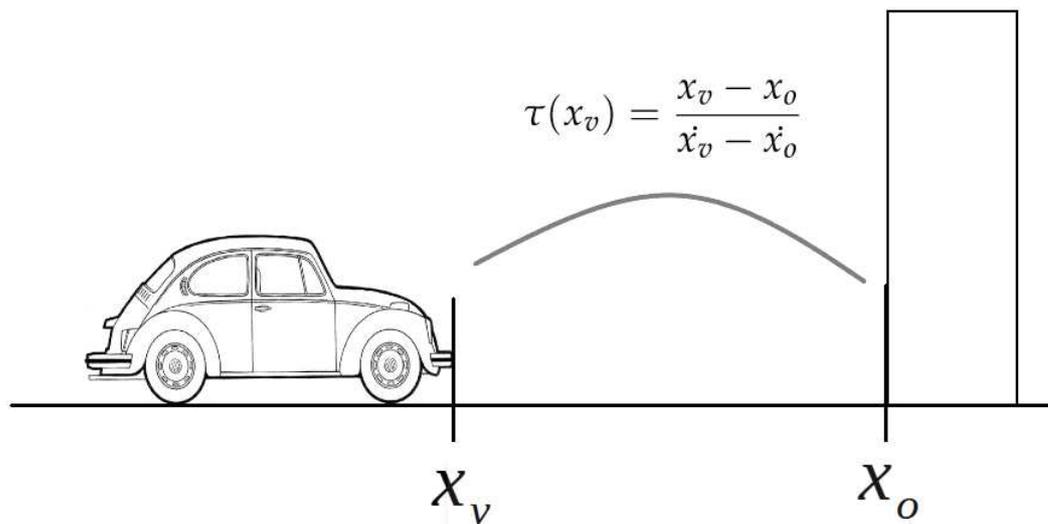


FIGURE 2.3 – Cas d’une voiture qui freine pour ne pas rentrer dans un obstacle. x_v représente la position de la voiture et x_o celle de l’obstacle. ((LEE, 2008))

aériennes nécessitant un contrôle relatif à la distance d’un objet ou d’un repère environnemental seraient spécifiées par ce paramètre τ . On pourrait ainsi citer le cas de la montée d’une pente ((G. A. CLARK, 2007)), où le temps auquel a commencé le survol de la pente pour ne pas s’écraser est spécifié par la valeur $\tau = \frac{\theta}{\dot{\theta}} = \frac{x}{\dot{x}}$, où θ est l’angle entre la direction du regard du pilote et la base de la pente et x la distance entre le pilote et la base de la pente.

2.2.4 Implication d’un mouvement réel

La réalisation d’un VBH dans un environnement réel nécessite l’intégration d’informations provenant de multiples modalités sensorielles différentes. En effet, bien que de nombreuses études (e.g. exemples donnés ci-dessus) se soient intéressées à la question du contrôle du mouvement propre au travers de paramètres purement optiques, la présence de phénomènes de désorientation spatiale (DS) issus de la perturbation d’informations modales perçues autre que visuelles, démontre que la connaissance et/ou le prélèvement de ces informations optiques dans l’environnement par le pilote n’implique pas forcément une réalisation avec succès de la manoeuvre de vol en cours. On peut citer l’exemple du "Go-Around" ou "Remise des gaz" déjà mentionné en introduction. Dans cette situation, la forte intensité des stimulations gravito-inertielles combinée aux limites physiques du système vestibulaire humain

peuvent entraîner une mauvaise perception de l'attitude de l'appareil et provoquer manœuvres correctives entraînant un accident. Ce phénomène peut survenir quelles que soient les conditions visuelles. Il est donc nécessaire de s'intéresser à d'autres modalités sensorielles pour pouvoir caractériser et comprendre l'impact environnemental sur les performances de vol.

2.3 Le système vestibulaire

2.3.1 Fonctionnement

Le système vestibulaire ((DAY et FITZPATRICK, 1974)) est un organe sensoriel situé dans l'oreille interne capable de prélever des informations dans le champ gravito-inertiel (GI) et contribuant à l'équilibre de l'individu et son orientation dans l'espace. Il est composé de deux types d'organes différents : les canaux semi-circulaires (au nombre de trois, les canaux antérieurs, postérieurs et horizontaux) qui sont sensibles aux accélérations angulaires et aux rotations de la tête, et les organes otolithiques (au nombre de deux, l'utricle et le saccule) qui sont eux sensibles aux accélérations (longitudinales, transverses et sagittales) linéaires ainsi qu'à la gravité. Le système vestibulaire est responsable d'un nombre important de réponses physiologiques (maintien de la posture, stabilisation de l'image sur la rétine ...). Après le système visuel, il s'agit du système le plus influent dans la détection de mouvements du corps, angulaires ou linéaires ((BENSON, 1990)). Il est donc nécessaire d'étudier son fonctionnement en conditions aéronautiques, notamment au cours de la manœuvre étudiée dans cette thèse.

2.3.2 Etudes de l'impact des informations GI

Ainsi, des recherches ont été faites sur la perception des accélérations linéaires. Par exemple, (ISRAEL et al., 1997) ont montré que les individus étaient incapables d'évaluer par eux-mêmes quelle était leur distance parcourue dans le noir, mais pouvaient reproduire un stimulus vestibulaire en durée, ainsi qu'en amplitude et profil de vitesse, qu'ils avaient déjà expérimenté de manière passive, supposant donc que la dynamique des déplacements passifs est apprise et reproductible, tandis que la distance est estimée indépendamment.

Un certain nombre d'études ((FETSCH, TURNER et al., 2009), (CULLEN, 2019), (DEANGELIS et D. E. ANGELAKI, 2012)...) se sont intéressées à la contribution du système vestibulaire dans la discrimination du mouvement propre. Dans le but de garder un environnement contrôlé, les participants sont, dans la plupart de ces études (par exemple (MACNEILAGE et al., 2010), (RICCIO, MARTIN et STOFFREGEN, 1992)), usuellement attachés fixement à une chaise tournante et restreints au niveau des mouvements de la tête et des bras, dans le noir. Ces études s'intéressent la plupart du temps à la perception d'un mouvement de rotation ou de la gravité subjective. Par exemple, (VALKO, LEWIS et MERFELD, 2012) étudie dans quelle mesure le système vestibulaire peut être remplacé par d'autres modalités sensorielles dans la discrimination du mouvement propre dans le noir, et ce en comparant des sujets sains à des sujets ne possédant plus de système vestibulaire. Cette étude a montré une contribution prédominante du système vestibulaire dans ces tâches de discrimination, résultat démontré par des seuils perceptifs significativement plus faibles chez les sujets sains.

En plus de s'occuper du maintien de la balance et des rotations de la tête, le système vestibulaire est très important dans la stabilisation des images sur la rétine. Ce mécanisme de compensation et de stabilisation visuelle est nommé « Vestibulo-Ocular Reflex » (VOR). Les VORs ((FETTER, 2007);(OKADA et al., 1999)) sont un ensemble de réflexes servant à stabiliser le regard pendant les mouvements de tête, à l'aide des mouvements des yeux principalement modulés par l'activation du système vestibulaire. Ils servent à stabiliser les images sur la rétine lors de rotations de la tête en produisant des mouvements oculaires dans la direction opposée au mouvement de la tête. On nomme Nystagmus les mouvements oculaires involontaires issus de problèmes pathologiques ou physiologiques, découlant de ces VORs. Des études sur ces phénomènes physiologiques ont montré l'importance et la nécessité de stimuli visuo-vestibulaires cohérents pour avoir une suppression visuelle efficace des mouvements et donc de bonnes performances visuelles ((GUEDRY, LENTZ et JELL, 1979); (GUEDRY, LENTZ, JELL et NORMAN, 1981)).

Enfin, toujours dans la même idée que les canaux visuels perceptifs diffèrent en fonction du type de tâche à réaliser, d'autres études (e.g. (CULLEN, 2019)) tendent à montrer que les mécanismes d'intégration de l'information gravito-inertielle varient en fonction de la tâche (Observateur vs. Contrôleur).

2.3.3 Information GI lors d'un vol

L'importance du système vestibulaire a été montrée au cours de situations de vol variées, allant de la discrimination du mouvement propre (en anglais "whole body motion discrimination") à l'estimation des distances ((TOROK et al., 2017); (VALKO, LEWIS et MERFELD, 2012), (BRITTON et ARSHAD, 2019)).

Au cours d'un vol à basse hauteur, les changements dans l'orientation et le mouvement du pilote génèrent des variations importantes dans le champ gravito-inertiel que le système vestibulaire peut détecter, principalement autour de l'axe vertical et des trois axes de rotation. Il a été montré ((TOROK et al., 2017)) qu'en plus d'apporter des informations relatives à l'évolution de l'orientation dans l'espace, les variations dans le champ gravito-inertiel impactent également l'estimation de la distance à un objet (entre autres, une surestimation des distances quand la tête est inclinée en avant et inversement pour une inclinaison en arrière). Il est donc logique de supposer que ces informations impactant les jugements de distance impactent également le maintien de l'altitude en aéronautique.

D'autres études (e.g. (RICCIO, MARTIN et STOFFREGEN, 1992); (BISDORFF et al., 1996)) ont montré à l'aide d'expérimentations où différents groupes de sujets (sains et avec des lésions vestibulaires périphériques ou ventrales, tel qu'au niveau des noyaux vestibulaires) étaient assis dans le noir avec un bandeau sur les yeux, que les informations vestibulaires (et proprioceptives) étaient essentielles dans la perception de la gravité subjective et dans la perception active de son orientation. Ces mécanismes sont nécessaires lors d'un déplacement dans un environnement en 3D.

2.3.4 Limitations du système

Cependant, le système vestibulaire est très facilement perturbé par les conditions et les stimuli environnementaux. Le principal problème du système vestibulaire est ce que l'on nomme le "Problème d'équivalence". En effet, les organes otolithiques sont normalement et idéalement conçus pour détecter la direction de la gravité et les déplacements vers le haut. De manière simple ((DAY et FITZPATRICK, 1974)), les organes otolithiques consistent en masses supportées par des cellules ciliées. Incliner la tête provoque une courbure des cils du fait de la force gravito-inertielle appliquée sur les masses, le tout modulant les activations des nerfs sensoriels connectés aux

cellules ciliées. Cependant, cela implique un problème perceptif, c'est à dire l'impossibilité à différencier les effets d'un champ gravito-inertiel sur une masse d'une accélération linéaire. Dit différemment, le système vestibulaire confond très facilement accélérations linéaires et rotations (principe sur lequel se repose certains simulateurs pour générer des accélérations de longue durée, $>3s$).

Autre limitation majeure du système vestibulaire, les seuils de perception des changements gravito-inertiels. Nombre d'études ((GIBB, GRAY et SCHARFF, 2016);(NEWMAN et FAICD, 2007)) mettent en avant les limitations de perception des stimuli du système vestibulaire pour expliquer une partie des phénomènes de Désorientation Spatiale (DS) subis par les pilotes. On nommera signaux infraliminaires et supraliminaires des signaux vestibulaires respectivement non perceptibles et perceptibles par le système vestibulaire de l'observateur. Différentes études conduites entre les années 1960 et 1980 se sont intéressées à ces questions de seuil perceptif, dans le but de prévenir une partie des risques de DS. Ainsi, (GUEDRY, 2005) a fait une revue des différents seuils perceptifs et de leur dépendance au type de tâche que l'individu a à exécuter. En prenant l'exemple d'un simulateur de type table tournante, (BENSON, HUTT et BROWN, 1989) a montré que les seuils de perceptions rotatifs sont de $1.58^\circ/s$ pour l'axe yaw, $2.07^\circ/s$ pour l'axe pitch et $2.04^\circ/s$ pour l'axe roll. D'autres études plus récentes (e.g. (VALKO, LEWIS et MERFELD, 2012)) ont également mis en évidence la dépendance de ces seuils perceptifs à la fréquence des stimuli vestibulaires perçus, montrant par exemple que des signaux ayant une fréquence inférieure à 0.5Hz augmentaient la valeur des seuils perceptifs. D'un point de vue aéronautique, des problèmes de perception peuvent survenir du fait de ces seuils de perception. Par exemple, un vent latéral suffisamment fort pour dévier la direction du mouvement d'un pilote, mais trop faible pour être perçu activement par le pilote, pourrait tout à fait survenir dans un environnement réel.

Enfin, il faut évoquer l'impossibilité du système vestibulaire à différencier dans le noir une vitesse constante d'une absence de mouvement.

2.3.5 Multimodalité du système

Contrairement aux mécanismes d'intégration et de perception des autres informations modales environnementales, l'information gravito-inertielle est toujours perçue de manière multimodale, en relation avec d'autres informations modales ((D.

ANGELAKI et CULLEN, 2008)). Des études ont mis en avant l'importance de la contribution de la modalité vestibulaire dans divers mécanismes physiologiques, tels que la perception du mouvement propre ((TOROK et al., 2017); (VALKO, LEWIS et MERFELD, 2012); (MANTEL et al., 2015)), les mécanismes de stabilisation du regard (VOR) ou encore la stabilisation de la posture (e.g. (RICCIO, MARTIN et STOFFREGEN, 1992)). Ainsi, bien que l'étude de la perception et du contrôle du mouvement propre en aéronautique puisse se faire dans des environnements uniquement visuels, il est nécessaire de considérer les informations gravito-inertielles pour pouvoir affiner les modèles perceptifs et comprendre les mécanismes de désorientation spatiale. Dans la partie suivante, nous considérons différentes approches théoriques sur la question de la perception multimodale et de leur impact sur les études menées.

2.4 Les théories de la perception multimodale

La relation entre les changements optiques (détectés par le système visuel) et inertiels (détectés par le système vestibulaire) au cours du mouvement propre a été largement étudiée ((D. ANGELAKI et CULLEN, 2008); (FETSCH, DEANGELIS et D. E. ANGELAKI, 2010); (CULLEN, 2019); (KOPPEN, HORST et MEDENDORP, 2019)). Ces études ont montré l'importance de la cohérence spatio-temporelle entre les informations visuo-vestibulaires pour le contrôle du mouvement propre. Cependant, des contradictions peuvent apparaître entre les différentes structures modales informationnelles (dus à une non cohérence entre les signaux, du bruit dégradant une modalité sensorielle...) et provoquer des perceptions erronées de hauteur, vitesse ou orientation. Ceci peut entraîner de possibles conséquences dramatiques telle qu'une perte de contrôle de l'appareil ((PENNINGS et al., 2020)). Dans une situation nominale (e.g. pas de vent, jour ensoleillé...), les variations des structures optique et gravito-inertielle sont continuellement congruentes. Mais dans une situation plus exigeante, telle que l'atterrissage dans un désert (phénomène de «Brown-out»), des covariations non naturelles entre différents sens (dans l'exemple entre les systèmes visuels et vestibulaires) peuvent survenir et dégrader fortement la perception et le contrôle de l'attitude et du mouvement propre ((GRADWELL et RAINFORD, 2006)). Il est donc nécessaire de comprendre et de caractériser l'impact de l'interaction visuo-vestibulaire sur les performances en cours de manœuvre.

Ces observations ont été théoriquement regroupées en deux grandes approches :

l'approche de l'intégration sensorielle (ou approche cognitive) et l'approche écologique. Nous exposons brièvement ces deux approches dans les paragraphes suivants.

2.4.1 Approche cognitive

Contexte

L'approche cognitive s'intéresse à l'intégration multisensorielle au niveau du réseau neuronal central et à l'impact des mécanismes cérébraux de filtrage sur l'information sensorielle perçue ((DICHGANS et BRANDT, 1978);(SHAMS et BEIERHOLM, 2010)...). Dans cette approche, les chercheurs partent de l'hypothèse que les informations sensorielles que l'on perçoit ne sont pas suffisantes pour avoir une perception précise et donc interagir de manière efficace avec l'environnement. Ainsi, les informations reçues ont besoin d'être enrichies pour fiabiliser la perception, parce que l'on nomme des mécanismes d'inférence. Ces inférences permettent d'extrapoler différentes informations à partir d'une structure sensorielle informationnelle insuffisante. Celles-ci reposent sur des processus statistiques, tels que des modèles bayésiens ((FETSCH, TURNER et al., 2009); (HILLIS et al., 2004)), pour extraire des informations supplémentaires des entrées sensorielles, telles que la variance des signaux et leur covariance, leur corrélation spatiale et temporelle. Les études sur la causalité des informations perçues et sur leur fiabilité sont les plus courantes.

Exemples : Etudes sur l'inférence causale

La perception de son mouvement propre nécessite l'intégration d'informations issues de multiples stimuli. La capacité à inférer la cohérence spatio-temporelle (aussi nommée "inférence causale") de ces stimuli est donc d'une importance cruciale. Dans ses papiers ((PEARL, 2009), (PEARL, 2010)) détaille les principales idées des théories de l'inférence causale et des mathématiques les soutenant.

De manière générale, ces mécanismes d'inférence doivent pouvoir détecter la corrélation entre ces différents signaux, intégrer de manière optimale les informations cohérentes entre elles et s'adapter dynamiquement aux discontinuités et aux conflits dans les structures informationnelles. Différents modèles ont été proposés, s'intéressant particulièrement à la combinaison de signaux visuels et auditifs. On peut par

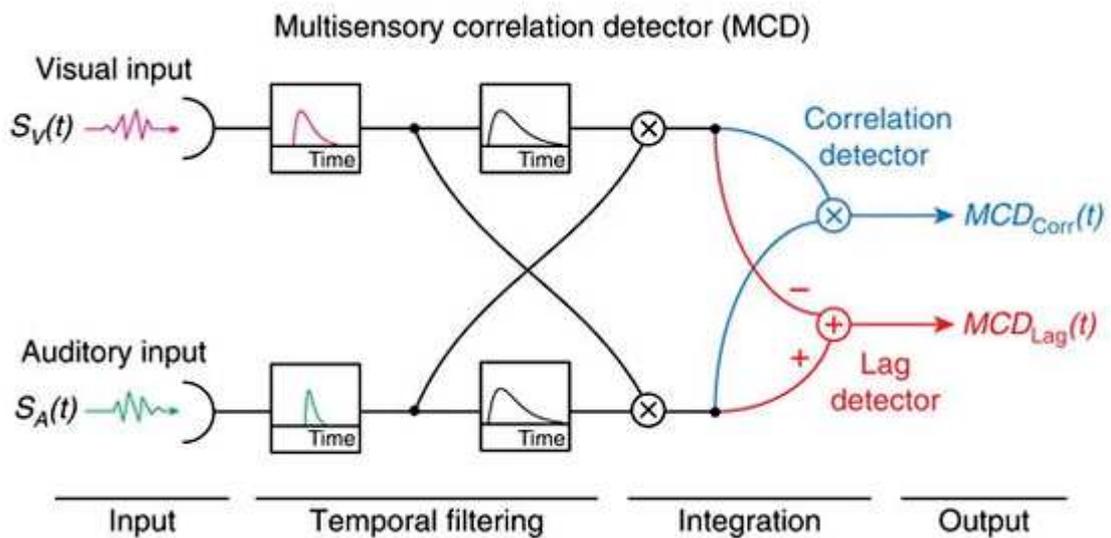


FIGURE 2.4 – Représentation schématique du Multisensory Correlation Detector (figure issue de (PARISE et ERNST, 2016))

exemple citer celui avancé par Parise et Ernst ((PARISE et ERNST, 2016)). Dans cette étude, un modèle d'observateur "idéal" est proposé, basé sur le modèle de détecteur de Hassenstein-Reichard, permettant de déterminer si deux signaux sensoriels proviennent d'une même source et sa (/leurs) localisation(s). Leur modèle, nommé en anglais "Multisensory Correlation Detector" (MCD), reçoit des signaux provenant de différentes modalités sensorielles et les intègre en plusieurs étapes (cf.2.4). En premier lieu, les signaux multisensoriels perçus passent indépendamment les uns des autres dans des filtres passe bas. Puis, les signaux résultants sont envoyés dans deux sous-unités symétriques en miroir, qui multiplient les signaux après avoir introduit un décalage temporel sur l'un des signaux grâce à un autre filtre passe bas, cela permettant de générer différents agencements temporels des signaux (ici visuels et auditifs) entre eux. Puis deux mécanismes parallèles prennent place, la multiplication de la sortie des sous-unités, dont l'amplitude représente la corrélation entre les signaux, et la soustraction des sorties des sous-unités, donnant le délai temporel entre les signaux.

Diverses approches mathématiques sont utilisées pour décrire les questions d'inférence causale. En plus de l'approche présentée ci-dessus, basée sur la combinaison de filtres (principalement passe bas) et de détecteurs de corrélation, d'autres études

proposent des approches plus orientées sur des calculs statistiques, dont principalement les statistiques bayésiennes. Ainsi, (KORDING et al., 2007) propose l'étude de signaux visuels et auditifs dans le but d'inférer la localisation de leur(s) source(s) mais également leur possible cause commune. Cette dernière inférence est complexe, car l'observateur n'a pas directement accès à la source des signaux perçus, mais à des signaux possiblement bruités. Pour réaliser ces inférences, le modèle repose sur deux interrogations, à savoir si les signaux ont une cause commune ou non, et si un observateur idéal détermine de manière statistiquement optimale comment les informations doivent être combinées (combinées si cause commune, séparées sinon).

Exemples : Etude "sensory weighted"

En addition de ces problèmes de causalité, la fiabilité des stimuli perçus est également une question d'importance. Il a été montré que le cortex cérébral régissant les informations gravito-inertielles est un cortex multimodal, dans le sens où des canaux neuronaux le relie directement à d'autres cortex modaux, comme ceux de la vision et des signaux somatosensoriels ((D. ANGELAKI et CULLEN, 2008);(BRITTON et ARSHAD, 2019)). Ainsi, les signaux vestibulaires sont constamment intégrés avec d'autres signaux sensoriels dans les mécanismes de perception. Dans leur étude de 2015, Ferrè et al. ((FERRÈ, WALTHER et HAGGARD, 2015)) ont étudié les mécanismes neuronaux spécifiques à ces intégrations sensorielles via des expérimentations de détection de stimuli somatosensoriels dans un environnement combinant stimuli visuels et vestibulaires. Ils ont mis en évidence trois types de comportements au niveau de la perception du stimulus tactile en fonction des deux autres stimuli : le phénomène de modulation indépendante multisensorielle (en anglais «Independent Multisensory Modulation») où chaque stimulus contribue indépendamment de l'autre à définir un seuil perceptif du stimulus tactile, le phénomène d'amélioration multisensorielle (en anglais «Multisensory enhancement») où les deux stimuli sensoriels se combinent pour abaisser le seuil de perception du stimulus tactile (détection plus aisée), et enfin le phénomène d'inhibition multisensorielle (en anglais «Multisensory inhibition») qui est inverse au phénomène précédent (augmentation du seuil perceptif).

D'autres études se sont intéressées aux mécanismes d'intégration de ces multiples informations sensorielles, en étudiant l'impact de l'incertitude liée à ces informations sur ces mécanismes ((DERAVET et al., 2018)). En effet, un stimulus lié à une

modalité sensorielle brouillée (e.g. durant la nuit ou du brouillard, la modalité visuelle, et donc la structure informationnelle liée, serait dégradée) pourrait être intégré en fonction de la fiabilité qu'on lui attribue (et donc se voir accorder moins d'importance dans le cas d'une information dégradée), et ce de manière dynamique. Par exemple, Fetsch et al. (2009) ((FETSCH, TURNER et al., 2009)) s'intéressent à cette question d'intégration dynamique en étudiant la combinaison d'informations sensorielles dans une tâche de discrimination de direction (en combinant de l'information optique, avec un flot optique, et de l'information gravito-inertielle, issue des mouvements de translation). Ils tendent à montrer l'existence de ces mécanismes de sommation sensorielle vis-à-vis de la fiabilité des signaux. Ainsi, en posant S_A le stimulus visuel (avec σ_A^2 sa variance) et S_B le stimulus vestibulaire (avec σ_B^2 sa variance), le stimulus sensoriel bimodal final perçu serait de la forme :

$$S_{AB} = w_A * S_A + w_B * S_B \quad (2.6)$$

$$\text{où } w_A = \frac{1/\sigma_A^2}{1/\sigma_A^2 + 1/\sigma_B^2} \text{ et } w_B = \frac{1/\sigma_B^2}{1/\sigma_A^2 + 1/\sigma_B^2}.$$

Limites inhérentes à l'approche

Malgré l'avantage d'expliquer le fonctionnement interne de la perception des stimuli sensoriels environnementaux, cette approche repose sur un contrôle strict des stimuli et implique souvent des expérimentations et des résultats hors du cadre opérationnalisable en aéronautique. L'étude des signaux cérébraux est complexe et nécessite un matériel de pointe. Les signaux cérébraux captés par les outils actuels de mesure sont très facilement bruités par les différents champs magnétiques générés par les appareils électroniques environnants. Ainsi, de telles études nécessitent un contrôle strict des variables environnementales pour observer les signaux issus de la réalisation d'une tâche particulière. Il est donc très difficile d'opérationnaliser des résultats obtenus avec une telle approche, la supervision des signaux cérébraux d'un pilote au cours d'un vol dans un environnement réel étant pratiquement impossible.

D'autre part, le contrôle de l'environnement nécessaire pour mener à bien les expériences au sein de cette approche implique souvent la restriction des mouvements

des participants pour ne pas bruite les signaux étudiés (les mouvements d'explorations étant, dans le cadre de cette approche, souvent considérés comme superflus), restriction impossible dans un avion.

2.4.2 Approche intermodale

Contexte

La seconde grande approche dans les théories de la perception est l'approche écologique ((GIBSON, 1950);(STOFFREGEN et BARDY, 2001)). Celle-ci repose principalement sur l'hypothèse, au contraire de l'approche précédente, que les stimuli environnementaux apportent suffisamment d'informations pour percevoir son environnement et s'y déplacer de manière efficace. Dans ce cas-là, il y aurait une relation, régie par des lois, liant l'interaction de l'individu avec l'environnement et les variations des structures informationnelles présentes dans cet environnement. Il existerait ainsi des invariants environnementaux spécifiant l'interaction, c'est-à-dire des paramètres issus des champs d'énergie ambiants qui restent constants au cours de l'action, permettant de la spécifier. Cette approche intermodale se place à un niveau d'analyse supérieur à celui de l'approche cognitive, celle de l'interaction entre l'acteur et son environnement.

Prenons par exemple la marche en avant, étudiée en ne considérant que les stimuli visuels. Quand un individu effectue un déplacement rectilinéaire vers l'avant, il a l'impression que l'ensemble des objets visibles dans l'environnement se met également en déplacement, dans le sens inverse du déplacement de l'individu((GIBSON, 1950)). Les changements spatio-temporels des patrons optiques induits par le mouvement de l'individu et perçus par celui-ci peuvent alors se décrire à l'aide d'un champ vectoriel, nommé le flot optique ((KOENDERINK et DOOM, 1981)). Ce flot est divisible en 3 composantes principales : les vecteurs correspondant au déplacement de chaque élément dans l'environnement visuel et dotés d'une amplitude et une direction, le foyer d'expansion, depuis lequel les vecteurs de déplacement sont en expansion radiale et le foyer de contraction, vers lequel les vecteurs de déplacement sont en contraction. Ces 3 composantes spécifient la direction vers laquelle se dirige l'individu ainsi que la direction d'où il vient, à une vitesse donnée.

Ces différents invariants sont des paramètres optiques issus de l'évolution spatio-temporelle des motifs dans la structure énergétique ambiante optique. Cependant,

le déplacement d'un individu dans un environnement réel structure souvent de manière cohérente plusieurs formes d'énergies ambiantes (acoustique, optique, inertielle, ...) et les stimulations de l'individu sont donc plurimodales.

La spécificité

Si on suppose l'existence d'une relation entre les variations des structures des énergies ambiantes et les actions d'un individu, on peut se questionner sur l'unicité ou la multiplicité de cette relation. Plusieurs approches ont été proposées pour répondre à cette question au cours des ans, à savoir principalement la spécification modale, la spécification amodale et la spécification intermodale.

L'idée de la spécification modale ((KUGLER et TURVEY, 1987)) est que l'interaction d'un individu avec son environnement serait spécifiée indépendamment par chaque structure informationnelle ambiante modale. L'argument principal soutenant cette idée est que chacune de ces structures entretiendrait une relation spécifique avec l'environnement sous-jacent et en serait spécifique indépendamment l'une de l'autre. Par exemple, on pourrait citer le paramètre tau présenté précédemment et sa dérivée temporelle, utilisés pour décrire des actions impliquant des collisions ou des réductions de distances (freinage d'une voiture, arrivée d'un oiseau sur une branche, ...). Néanmoins, cette approche pose le problème de la cohérence informationnelle. En effet, chaque modalité sensorielle génère en partie des informations qui lui sont spécifiques et non accessibles par les autres modalités. Par exemple, la notion de distance est spécifique à la modalité visuelle et ne peut pas être renseignée directement par d'autres modalités sensorielles, telle que la vestibulaire. Ainsi l'absence de redondance entre les stimuli de différentes modalités sensorielles provoquerait des ambiguïtés concernant la perception de la réalité physique spécifiée.

La spécification amodale ((GIBSON, 1986)) de son côté suppose qu'une même réalité physique pourrait être spécifiée par des motifs informationnels existant de manière redondante dans plusieurs structures ambiantes modales. Par exemple, dans leur

étude, (ROSENBLUM et SALDAÑA, 1996) se sont intéressés à la question des structures optiques et auditives dans la perception d'un dialogue. Bien que cette redondance de l'information permette de supprimer une partie des problèmes d'ambiguïtés informationnelles de l'approche précédente, il a été montré que ce n'est pas totalement le cas ((CUTTING et VISHTON, 1995)). En effet, bien que l'information en elle-même soit redondante dans les structures ambiantes modales, les problèmes d'ambiguïté reviennent, si deux stimuli sont comparés entre eux. Ainsi, l'étude (LAURENT, MONTAGNE et DUREY, 1996) s'intéresse à l'impact de deux paramètres optiques différents, que sont l'évolution de l'extension du contour optique d'un objet en approche et l'évolution de la convergence oculaire nécessaire au maintien de la fixation binoculaire sur cet objet, sur le "Time-to-contact" (durée avant l'atteinte d'un obstacle ou d'une position donnée). En réussissant à manipuler le "Time-to-contact" avec une de ces deux variables sans modifier la seconde variable, ils ont prouvé que les stimuli n'avaient pas une relation unique et déterminée avec l'environnement. Ainsi des mécanismes d'inférence risqueraient d'être nécessaires pour une bonne interaction avec l'environnement, ce qui est contraire au principe de spécification (de la perception directe).

En résumé, les spécification modale et amodale soulèvent des problèmes informationnels remettant en cause le principe de spécification. Stoffregen et Bardy ((STOFFREGEN et BARDY, 2001)) ont donc proposé l'idée de spécification inter-modale. L'information spécifiant l'interaction de l'individu avec l'environnement serait présente dans une structure informationnelle d'ordre supérieur, nommée la configuration globale (en anglais "Global Array").

La théorie du "Global Array"

Ainsi, en supposant l'existence d'invariants environnementaux spécifiant les interactions de l'individu, une théorie valable serait de supposer l'existence d'une structure informationnelle d'ordre supérieur issue de l'interaction des différentes structures informationnelles modales environnementales. Sous cette hypothèse, il existerait dans cette structure informationnelle de l'information invariante par rapport à l'interaction qui spécifierait de manière univoque cette interaction avec l'environnement. De plus, cela supposerait que l'idée de sens séparés pour la perception de l'environnement serait erronée, celle-ci menant toujours à des problèmes d'ambiguïtés entre réalités modales physiques perçues (si chaque sens est séparé, il y a

une génération pour chaque sens d'une réalité perceptive). La configuration globale serait une structure de dimension N , avec N = nombre de dimensions modales impliquées dans l'action – nombre de dimensions modales communes.

Prenons l'exemple d'une voiture qui freine, étudiée dans un environnement visuo-vestibulaire. L'impact sur les structures informationnelles environnementales de cette manoeuvre peut être vu au travers des deux variables modales que sont l'évolution de la norme des vecteurs du flot optique perçus par le conducteur (structure optique) et l'évolution de l'intensité des forces appliquées sur le système voiture-pilote (structure gravito-inertielle). Ces deux paramètres pris indépendamment n'apportent pas énormément d'informations. En effet, l'évolution du flot optique au cours du temps n'est pas spécifique à l'action de freiner, de même pour l'évolution de la force de freinage. En effet, à titre d'exemple, cette évolution du flot optique peut tant être issue d'un individu en mouvement, puis qui s'arrêterait par rapport à un environnement illuminé fixe, que d'un individu fixe par rapport à un environnement illuminé cette fois-ci en mouvement et qui s'arrêterait. Cependant, si l'on représente la nappe énergétique issue de l'interaction de ces deux modalités, donc la courbe en trois dimensions représentant l'évolution du flot optique en fonction de la force de freinage au cours du temps, on obtient un motif spécifique de l'action de freiner et de s'arrêter par rapport à un environnement illuminé fixe(cf. 2.5).

Exemples d'application

Plusieurs études se sont intéressées à ces questions de spécification. On peut citer les études sur la perception de l'équilibre et de la gravité subjective, pendant lesquelles les chercheurs essaient de comprendre les relations entre environnement ambiant et dynamique de corps. Ainsi, dans leur étude ((RICCIO, MARTIN et STOFFREGEN, 1992)), Riccio, Martin et Stoffregen s'intéressent à la question du rôle de la dynamique de l'équilibre de la posture dans la perception active de l'orientation. Ils partent du principe que la configuration du corps de l'individu détermine les aspects informationnels de l'environnement accessible à la réalisation des interactions avec cet environnement, tandis que la stabilité du corps influencerait la précision de ces interactions. Pour tester leur hypothèse, ils se reposent principalement sur des expérimentations dans des environnements uniquement vestibulaires. La vue

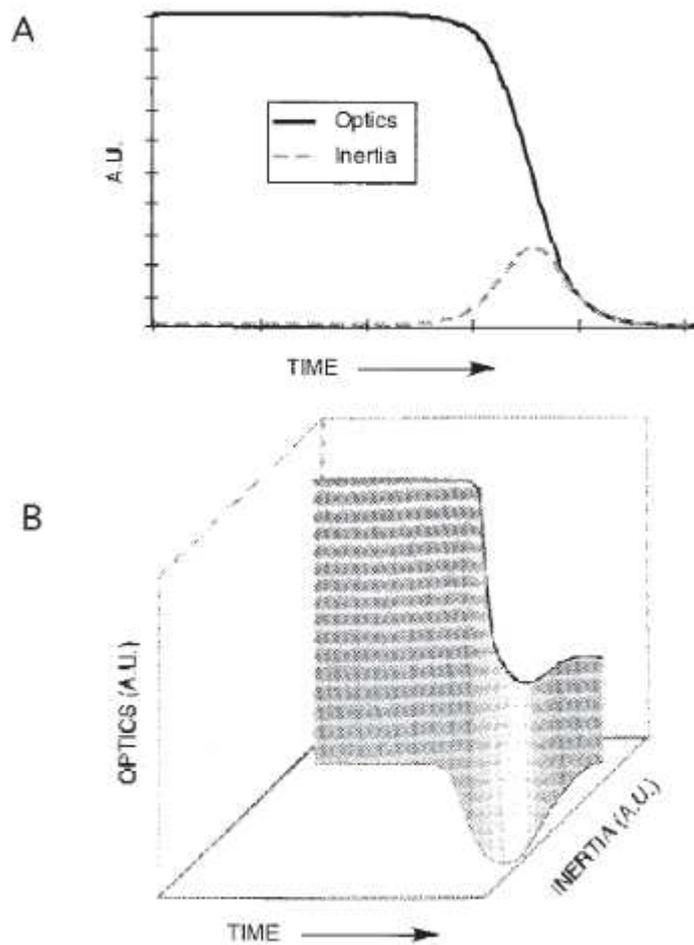


FIGURE 2.5 – Exemple d’une voiture qui freine. A. Représentation graphique de l’évolution de l’intensité de la force de freinage et de la norme du flot optique au cours du temps. B. Représentation en 3D de ces deux évolutions en fonction du temps. (Figure issue de (STOFFREGEN et BARDY, 2001))

des participants est cachée à l'aide d'un bandeau ou d'un casque, tandis qu'un déplacement de la cabine d'un simulateur RATS (en anglais «Roll-axis Tracking Simulator») est créé (générant ainsi des informations gravito-inertielles), mouvement que les participants doivent annuler. Les différentes expérimentations menées démontrent que la perception de l'orientation serait basée sur les variations des motifs du mouvement du corps (cinématique) et sur les actions nécessaires pour résister à ces mouvements (cinétique) et ce par rapport à l'environnement; la domination de la balance du corps sur la gravité perçue dans le contrôle de la posture étant principalement dépendante de l'amplitude de l'angle (le « tilt ») du corps par rapport à sa balance. Ainsi, la sensibilité à la dynamique de la balance n'implique et/ou ne dépend pas de la sensibilité à la force gravito-inertielle ou à ses composantes, mais plutôt aux conséquences dynamiques de la force gravito-inertielle.

On pourrait également citer la théorie du tau-couplage, dont on parlait précédemment. En effet, les chercheurs se basant sur cette approche tentent de caractériser un paramètre environnemental, tau, représentant l'évolution de la fermeture entre deux variables environnementales (aussi appelé en anglais le « gap »), qui spécifierait diverses actions. Dans l'exemple donné précédemment pour cette théorie, le taux d'évolution de la distance entre l'obstacle et la voiture freinant (la dérivée temporelle du paramètre tau) est représentatif de l'action de freiner du conducteur. En effet, dans ce contexte, la relation $\dot{\tau} = -0.5$ lie des paramètres environnementaux (les positions instantanées du conducteur et de l'obstacle) à l'action de freiner précisément au niveau de l'obstacle.

Conclusions sur l'approche

Cette approche présente également différentes limitations. Elle repose sur l'étude de l'interaction d'un individu avec son environnement et ne tente pas réellement, du fait du niveau d'abstraction plus élevé que précédemment, d'expliquer les mécanismes sous-jacents à cette interaction. Le filtrage et le traitement des informations sensorielles est ainsi relativement laissé de côté pour s'intéresser à des réponses principalement physiologiques. Cette approche n'est donc que de peu d'intérêt dans les études sur le fonctionnement du cerveau et les différents impacts cognitifs des stimuli environnementaux.

En revanche, elle a l'avantage de pouvoir expliquer le comportement global d'un individu face à un environnement donné et est beaucoup plus simple à mettre en

œuvre. Les situations de VBH impliquent de nombreux stimuli et une grande complexité à les étudier dans un environnement contrôlé. En effet, l'utilisation d'un simulateur implique de nombreuses stimulations environnementales supplémentaires (bruit auditif des actionneurs du simulateur, génération d'un mouvement complexe, bruit magnétique des différents appareils électroniques utilisés, ...), empêchant donc l'étude directe des signaux cérébraux. Une étude comportementale et interactionnelle est donc nécessaire dans notre contexte.

2.5 Complexité des vols en environnement réel

2.5.1 Limitation des approches théoriques

Mono- vs. Multi-modalité du mouvement propre

Comme nous l'avons vu précédemment, un certain nombre d'études se sont intéressées à la question de la perception et du contrôle de la hauteur en vol. Cependant, certaines questions restent obscures.

Différents paramètres optiques ont été proposés ((FLACH, HAGEN et LARISH, 1992), (LARISH et FLACH, 1990), (LEE, 1998), (GRAY et al., 2008)), en deux dimensions (angle d'écartement, angle de dépression, $\dot{\tau}$...), et en trois dimensions (GOFR, occlusion de surface...) pour caractériser les informations prélevées par un pilote pour percevoir et contrôler son mouvement propre. Cependant, bien que l'importance d'autres stimuli sensoriels, dont principalement les stimuli vestibulaires, sur la perception et le contrôle du mouvement propre dans un environnement dynamique ait été montré (e.g. (ISRAEL et al., 1997), (CULLEN, 2019)) et que nombre de rapports mettent en avant l'importante responsabilité des problèmes vestibulaires dans les situations de DS (e.g. (B. CLARK, 1971), (LEWKOWICZ et BIERNACKI, 2020), (PENNINGS et al., 2020)), l'impact des stimuli vestibulaires et la contribution de l'interaction visuo-vestibulaire sur la perception et le contrôle du mouvement propre en vol restent obscurs.

Différences entre contrôleur et observateur

D'autre part, la prise en compte de l'impact du type de tâche réalisée en cours de vol sur le contrôle du mouvement propre est nécessaire. En effet, la plupart des

études présentées jusqu'ici (e.g. (GRAY et al., 2008), (LEE, 2008), (FAJEN, 2005)) s'intéressent à la question de la perception et du contrôle du mouvement propre en se basant sur des processus passifs ascendants (l'information était perçue d'un point de vue d'observateur), cela permettant une simplification du dynamisme des mécanismes physiologiques.

Cependant, différentes études mettent en avant des différences de mécanisme de perception si l'individu est passif vis-à-vis de l'environnement ou s'il est actif par rapport à lui. Ainsi comme nous l'avons vu précédemment, certaines études montrent que les mécanismes d'intégration de l'information visuelle (e.g. (GOODALE et D. A. MILNER, 1992), (KNOL, 2016)) et vestibulaire (e.g. (CULLEN, 2019)) varient en fonction du type de tâche à effectuer. Dans leur étude, (C. E. SCHROEDER et al., 2010) mettent en avant la nature dynamique des mécanismes perceptifs et de l'impact du rythme des actions nécessaires à la tâche à réaliser. Ainsi, lors de tâches de fixation d'un objet, les signaux neuronaux du cortex visuel seraient modulés par la fréquence des saccades oculaires nécessaires à la stabilisation de l'image.

Comme nous l'avons vu, la manœuvre du VBH est une combinaison d'actions de supervision (perception de la hauteur sol de vol, anticipation de l'évolution du terrain...) et de contrôle (contrôle des déplacements de l'appareil et de la trajectoire de vol). Au regard de ce que nous avons vu précédemment, il semble nécessaire d'étudier les mécanismes de contrôle du mouvement propre avec une approche tenant en compte du contexte dynamique de la manœuvre. En effet, on peut donc supposer que les différentes actions que le pilote doit réaliser vont impliquer, outre des charges de travail différentes, des mécanismes perceptifs différents.

Impact sur la structure informationnelle

En reprenant l'idée d'une structure d'ordre supérieur spécifiant l'interaction du pilote avec son environnement de la théorie du Global Array, les questions de la multimodalité de la perception du mouvement propre et de l'impact du type de tâche à réaliser sont essentiels.

D'une part, comme nous l'avons vu avec l'exemple de la voiture qui freine et de l'évolution des informations optiques et gravito-inertielles au cours du freinage ((STOFFREGEN et BARDY, 2001)), considérer l'évolution de la norme du flot optique seule et la considérer en rapport avec l'évolution de l'intensité de freinage implique deux structures informationnelles profondément différentes. On peut donc s'attendre à ce que la

structure informationnelle générée par le déplacement du pilote dans son environnement et dans laquelle il prélève ses informations soit également différente de la simple structure énergétique visuelle.

D'autre part, en prenant en compte les différences de mécanismes perceptifs variant en fonction du rapport du pilote à l'environnement ((C. E. SCHROEDER et al., 2010)), on peut également s'attendre à ce que la structure énergétique d'ordre supérieur évolue dynamiquement au cours de la manœuvre du VBH en fonction de l'action que le pilote est en train de réaliser.

Il paraît donc nécessaire d'étudier la manœuvre du VBH dans un contexte multimodal et de considérer l'impact de cette multimodalité sur les mécanismes de contrôle du mouvement propre en fonction de la tâche.

2.5.2 Différences entre vol réel et vol simulé

Un dernier point à prendre en compte est la différence entre l'impact d'un environnement réel et d'un environnement visuo-vestibulaire simulé sur les performances de réalisation d'un VBH. En effet, alors qu'un environnement réel implique des variations dans l'ensemble des structures informationnelles modales (variations intrinsèques au mouvement propre, bruit de l'hélicoptère, effet des vents sur l'aérodynamisme de l'hélicoptère, ...), un environnement simulé permet un contrôle poussé des stimuli environnementaux. L'utilisation d'un casque de réalité virtuelle ou d'un écran peut générer des informations optiques, l'utilisation d'un simulateur mobile ou d'un système galvanique peut générer des informations gravito-inertielles... Dans ce contexte, la question de la fidélité de la simulation d'un VBH par rapport à un VBH réel est centrale dans la généralisation des résultats pour les entraînements des pilotes et pour leur opérationnalisation. Tester les contributions visuelles et vestibulaires (et leurs interactions) pour réaliser un VBH réussi nécessite de manipuler l'environnement perceptif du pilote. A cause du risque élevé et de la difficulté de contrôler les variables environnementales (vent, luminosité...), cette manipulation est compliquée dans la vie réelle. Les entraînements virtuels avec des simulateurs sont largement utilisés pour donner aux pilotes un espace sécurisé mais réaliste d'entraînement ((MOSKALIUK, BERTRAM et CRESS, 2013); (GANIER, HOAREAU et TISSEAU, 2014)). Le couplage d'un simulateur avec un dispositif visuel (tel qu'un casque de réalité virtuelle) peut recréer, dans une certaine mesure, des scénarii de vol réalistes avec des stimulations visuelles et vestibulaires.



FIGURE 2.6 – Exemple de simulateur à base fixe : Le Heliflight-R Flight Simulator de liverpool

Fidélité de la simulation

Simuler parfaitement un environnement réel est impossible ((GIBSON, 1971); (STAPPERS, GAVER et OVERBEEKE, 2004); (STOFFREGEN, BARDY et al., 2003)). Ainsi la question de la fidélité de la simulation est primordiale. Pour recréer le plus fidèlement possible les stimulations visuo-vestibulaire auxquelles sont soumis les pilotes, il est nécessaire d'utiliser un simulateur pouvant recréer un environnement multi-modal, par exemple à la fois des stimuli visuels et des stimuli vestibulaires.

Les deux principaux types de simulateur sont les simulateurs à base fixe (e.g. (FOUQUE et al., 1999); (PADFIELD, LEE et BRADLEY, 2003)) et les simulateurs à base mobile (e.g. (BELLMAN et al., 2011)). Les simulateurs à base fixe (e.g. 2.6) bougent uniquement sous forme de rotation et recréent les accélérations linéaires en jouant sur les limites du système vestibulaire humain (difficulté à différencier accélération linéaire et rotation angulaire, voir la partie sur les limitations du système vestibulaire). Ce sont les simulateurs les plus couramment utilisés lors des entraînements des pilotes et des études sur les situations auxquelles ils sont soumis (e.g. (CASNER, GEVEN et WILLIAMS, 2013)).



FIGURE 2.7 – Exemple de simulateur à base mobile : Le Vertical Motion Simulator du centre de recherches Ames de la NASA

Les simulateurs à base mobile peuvent quant à eux recréer à la fois des mouvements rotatifs et des accélérations linéaires limitées (e.g. 2.7). Il s'agit souvent de simulateurs physiquement beaucoup plus gros que les simulateurs à base mobile, de par leur possibilité à recréer de vraies accélérations. De fait des contraintes physiques, les simulateurs à base mobile sont toujours limités en amplitudes de mouvements.

Cette question de génération d'accélérations linéaires est primordiale lors du choix du simulateur utilisé lors d'études sur le mouvement propre. En effet, si les chercheurs veulent générer une accélération linéaire avec un simulateur à base mobile, celui-ci doit disposer de suffisamment d'amplitude de mouvement pour reproduire tant l'intensité que la longueur temporelle de cette accélération. Ainsi, pour

contourner ce problème, les simulateurs à base fixe reposent sur l'illusion au niveau du système vestibulaire entre les rotations et les accélérations linéaires. Cependant ces deux informations impliquent des variations des structures énergétiques ambiantes différentes (par exemple lors d'un déplacement dans un environnement visuo-vestibulaire, une rotation et une accélération linéaire provoquent des variations du flot optique différentes). Il est donc crucial d'entraîner les pilotes dans des environnements simulés utilisant des simulateurs à base mobile pour recréer de vraies accélérations linéaires.

Chapitre 3

Première étude - Expérimentation observateur - Pilotes novices

Dans cette première étude ((DENQUIN et al., 2021)) les participants devaient réaliser une tâche d'observateur d'un VBH automatique simulé avec un simulateur mobile. Dans ce contexte, nous nous sommes intéressés à la question de la perception de la hauteur-sol de vol et de l'impact sur cette perception d'une stimulation visuo-vestibulaire. Il s'agissait donc d'une tâche d'observation d'un vol automatique avec report de la valeur instantanée de la hauteur-sol perçue. Cette tâche reposait sur l'intégration d'informations relatives pendant un vol automatique découplé des actions du pilote. Dans certains essais, nous avons ajouté du bruit aux stimulations visuelles et vestibulaires pour étudier l'impact de la dégradation des informations sensorielles et des vibrations sur la perception en VBH. La contribution des interactions visuo-vestibulaires a été évaluée en analysant le comportement des participants pendant la tâche (contrôle du joystick, temps de réaction) et leurs performances (erreur de perception de la hauteur). Au regard de la littérature existante, deux hypothèses furent alors proposées : premièrement, l'observation de meilleures performances dans un environnement visuo-vestibulaire comparé à un environnement uniquement visuel et deuxièmement, l'impact négatif de la dégradation des informations optiques et gravito-inertielles sur les performances.

3.1 Méthodologie

3.1.1 Présentation des sujets et des questionnaires

Treize participants de l'Université de Montpellier, naïfs (22+/-4 ans, 7 femmes, tous droitiers), non payés et avec une vision normale et/ou corrigée se sont portés volontaires pour participer à cette expérimentation. Les participants n'avaient aucune expérience de vol (non pilotes), ni aucune expérience avec le simulateur utilisé. Ils étaient informés de leur tâche principale, mais n'étaient pas au courant de la procédure expérimentale.

Les sujets devaient renseigner deux questionnaires, le premier traitant du mal des transports (pour les mouvements du simulateur, test SSQ) et le deuxième de la claustrophobie ((RANDOMSKY, RACHMAN et al., 2001),(RANDOMSKY, OUMET et al., 2006)), pour assurer des comportements et/ou des réponses physiologiques similaires en environnement fermé. Le SSQ fut renseigné à deux reprises par les participants, avant et après l'expérimentation, pour vérifier l'impact des mouvements de la cabine sur les ressentis des participants. L'objectif de ces questionnaires était de s'assurer que ces deux phénomènes n'impacterait pas les résultats obtenus.

Cette expérimentation a été conduite en accord avec la déclaration d'Helsinki de 1964 et ses amendements suivants. Elle fut approuvée par l'Institutional Review Board (IRB) du laboratoire EuroMov, Université de Montpellier (IRB-EM 1708A). Le consentement écrit de participation à l'expérimentation fut obtenu pour chaque participant.

3.1.2 Matériel

Systeme de simulation mobile

Un système de simulation mobile, le simulateur iMose, disponible au laboratoire EuroMov de l'Université de Montpellier (voir 3.1), fut utilisé pour administrer les stimulations vestibulaires au cours de l'expérimentation. Le système de simulation consistait en un simulateur mobile KUKA KR500-3 MT à 6 degrés de liberté (BEC GmbH, Reutlingen, Allemagne) ((BELLMAN et al., 2011)), trois stations de contrôle

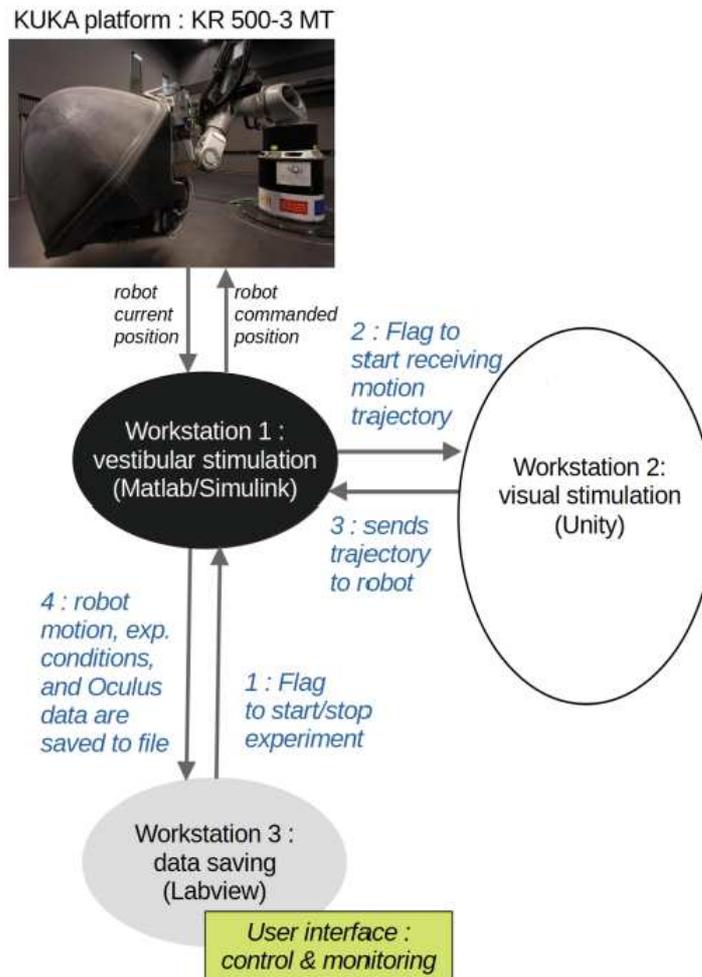


FIGURE 3.1 – Schéma montrant le fonctionnement du système expérimental. (En haut) Simulateur iMose du laboratoire EuroMov.

(cf. 3.1), un casque de réalité virtuelle et un joystick. Le simulateur KUKA était composé d'une cabine reliée à un bras mécanique, dans laquelle les participants étaient assis sur un siège d'hélicoptère avec sangles de sécurité et contenant des périphériques externes de communication participants / expérimentateurs, des caméras pour superviser les participants, ainsi que le joystick et le casque de réalité virtuelle. Le tout était accessible et contrôlé par la Station de Contrôle n°2 (attachée physiquement à la cabine du simulateur). La plate-forme KUKA, directement contrôlée par la Station de Contrôle n°1, avait une amplitude de mouvement verticale de 3 mètres, ce qui était suffisant pour notre contexte inspiré du VBH.

Système de simulation virtuelle

La Station de Contrôle n°1 coordonnait les mouvements entre le robot KUKA et les mouvements de la trajectoire de vol dans l'environnement virtuel, via une interface de contrôle Matlab/Simulink (Natick, Massachusetts, USA). La Station de Contrôle n°2 exécutait l'environnement virtuel conçu en C# avec le logiciel Unity (licence étudiante, voir 3.2) et projetait l'environnement dans un casque de réalité virtuelle Oculus Rift DK2 (résolution par œil 960*1080, voir 3.2). Le casque montrait l'environnement virtuel sans afficher d'informations non nécessaires à la tâche (telle qu'une cabine d'hélicoptère). La trajectoire de vol simulée fut d'abord générée dans l'environnement virtuel, puis envoyée par la Station de Contrôle n°2 à la Station de Contrôle n°1 contrôlant les mouvements du simulateur. Le survol de la succession de collines dans la trajectoire de vol expérimental dont la "height map" (carte des reliefs) correspondait à une fonction sigmoïde avec une pseudo-période de 20s dépendant du taux de rafraîchissement oscillant autour de 72Hz, d'équation :

$$f(X) = 100 * (0.5 * (\tanh(3 * \cos(\frac{2\pi * (X + 461)}{2048})) + 0.5) + 1)), \quad (3.1)$$

Cette forme permettait : 1) de minimiser les accélérations trop fortes (moins de 2m/s²) au niveau des sommets et des pieds des collines, et 2) de donner aux participants une sensation plus réaliste en créant des accélérations verticales plus fortes du fait des pentes plus abruptes de cette fonction sigmoïde. Le système vestibulaire nécessitait une valeur suffisante d'accélération pour que les participants aient une bonne perception de la direction du mouvement ((D. ANGELAKI et CULLEN, 2008)). Enfin, la Station de Contrôle n°3 servait aux expérimentateurs d'interface de contrôle utilisateur à l'aide d'un script Labview National Instruments (Austin, Texas, USA) et permettait de lancer/stopper l'expérimentation ainsi que de collecter les données expérimentales.

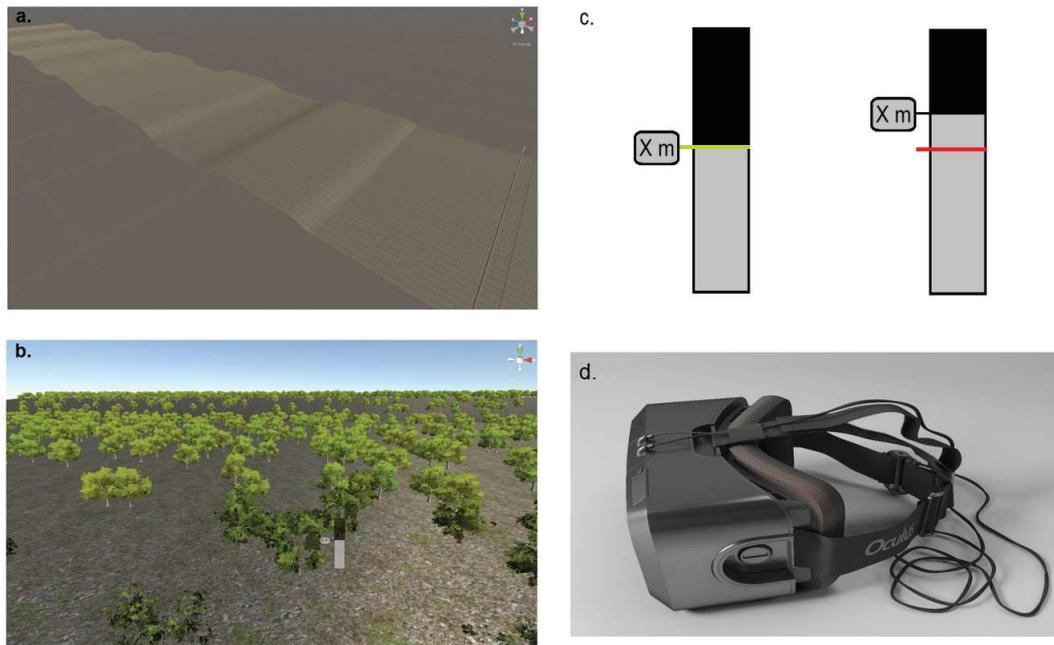


FIGURE 3.2 – a. Terrain expérimental vu de haut (sans les arbres); b. Visuel affiché dans le casque Oculus Rift, exemple sans brouillard avec la jauge affichée; c. Jauges utilisées au cours de l'expérimentation. A gauche, la jauge en phase 1, à droite la jauge en phase 2; d. Casque Oculus Rift DK2.

Joystick d'aviation pour les performances

Dans cette expérimentation, les participants utilisaient un joystick d'aviation à 2 degrés de liberté (Thrustmaster – Houston, Texas, USA) pour reporter leur hauteur-sol perçue dans l'environnement virtuel. Les deux axes de contrôle du joystick (longitudinal et latéral) renvoyaient des valeurs comprises entre -1 et 1, les valeurs négatives et positives correspondant respectivement à des mouvements en arrière et en avant pour l'axe longitudinal, et des mouvements vers la gauche et la droite pour l'axe latéral.

Au cours de l'expérimentation, les participants contrôlaient avec l'axe sagittal du joystick une jauge graduée qui était affichée sur les écrans du casque de réalité virtuelle. Tirer le joystick en arrière ou le pousser en avant permettait d'indiquer respectivement une augmentation ou une diminution de la hauteur perçue.



FIGURE 3.3 – Exemple d’environnement visuel avec brouillard

3.1.3 Stimuli

Cette première expérimentation fut conçue en blocs de 2-par-3 pour pouvoir tester respectivement les contributions des stimulations optique et gravito-inertielle :

Deux types de conditions Visuelles :

- un Environnement Visuel Normal affichant le terrain un jour de soleil sans nuages, pluie ou brouillard (voir 3.2 a.);

- un Environnement Visuel Dégradé affichant le même terrain un jour de brouillard, impactant graduellement la distance de vision des participants (cf. 3.3). La densité (F) du brouillard fut calculée avec l’équation $F = \exp(-0,008 * X)^2$, où X représentait la position du point d’observation selon l’axe longitudinal par rapport à la position de l’observateur (réalisé avec la librairie « Basic package » du logiciel Unity).

Le terrain en lui-même était identique pour chacune des conditions EVN et EVD.

	Mvt	Mvt bruité	No Mvt
EVN	6	6	6
EVD	6	6	6
	Total		36

FIGURE 3.4 – Récapitulatif des essais expérimentaux et du nombre d'essais par condition

Trois types de conditions Vestibulaires :

- mouvements normaux (Mvt), où la cabine du simulateur avait des mouvements verticaux correspondants aux déplacements verticaux de la scène virtuelle;

- mouvements bruités (Mvt Bruité), où la cabine bougeait comme dans la condition Mvt, mais avec un bruit blanc rajouté sur le déplacement (bruit blanc d'amplitude maximale de l'ordre de 1/25ème de l'amplitude maximale du mouvement de la cabine et de fréquence 22,5Hz);

- pas de mouvements (No Mvt), où la cabine ne bougeait pas et les participants étaient seulement soumis à l'environnement visuel.

3.1.4 Modélisation de l'environnement

Modélisation de l'environnement visuel

Le terrain expérimental fut conçu, comme dit précédemment, avec le logiciel Unity en licence étudiante et était constitué de deux parties distinctes (phase 1 et phase 2).

La phase 1 était un terrain plat faiblement texturé en 2D recouvert d'arbres identiques (densité 200 arbres/km²). Cette phase était conçue pour que les participants la traversent en 12,5s, quelle que soit leur vitesse. Ensuite venait la phase 2, où le participant commençait par survoler une colline commençant à mi-parcours de son ascension, puis une succession de collines identiques (même hauteur, même longueur). Cette phase était conçue pour être survolée par les participants en 57,5s,

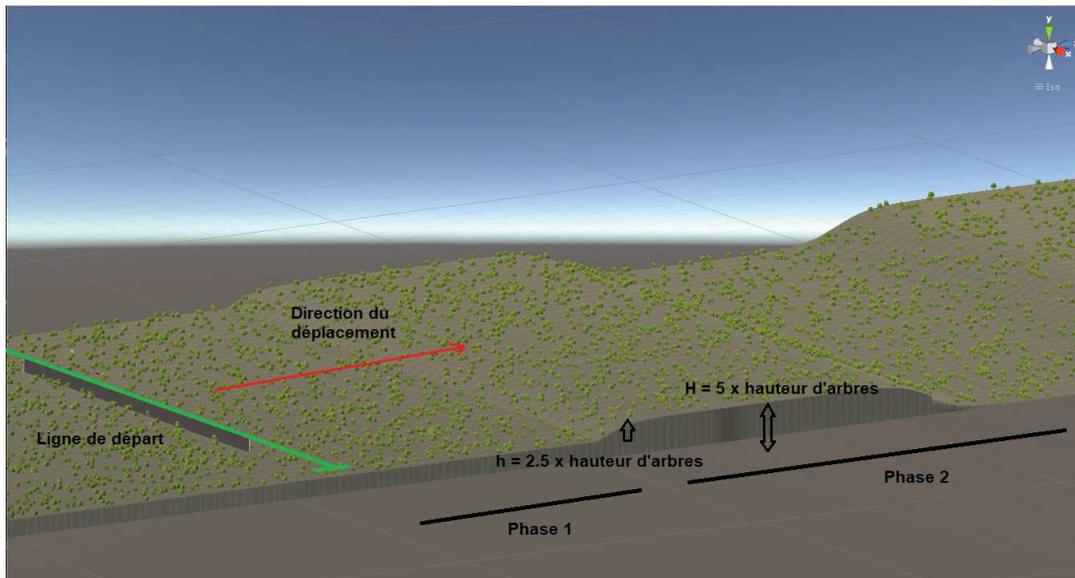


FIGURE 3.5 – Terrain expérimental vu de haut. La position de départ des participants est indiquée en vert, le sens de la trajectoire en rouge.

donnant un survol total du terrain expérimental (quelle que soit la vitesse) en 70s.

Les tailles en hauteur d'arbres et durées en secondes sont représentées sur la figure 3.5.

Dans le cadre de cette expérimentation, une jauge graduée (voir figure 3.5 c.) était affichée dans le coin inférieur droit de l'interface visuel des participants. Cette jauge, dépendant de la phase de l'essai en cours, permettait aux participants de reporter leur hauteur-sol perçue de vol (voir sous-partie Procédure).

Modélisation de la trajectoire

Dans cette expérimentation, les participants étaient observateurs d'un vol automatique (voir Annexe A). Celui-ci commençait (phase 1) à une hauteur pseudo-aléatoire ($45ft + nb_{alea}(-1; +1) * 4.5ft$). Deux vitesses longitudinales différentes étaient générées selon les essais, 75km/h et 125km/h. Le survol du terrain s'effectuait à hauteur-sol constante pendant la phase 1. Lors du début de la phase 2 et du survol des collines, le vol automatique suivait le relief du terrain pour maintenir une hauteur-sol constante (à la valeur hauteur-sol initiale). Au bout d'un temps pseudo aléatoire (entre 25s et 45s après le début de l'essai, donc entre 12,5s et 32,5s

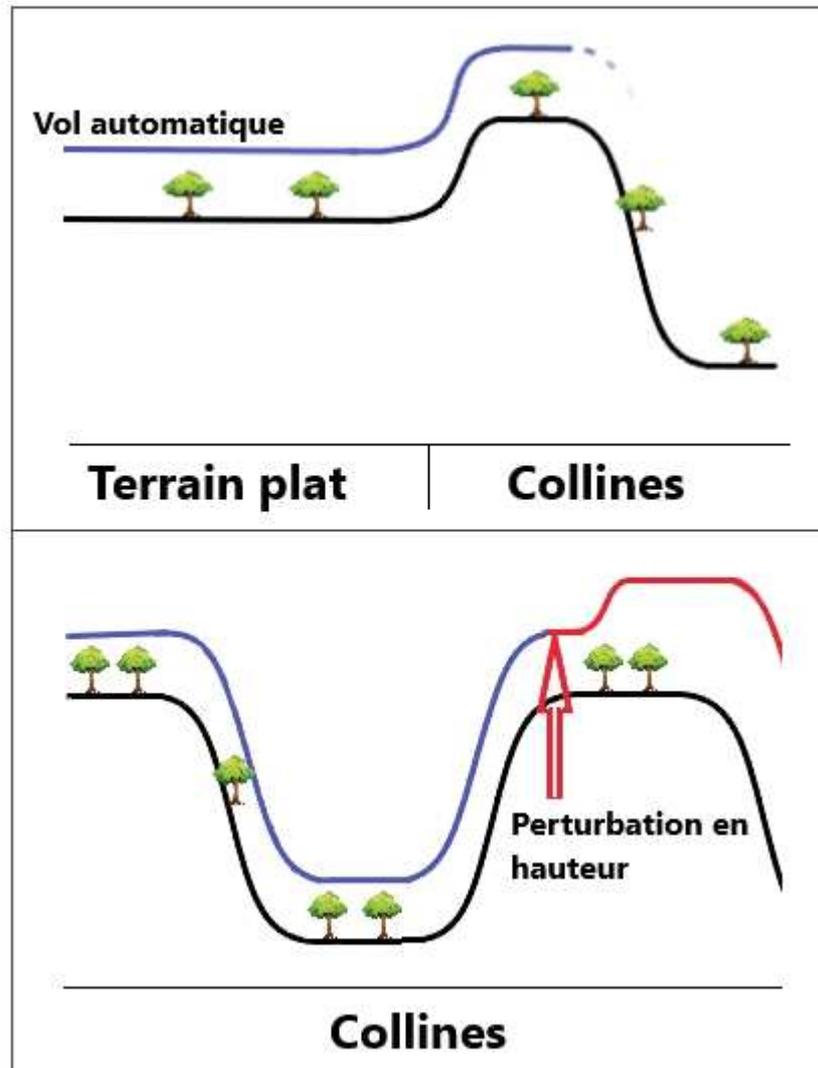


FIGURE 3.6 – Schéma récapitulatif de l'expérimentation; a. Début de l'essai, phase 1 et début phase 2, (en bleu) la trajectoire de vol; b. Moment de l'essai où la perturbation en hauteur survient; (en rouge) la trajectoire de vol après perturbation.

après le début de la phase 2) une perturbation en hauteur survenait (augmentation ou diminution constante de la hauteur sur une durée d'environ 2s) d'une amplitude totale de 15% de la hauteur-sol initiale de vol. Puis le survol continuait à la nouvelle hauteur-sol de survol jusqu'à la fin de l'essai.

L'annexe A résume les différents paramètres de l'environnement simulé.

3.1.5 Procédure

Cette première étude se déroulait sur un total de 120 minutes.

Elle commençait à l'arrivée des participants. Ils devaient d'abord remplir et signer un formulaire de consentement pour participer à l'expérimentation et donner leur permission d'utiliser les données. Ensuite, il leur était demandé de remplir un questionnaire sur le mal des transports (SSQ) et un questionnaire sur la claustrophobie. Compléter et signer les documents prenait environ 15-20 minutes. Puis, les expérimentateurs leur expliquaient le but de l'expérimentation, c'est-à-dire les attentes en termes de stimuli (mouvements cabines...) et comment réaliser la tâche, le tout pendant environ 10-15 minutes.

Il était expliqué aux participants qu'ils seraient observateurs d'un mouvement automatique sans aucun contrôle dessus possible, leur objectif étant globalement de reporter leur hauteur-sol perçue à l'aide d'une jauge graduée. Chaque essai serait décomposé en deux phases : la phase 1, survol d'un terrain plat, suivie de la phase 2, survol d'un terrain vallonné (toutes les collines étant identiques). La tâche à réaliser par les participant dépendait de la phase de survol en cours. Pendant la phase 1 (12.5s), les participants étaient observateurs passifs d'un vol automatique à hauteur-sol constante et devaient reporter à l'aide de la jauge affichée à l'écran et le joystick leur hauteur initiale de vol. Le report de cette hauteur initiale se faisait en variant le niveau de la jauge (représenté par un trait vert, cf. figure 3.2). Le vol se faisait à vitesse pseudo aléatoire constante (75 ou 125 km/h). Les participants étaient encouragés à utiliser les arbres présents dans l'environnement visuel comme référence dans leur jugement de perception de la hauteur, dans le but de réduire les variations dans les réponses des différents participants. Au cours de la phase 2 (57.5s), la hauteur indiquée au cours de la phase 1 était représentée sur la jauge avec un trait rouge. Les participants devaient alors rapporter les variations perçues de la hauteur-sol en faisant varier le niveau de la jauge par rapport à cette hauteur-sol initiale (voir figure 3.6).

Sous confirmation orale que la tâche était comprise, les participants étaient assis et attachés dans la cabine du simulateur iMose à l'aide d'une ceinture de sécurité (avec aucune restriction au niveau des bras et de la tête) et avec un joystick 2 axes

dans leur main droite. Le casque Oculus Rift était ensuite posé sur la tête des participants, ajusté à leur vue et sécurisé. Finalement on munissait les participants d'un casque audio pour permettre la communication orale avec les expérimentateurs.

Une fois installés et avant de commencer l'expérimentation, les participants devaient réaliser une phase de familiarisation pour les habituer à la tâche à effectuer, au terrain expérimental et aux stimuli visuo-vestibulaires. Pour cette première étude, la familiarisation consistait en six essais de 70s de vol à basse hauteur un jour ensoleillé.

Ces essais consistaient en une combinaison de différents types de mouvements. Dans chacun de ces essais, la jauge expérimentale était affichée dans le champ visuel des participants. Les trois premiers reproduisaient le survol d'un terrain plat (comme celui présenté en phase 1 de l'expérimentation, mais survolé en 70s), où les participants expérimentaient successivement un vol en ligne droite à hauteur-sol constante, un vol en ligne droite avec une variation ponctuelle négative de la hauteur-sol et un vol identique mais avec une variation positive de la hauteur. Les trois derniers essais de familiarisation consistaient en un survol à hauteur-sol constante au dessus du terrain expérimental, un survol avec une variation ponctuelle (positive ou négative) de la hauteur-sol de vol et enfin un survol identique au précédent, mais auquel on rajoutait un bruit vibrationnel autour des mouvements de la cabine. Chaque perturbation en hauteur était exécutée à un temps pseudo-aléatoire entre 25s et 45s. Quand les performances des participants étaient satisfaisantes et qu'ils se sentaient à l'aise, l'expérimentation commençait.

Les expérimentateurs monitoraient les estimations en hauteur des participants par rapport aux stimuli, pour superviser leurs performances et la cohérence de leurs résultats, en donnant une assistance orale si nécessaire. Lors de la réalisation de l'expérimentation en elle-même, les participants devaient refaire les phases 1 et 2 comme réalisées dans les deux derniers essais de familiarisation. Cette première étude était constituée de 36 essais de 70s chacun. Tous les 12 essais expérimentaux, on leur proposait de prendre une pause de 10 minutes en dehors du simulateur. Les participants étaient surveillés à l'aide d'une caméra située dans la cabine du simulateur sur leur côté droit et s'ils semblaient malades ou nauséux, ou qu'ils le rapportaient, une pause était systématiquement prise.

Une fois les essais terminés, les participants sortaient du simulateur et devaient compléter un nouveau questionnaire SSQ. Ils partageaient ensuite leur point de vue sur la tâche qu'ils venaient de réaliser ainsi que sur leurs performances et sur toute information qu'ils trouvaient intéressante.

3.1.6 Analyses et données

Mesures

Plusieurs mesures expérimentales furent utilisées pour quantifier les performances et le comportement des participants en cours d'essais. Ces métriques furent calculées en utilisant le logiciel Rstudio.

Temps de réaction Le temps de réaction (TR) a été calculé comme le temps entre l'initiation de la perturbation en hauteur et la première action du participant sur le joystick qui suit. Les données furent filtrées en utilisant un seuil pour éviter les fausses réponses positives dues au possible bruit sur le signal du joystick causé par les mouvements de la cabine. Ce seuil fut déterminé en bougeant la cabine à vide dans une condition de mouvement bruité (le pire cas).

Ratio en hauteur Le ratio en hauteur (RH) a été calculé avec l'équation :

$$HR = abs(1 - \frac{HR_{apres}}{HR_{avant}}), \quad (3.2)$$

les hauteurs rapportées avant et après correspondent à un état perceptif « stable » avant et après la perturbation (évaluées au travers de la position joystick – i.e., une valeur angulaire normalisée entre ± 1), correspondant à au moins 7s sans changement dans la hauteur rapportée. La perturbation en hauteur étant constamment de $\pm 15\%$ de la hauteur initiale, si $HR = 0,15$, les participants percevaient parfaitement l'amplitude de la variation de hauteur.

DIMSS Le DIMSS (en anglais « Dynamic Interface Modeling and Simulation System », ((JENNINGS et al., 2005),(ROSCOE et WILKINSON, 2002)), caractérise le comportement global du participant enregistré via les mouvements du joystick, et est une métrique communément utilisée en aéronautique. La métrique du DIMSS est typiquement utilisée pour évaluer la charge de travail des pilotes. Le DIMSS était calculé au travers de l'ensemble des essais avec une fenêtre glissante telle que :

$$DIMSS(W_n; W_{n+1}) = (Nb_{maxima} + Nb_{minima}) * Std(Joystick(W_n; W_{n+1})), \quad (3.3)$$

où $Nb_{maxima} + Nb_{minima}$ représente le nombre d'inversions de contrôle du joystick (en anglais « control reversal »). Nb_{maxima} et Nb_{minima} sont respectivement le nombre de maxima et de minima locaux du signal du joystick sur la fenêtre de calcul, leur somme étant multipliée par la déviation standard du signal du joystick sur cette même fenêtre. La notation $[W_n; W_{n+1}]$ représente une fenêtre glissante de 3,5s, où W_{n+1} correspond à l'itération 3,5s après l'itération W_n .

Plus la valeur du DIMSS était faible, plus le contrôle du joystick était stable, zéro signifiant que les participants n'avaient pas bougé leur joystick.

Dans le but d'avoir une meilleure compréhension du comportement des participants dans certains cas (que nous détaillerons plus loin), nous avons également étudié les deux composantes de la métrique DIMSS, c'est-à-dire la déviation standard du signal du joystick (StdJ), qui est une estimation de l'amplitude des mouvements du joystick, et le nombre d'inversions de contrôle (NIC), qui est une estimation de la fréquence des mouvements du joystick. La moyenne et la déviation standard de ces deux variables ont été calculées pour chaque condition, sur l'ensemble des essais.

Outils statistiques

Dans cette expérimentation, il a été considéré deux variables indépendantes et deux variables dépendantes ont été considérés. Les variables indépendantes étaient la qualité visuelle de l'environnement (EVN, EVD) et le type de mouvements de la

cabine du simulateur (Mvt, Mvt bruité, No Mvt), tandis que les variables dépendantes étaient la perception rapportée de la hauteur et les réponses du joystick.

Pour chaque variable étudiée, des ANOVA (analyses de variance) de type-III à mesures répétées avec les conditions visuelle et de mouvement considérées comme variables intra-sujets ont été calculées. Puis des tests post-hoc furent effectués avec des t-tests appariés utilisant la correction de Bonferroni, calculés avec le logiciel R (packages « ez », « afex », « lsmeans » et « ggplot2 »).

3.2 Résultats

Aucun participant n'était claustrophobe, la somme des réponses au questionnaire des participants étant toujours au niveau de la moyenne et de la déviation standard de l'ensemble de la population. D'autre part, aucun participant n'a été rendu malade par la tâche, puisqu'il n'y a eu aucune différence significative avant/après pour les questionnaires SSQ. Ainsi, les résultats perceptuels de cette étude sont dus à l'exposition à la tâche et non à l'exposition à l'environnement simulé.

Temps de réaction (TR) L'ANOVA à deux facteurs (Visuel, Mouvement) à mesures répétées a révélé un effet du Mouvement (de la cabine) ($F(2, 24) = 45.20, \eta^2 = .54, p < .0001$) sur le temps de réaction des participants (voir figure 3.7). Les participants avaient ainsi un temps de réaction plus rapide, en réponse à la perturbation en hauteur de la trajectoire de vol, quand la cabine du simulateur était en mouvement, comparé à quand elle ne bougeait pas (post-hoc t-tests appariés : Mvt vs. No Mvt, $t(24) = -9.163, p < .0001$; No Mvt vs. Noise : $t(24) = 6.781, p < .0001$). Cela démontre un fort impact de la stimulation vestibulaire.

Ratio en hauteur (HR) L'ANOVA à deux facteurs (Visuel, Mouvement) à mesures répétées n'a montré aucun impact significatif de nos conditions expérimentales sur le report de la perception.

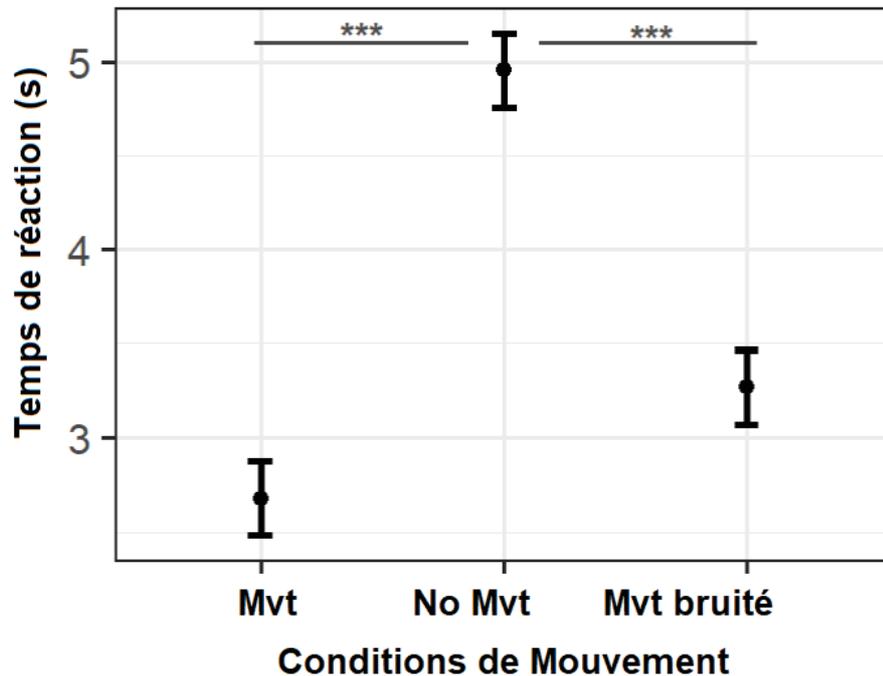


FIGURE 3.7 – Valeur moyenne du Temps de Réaction (TR) en fonction des différentes conditions de mouvement (* : $p < .05$; ** : $p < .001$; *** : $p < .0001$).

DIMSS La déviation standard, ainsi que la valeur moyenne, du DIMSS ont été calculées sur une fenêtre de 10s après la perturbation en hauteur, dans l'idée de quantifier le comportement des participants au niveau du contrôle du joystick quand la perturbation survenait. L'ANOVA à deux facteurs (Visuel, Mouvement) à mesures répétées effectuée sur la déviation standard du DIMSS n'a montré aucun effet significatif des conditions expérimentales. Néanmoins celle effectuée sur la valeur moyenne du DIMSS a révélé un effet de la condition Visuelle ($F(1, 12) = 512, \eta^2 = .11, p < .01$), ainsi que de l'interaction des conditions Visuelle et de Mouvement ($F(2, 24) = 3.56, \eta^2 = .06, p < .05$, voir figure 3.8). La moyenne du DIMSS n'a pas été affectée par l'absence de mouvements de la cabine quand le visuel était bon (EVN), mais l'a été quand l'environnement visuel était dégradé (EVD) (condition EVD/No Mvt différente de toutes les autres conditions, $t(36) = 4.191, p < .02$). Fait intéressant, même la condition Mvt bruité a suffi pour compenser la dégradation de l'information visuelle (EVD) et ramener le niveau de contrôle à celui observé en condition EVN.

La même ANOVA à deux facteurs a été réalisée sur StdJ, la composante en amplitude des mouvements moyens des participants avec le joystick, calculée sur la même fenêtre temporelle que le DIMSS. Un effet de la condition Visuelle ($F(1, 12) = 5.29, \eta^2 = .08, p < .05$, voir figure 3.9 a.) et un effet de la condition de Mouvement cabine ($F(2, 24) = 3.87, \eta^2 = .04, p < .05$, voir figure 3.9 b.) ont été trouvés. Cela a confirmé les résultats obtenus avec le DIMSS, montrant que l'absence de mouvements de la cabine (post-hoc t-test apparié : No Mvt vs. Mvt bruité, $t(24) = 2.624, p < .025$; Mvt vs. No Mvt non significatif) et un environnement visuel dégradé augmentait significativement la variabilité des mouvements du joystick. L'interaction entre les conditions visuelles et de mouvement n'a pas révélé cependant de résultats significatifs.

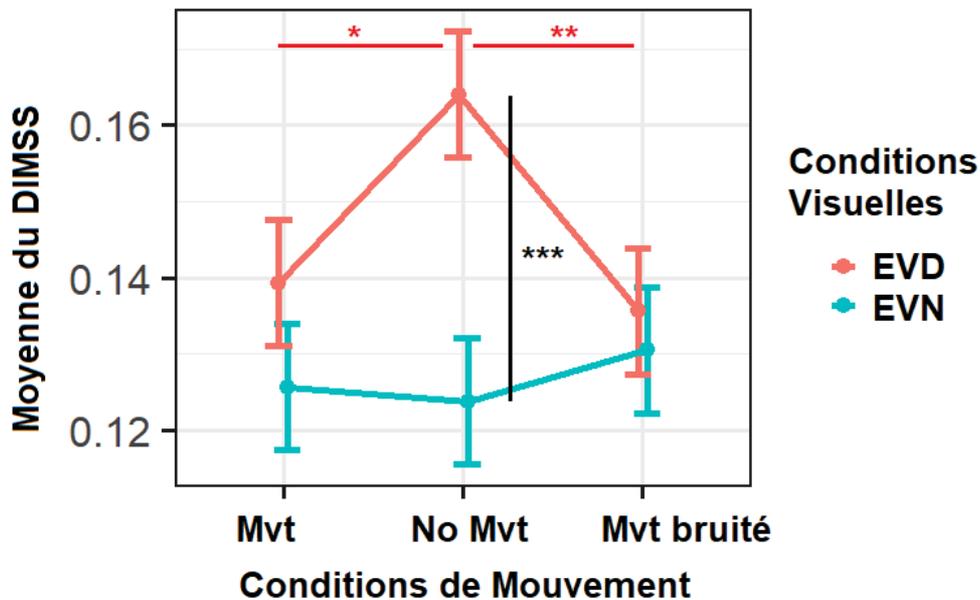


FIGURE 3.8 – Moyenne de la métrique DIMSS en fonction des différentes conditions de mouvements et des conditions visuelles (* : $p < .05$; ** : $p < .001$; *** : $p < .0001$).

Nombre d'inversions de contrôle L'ANOVA à deux facteurs n'a révélé aucun impact significatif des conditions Visuelle et de Mouvement sur cette variable d'étude.

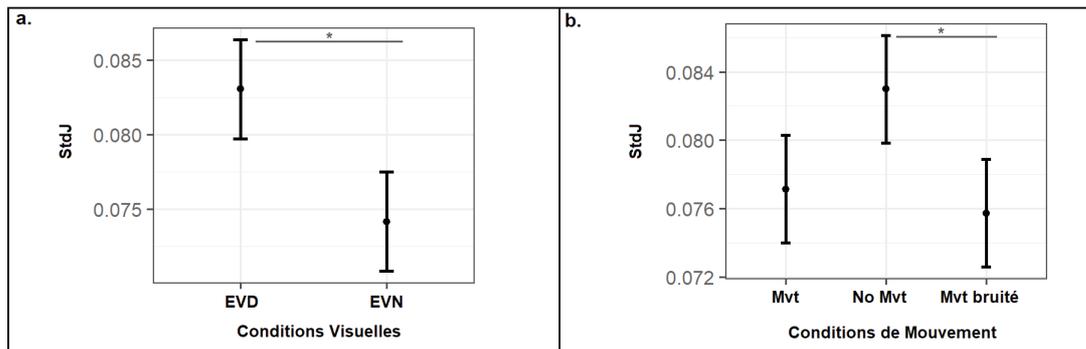


FIGURE 3.9 – Moyenne de la déviation standard du signal du joystick en fonction : a. des conditions visuelles; b. des conditions de mouvement (* : $p < .05$; ** : $p < .001$; *** : $p < .0001$).

3.3 Discussion

Le VBH est une manœuvre de vol qui implique d'importantes variations dans les structures optiques et gravito-inertielles. L'objectif de cette expérimentation était d'étudier l'impact d'un environnement visuo-vestibulaire sur la perception et le report de la hauteur-sol de vol en situation de VBH simulé. La qualité de l'environnement visuel et le type de mouvement de la cabine ont été manipulés et leurs effets analysés. Au regard de nos hypothèses initiales pour cette expérimentation, nous avons trouvé deux résultats principaux.

Premièrement, comme supposé, les participants ont eu de meilleures performances et un contrôle du joystick plus stable dans un environnement visuo-vestibulaire que dans un environnement purement visuel. En effet, bien que les estimations de hauteur-sol n'ont pas été significativement impactées par les 2x3 conditions visuelles et de mouvement, le temps de réaction et la métrique DIMSS dépendaient de la présence d'informations gravito-inertielles. Quelle que soit la condition Visuelle (EVN, EVD), l'absence de variations gravito-inertielles (condition No Mvt) menait à une augmentation significative du temps de réaction des participants, par rapport aux conditions où la cabine bougeait (conditions de mouvement Mvt et Mvt bruité). De plus, alors que l'impact des informations gravito-inertielles en condition visuelle EVN n'impactait pas significativement la valeur du DIMSS, l'absence de ces mêmes informations en condition visuelle EVD dégradait significativement la stabilité du contrôle joystick (comme montré par l'augmentation significative de la valeur moyenne du DIMSS). Ces résultats sont cohérents avec la littérature ((FETSCH,

DEANGELIS et D. E. ANGELAKI, 2010), (WRIGHT, DIZIO et LACKNER, 2005)) existante affirmant l'amélioration des performances en environnement visuo-vestibulaire par rapport à un environnement uniquement visuel. Ces résultats tendent à supporter l'idée que les accidents en VBH risquent plus d'arriver du fait des temps de réponses aux variations du terrain plutôt qu'à l'estimation de la hauteur-sol en elle-même. En outre, la stabilisation du contrôle du joystick en condition visuelle EVD grâce aux stimulations vestibulaires (même en condition Mvt bruité) supportait que les ajustements au niveau du joystick impliqués dans le report de l'estimation de la hauteur, bénéficiaient des stimulations vestibulaires en condition visuelle EVD.

Deuxièmement, alors que la dégradation des informations optiques impactait négativement les performances en cours de tâche, le bruit vibrationnel rajouté aux mouvements du joystick n'avait pas d'effets significatifs. Bien que cette première observation soit en accord avec la littérature existante, la seconde semble contredire les résultats précédemment analysés ((STAVE, 1979)), même si les résultats obtenus dans des contextes et tâches différentes doivent être pris avec précaution si comparés. Ce résultat peut être expliqué par le fait que bien que les informations gravito-inertielles aient été dégradées, le bruit vibrationnel augmentait l'attention des participants, compensant les informations dégradées.

Chapitre 4

Deuxième étude - Expérimentation contrôleur - Pilotes novices

Une deuxième expérimentation a été réalisée dans la continuité de la première ((DENQUIN et al., 2021)). Dans celle-ci nous nous sommes intéressés à la question de l'impact d'un environnement visuo-vestibulaire sur le contrôle de la trajectoire de vol dans un contexte de VBH simulé. Au cours de cette expérimentation, les participants avaient pour tâche de contrôler activement leur hauteur-sol pendant un vol semi-automatique en avant. Comme dans l'étude précédente, du bruit a été rajouté dans certaines conditions pour étudier son impact sur la réalisation de la tâche. La contribution des interactions visuo-vestibulaires a été étudiée au cours de cette expérimentation en analysant le comportement en vol des participants (contrôle joystick, coefficient de délais) ainsi que leurs performances en cours de tâche (écart à la trajectoire cible, coefficient de corrélation maximum). Ainsi, comme précédemment, deux hypothèses furent proposées : premièrement, l'observation de meilleures performances dans un environnement visuo-vestibulaire comparé à un environnement uniquement visuel et deuxièmement, l'impact négatif de la dégradation des informations optiques et gravito-inertielles sur les performances.

4.1 Méthodologie

4.1.1 Présentation des sujets et questionnaires

Treize participants de l'Université de Montpellier, naïfs (22+/-4 ans, 7 femmes, tous droitiers), non payés et avec une vision normale et/ou corrigée se sont portés

volontaires pour participer à cette étude. Les participants n'avaient aucune expérience de vol (non pilotes) et avaient tous participé à la première expérimentation (avec un délai de 5 jours entre les deux expérimentations). Ils étaient informés de leur tâche principale mais n'étaient pas au courant de la procédure expérimentale.

Les sujets devaient renseigner les deux mêmes questionnaires que précédemment, un pour le mal des transports (pour les mouvements du simulateur, le SSQ) et un autre pour la claustrophobie. Ces deux questionnaires servant à assurer des comportements et/ou des réponses physiologiques similaires en environnement fermé. Ainsi, les résultats observés dans cette étude sont dus à l'exposition à la tâche et non à l'exposition à l'environnement simulé ou à l'un de ces deux phénomènes perceptifs.

Cette expérimentation a été conduite en accord avec la déclaration d'Helsinki de 1964 et ses amendements suivants. Elle fut approuvée en même temps que l'expérimentation précédente par l'Institutional Review Board (IRB) du laboratoire EuroMov de l'Université de Montpellier (IRB-EM 1708A). Le consentement écrit de participation à l'expérimentation fut obtenu pour chaque participant.

4.1.2 Matériel

Systeme de simulation mobile

Le même dispositif de simulateur mobile fut utilisé (iMose, laboratoire Euromov, (BELLMAN et al., 2011)) pour générer les stimulations vestibulaires au cours de l'expérimentation. Il était composé du bras mobile KUKA KR500-3 MT à 6 degrés de liberté (BEC GmbH, Reutlingen, Allemagne) relié à une cabine avec un siège d'hélicoptère avec des sangles et un joystick, des trois stations de contrôles décrites plus haut et du casque de réalité virtuelle Oculus Rift DK2.

Systeme de simulation visuelle

Le système générant la stimulation visuelle était le même que dans l'expérimentation précédente. La Station de Contrôle n°2 exécutait l'environnement virtuel

conçu en C# avec le logiciel Unity et le projetait dans un casque Oculus Rift DK2 (résolution par œil 960*1080). Comme précédemment, l'environnement était affiché sans informations superflues. Les systèmes de simulations étaient contrôlés et coordonnés de la même manière que dans l'étude précédente, la Station de Contrôle n°2 envoyant les ordres en position à la Station de Contrôle n°1.

La Station de Contrôle n°3 était quant à elle le support de l'interface de contrôle des expérimentateurs.

Joystick

Dans cette expérimentation, les participants ont utilisé un joystick d'aviation à 2 degrés de liberté (Thrustmaster – Houston, Texas, USA) afin de contrôler en temps réel leur hauteur-sol de vol au cours du déplacement dans l'environnement virtuel. Les deux axes de contrôle du joystick (sagittal et latéral) renvoyaient des valeurs comprises entre -1 et 1, où les valeurs négatives et positives correspondaient respectivement à des mouvements en arrière et en avant pour l'axe sagittal, et des mouvements vers la gauche et la droite pour l'axe latéral. Ainsi, les participants devaient contrôler leurs déplacements verticaux avec le joystick dans l'environnement virtuel, tandis qu'ils subissaient un mouvement automatique constant longitudinal à une vitesse fixe dépendant des conditions expérimentales.

4.1.3 Stimuli

Cette deuxième expérimentation a été conçue en blocs de 2-par-3 pour pouvoir tester respectivement les contributions des informations optiques et gravito-inertielles. Il s'agissait des mêmes conditions expérimentales qu'au cours de l'expérimentation précédente, c'est-à-dire :

Deux types de conditions Visuelles :

- un Environnement avec Visuel Normal (EVN) affichant le terrain un jour de soleil sans nuages, pluie ou brouillard ;

	Mvt	Mvt bruité	No Mvt
EVN	3	3	3
EVD	3	3	3
	Total		18

FIGURE 4.1 – Récapitulatif des essais expérimentaux et du nombre d'essais par condition

- un Environnement avec Visuel Dégradé (EVD) affichant le même terrain un jour de brouillard, impactant graduellement la distance de vision des participants. La densité (F) du brouillard était calculée comme dans l'expérimentation précédente.

Pour chacune des conditions EVN et EVD, le terrain en lui-même était identique.

Trois types de conditions Vestibulaires :

- mouvements normaux (Mvt), où la cabine du simulateur avait des mouvements verticaux correspondant aux déplacements verticaux de la scène virtuelle ;

- mouvements bruités (Mvt Bruité), où la cabine bougeait comme dans la condition Mvt, mais avec le même bruit blanc que précédemment ;

- pas de mouvements (No Mvt), où la cabine ne bougeait pas et les participants étaient seulement soumis à l'environnement visuel.

4.1.4 Modélisation de l'environnement

Le terrain expérimental utilisé était quasiment le même que dans l'expérimentation précédente (voir la figure 4.2). Il a également été conçu avec le logiciel Unity en licence libre. Le terrain était constitué de deux parties distinctes (phase 1 et phase 2). La phase 2 était légèrement différente de celle de la première expérimentation (voir Annexe B)

La phase 1 était, encore une fois, un terrain plat faiblement texturé en 2D recouvert d'arbres identiques (densité 200 arbres/km²). Cette phase était conçue pour que les

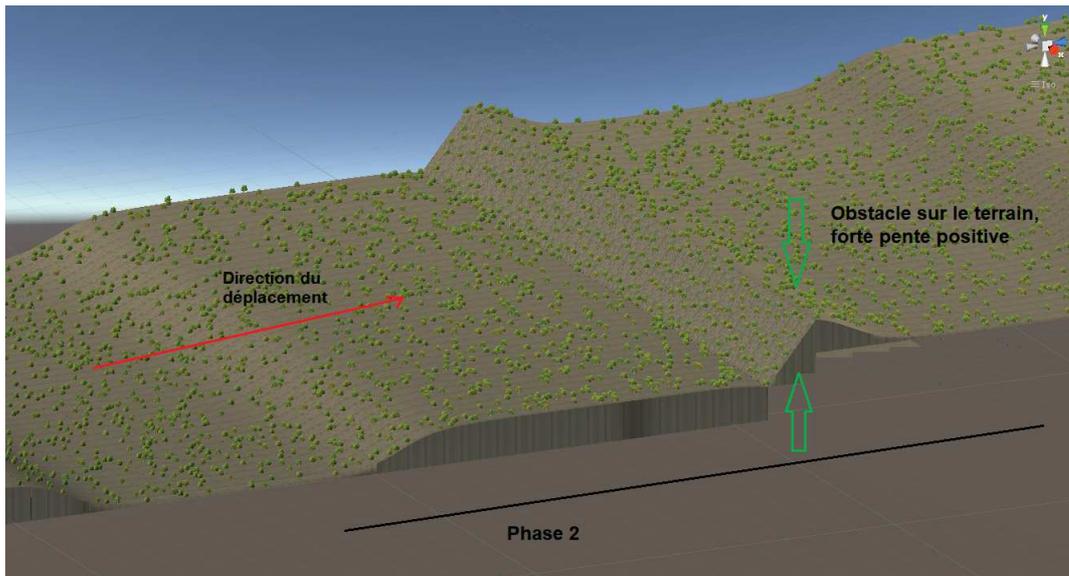


FIGURE 4.2 – Terrain expérimental vu de haut. L’obstacle à survoler, la forte pente positive, est indiqué en vert, le sens de la trajectoire en rouge.

participants la traversent en 12,5s, quelle que soit leur vitesse.

Ensuite venait la phase 2, consistant en une colline commençant à mi-parcours de sa hauteur, puis une succession de collines identiques (même hauteur, même longueur). La particularité de cette expérimentation au niveau du terrain était l’apparition après la deuxième colline survolée d’une forte pente positive, suivie de nouveau par une succession de collines comme précédemment. Cette phase était conçue quand à elle pour être survolée par les participants en 77,5s, donnant un survol total du terrain expérimental (quelle que soit la vitesse) en 90s.

La partie du nouveau terrain expérimental différant du précédent est représentée sur la figure 4.2 (flèches vertes).

L’annexe B résume les différents paramètres de l’environnement simulé.

Dans cette expérimentation, les participants étaient soumis à un vol à avancement longitudinal automatique à vitesse constante et avaient le contrôle sur leurs mouvements verticaux à l’aide du joystick dans leur main droite. Le vol commençait (phase 1) au-dessus du terrain plat. Pendant 10s, les participants ne pouvaient pas contrôler les mouvements verticaux et étaient juste observateurs d’un mouvement longitudinal uniforme. Après ces 10s, les participants pouvaient contrôler leurs mouvements verticaux. L’objectif étant de réussir à survoler les collines en phase 2

en gardant la hauteur-sol initiale constante.

Les mouvements du joystick selon son axe longitudinal généraient un signal qui, après filtrage par une fonction de transfert du second ordre, contrôlait les déplacements verticaux en vitesse pour à la fois les déplacements verticaux dans l'environnement visuel et de la cabine du simulateur. Les mouvements en arrière et en avant répliquaient les actions du collectif d'un hélicoptère pour augmenter ou décroître la hauteur-sol. Les mouvements du joystick et la variation de hauteur-sol étaient liés par un modèle d'hélicoptère du deuxième ordre, avec la fonction de transfert suivante :

$$a_0 * posZ_n + a_1 * posZ_{n-1} + a_2 * posZ_{n-2} = b_0 * J_n + b_1 * J_{n-1} + b_2 * J_{n-2}, \quad (4.1)$$

où $posZ_n$ est la hauteur de vol à l'image n , J_n est l'angle longitudinal du joystick à l'image n et $(a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2)$ sont des coefficients déterminés empiriquement ayant pour valeur $(4.0526, -8, 3.9474, 0.0069, 0.0139, 0.0069)$.

4.1.5 Procédure

Cette deuxième étude prenait un total de 90 minutes pour être réalisée. Elle débutait comme l'expérimentation précédente. Les participants devaient d'abord remplir et signer un formulaire de consentement pour participer à l'étude et donner la permission d'utiliser les données. Ensuite, il leur était demandé de remplir un questionnaire sur le mal des transports (SSQ) et un questionnaire sur la claustrophobie. Compléter et signer les documents prenait environ 15-20 minutes. Puis, les expérimentateurs leur expliquaient le but de l'expérimentation, c'est-à-dire les attentes en termes de stimuli (mouvements cabines, contrôle joystick...) et comment réaliser la tâche, le tout pendant environ 10-15 minutes.

On expliquait aux participants qu'ils seraient cette fois-ci contrôleurs d'un vol pseudo-automatique en avant. Ils auraient le contrôle des déplacements verticaux du vol simulé et devraient faire en sorte de garder leur hauteur-sol constante. Comme précédemment, chaque essai serait décomposé en deux phases : la phase 1, survol

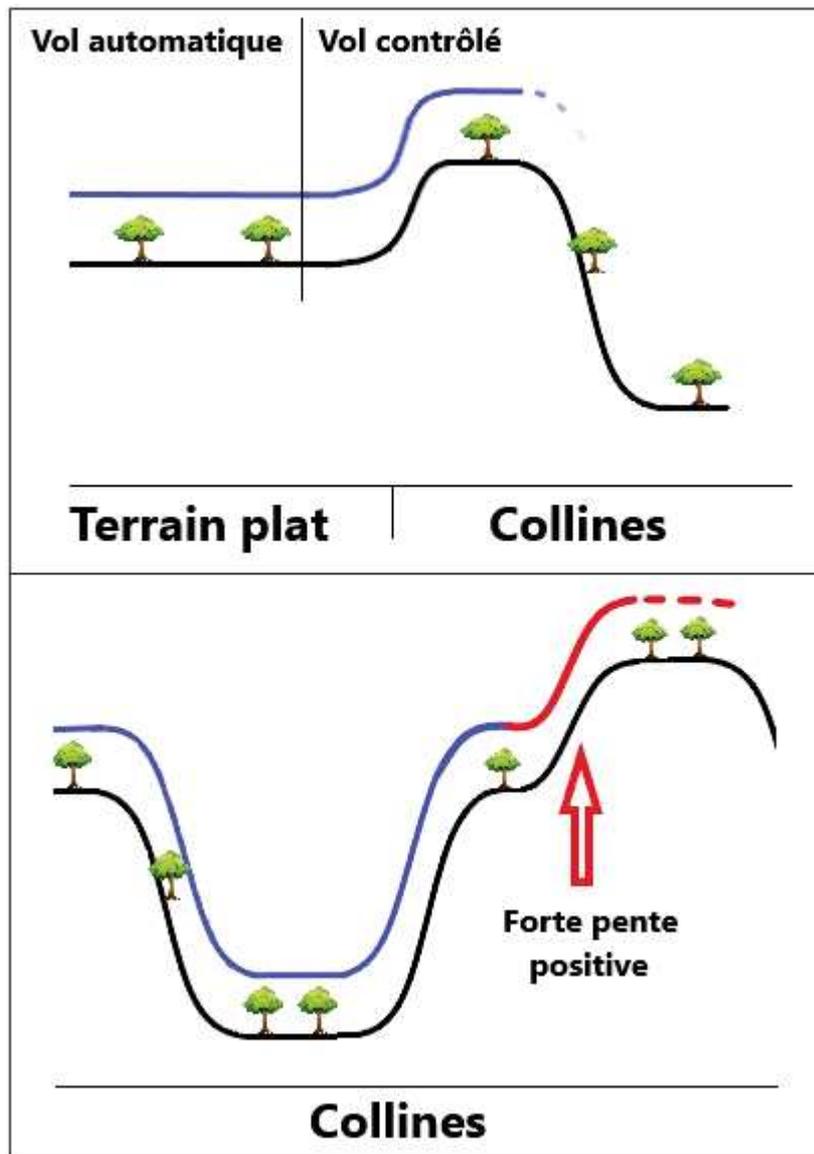


FIGURE 4.3 – Schéma récapitulatif de l'expérimentation; a. Début de l'essai, phase 1 et début phase 2, (en bleu) la trajectoire de vol; b. Moment de l'essai où l'obstacle doit être survolé; (en rouge) la trajectoire de vol à suivre.

d'un terrain plat, suivie de la phase 2, survol d'un terrain vallonné (toutes les collines étant identiques) qui cette fois-ci présenterait à un moment donné une forte pente positive, suivie de nouveau par des collines (cf. la figure 4.2). La tâche à réaliser par les participant dépendait de nouveau de la phase de survol en cours. Pendant la phase 1 (12.5s), les participants étaient observateurs passifs d'un vol automatique à hauteur-sol constante pendant 10s, et n'avaient donc aucun contrôle de leur hauteur-sol de vol. 2.5s avant la fin de la phase 1 et pendant la phase 2, ils obtenaient le contrôle des déplacements verticaux et devaient faire en sorte de conserver leur hauteur-sol initiale de vol (voir figure 4.3). Le vol se faisait à vitesse pseudo aléatoire constante (75 ou 125 km/h), déterminée par les conditions expérimentales. Les participants étaient cette fois encore encouragés à utiliser les arbres situés dans l'environnement pour contrôler leur hauteur-sol.

Sous confirmation orale que la tâche était comprise, les participants étaient assis et attachés dans la cabine du simulateur iMose à l'aide d'une ceinture de sécurité (sans aucune restrictions au niveau des bras et de la tête) et avec un joystick 2 axes dans leur main droite. Le casque Oculus Rift était ensuite posé sur la tête des participants, ajusté à leur vue et sécurisé. Finalement un casque était posé sur leurs oreilles pour permettre la communication orale avec les expérimentateurs.

Une fois installés et avant de commencer l'expérimentation, les participants devaient réaliser une phase de familiarisation pour les habituer à la tâche à effectuer, au terrain expérimental et aux stimuli visuo-vestibulaires. Pour cette deuxième étude, la familiarisation consistait en quatre essais de 90s de vol à basse hauteur un jour ensoleillé.

Ces essais consistaient encore une fois en une combinaison de différents types de mouvements, les phases expérimentales étant présentes (phase 1 sans aucuns contrôles, phase 2 avec). Les deux premiers essais reproduisaient le vol au-dessus d'un terrain plat peuplé d'arbres, où les participants pouvaient pratiquer (avec mouvements de la cabine), le contrôle avec le joystick du mouvement vertical du déplacement. Les deux derniers essais de familiarisation se déroulaient dans le même environnement que celui de la première expérimentation (ie. sans la forte pente de la phase 2 du terrain de la deuxième expérimentation), d'abord sans, puis avec un bruit

vibrationnel autour du mouvement de la cabine (donc les conditions expérimentales Mvt et Mvt bruité). Quand les performances des participants étaient satisfaisantes et qu'ils étaient à l'aide, l'expérimentation commençait.

Quand les performances des participants étaient satisfaisantes, l'expérimentation commençait. Comme dans l'expérimentation précédente, les expérimentateurs supervisaient les trajectoires de vol des participants par rapport aux stimuli, pour confirmer une réalisation correcte de la tâche et donner une assistance orale si nécessaire. Pour la partie expérimentale, il fut demandé aux participants de refaire les phases 1 et 2 comme effectué dans les deux derniers essais de familiarisation. Cette deuxième étude fut constituée de 18 essais de 90s chacun. Tous les 9 essais expérimentaux, on proposa aux participants de prendre une pause de 15 minutes en dehors du simulateur. Les participants étaient monitorés à l'aide d'une caméra dans la cabine, et s'ils semblaient malades ou nauséeux une pause était systématiquement prise.

Une fois les essais terminés, les participants sortaient du simulateur et devaient compléter un nouveau questionnaire SSQ. Ils partageait ensuite leur point de vue sur la tâche qu'ils venaient de réaliser ainsi que sur leurs performances et sur toute information qu'ils trouvaient intéressantes.

4.1.6 Analyses et données

Mesures

Plusieurs mesures expérimentales furent utilisées pour quantifier les performances et le comportement des participants en cours d'essai. Ces métriques furent calculées en utilisant le logiciel R ainsi que Word Excel :

Déviaton de l'Objectif La Déviaton de l'Objectif (DO) était simplement la valeur cumulée sur l'ensemble de l'essai de l'aire sous la courbe entre la hauteur-sol de vol cible (la hauteur initiale de vol) et la hauteur-sol de vol des participants (voir exemple figure 4.4) sur une fenêtre glissante de 3.5s :

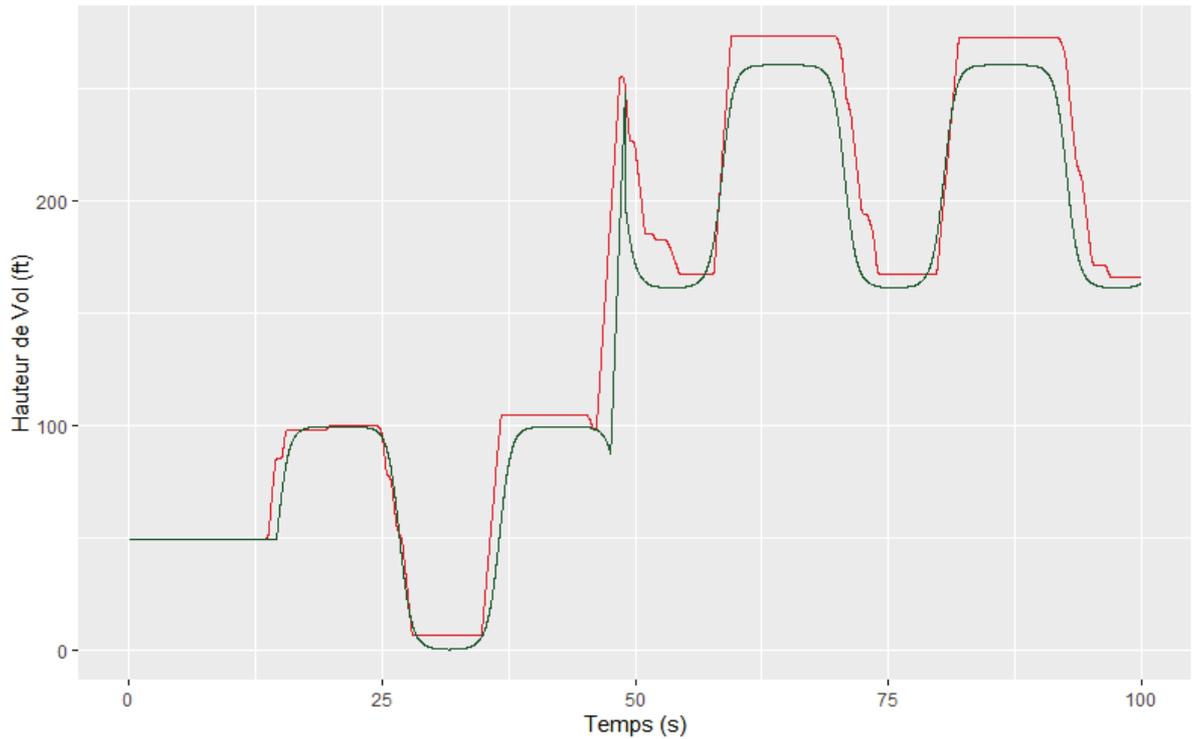


FIGURE 4.4 – (en vert) Trajectoire cible, avec survol à hauteur-sol constante; (en rouge) Exemple de trajectoire suivie par un participant.

$$do[n] = \int_{W_n}^{W_{n+1}} |p(x) - t(x)| dx \quad (4.2)$$

Et donc,

$$DO = \sum do[n] \quad (4.3)$$

Paramètres de cross-corrélation Les deux paramètres de cross-corrélation (corrAcf et corrLag) étaient issus du calcul de la cross-corrélation entre la trajectoire de vol cible et la trajectoire de vol des participants (cf. les deux courbes affichées sur la figure 4.4). Le coefficient corrAcf correspond au maximum de corrélation entre les deux trajectoires (corrAcf = 1 signifiant que les deux trajectoires sont confondues) et le coefficient corrLag correspond à l'écart temporel entre les deux trajectoires associé au coefficient de corrélation maximum (corrLag = 0 signifiant que les deux trajectoires sont parfaitement synchronisées). Une valeur positive de corrLag indiquait que les participants suivaient la trajectoire cible avec du retard et inversement,

une valeur négative indiquait que les participants étaient en avance sur la trajectoire cible. La normalité des distributions étudiées a été vérifiée avec le test de Shapiro-Wilk (Rstudio, fonction `Shapiro-test()` du "basic package").

DIMSS Le DIMSS (en anglais « Dynamic Interface Modeling and Simulation System », qui caractérise le comportement global du participant enregistré via les mouvements du joystick, a de nouveau été utilisé au cours de cette expérimentation. Son calcul se fit encore au travers de l'ensemble des essais avec une fenêtre glissante telle que :

$$DIMSS[W_n; W_{n+1}] = (Nb_{maxima} + Nb_{minima}) * StdJ(Joystick[W_n; W_{n+1}]), \quad (4.4)$$

où $(Nb_{maxima} + Nb_{minima})$ représente le nombre de d'inversions de contrôle du joystick (en anglais « control reversal »). Nb_{maxima} et Nb_{minima} sont respectivement le nombre de maximum et de minimum locaux du signal du joystick sur la fenêtre de calcul $[W_n; W_{n+1}]$, leur somme étant multipliée par la déviation standard du signal du joystick sur cette même fenêtre.

Plus la valeur du DIMSS était élevée, moins le contrôle du joystick était stable, zéro signifiant que les participants n'avaient pas bougé leur joystick.

Dans le but d'avoir une meilleure compréhension du comportement des participants dans certains cas spécifiques (que nous verrons plus loin), nous avons encore une fois étudié les deux composantes de la métrique DIMSS, c'est-à-dire la déviation standard du signal du joystick (StdJ) et le nombre d'inversions de contrôle (NIC). La moyenne et la déviation standard de ces deux variables ont été calculées pour chaque condition, sur l'ensemble des essais.

Outils statistiques

Dans cette expérimentation, nous avons considéré les mêmes variables indépendantes que dans l'expérimentation précédente, à savoir la qualité visuelle de l'environnement (EVN, EVD) et le type de mouvement de la cabine du simulateur (Mvt, Mvt bruité, No Mvt), ainsi que deux variables dépendantes, la hauteur-sol de vol des participants et les réponses joystick, comme précédemment.

Pour chaque variable étudiée, des ANOVA (analyses de variance) de type-III à mesures répétées, avec les conditions Visuelle et de Mouvement considérées comme variables intra-sujets ont été calculés. Puis des tests post-hoc ont été effectués avec des t-tests appairés utilisant la correction de Bonferroni, calculés avec le logiciel R (packages « ez », « afex », « lsmeans » et « ggplot2 »).

4.2 Résultats

Comme précédemment, il n'y a pas eu de participant claustrophobe, la somme des réponses au questionnaire des participants étant toujours au niveau de la moyenne et de la déviation standard de l'ensemble de la population. De même, aucun participant n'a été rendu malade par la tâche, puisqu'il n'y a eu aucune différence significative entre les questionnaires avant/après.

Déviation de l'Objectif (DO) L'ANOVA à deux facteurs (Visuel, Mouvement) à mesures répétées calculée avec la DO a révélé un effet du Mouvement ($F(2, 24) = 26.55, \eta^2 = .41, p < .0001$, voir la figure 4.5), la condition Mouvement bruité impactant significativement plus la DO que les deux autres conditions de Mouvement (post-hoc t-tests appairés : Mvt vs. Mvt bruité, $t(24) = -6.216, p < .0001$; No Mvt vs. Mvt bruité, $t(24) = -6.402, p < .0001$).

Coefficient de corrélation maximal (corrAcf) L'ANOVA à deux facteurs (Visuel, Mouvement) à mesures répétées calculée avec corrAcf a montré un effet significatif de la condition Visuelle ($F(1, 12) = 10.67, \eta^2 = .04, p < .01$) et un autre effet

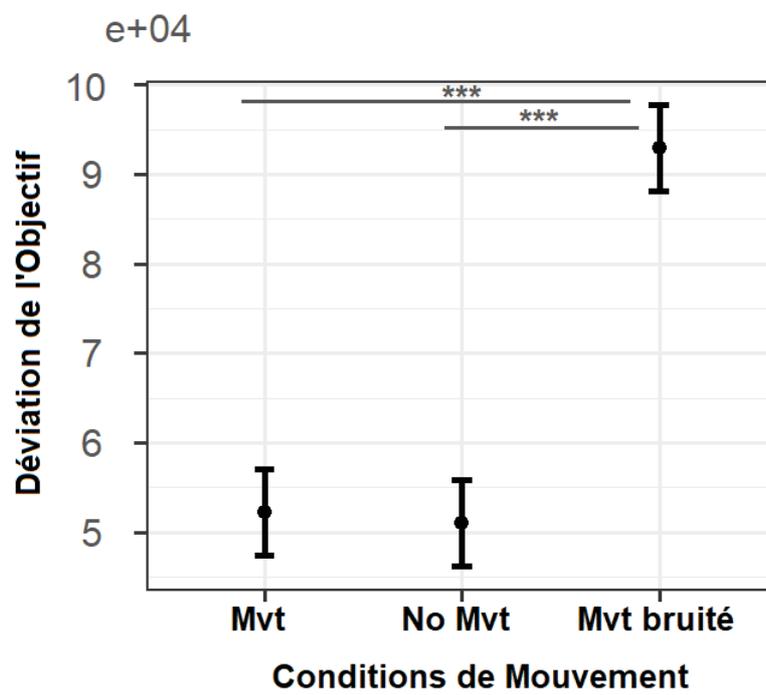


FIGURE 4.5 – Déviation de l'Objectif moyenne en fonction des différentes conditions de mouvement (* : $p < .05$; ** : $p < .001$; *** : $p < .0001$).

significatif de l'interaction des conditions Visuelle et de Mouvement ($F(2, 24) = 8.82, \eta^2 = .08, p < .01$). Comme on peut le voir sur la figure 4.6 a., il n'y avait pas de différences significatives entre les conditions Mvt et No Mvt que ce soit en condition visuelle (EVN ou EVD). La condition Mouvement bruité quant à elle provoquait une valeur significativement supérieure de corrAcf en condition EVN qu'en condition EVD (post-hoc t-test apparié : EVN/Mvt bruité vs. EVD/Mvt bruité, $t(36) = 5.016, p < .0001$).

Coefficient de délais entre les trajectoires (corrLag) La même ANOVA à deux facteurs et à mesures répétées calculée avec corrLag a révélé un effet significatif de la condition de Mouvement ($F(2, 24) = 28.56, \eta^2 = .28, p < .0001$) et un effet significatif de l'interaction entre les conditions Visuelle et de Mouvement ($F(2, 24) = 31.70, \eta^2 = .33, p < .0001$). Comme montré sur la Figure 4.6 b., la condition Mvt provoquait les meilleures performances dans chacune des conditions Visuelles (délai inférieur à 0.1s). Quand l'information optique n'était pas dégradée (condition EVN), la présence de bruit dans les mouvements cabine (condition Mvt bruité) augmentait significativement le délai entre la trajectoire du participant et la trajectoire idéale (délai de 0.45s) comparé aux deux autres conditions de Mouvement (post-hoc t-tests appariés : Mvt vs. No Mvt, $t(48) = -7.586, p < .0001$; No Mvt vs. Mvt bruité, $t(48) = 5.482, p < .0001$).

DIMSS La même ANOVA à deux facteurs à mesures répétées effectuée sur la métrique du DIMSS a montré le même type d'effets que le coefficient corrLag. Un effet significatif de la condition de Mouvement a été trouvé ($F(2, 24) = 11.42, \eta^2 = .19, p < .001$) ainsi qu'un effet significatif de l'interaction entre les conditions Visuelle et de Mouvement ($F(2, 24) = 23.29, \eta^2 = .38, p < .0001$, voir figure 4.7). Encore une fois, la condition Mvt impliquait un meilleur contrôle du joystick (plus stable) dans les deux conditions Visuelles (EVN, EVD) (post-hoc t-tests appariés : EVN/Mvt vs. EVN/Mvt bruité, $t(48) = 5.133, p < .0001$; EVD/Mvt vs. EVD/No Mvt, $t(48) = 5.452, p < .0001$). La condition Mvt bruité quant à elle affecte positivement le contrôle du joystick en condition EVN, au contraire d'en condition EVD où elle dégradait les performances ($t(48) = 6.121, p < .0001$).

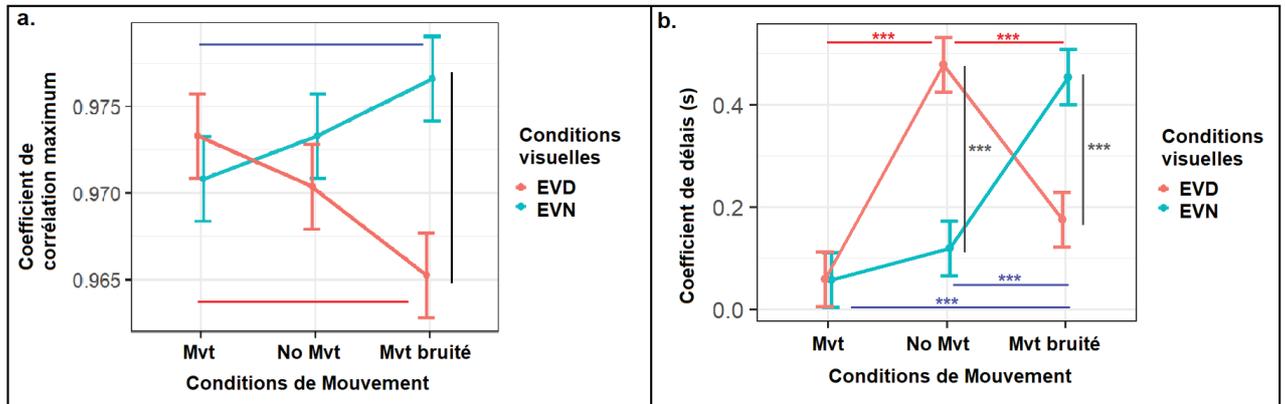


FIGURE 4.6 – a. Coefficient de corrélation maximum moyen entre la trajectoire cible et celle des participants en fonction des conditions Visuelle et de Mouvement; b. Délai moyen entre la trajectoire cible et celle des participants en fonctions des conditions Visuelle et de Mouvement (* : $p < .05$; ** : $p < .001$; *** : $p < .0001$).

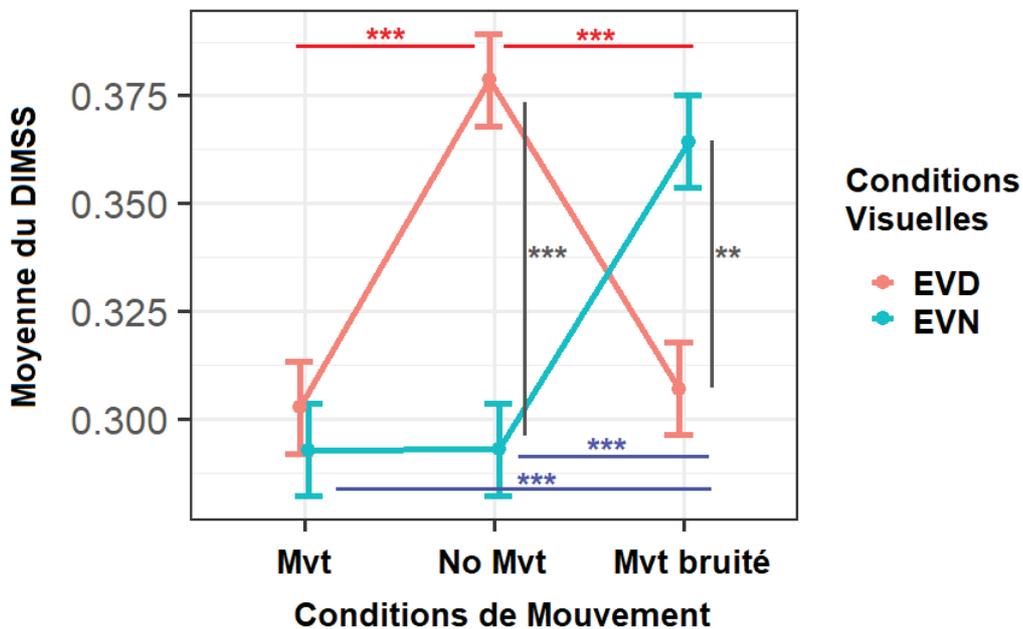


FIGURE 4.7 – Moyenne de la métrique DIMSS en fonction des conditions de mouvement et des conditions visuelles (* : $p < .05$; ** : $p < .001$; *** : $p < .0001$).

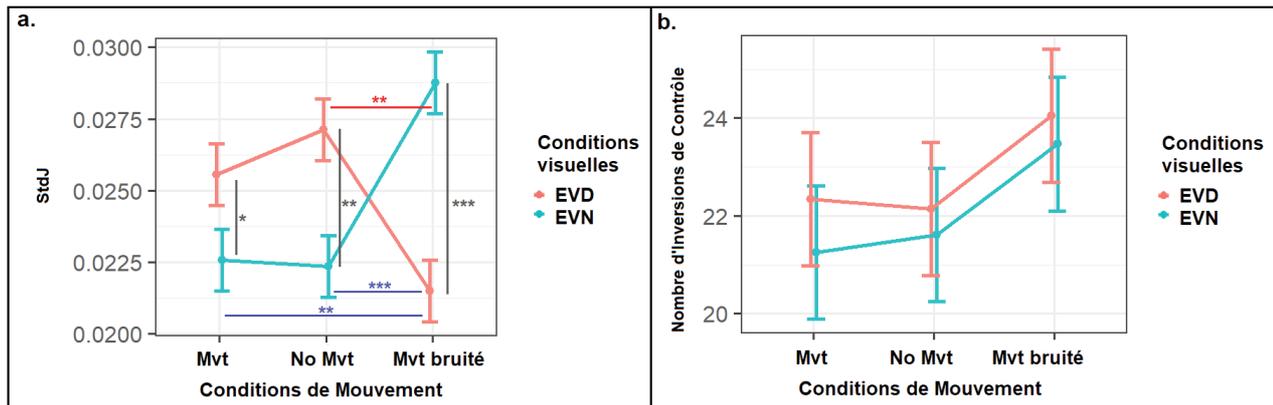


FIGURE 4.8 – a. Moyenne de la déviation standard du joystick en fonction des conditions de Mouvement et Visuelle; b. Nombre d'inversions de contrôle moyen en fonction des conditions de Mouvement et Visuelles (* : $p < .05$; ** : $p < .001$; *** : $p < .0001$).

Déviation standard du signal du joystick (StdJ) La même ANOVA à deux facteurs à mesures répétées effectuée sur StdJ a montré un effet significatif de l'interaction entre les conditions Visuelle et de Mouvement ($F(2, 24) = 22.05, \eta^2 = .34, p < .0001$, voir la figure 4.8 a.). En condition visuelle EVN, la mesure StdJ était significativement plus élevée en condition Mvt bruité que dans les deux autres conditions de mouvement (post-hoc t-test appariés : Mvt vs. Mvt bruité, $t(48) = 2.835, p < .05$; No Mvt vs. Noise, $t(48) = 3.927, p < .0001$).

Nombre d'inversion de contrôle (NIC) La même ANOVA fut effectuée avec cette mesure, mais aucuns effets significatifs des conditions expérimentales Visuelle et de Mouvement ne furent trouvés (voir la figure 4.8 b.).

4.3 Discussion

L'objectif de cette deuxième expérimentation était d'étudier l'impact d'un environnement visuo-vestibulaire sur le contrôle de la hauteur-sol de vol lors d'un vol semi-automatique en situation de VBH simulé. La qualité de l'environnement visuel et le type de mouvement de la cabine ont encore une fois été manipulés et leurs effets analysés.

Dans la continuité de l'expérimentation précédente, les participants semblaient avoir de meilleures performances de vol dans un environnement visuo-vestibulaire que dans un environnement purement visuel. En effet, bien que la condition Mvt n'ait pas affecté significativement les performances lorsque le visuel était bon (condition visuelle EVN), la présence d'informations gravito-inertielles permettait de compenser l'impact négatif de la dégradation des informations visuelles. Ajouter des informations gravito-inertielles cohérentes à la condition visuelle EVD réduisait le délai entre la trajectoire des participants et la trajectoire cible tout en améliorant la stabilité du contrôle joystick.

Néanmoins, nous avons trouvé dans cette expérimentation que l'ajout de bruit vibrationnel sur les mouvements de la cabine du simulateur impactait négativement les performances de vol quelle que soit la condition Visuelle. De manière générale, la présence de bruit vibrationnel (condition Mvt bruité) augmentait significativement la valeur du DO, ce qui signifiait après une étude plus poussée un écart constant par rapport à la trajectoire cible. En outre, ces variations non cohérentes impliquaient également une augmentation significative du délai entre les deux trajectoires (corr-Lag). D'autre part, la condition Mvt bruité impactait la valeur du DIMSS. En effet, celle-ci augmentait significativement lorsque l'environnement visuel était bon (EVN) comparé aux deux autres conditions de mouvement. Lorsque l'environnement était mauvais (EVD), la valeur du DIMSS semblait indiquer une stabilisation des mouvements joysticks au niveau de la condition Mvt, mais lorsque l'on décompose le DIMSS en ses deux composantes StdJ et NIC (comme expliqué dans la partie Mesures), on remarquait une rigidification significative des mouvements de joystick en condition EVD/Mvt bruité par rapport aux conditions EVD/Mvt et EVN/Mvt bruité, montrant donc un impact en réalité négatif du bruit vibrationnel sur le contrôle du joystick. Ces résultats sont en adéquation avec la littérature existante, stipulant l'impact négatif qu'aurait le bruit vibrationnel ajouté aux stimulations vestibulaires.

Chapitre 5

Troisième étude - Expérimentation observateur - Pilotes experts

Un deuxième ensemble d'expérimentations fut réalisé au cours de cette thèse en partenariat avec le centre de recherches Ames de la NASA (Mountain View, USA), toujours sur la question de la perception et du contrôle de la trajectoire en VBH, et de l'impact sur ces mécanismes des modalités visuelle et vestibulaire. Ces deux expérimentations, sur le modèle des deux précédentes (tâche observateur vs. tâche contrôleur), furent conduites avec des pilotes militaires expérimentés, un modèle d'hélicoptère plus complet que celui utilisé dans les expérimentations menées à EuroMov et un autre simulateur à base mobile, le Vertical Motion Simulator (VMS), ayant la possibilité de générer des accélérations verticales de forte amplitude sur de longues durées avec un haut taux de fidélité et de réalisme. L'idée était cette fois-ci d'étudier l'impact de modalités sensorielles simulées sur les performances de vol d'un pilote expert. Différentes combinaisons de stimuli visuels et vestibulaires furent proposées aux pilotes dans le but de caractériser leur impact sur les performances de supervision de la hauteur-sol de vol, ainsi que de comprendre les différences de mécanismes perceptifs mis en jeu entre des tâches de contrôleur et d'observateur sur l'estimation de la hauteur-sol de vol. La première de ces deux expérimentations (GODFROY-COOPER et al., 2020) reposait sur le même principe que l'expérimentation présentée au chapitre 3, une tâche d'observateur d'une trajectoire de vol générée par un système d'auto-pilote. L'analyse des résultats expérimentaux a été effectuée au travers de l'étude de paramètres comportementaux (contrôle du joystick) et de performance (écart à la trajectoire cible). Deux hypothèses furent formulées, dans la continuité des deux premières expérimentations, à savoir 1) que les pilotes auraient de meilleures performances dans un environnement visuo-vestibulaire plutôt

que uniquement visuel et 2) que la contribution des informations gravito-inertielles serait plus importante quand les informations visuelles seraient dégradées.

5.1 Méthodologie

5.1.1 Présentation des sujets

Sept pilotes de l'armée de l'air américaine (42+/-15 ans, 7 hommes, tous droitiers, un pilote instructeur de recherche, trois pilotes de tests expérimentaux, deux pilotes de recherche et un pilote instructeur), avec une vision normale se sont portés volontaires pour participer à cette expérimentation. Le nombre d'heures de vol des pilotes variait entre 560 heures et 7300 heures (moyenne de 2736 heures). Le nombre d'heures en simulateur variait entre 100 heures et 1000 heures (moyenne de 365 heures). Tous les pilotes avaient déjà volé en condition visuelle réelle dégradée (de 40 heures à 1500 heures, moyenne de 765 heures).

Les participants étant des pilotes expérimentés et déjà entraînés aux simulateurs de vol, nous n'avons pas fait renseigner de questionnaire de claustrophobie ni de mal des transports.

5.1.2 Matériel

Système de simulation mobile

Dans le cadre de cette troisième expérimentation, un simulateur à base mobile différent du précédent fut utilisé, le VMS (en anglais « Vertical Motion Simulator », cf. (APONSO, BEARD et J. A. SCHROEDER, 2009)) disponible au centre de recherches Ames de la NASA (Mountain View, USA). C'est un simulateur à 6 degrés de liberté (trois translations et trois rotations) découplés et est l'un des plus grands simulateurs mobiles de vol au monde, pouvant bouger jusqu'à 60 pieds verticalement et 40 pieds horizontalement et permettant de recréer avec une haute fidélité des déplacements. La cabine équipée sur le simulateur représentait une cabine d'hélicoptère de classe UH-60 Black Hawk avec un champ visuel OTW (« Out the window ») représentatif de ce type de véhicule (voir figure 5.1).



FIGURE 5.1 – Vertical Motion Simulator. (Gauche) VMS vu de l'extérieur. (Droite) Intérieur de la cabine

Systeme de simulation visuelle

La scène visuelle OTW était générée par un système de génération d'image Rockwell-Collins EPX-500, procurant un environnement visuel complexe et à haute résolution à 60Hz. L'environnement n'était projeté que sur les trois écrans du haut (les fenêtres inférieures n'étant pas utilisées pour éviter que les pilotes prennent leur information de hauteur-sol par ces écrans, figure 5.1 image de droite). L'envergure horizontale du champ visuel était de +/- 78 degrés, l'envergure verticale du champ visuel étant de -16 à +12 degrés pour les trois fenêtres supérieures.

5.1.3 Stimuli

Deux types de conditions Visuelles :

- un Environnement avec Visuel Normal (EVN) affichant le terrain expérimental un jour de soleil sans nuages, pluie ou brouillard ;

- un Environnement avec Visuel Dégradé (EVD) affichant le même terrain un jour de brouillard, impactant graduellement la distance de vision des participants. Le brouillard était un modèle de brouillard pré-existant dans le simulateur VMS de même type que celui utilisé durant les expérimentations des chapitres 3 et 4, mais avec une distance de visibilité d'environ 400 mètres.

Pour chacune des conditions EVN et EVD, le terrain en lui-même était identique.



FIGURE 5.2 – (Gauche) participant contrôlant la jauge graduée avec le joystick. (Milieu) Jauge graduée affichée avec l’environnement virtuel. (Droite) Jauge graduée.

Deux types de conditions Vestibulaires :

- mouvements normaux (Mvt), où la cabine du simulateur avait des mouvements verticaux correspondant aux déplacements verticaux du pilote dans la scène virtuelle;

- pas de mouvements (No Mvt), où la cabine ne bougeait pas et les participants étaient seulement soumis à l’environnement visuel projeté sur les écrans de la cabine.

5.1.4 Modélisation de l’environnement

Le terrain expérimental a été conçu avec un logiciel propriétaire de la NASA. Il était composé (voir Annexe C), dans la même idée que les terrains expérimentaux des deux précédentes expérimentations, de deux phases. La phase 1 consistait en un terrain plat, peuplé d’arbres tous identiques (densité de 193 arbres par mile²), d’environ 850 pieds, parcouru en 9.1s par les participants. Elle se terminait par une courte montée d’environ 90ft à 25 degrés pendant 1.8s.

La phase 2 quant à elle était constituée d’un terrain, toujours peuplé d’arbres tous identiques (même densité que précédemment), composé d’une succession de collines toutes identiques, hautes d’environ 160ft (2,5 hauteurs d’arbres), et parcouru en environ 78s. L’ensemble du terrain expérimental était survolé en 90s.

Dans le cadre de cette expérimentation, un indicateur gradué (le même type que celui utilisé lors de l'expérimentation "Observateur" au laboratoire EuroMov, voir figure 5.2) était affiché dans le coin inférieur droit de l'interface visuel des participants. Cet indicateur avait la même fonction durant tout le long des essais. Les participants pouvaient contrôler la hauteur indiquée (entre 0 et 120ft) grâce aux mouvements sagittaux du collectif de la cabine du VMS, tirer le collectif vers soi indiquant une augmentation de la valeur, et inversement.

Modélisation de la trajectoire

Pour cette expérimentation, du fait de la complexité de simuler une trajectoire par ordinateur avec le modèle d'hélicoptère implémenté dans le VMS, la trajectoire d'un pilote expérimenté fut enregistrée et utilisée comme vol de référence. Il lui fut demandé de voler au dessus du terrain expérimental à une hauteur-sol constante de 45ft et une vitesse constante de 55 knots (il avait à sa disposition un retour de sa hauteur-sol et de sa vitesse pour l'assister dans cette tâche).

L'annexe C résume les paramètres de l'environnement simulé.

5.1.5 Procédure

Pour chaque participant, cette troisième étude durait environ 60 minutes au total. Les participants commençaient par remplir et signer un formulaire de consentement pour participer à l'étude et donner leur permission d'utiliser les données. Ensuite, il leur était demandé de remplir un questionnaire sur les nombres d'heures qu'ils avaient passées dans différentes conditions (nombre d'heures en simulateur, nombre d'heure de vol en visuel dégradé, ...). Compléter et signer les documents prenait environ 10 minutes.

Les expérimentateurs expliquaient ensuite succinctement la tâche que les participants devaient réaliser. Il leur était annoncé qu'ils seraient observateurs d'un vol pré-enregistré au dessus du terrain expérimental. Une perturbation en hauteur de 18ft (positive ou négative, comme pour le chapitre 3) de la trajectoire automatique serait introduite à un temps pseudo aléatoire au cours des essais. La tâche des participants était de reporter à l'aide d'un indicateur gradué affiché sur leur interface

visuelle la hauteur-sol courante. Chaque terrain expérimental serait décomposé en deux phases : la phase 1, survol d'un terrain plat, suivie de la phase 2, survol d'un terrain vallonné (toutes les collines étant identiques). Le vol se faisait à une vitesse quasiment constante de 55 knots. Ils étaient encouragés à utiliser les arbres présents dans l'environnement visuel comme référence dans leur jugement de perception de la hauteur, dans le but de réduire les variations dans les réponses des différents participants.

Sous confirmation orale que la tâche était comprise, les participants étaient assis et attachés dans la cabine du VMS (voir figure 5.2 gauche) à l'aide d'une ceinture de sécurité (sans restrictions au niveau des bras et de la tête). Puis, on munissait les participants d'un casque audio pour permettre la communication orale avec les expérimentateurs.

Une fois installés et avant de commencer l'expérimentation, les participants devaient réaliser un essai de familiarisation, pour prendre connaissance de l'environnement simulé. Il consistait en un survol du terrain expérimental un jour ensoleillé avec mouvements du VMS et présence de l'indicateur de hauteur-sol perçue sur l'interface visuelle.

Une fois l'essai réalisé et reçu confirmation orale du pilote qu'il comprenait la tâche, l'expérimentation commençait.

Les expérimentateurs monitoraient les estimations en hauteur des pilotes par rapport aux stimuli, pour superviser leurs performances et la réalisation de la tâche, en donnant une assistance orale si nécessaire. Les pilotes devaient réaliser l'expérimentation comme il leur avait été précisé. Cette troisième étude était constituée de 20 essais de 2 minutes chacun (90s d'essai suivies de 30s de réinitialisation du VMS). Tous les 10 essais expérimentaux, on leur proposait de prendre une pause de 10 minutes en dehors du simulateur. Les participants étaient monitorés à l'aide d'une caméra située dans la cabine sur leur côté gauche et s'ils semblaient malades ou nauséux une pause était systématiquement prise.

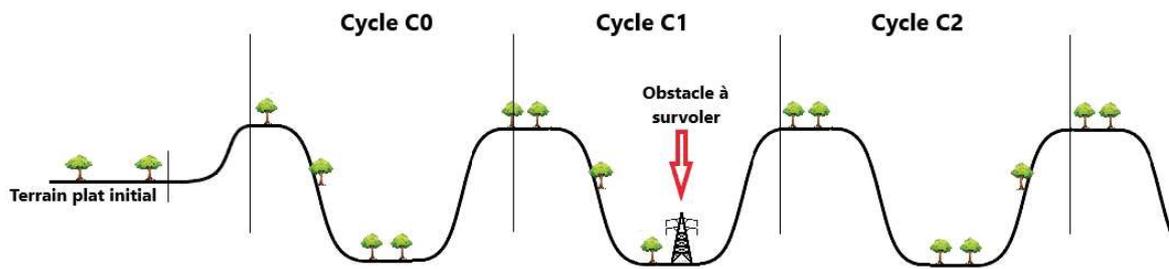


FIGURE 5.3 – Exemple de découpage du terrain entre les 3 cycles C0, C1 et C2 d'étude.

Une fois les essais terminés, les pilotes sortaient du simulateur et étaient débriefés sur leurs performances. Ils partageaient ensuite leur point de vue sur la tâche qu'ils venaient de réaliser ainsi que sur leurs performances et sur toute information qu'ils trouvaient intéressante.

5.1.6 Analyses et données

Mesures

Considération du terrain De part la conception de cette expérimentation, le terrain expérimental survolé par les pilotes voyait sa partie avec des collines se répéter de manière périodique. Ainsi, dans le but d'avoir une étude plus précise de l'impact du terrain et des différentes conditions de vol sur les performances de suivi et report de hauteur-sol, trois niveaux d'analyse ont été conçus. Pour chaque essai, la trajectoire parcourue a été découpée en 3 cycles : le cycle C0 (pré-perturbation) étant la période de collines avant la période contenant la perturbation, le cycle C1 (perturbation) étant la période du terrain au cours de laquelle la perturbation en hauteur survient et C2 (post-perturbation) la période du terrain après celle contenant la perturbation (voir figure 5.3) à partir du temps d'apparition de la perturbation et de la période du relief du terrain. Les variables ont donc été étudiées 1) sur chacun de ces cycles indépendamment, 2) entre ces différents cycles et enfin 3) en moyenne globale sur l'ensemble de l'essai.

Erreur de suivi L'Erreur de Suivi est l'estimation de l'écart entre la hauteur-sol rapportée par les pilotes et la hauteur-sol cible. Cette erreur de suivi a été utilisée pour deux métriques différentes :

MBE La "Mean Biased Error" (MBE), calculée avec l'équation :

$$MBE = 1/n * \sum_{i=n}^{i=n+1} P_i - O_i, \quad (5.1)$$

où P_n et O_n sont respectivement la hauteur-sol cible (prédiction) et la hauteur-sol courante (observation) à l'image n. La fenêtre [n;n+1] représente une fenêtre moyenne glissante de 150ms. La MBE représente l'erreur qualitative de suivi et a été utilisée pour fournir une estimation de la qualité de la réponse, i.e. une surestimation ou une sous estimation de l'altitude cible.

MAE La "Mean Absolute Error" (MAE) est l'erreur absolue de suivi et est une estimation quantitative de l'amplitude de la différence entre la hauteur-sol rapportée et la hauteur-sol cible. Elle est calculée, dans la même idée que la MBE, avec la formule :

$$MAE = 1/n * \sum_{i=n}^{i=n+1} |P_i - O_i|, \quad (5.2)$$

avec encore une fois P_n et O_n la hauteur-sol cible (prédiction) et la hauteur-sol courante (observation) à la frame n, la fenêtre [n;n+1] représentant toujours une fenêtre moyenne glissante de 150ms. La MAE représente l'erreur quantitative de suivi et fournit une estimation de l'écart de la réponse à la cible.

Temps de réaction Il n'était pas demandé aux participants de rapporter quand ils percevaient la perturbation en hauteur pour la première fois dans l'essai. Une méthode fut donc conçue pour inférer le temps de réaction / perception basée sur les différences entre l'altitude de l'autopilote AP (trajectoire automatique ne prenant pas en compte la perturbation en hauteur), l'altitude RADALT (trajectoire AP à laquelle on rajoute la perturbation en hauteur) et la hauteur-sol rapportée par les participants.

Une méthode pour déterminer le moment de détection de la perturbation en hauteur est de comparer l'erreur entre la hauteur rapportée et les trajectoires RADALT et AP. On peut voir sur la figure 5.4 une illustration de cette méthode. Après le début de la perturbation en hauteur, les trajectoires AP et RADALT se séparent pour atteindre

une distance maximale d'environ 18ft après 5 secondes. L'erreur de suivi relative à l'altitude RADALT et à l'altitude AP ont été calculées et affichées sur la figure 5.4. Cette figure montre l'erreur moyenne absolue de suivi par rapport à la trajectoire AP et la trajectoire RADALT.

On peut clairement voir sur ces figures le croisement entre les deux courbes. Avant le croisement, l'erreur de suivi est inférieure quand calculée tant par rapport à la trajectoire AP qu'à la trajectoire RADALT, indiquant que le pilote n'a détecté ou réagi à la perturbation en hauteur. Après le croisement des deux courbes, l'erreur de suivi calculée par rapport à la trajectoire AP est supérieure à celle calculée par rapport à la trajectoire RADALT, indiquant la détection de la perturbation. Il est probable que les temps de réaction étaient identifiés quelques secondes après la véritable détection de la perturbation, au maximum de la courbe avant le croisement.

Outils statistiques Des ANOVA (analyses de variance) de type-III à mesures répétées furent calculés pour déterminer la présence, ou non, d'effets sur les performances et le comportement des pilotes du Cycle (C0, C1 et C2), de la Visibilité (EVN et EVD), du Mouvement (Mvt et No Mvt) et de la direction de la perturbation (positive et négative). Les moyennes (μ), déviations standard (SD) et/ou erreurs standard (SE) ont été calculées pour les trois cycles décrits précédemment. Des test post-hoc de Bonferroni furent calculés pour différentes comparaisons significatives. Tous les effets décrits ont été considérés significatifs statistiquement pour des p-valeurs $p \leq .05$. Les valeurs aberrantes furent enlevées en utilisant la procédure de la distance de Mahalanobis. Les facteurs Visuel, Mouvement et Perturbation étaient considérés comme facteurs within-subject (tous les participants effectuant toutes les conditions expérimentales). Tous les calculs ont été effectués avec le logiciel Rstudio (packages « ez », « afex », « lsmeans » et « ggplot2 ») et Word Excel.

5.2 Résultats

5.2.1 Erreur de suivi

MBE L'ANOVA à quatre facteurs (Visuel, Mouvement, Cycle, Perturbation) à mesures répétées calculée avec la MBE a révélé un effet simple de la direction de la

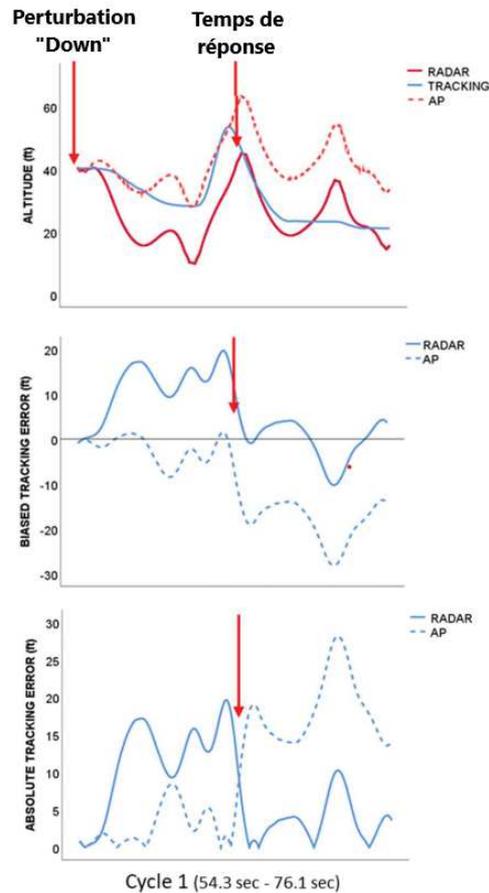


FIGURE 5.4 – Illustration de la méthodologie utilisée pour déterminer indirectement la détection des perturbations. Dans cet exemple, une perturbation "Down" est introduite 54.3s après le début de l'essai. En haut : altitude RADALT, altitude de suivie (Tracking) et altitude AP (RADALT moins Perturbation). Centre : erreur de suivie biaisée (signée) par rapport à l'altitude RADALT et l'altitude AP. En bas : erreur absolue de suivi par rapport à l'altitude RADALT et l'altitude AP. Le temps de réponse (ici 11.5s après le début de la perturbation) est déterminée par le croisement entre les courbes de l'altitude RADALT et de l'altitude AP ((GODFROY-COOPER et al., 2020))

perturbation ($F(1, 6) = 163.24, \eta^2 = .352, p < .001$), les participants étant significativement plus précis en condition "Up" qu'en condition "Down", dans laquelle ils avaient tendance à sous-estimer la hauteur-sol de vol (voir 5.5).

Trois effets d'interaction ont été révélés :

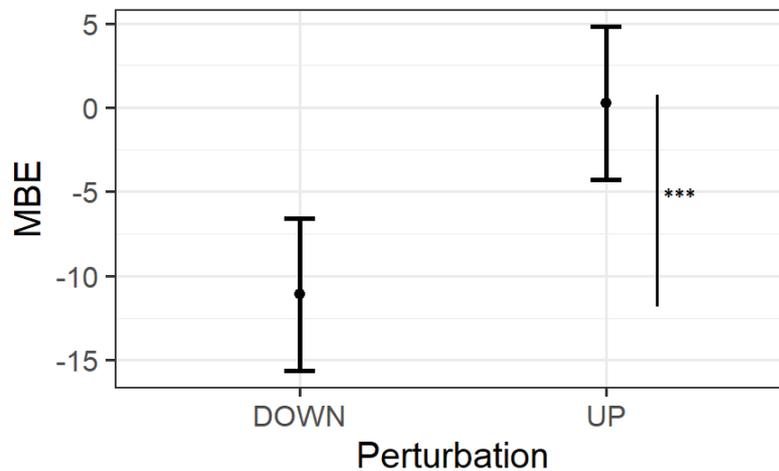


FIGURE 5.5 – Valeur de la MBE en fonction du sens de la perturbation ("Up", "Down").

- Interaction entre les conditions Visuelle et Mouvement ($F(1, 6) = 16.76, \eta^2 = .108, p = .026$) (post-hoc t-tests appairés : en condition visuelle EVD, Mvt vs. No Mvt, $t(12) = -2.323, p = .0399$; en condition No Mvt, EVN vs. EVD, $t(12) = 2.994, p < .0128$). On constate que les participants étaient significativement plus précis dans leur estimation de la hauteur-sol en condition EVN par rapport à la condition EVD en l'absence de mouvements cabines. En outre, la performance des participants était significativement meilleure en condition EVD en présence de mouvement (voir 5.6).

- Interaction entre les conditions Cycle et Perturbation ($F(2, 12) = 107.73, \eta^2 = .150, p < .001$, voir 5.7) (post-hoc t-tests appairés : par rapport au facteur Cycle, C0 "Down" vs. "Up", $t(12) = -3.267, p = .0076$; C1 "Down" vs. "Up", $t(12) = -7.045, p < .0001$; C2 "Down" vs. "Up", $t(12) = -20.097, p < .0001$; par rapport au facteur perturbation, "Down" C0 vs. C2, $t(24) = 7.671, p < .0001$; "Down" C1 vs. C2, $t(24) = 8.684, p < .0001$; "Up" C0 vs. C1, $t(24) = -5.133, p = .0002$; "Up" C0 vs. C2, $t(24) = -10.68, p < .0001$; "Up" C1 vs. C2, $t(24) = -5.547, p < .0001$).

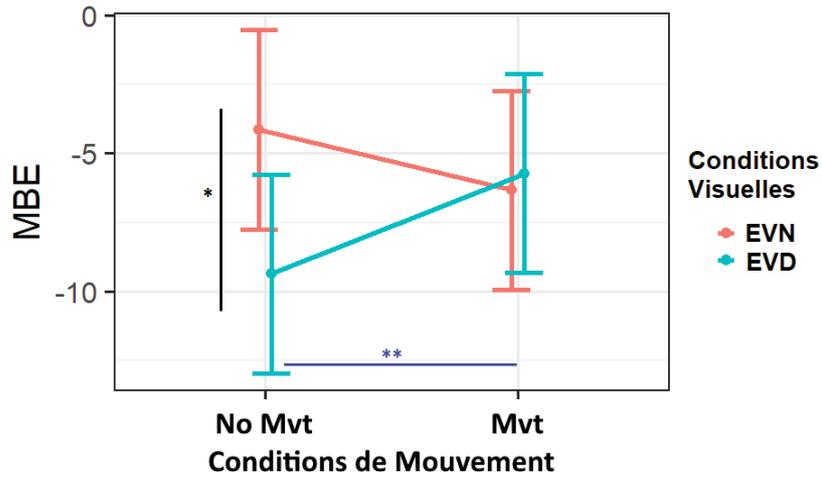


FIGURE 5.6 – Valeur de la MBE en fonction de la présence (Mvt) ou non (No Mvt) de mouvements cabine. La ligne bleue représente la condition Visuelle EVN et la ligne rouge représente la condition Visuelle EVD.

En condition "Up" les participants commençaient par sous-estimer leur hauteur-sol puis finissaient les essais en la sur-estimant, mais restaient en général meilleurs dans leur estimation qu'en condition "Down". Dans celle-ci, les participants avaient tendance à sous estimer de plus en plus la hauteur-sol durant les essais.

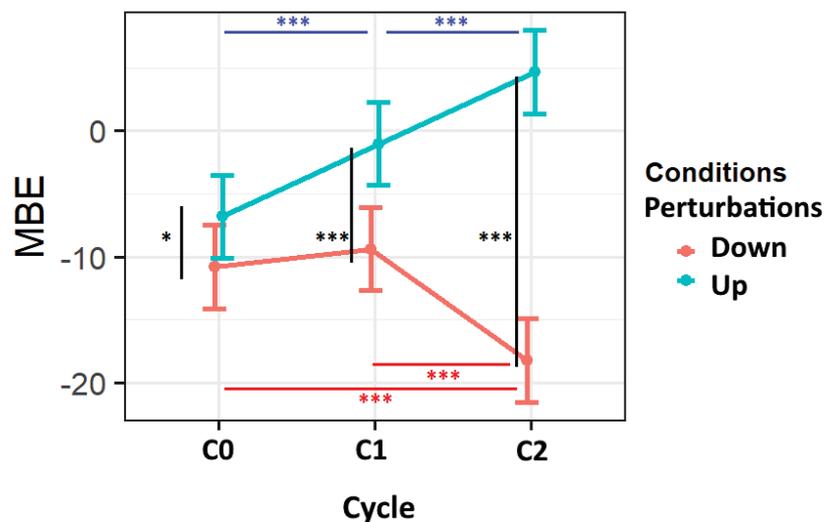


FIGURE 5.7 – Valeur de la MBE en fonction du Cycle en cours (C0, C1, C2). La ligne rouge représente la condition Perturbation "Down" et la ligne bleue représente la condition Perturbation "Up".

- Interaction entre les conditions Cycle, Mouvement et Perturbation ($F(4, 24) =$

8.16, $\eta^2 = .106$, $p = .022$) que nous verrons un peu plus loin lors des comparaisons entre condition "Up" et "Down".

MAE La même ANOVA à quatre facteurs (Visuel, Mouvement, Cycle, Perturbation) à mesures répétées calculée avec la MAE n'a pas révélé d'effet simple sur aucun facteur. On trouve cependant un effet d'interaction entre les facteurs Visuel, Mouvement et Perturbation ($F(4, 24) = 26.28$, $\eta^2 = .128$, $p = .007$).

"Up" vs. "Down"

MBE L'impact des interactions du facteur Perturbation avec les autres facteurs nous a amené à différencier le cas Perturbation "Up" du cas Perturbation "Down". Dans le cas "Up", l'ANOVA à trois facteurs (Visuel, Mouvement, Cycle) à mesures répétées calculée avec la métrique MBE révèle un effet du cycle (observé de manière plus générale précédemment avec l'effet d'interaction entre Cycle et Perturbation) et un effet d'interaction entre les facteurs Visuel et Mouvement ($F(1, 6) = 16.63$, $\eta^2 = .157$, $p = .040$, voir 5.8) (post-hoc t-tests appairés : en condition visuelle EVD, Mvt vs. No Mvt, $t(12) = -2.899$, $p = .0178$). On observait une amélioration significative de l'erreur de suivi en condition Mvt par rapport à la condition No Mvt.

En condition "Down", on retrouve de nouveau l'effet du facteur Cycle précédent ($F(2, 12) = 107.73$, $\eta^2 = .150$, $p < .001$, voir 5.7), ainsi qu'un effet d'interaction entre Cycle et Mouvement ($F(2, 24) = 14.88$, $\eta^2 = .110$, $p = .048$) montrant qu'au début des essais (Cycle 0), les participants avaient une meilleure précision dans leur estimation continue de la hauteur-sol lorsque la cabine du simulateur bougeait, puis les performances se dégradèrent de la même manière au cours des essais pour les deux conditions de Mouvement (post-hoc t-tests appairés : par rapport au facteur Mouvement, No Mvt C0 vs. C2, $t(24) = 3.421$, $p = .0117$; No Mvt C1 vs. C2, $t(24) = 5.144$, $p = .0004$; Mvt C0 vs. C2, $t(24) = 6.027$, $p = .0001$; Mvt C1 vs. C2, $t(24) = 4.161$, $p = .0026$).

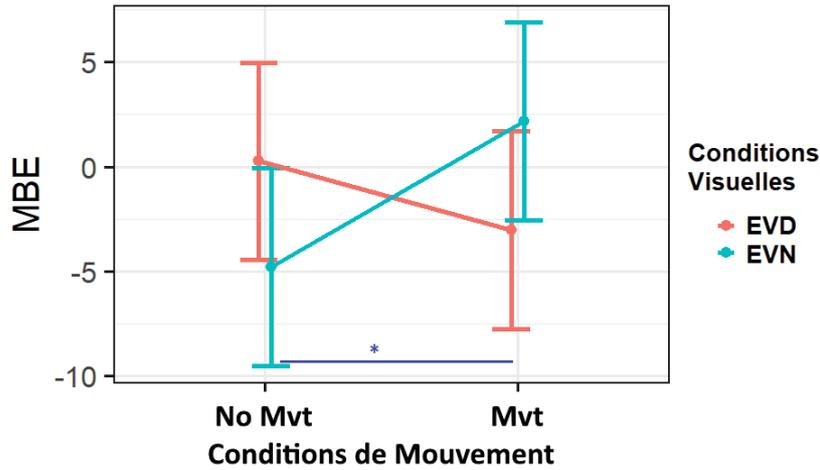


FIGURE 5.8 – Valeur de la MBE en condition "Up" en fonction de la présence (Mvt) ou non (No Mvt) de mouvements cabine. La ligne bleue représente la condition Visuel EVN et la ligne rouge représente la condition Visuel EVD.

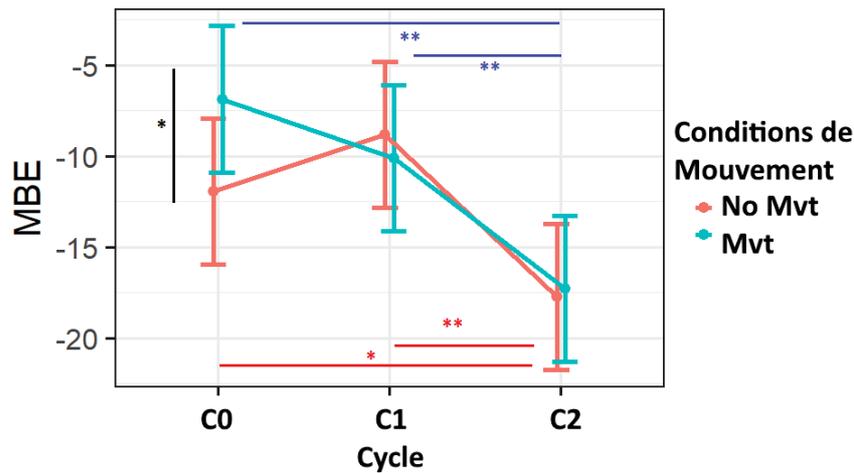


FIGURE 5.9 – Valeur de la MBE en condition "Down" en fonction du Cycle en cours (C0, C1, C2). La ligne rouge représente la condition sans mouvements cabine (No Mvt) et la ligne bleue représente la condition avec mouvements cabine (Mvt).

MAE La même ANOVA à trois facteurs appliquée à la métrique MAE nous révèle en condition "Up" un effet d'interaction entre Visuel et Mouvement ($F(1,6) = 18.60, \eta^2 = .230, p = .008$, voir 5.10) (post-hoc t-tests appairés : par rapport au facteur Visuel, EVN No Mvt vs. Mvt, $t(12) = -3.120, p = .0109$; EVD No Mvt vs. Mvt, $t(12) = 3.074, p = .0118$; par rapport au facteur Mouvement, No Mvt EVN vs. EVD, $t(12) = -2.571, p = .0314$), montrant une amélioration significative de la

précision de suivi en condition EVD lorsque la cabine du simulateur bougeait, et une dégradation de ces performances en condition EVN lorsque la cabine bougeait (sur-estimation).

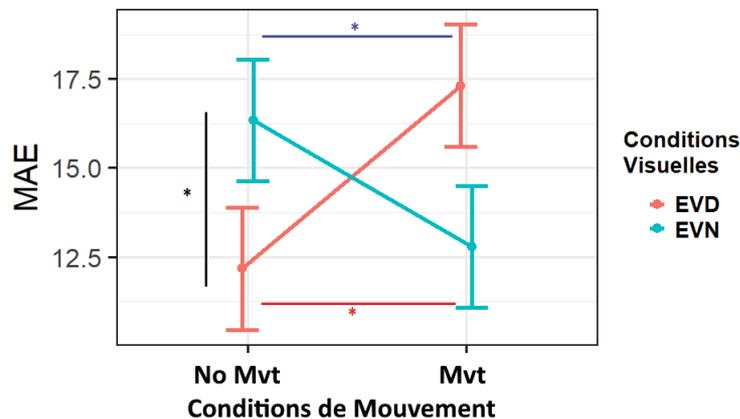


FIGURE 5.10 – Valeur de la MAE en condition "Up" en fonction de la présence (Mvt) ou non (No Mvt) de mouvements cabine. La ligne bleue représente la condition Visuelle EVN et la ligne rouge représente la condition Visuelle EVD.

Aucun effet significatif n'est apparu pour la condition "Down".

TR L'ANOVA à quatre facteurs (Visuel, Mouvement, Cycle, Perturbation) à mesures répétées n'a montré aucun impact significatif de nos conditions expérimentales sur les temps de réaction des participants

5.3 Discussion

L'objectif de cette troisième expérimentation était d'étudier l'impact d'un environnement visuo-vestibulaire sur la perception de la hauteur-sol de vol lors d'un vol automatisé en situation de VBH simulé. Cette étude différait de la première (chapitre 3) sur deux points principaux : la participation de pilotes militaires experts, à la différence des participants naifs sans expérience du chapitre 3 et sur la présence, et l'utilisation, d'un simulateur à base mobile pouvant recréer avec un haut taux de fidélité les variations gravito-inertielles. La qualité de l'environnement visuel et le type de mouvement de la cabine ont encore une fois été manipulés et leurs effets

analysés sur les performances et le comportement des pilotes.

Dans la continuité des deux expérimentations menées au laboratoire EuroMov, les informations gravito-inertielles jouaient un rôle significatif dans l'estimation de la hauteur-sol, mais uniquement dans le cas où la structure optique ne spécifiait pas efficacement l'interaction entre l'acteur et son environnement. Les pilotes experts semblaient avoir de meilleures performances de vol dans un environnement visuo-vestibulaire que dans un environnement purement visuel. En effet, bien que la condition Mvt n'ait pas impacté significativement les performances en condition visuelle normale (EVN), la présence d'informations gravito-inertielles permettait de compenser l'impact négatif de la dégradation des informations visuelles (fig 5.6). Néanmoins, cet impact des mouvements cabine variait en fonction du sens de la perturbation, comme on peut le voir de manière générale avec la figure 5.5. En condition "Up", la présence de mouvements cabines améliorait la performance d'estimation des pilotes en condition EVD (tant d'un point de vue de la MBE que de la MAE), ces mouvements cabines pouvaient impliquer une augmentation de l'erreur de suivi (MBE non significativement différente entre les conditions, MAE significativement plus élevée en présence de mouvements cabine). En condition "Down", bien que la présence de mouvements cabines ait amélioré la précision des participants au début des essais, cet effet s'atténuait au cours du temps (5.9). Enfin, les conditions expérimentales n'ont pas affecté le temps de détection de la perturbation par les participants, résultat probablement issu de l'entraînement auquel sont soumis les pilotes militaires sur simulateur.

Chapitre 6

Quatrième étude - Expérimentation contrôleur - Pilotes experts

La quatrième et dernière expérimentation était dans la continuité de l'expérimentation présentée en partie IV. Réalisée au centre de recherche Ames de la NASA avec le simulateur VMS, cette dernière étude consistait en la réalisation par des pilotes militaires experts d'une tâche de maintien de la hauteur-sol de consigne de vol en VBH simulé. Différentes combinaisons de stimuli visuels et vestibulaires furent proposées aux pilotes pour tester et caractériser la contribution de ces modalités sensorielles sur les performances de contrôle du mouvement propre. L'objectif de cette expérimentation était d'approfondir les résultats obtenus lors de la seconde expérimentation menée au laboratoire EuroMov (chapitre 4) avec un groupe de participants experts (pilotes militaires) et un modèle hélicoptère ainsi qu'un environnement gravito-inertiel plus réaliste. Les mêmes hypothèses que précédemment ont été considérées, à savoir 1) que les pilotes auraient de meilleures performances dans un environnement visuo-vestibulaire plutôt que uniquement visuel et 2) que la contribution des informations gravito-inertielles serait plus importante quand les informations visuelles sont dégradées.

6.1 Méthodologie

6.1.1 Présentation des sujets

Sept pilotes de l'armée de l'air américaine (42+/-15 ans, 7 hommes, tous droitiers, un pilote instructeur de recherche, trois pilotes de tests expérimentaux, deux

pilotes de recherche et un pilote instructeur), avec une vision normale, se sont portés volontaires pour participer à cette expérimentation. Ils avaient également participé à la troisième étude. Le nombre d'heures de vol des pilotes variait entre 560 heures et 7300 heures (moyenne de 2736 heures). Le nombre d'heures en simulateur variait entre 100 heures et 1000 heures (moyenne de 365 heures). Tous les pilotes avaient déjà volés en condition visuelle réelle dégradée (de 40 heures à 1500 heures, moyenne de 765 heures).

Les participants étant des pilotes expérimentés et déjà entraînés aux simulateurs de vol, nous n'avons pas fait renseigner de questionnaire de claustrophobie, ni de mal des transports.

6.1.2 Matériel

Système de simulation mobile

Dans le cadre de cette quatrième expérimentation, le VMS (en anglais « Vertical Motion Simulator », cf. (APONSO, BEARD et J. A. SCHROEDER, 2009)) disponible au centre de recherches Ames de la NASA (Mountain View, USA), fut encore utilisé. La cabine équipée sur le simulateur représentait une cabine d'hélicoptère utilitaire de classe UH-60 Black Hawk avec un champ visuel OTW (en anglais « Out the window ») représentatif de ce type de véhicule.

Système de simulation visuelle

La scène visuelle OTW était générée par un système de génération d'image Rockwell-Collins EPX-500, procurant un environnement visuel complexe et à haute résolution à 60Hz. L'environnement n'était encore une fois projeté que sur les trois écrans du haut (les fenêtres inférieures n'étant pas utilisées pour éviter que les pilotes prennent leur information de hauteur-sol par là). L'envergure horizontale du champ visuel était de +/- 78 degrés, l'envergure verticale du champ visuel étant de -16 à +12 degrés pour les trois fenêtres supérieures.

6.1.3 Stimuli

Les conditions expérimentales étaient comme durant précédente, à savoir :

Deux types de conditions Visuelles :

- un Environnement avec Visuel Normal (EVN) affichant le terrain un jour de soleil sans nuages, pluie ou brouillard (voir Fig XX a.);
- un Environnement avec Visuel Dégradé (EVD) affichant le même terrain un jour de brouillard, impactant graduellement la distance de vision des participants.

Deux types de conditions Vestibulaire :

- mouvements normaux (Mvt), où la cabine du simulateur avait des mouvements verticaux correspondants aux déplacements verticaux du pilote dans la scène virtuelle;
- pas de mouvements (No Mvt), où la cabine ne bougeait pas et les participants étaient seulement soumis à l'environnement visuel projeté sur les écrans de la cabine.

6.1.4 Modélisation de l'environnement

Le terrain expérimental a été conçu avec un logiciel propriétaire de la NASA. Il était composé (voir Annexe D), dans la même idée que les terrain expérimentaux des trois précédentes expérimentations, de deux phases. La phase 1 consistait en un terrain plat, peuplé d'arbres tous identiques (densité de 193 arbres par mile²), d'environ 850 pieds, parcouru en 9.1s par les participants. Elle se terminait par une courte montée d'environ 90 pieds à 25 degrés pendant 1.8s.

La phase 2 quant à elle était un terrain, toujours peuplé d'arbres tous identiques (même densité que précédemment), composé d'une succession de collines toutes identiques, hautes d'environ 160 pieds (2.5 hauteurs d'arbres), et parcouru en environ 78s. La particularité du terrain expérimentale de cette dernière expérimentation se trouvait dans la présence, entre 10s et 55s après le début de la phase 2 du terrain, d'une ligne électrique de 55ft de haut. L'ensemble du terrain expérimental était survolé en 90s.

Modélisation de la trajectoire

Pour cette expérimentation, les participants avaient à leur disposition les trois leviers de contrôle d'un hélicoptère classique (collectif, cyclique et pédalier). Le modèle hélicoptère régissant le contrôle des commandes était celui d'un hélicoptère de classe utilitaire UH-60. Les participants (pilotes experts) avaient la possibilité d'utiliser ces trois commandes pour contrôler leur trajectoire de vol.

6.1.5 Procédure

Cette quatrième et dernière étude prenait un total de 60 minutes pour être réalisée. Les participants commençaient par remplir et signer un formulaire de consentement pour participer à l'étude et donner la permission d'utiliser les données. Ensuite, les sept pilotes de la NASA, qui participaient également à l'expérimentation observateur, devaient remplir un questionnaire sur les nombres d'heures qu'ils avaient passés dans différentes conditions (nombre d'heure en simulateur, nombre d'heure de vol en visuel dégradé, ...) s'ils passaient leur première expérimentation (pas besoin de répéter ces questionnaires si ils l'avaient déjà rempli quelques temps plus tôt pour une précédente expérimentation). Compléter et signer les documents prenait environ 10 minutes.

Les expérimentateurs expliquaient ensuite succinctement l'objectif de l'expérimentation aux participants. Il leur était annoncé qu'ils seraient contrôleur d'un vol simulé au dessus du terrain expérimental. Leur tâche était de garder constante leur hauteur-sol et leur vitesse de vol au cours du survol du terrain expérimental. Ils étaient prévenu que des obstacles (ici présence d'une ligne électrique) pouvait se trouver sur leur chemin et qu'il devraient survoler l'obstacle puis reprendre leur survol du terrain à la hauteur-sol initial. Chaque essai serait décomposé en deux phases : La phase 1, survol d'un terrain plat, suivie de la phase 2, survol d'un terrain vallonné (toutes les collines étant identiques et présence d'un obstacle à survoler). Les pilotes étaient encouragés à utiliser les arbres présents dans l'environnement visuel comme référence dans leur jugement de perception de la hauteur, dans le but de réduire les variations dans les réponses des différents participants.

Sous confirmation orale que la tâche était comprise, les participants étaient assis et attachés dans la cabine du VMS à l'aide d'une ceinture de sécurité (sans aucunes restrictions au niveau des bras et de la tête). Puis, on munissait les participants d'un casque audio pour permettre la communication orale avec les expérimentateurs.

Une fois installés et avant de commencer l'expérimentation, les participants devaient réaliser quelques essais de familiarisation (survol du terrain expérimental, faiblement texturé et en l'absence d'arbre), pour prendre connaissance de l'environnement simulé et du modèle de contrôle hélicoptère.

Sous confirmation orale que les participants étaient à l'aise avec les contrôles de l'hélicoptère simulé, l'expérimentation commençait.

Les expérimentateurs monitoraient les estimations en hauteur des pilotes par rapport aux stimuli, pour superviser leurs performances et la réalisation de la tâche, en donnant une assistance orale si nécessaire. Les pilotes devaient réaliser l'expérimentation comme il leur avait été précisé. Cette troisième étude était constituée de 20 essais de 2 minutes chacun (90s d'essai suivi de 30s de réinitialisation du VMS) chacun. Tous les 10 essais expérimentaux, on leur proposait de prendre une pause de 10 minutes en dehors du simulateur. Les participants étaient surveillés à l'aide d'une caméra située dans la cabine sur leur côté gauche et s'ils semblaient malades ou nauséux une pause était systématiquement prise.

Une fois les essais terminés, les pilotes sortaient du simulateur et étaient débriefés sur leurs performances. Ils partageaient ensuite leur point de vue sur la tâche qu'ils venaient de réaliser ainsi que sur leurs performances et sur toute information qu'ils trouvaient intéressante.

6.1.6 Analyses et données

Mesures

Considération du terrain Sur le même principe que l'expérimentation précédente, le terrain expérimental survolé par les pilotes voyait sa partie avec des collines se répéter de manière périodique. Ainsi, dans le but d'avoir une étude plus précise

de l'impact du terrain et des différentes conditions de vol sur les performances de contrôle de la trajectoire de vol, trois niveaux d'analyse ont été conçus. Pour chaque essai, la trajectoire parcourue a été découpée en 3 cycles. Le cycle C0 (pré-obstacle) étant la période de collines avant la période contenant la perturbation, le cycle C1 (obstacle, ligne électrique) étant la période du terrain au cours de laquelle les participants et C2 (post-obstacle) la période du terrain après celle contenant l'obstacle (voir figure chapitre précédent 5.3) à partir du temps d'apparition de la perturbation et de la période du relief du terrain. Les variables ont donc été étudiées 1) sur chacun de ces cycles indépendamment, 2) entre ces différents cycles et enfin 3) en moyenne globale sur l'ensemble de l'essai.

Erreur en position L'erreur en position des participants a été déterminée tout au long des essais par la différence entre l'altitude de survol du participant et l'altitude cible. Une erreur nulle signifiait que le participant suivait parfaitement la trajectoire cible, c'est-à-dire qu'il avait réussi à conserver sa hauteur-sol de vol constante et égale à la valeur initiale au travers de l'essai. De cette erreur on obtenait la "Mean Biased Error" (MBE), calculée comme pour l'expérimentation précédente avec l'équation :

$$MBE = 1/n * \sum_{i=n}^{i=n+1} P_i - O_i, \quad (6.1)$$

où P_n et O_n sont respectivement la hauteur-sol cible (prédiction) et la hauteur-sol courante (observation) à l'image n. La fenêtre [n;n+1] représente une fenêtre moyenne glissante de 150ms.

Erreur en vitesse Les participants devant à la fois maintenir leur hauteur-sol constante et leur vitesse de survol constante, nous avons également calculé l'erreur en vitesse des trajectoires prises. Trois métriques ont été calculées :

- La vitesse verticale, représentant le taux de variation verticale de la trajectoire des participants (RoC, en anglais "Rate of climb"),
- La vitesse horizontale, et plus précisément l'erreur en vitesse longitudinale (en anglais "Airspeed error") par rapport à la cible,
- La vitesse moyenne rapportée au sol (MbgS, en anglais "Mean biased ground speed"),

calculée à partir des deux précédentes vitesses.

Survol de l'obstacle Plusieurs métriques ont été calculées pour caractériser le survol de l'obstacle (Ligne électrique) par les participants. Ces métriques peuvent être divisées entre les métriques de distance et les métriques temporelles.

Erreur en position Les métriques de distance regroupent : la valeur moyenne (en ft) de survol de l'obstacle au moment de l'obstacle (ClearLocus), l'enveloppe de survol de cet obstacle (avec 4 mesures représentant la hauteur de survol de l'obstacle +/-2.5s et +/-5s autour de la position de l'obstacle), la valeur de cette hauteur de survol au moment de la détection de l'obstacle (ClearDval) et enfin la valeur de la distance de survol maximale (ClearMaxVal).

Métriques temporelles Les métriques temporelles sont quant à elles le temps de détection de l'obstacle (ClearD) et le temps auquel ont atteint la hauteur maximale de survol (ClearMax).

Le temps de détection, ClearD, a été calculé selon la même manière que celui proposé dans le chapitre 5 (expérimentation "Observateur" NASA).

Outils statistiques

Dans cette quatrième et dernière expérimentation, des ANOVA de type-III à mesures répétées (Rstudio, packages « ez », « afex », « lsmeans » et « ggplot2 » ; Word Excell) ont encore été utilisées pour déterminer la présence ou non d'effet sur les performances et le comportement des participants du Cycle (C0, C1, C2 - uniquement pour les erreurs en position et en vitesse), du Visuel (EVN, EVD) et du Mouvement cabine (Mvt, No Mvt). Des tests post-hoc utilisant la correction de Bonferroni ont été calculés pour différentes combinaisons. Tous les effets décrits étaient considérés comme statistiquement significatif si $p \leq .05$. Les données aberrantes furent retirées en utilisant la procédure de la distance de Mahalanobis. Les facteurs Visuel, Mouvement et Perturbation étaient considérés comme facteurs within-subject (tous

les participants effectuant toutes les conditions expérimentales). Enfin des calculs de corrélation ont été effectués entre diverses variables, la normalité des distributions étudiées ayant été vérifiée avec le test de Shapiro-Wilk (Rstudio, fonction `Shapiro.test()` du "basic package").

6.2 Résultats

Comme précédemment, il n'y a pas eu de participant claustrophobe, la somme des réponses au questionnaire des participants étant toujours au niveau de la moyenne et de la déviation standard de l'ensemble de la population. De la même manière, aucun participant n'a été rendu malade par la tâche, puisqu'il n'y a eu aucune différence significative entre les questionnaires avant/après.

Erreur en position L'ANOVA à trois facteurs (Visuel, Mouvement, Cycle) à mesures répétées calculée avec la MBE a révélé un effet simple du facteur Mouvement ($F(1,4) = 14.01, \eta^2 = .107, p = .020$, erreur en position des participants en condition Mvt qu'en condition No Mvt, voir 6.1), un effet simple du facteur Visuel ($F(1,4) = 8.69, \eta^2 = .133, p = .042$, erreur en position des participants en condition EVD qu'en condition EVN, voir 6.2), ainsi qu'un effet simple du Cycle ($F(1,6) = 29.12, \eta^2 = .369, p = .004$, erreur en position des participants plus élevée lors du cycle 1 que lors des deux autres cycles, voir 6.3).

Erreur en vitesse L'ANOVA à trois facteurs (Visuel, Mouvement, Cycle) à mesures répétées calculée avec la vitesse verticale moyenne des participants a révélé un effet du facteur Visuel ($F(1,4) = 8.69, \eta^2 = .475, p = .05$, en condition Visuelle EVN les participants avaient tendance à survoler le terrain et les obstacles moins vite qu'en condition EVD, voir 6.4).

La même ANOVA appliquée sur la vitesse horizontale moyenne des participants n'a pas révélé d'effets significatifs des facteurs expérimentaux.

Finalement, l'ANOVA à trois facteurs à mesures répétées appliquée la MbgS (vitesse moyenne rapportée au sol) a révélé un effet simple du Cycle ($F(1,6) = 12.54, \eta^2 =$

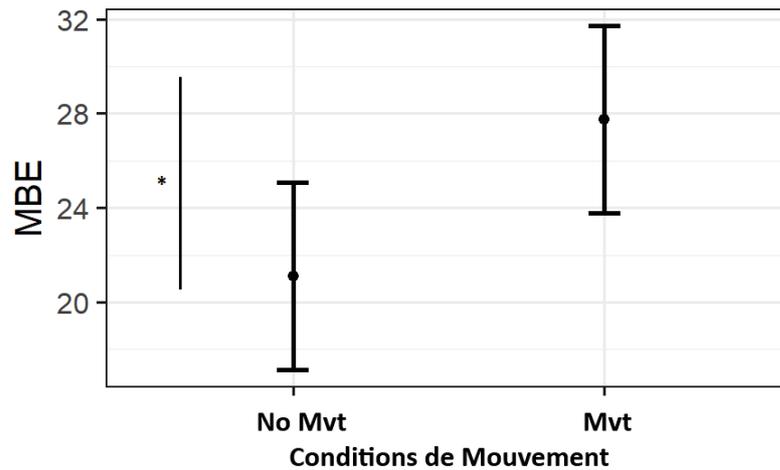


FIGURE 6.1 – Valeur de la MBE en fonction de la présence (Mvt) ou non (No Mvt) de mouvements cabine.

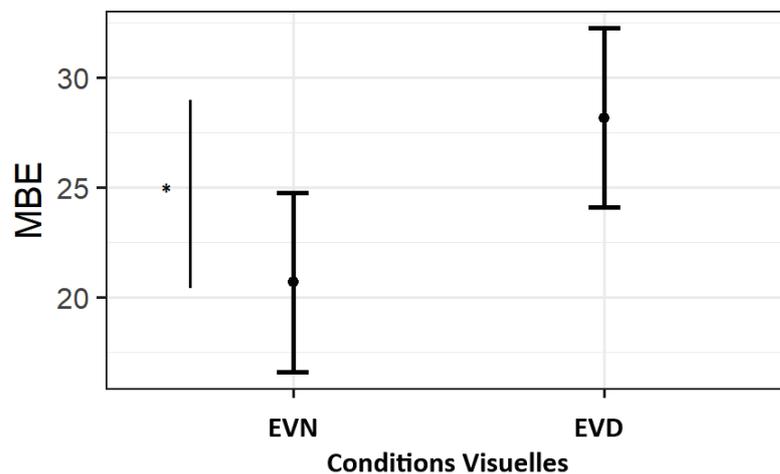


FIGURE 6.2 – Valeur de la MBE en fonction de la condition Visuelle (EVN, EVD).

.324, $p = .012$, vitesse moyenne des participants significativement plus élevée lors du cycle C0 que lors des deux autres cycles, voir 6.5).

Survol de l'obstacle

Métriques de distance L'ANOVA à deux facteurs (Visuel, Mouvement) à mesures répétées appliquée à ClearLocus a révélé un effet simple du facteur Visuel ($F(1,5) = 20.39, \eta^2 = .314, p = .006$, voir 6.6), un effet simple du Mouvement

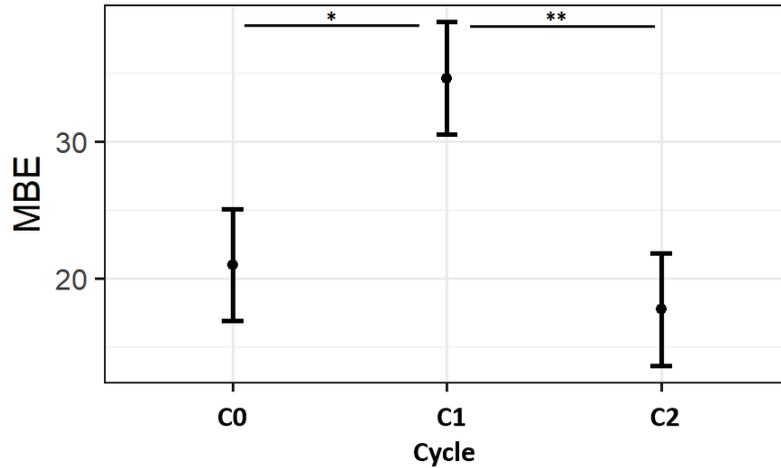


FIGURE 6.3 – Valeur de la MBE en fonction du Cycle en cours (C0, C1, C2).

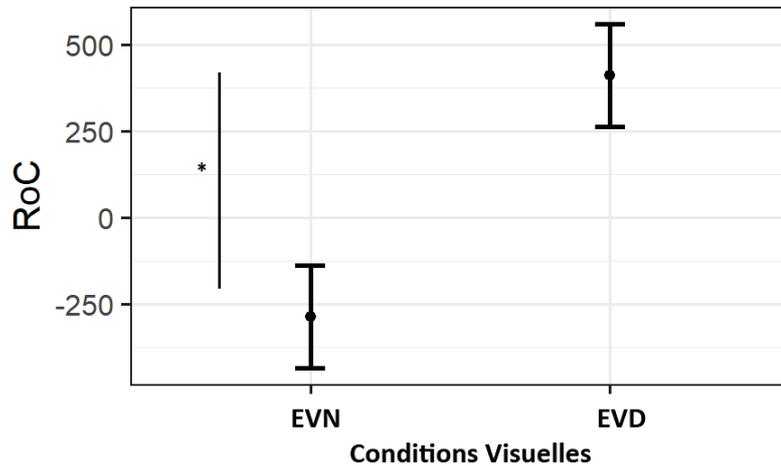


FIGURE 6.4 – Valeur de la RoC en fonction de la condition Visuelle (EVN,EVD).

($F(1,5) = 7.97, \eta^2 = .282, p = .037$, voir 6.7) et un effet d'interaction entre les facteurs Visuel et Mouvement ($F(1,5) = 14.20, \eta^2 = .222, p = .013$, voir 6.8) (post-hoc t-tests appairés : par rapport au facteur Visuel, EVD No Mvt vs. Mvt, $t(12) = -4.406, p = .002$; par rapport au facteur Mouvement, Mvt EVN vs. EVD, $t(12) = -5.870, p = .0002$).

L'étude de l'enveloppe de survol de l'obstacle a montré un effet simple du facteur Visuel sur la hauteur de survol 5 secondes avant l'obstacle ($F(1,5) = 13.56, \eta^2 = .117, p = .014$), un effet simple des facteurs Visuel ($F(1,5) = 19.50, \eta^2 = .355, p =$

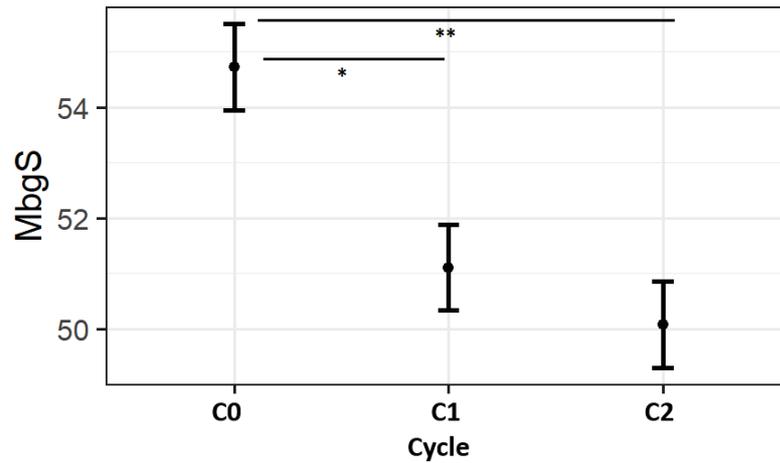


FIGURE 6.5 – Valeur de la MbgS en fonction du Cycle en cours (C0, C1, C2).

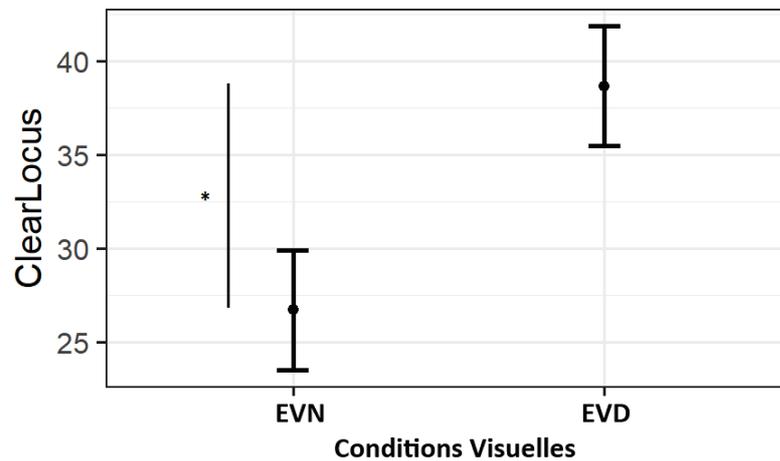


FIGURE 6.6 – Valeur de ClearLocus en fonction de la condition Visuelle (EVN, EVD)

.007) et Mouvement ($F(1,5) = 7.62, \eta^2 = .170, p = .040$) sur la hauteur 2.5 secondes avant l'obstacle et un effet simple du facteur Visuel ($F(1,5) = 10.83, \eta^2 = .170, p = .022$) sur la hauteur 2.5 secondes après l'obstacle. Les figures 6.9 et 6.10 résument ces résultats pour respectivement le facteur Visuel et le facteur Mouvement.

L'ANOVA à deux facteurs (Visuel, Mouvement) à mesures répétées appliquée à ClearDval a montré un effet du facteur Visuel ($F(1,5) = 14.32, \eta^2 = .268, p = .013$, voir 6.11) montrant que les participants étaient significativement plus haut au moment de la détection de l'obstacle en condition EVD qu'en condition EVN.

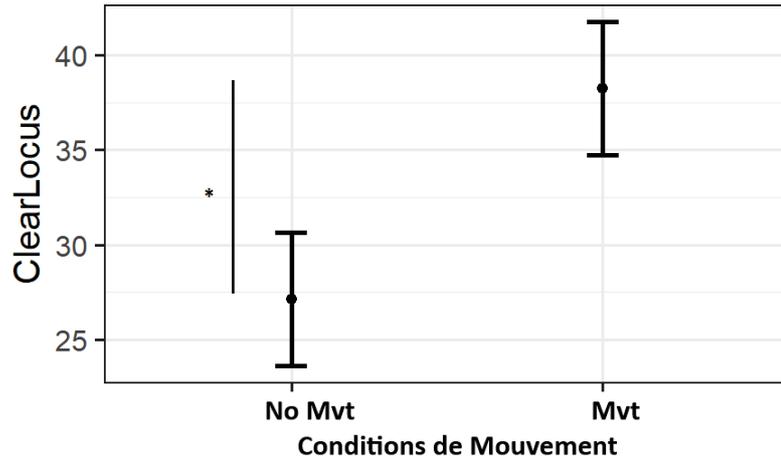


FIGURE 6.7 – Valeur de la MBE en fonction de la présence (Mvt) ou non (No Mvt) de mouvements de cabine.

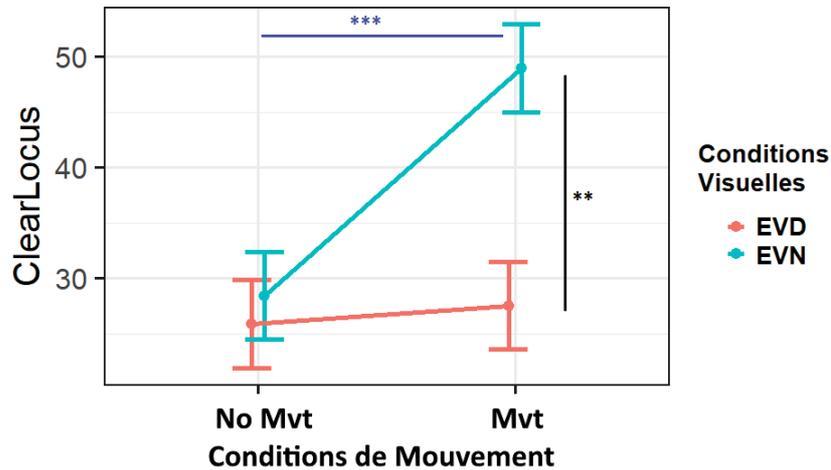


FIGURE 6.8 – Valeur de la MBE en fonction de la présence (Mvt) ou non (No Mvt) de mouvements de cabine. La ligne rouge représente la condition Visuelle EVD, la ligne bleue la condition EVN.

La même ANOVA appliquée à ClearMaxVal a montré les effets simple des facteurs Visuel ($F(1, 5) = 49.27, \eta^2 = .323, p < .001$, voir 6.12) et Mouvement ($F(1, 5) = 6.65, \eta^2 = .213, p = .050$, voir 6.13).

Métriques temporelles Les mêmes ANOVAs à deux facteurs à mesures répétées appliquées aux métriques ClearD et ClearMax n'ont pas révélé d'effets significatifs de nos facteurs expérimentaux.

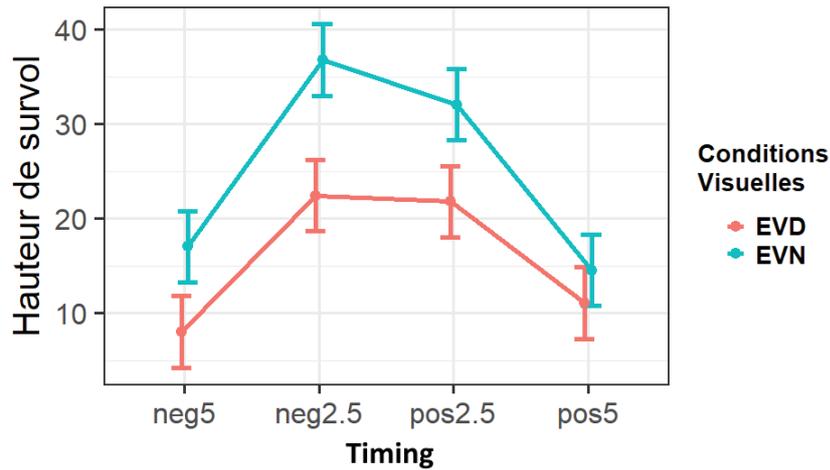


FIGURE 6.9 – Trajectoire de survol de l'obstacle +/-2.5s et +/-5s autour de l'obstacle. La ligne bleue représente l'enveloppe de survol pour la condition Visuelle EVN, la ligne rouge pour la condition EVD.

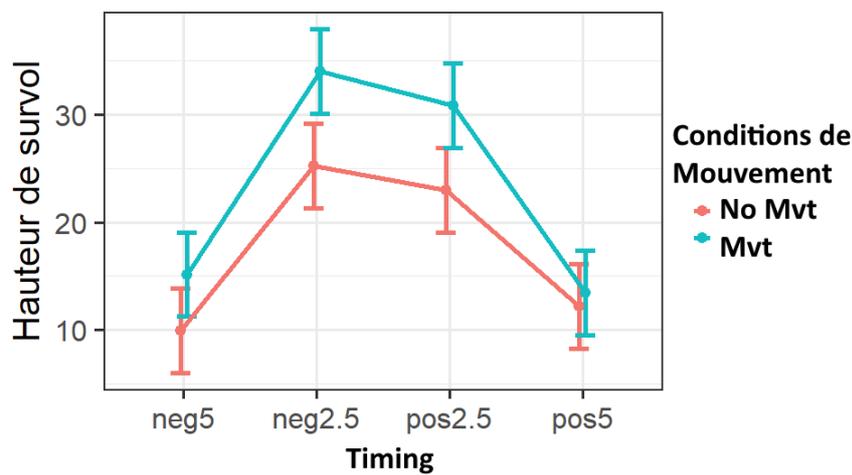


FIGURE 6.10 – Trajectoire de survol de l'obstacle +/-2.5s et +/-5s autour de l'obstacle. La ligne rouge représente l'enveloppe de survol en l'absence de mouvements cabine, la ligne bleue pour la présence de mouvements cabine.

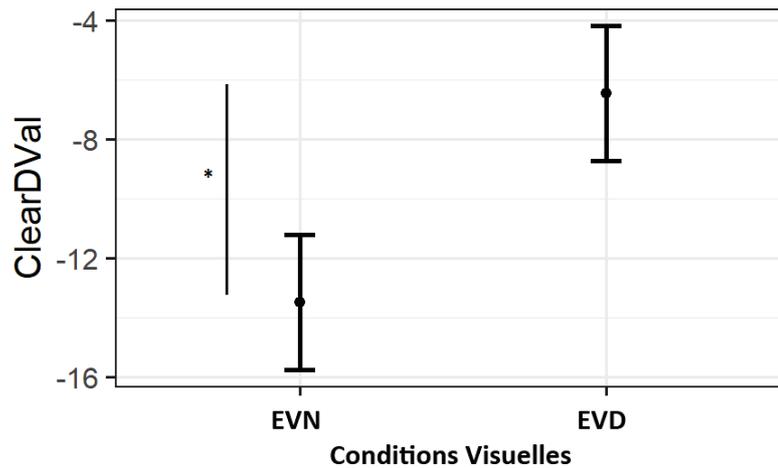


FIGURE 6.11 – Amplitude de survol de l'obstacle au moment de la détection de l'obstacle en fonction des deux conditions Visuelles (EVN, EVD).

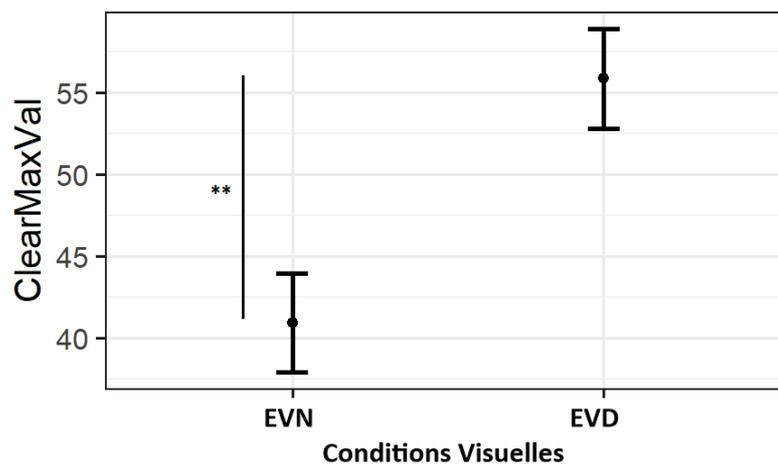


FIGURE 6.12 – Amplitude de survol maximal de l'obstacle en fonction de la condition Visuelle (EVN, EVD).

6.3 Discussion

6.3.1 Expérimentation "Contrôleur"

L'objectif de cette quatrième et dernière expérimentation était d'étudier l'impact d'un environnement visuo-vestibulaire sur le contrôle d'une trajectoire de vol en situation de VBH simulé avec des pilotes experts (dans la même idée que le chapitre 4). Cette étude différait de l'expérimentation contrôleur au laboratoire EuroMov sur trois points principaux : la participation de pilotes militaires experts, l'utilisation

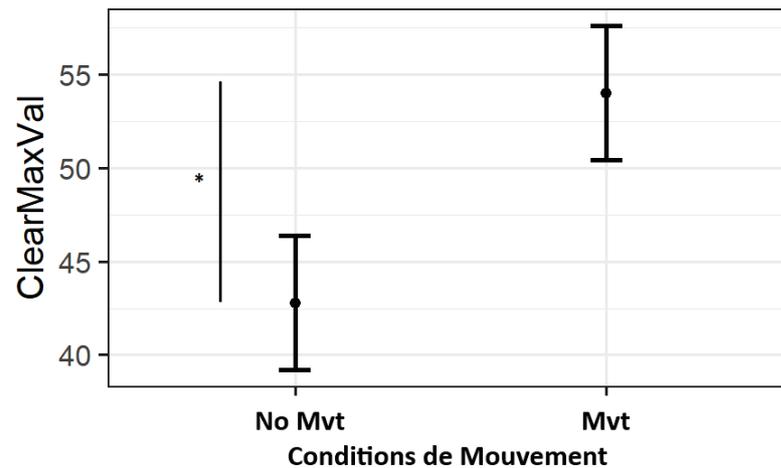


FIGURE 6.13 – Amplitude de survol maximal de l’obstacle en fonction de la condition de mouvement (Mvt et No Mvt).

d’un simulateur à base mobile pouvant recréer avec un haut taux de fidélité les variations gravito-inertielles et l’utilisation d’un modèle hélicoptère réaliste. La qualité de l’environnement visuel et le type de mouvement de la cabine ont encore une fois été manipulés et leurs effets analysés sur les performances et le comportement des pilotes.

Dans la continuité des expérimentations menées au laboratoire EuroMov, les informations visuelles et gravito-inertielles jouaient un rôle important sur le contrôle de la trajectoire de vol des participants.

De manière générale, l’écart entre la trajectoire des participants et la trajectoire cible augmentait dans la condition visuelle dégradée et en présence de mouvements cabine. Bien que cette dégradation en condition EVD était attendue, l’augmentation de l’erreur en présence de mouvement ne l’était pas. Celle-ci pourrait s’expliquer de deux manières différentes, la première étant que le prélèvement des informations générées par les variations du champ gravito-inertiel impacte le contrôle du paramètre de hauteur-sol de sorte que les participants adoptent un comportement plus prudent et se traduise par une hauteur de vol plus élevée; la deuxième étant que les participants ayant subis des entraînements poussés en simulateurs à base fixe (sans mouvements cabines ou avec des illusions d’accélérations linéaires générées avec des rotations), la présence de variations GI fidèles déroge de leurs habitudes sur simulateur et impacte les performances. La tâche a néanmoins été bien réalisée,

quelles que soit les conditions de mouvement comme le montre la figure 6.3. En effet, l'augmentation significative de l'erreur lors du cycle C1 provient du survol de l'obstacle, augmentant forcément l'écart à la cible, puis les participants reviennent à une erreur sensiblement proche de l'erreur de début d'essai.

Du point de vue des vitesses, on peut de nouveau voir un effet du facteur Visuel sur la vitesse verticale (RoC), celle-ci étant significativement plus élevée en EVD qu'en EVN, probablement issu de la détection plus tardive du relief du terrain dû à la mauvaise visibilité. Néanmoins, la figure 6.5 tend à nous montrer que les participants arrivaient à stabiliser leur vitesse de vol au cours des essais.

Enfin, la détection et le survol de l'obstacle rencontré par les participant ont également été analysés. De manière globale, les participants tendaient à survoler l'obstacle avec plus de prudence (plus de hauteur) en condition EVD qu'en condition EVN (6.10) et de même en présence de mouvements cabines par rapport à leur absence (6.11). On peut cependant remarquer que lors de ce survol de l'obstacle, les participants avaient tendance à voler beaucoup plus haut au dessus de l'obstacle en condition Mvt - EVD qu'en condition EVN, différence de résultats n'étant pas observable en l'absence de mouvements cabine.

Chapitre 7

Discussion

Dans un souci de simplicité et de compréhension, les deux premières expérimentations menées au laboratoire EuroMov seront respectivement appelées ici "EuroMov Observateur" et "EuroMov contrôleur", tandis que les deux expérimentations menées au laboratoire Ames de la NASA seront appelées "NASA Observateur" et "NASA Contrôleur".

La manoeuvre du Vol à Basse Hauteur (VBH) implique de riches variations des champs optiques et gravito-inertiels (GI). Au cours de ces expérimentations, nous avons montré que les interactions visuo-vestibulaires avaient un impact significatif à la fois sur la perception et sur le contrôle actif de la hauteur de vol, particulièrement dans les situations de vision dégradée. L'objectif de cette thèse était d'examiner l'impact des contributions optiques et gravito-inertielles lors d'un scénario de suivi de terrain en Vol à Basse Hauteur (VBH) simulé avec des pilotes novices et experts.

7.1 Environnement mono-modal vs. multimodal

La première hypothèse posée au cours de cette thèse était que la précision et la rapidité d'exécution des mécanismes de perception-action des participants doivent s'améliorer dans un environnement multimodal (ici comprenant des stimulations optiques et gravito-inertielles) par rapport à un environnement uniquement visuel. Les résultats obtenus au cours des deux premières expérimentations menées au laboratoire EuroMov tendent à confirmer cette hypothèse. En effet, comme attendu, les participants de ces expérimentations avaient de meilleures performances et un

comportement plus stable lorsqu'ils étaient en présence d'un environnement visuo-vestibulaire congruent comparé à un environnement purement visuel ((WRIGHT, DIZIO et LACKNER, 2005), (FETSCH, DEANGELIS et D. E. ANGELAKI, 2010), (GIBSON, 1950)). Pendant l'expérimentation "EuroMov Observateur" (voir chapitre III), quelle que soit la condition Visuelle (EVN, EVD), l'absence de variations dans le champ gravito-inertiel (i.e. condition No Mvt) menait à l'accroissement du temps de réaction, en comparaison avec les conditions de mouvement cabine (i.e. Mvt et Mvt Bruité, voir figure 3.7)). La stabilité des mouvements de contrôle du joystick, quant à elle, était optimale lorsque l'environnement visuel était clair (EVN) ou lorsque la dégradation de l'environnement était compensée par des variations cohérentes du champ gravito-inertiel (condition EVD - Mvt, voir figure 3.8). Dans la continuité de ces résultats, on remarque dans l'expérimentation "EuroMov contrôleur" que les meilleures performances en suivi de trajectoire (corrAcf) et en rapidité de réponse de contrôle (corrLag) étaient atteintes quand la qualité de l'environnement visuel était optimale (condition EVN, tant que les variations du champ GI n'étaient pas bruitées) ou bien dans la condition où des variations gravito-inertielles congruentes avec la tâche compensait la dégradation des informations optiques (i.e. condition EVD - Mvt) (voir figure 4.6), comparées aux autres combinaisons environnementales optique-GI. Les temps de réponse, ainsi que les estimations de hauteur, diminuaient de manière cohérente avec la dégradation des informations gravito-inertielles, les conditions Mvt Bruité - EVN et Mvt - EVD permettant de bonnes estimations de la hauteur-sol de vol et des réponses de contrôle lentes, la condition Mvt Bruité - EVD entraînant quant à elle de mauvaises estimations de hauteur-sol et des réponses de contrôle rapides. Pour résumer, dans ce premier lot expérimental, la présence d'un environnement visuel optimal était suffisante pour avoir un contrôle stable du joystick dans l'expérimentation "EuroMov observateur", mais l'ajout de variations GI cohérentes permettait d'améliorer les temps de réaction et de compenser, si besoin, la dégradation des informations visuelles. Ces résultats sont cohérents avec la littérature, comme par exemple (WRIGHT, DIZIO et LACKNER, 2005), affirmant que lorsque la scène visuelle présentée est une représentation précise de l'environnement, l'information optique est prédominante sur l'information gravito-inertielle dans la détermination de sa position dans l'espace. Dans la continuité de ces résultats, l'expérimentation "EuroMov contrôleur" nous montre d'une manière légèrement différente, mais toujours en accord avec la littérature, qu'un environnement

visuel optimal était suffisant pour une perception et une réalisation efficace de la tâche, l'ajout de variations GI aidant principalement à compenser la possible dégradation des informations optiques.

On retrouve en partie ces résultats dans les deux expérimentations menées à la NASA. En effet, au cours de l'expérimentation "NASA observateur", la précision des pilotes experts variait en fonction de la présence ou non de mouvements cabine, l'apport positif des mouvements cabine apparaissant principalement lorsque l'environnement visuel était dégradé. On constate sur la figure 5.6 une amélioration significative de la performance des pilotes en condition Mvt - EVD par rapport à la condition No Mvt - EVD, tandis que la présence d'un environnement visuel non dégradé (condition EVN) suffisait pour atteindre de bonnes performances, quelle que soit la condition de mouvement cabine. Cependant, alors que les performances des participants variaient en fonction de la présence ou non de mouvements cabines, la rapidité de réponse à la perturbation n'était pas affectée par les conditions expérimentales. Dans l'expérimentation "NASA contrôleur", les performances des pilotes variaient également en fonction de la présence ou non de variations gravito-inertielles. Néanmoins dans ce cas-ci, les résultats obtenus ne montraient pas d'impact positif sur les performances et les temps de réponses des participants. En effet, bien que comme dans les trois précédentes expérimentations les conditions visuelles avaient l'impact attendu (dégradation des performances en condition EVD par rapport à EVN, voir par exemple la figure 6.2), les conditions de Mouvement cabine ne compensaient pas cette fois-ci la dégradation des informations optiques, les participants ayant tendance à voler plus haut en présence de mouvements cabine (condition Mvt) qu'en leur absence (condition No Mvt). Cette augmentation de la hauteur se retrouvant tant dans la hauteur-sol moyenne de vol au cours des essais (encore une fois, voir figure 6.2) que sur le survol de l'obstacle (voir figures 6.6 et 6.10). Pour finir, comme pour l'expérimentation "NASA observateur", bien que les performances en vol des participants aient varié en fonction des conditions expérimentales, les temps de réponse (détection de l'obstacle) n'étaient pas impactés par ces conditions expérimentales. Ainsi, à défaut de montrer une amélioration des performances en environnement multimodal, l'impact significatif de la condition Mvt de l'expérimentation "NASA contrôleur" nous apporte là encore la preuve de la nécessité de considérer la multimodalité du contexte du VBH.

Ces résultats sont importants pour le monde de la simulation de vol et de la fidélité des systèmes de simulation mobile, car ils démontrent qu'un environnement simulé uniquement visuel pourrait ne pas être suffisant pour simuler un scénario de VBH efficace impliquant un comportement réaliste des pilotes. Les réponses de pilotage actives et passives étaient généralement plus rapides et précises pour un environnement congruent visuo-vestibulaire que pour un environnement uniquement visuel. Ainsi, les stimulations visuo-vestibulaires sont nécessaires pour étudier un comportement de pilotage naturel durant un VBH. On peut par exemple pointer les variations des temps de réaction des participants naïfs (expérimentations EuroMov) à une perturbation donnée. Dans l'expérimentation "EuroMov Observateur", les temps de réaction des participants étaient plus longs (d'environ deux secondes) quand les variations gravito-inertielles étaient absentes par rapport au moment où elles étaient présentes, et ce quelle que soit la condition visuelle (EVN, EVD). Dans des contextes critiques tel que le VBH, deux secondes peuvent faire la différence entre l'évitement d'un obstacle et la destruction de l'hélicoptère. Dans l'expérimentation "EuroMov contrôleur", le délai trouvé avec le paramètre $corrLag$, quand les informations gravito-inertielles étaient présentes, pouvait conduire à des problèmes identiques. Les simulateurs à base mobile typiques ont des limites physiques ((STRATULAT et al., 2011)) et un coût de production très élevé, raisons pour lesquelles les simulateurs d'entraînement sont principalement composés de plateformes fixes recréant des environnements visuels à haute fidélité mais avec des interactions visuo-vestibulaires cohérentes très limitées ((STOFFREGEN, BARDY et al., 2003)). Ainsi, même s'il est techniquement plus facile de simuler un environnement visuel qu'un environnement visuo-vestibulaire, il est nécessaire d'utiliser des stimulations visuo-vestibulaires congruentes pour reproduire un comportement naturel ((FLACH et R. WARREN, 1995)).

7.2 Impact du bruit gravito-inertiel - Expérimentations EuroMov

Lors de la réalisation des expérimentations menées à EuroMov, nous avons supposé le possible impact négatif de la dégradation des informations optiques et gravito-inertielles sur les performances des participants. Il a été montré que le bruit optique

et le bruit gravito-inertiel (conditions EVD et Mvt Bruité) dégradait les performances différemment dans les tâches "Observateur" et "Contrôleur". En effet, durant l'expérimentation "Observateur", la dégradation de l'information optique (condition EVD) impactait plus la performance que la dégradation des informations gravito-inertielles (vibrations de la cabine, voir figures 3.7 et 3.8). La condition EVD impliquait des réponses en hauteur plus lentes et moins précises, tandis que le bruit gravito-inertiel ne diminuait pas significativement le temps de réponse, ni les estimations en hauteur, au travers des conditions. Cependant, dans le cadre de l'expérimentation "Contrôleur", le bruit vibrationnel (GI) ajouté impactait plus négativement (par exemple figure 4.5) les performances (métrique DFT) et le comportement (valeur moyenne du DIMSS, corrLag), que la condition visuelle dégradée (EVD). En effet, de bonnes performances étaient atteignables quelle que soit la qualité de l'information visuelle. Ajouter des variations gravito-inertielles non cohérentes (condition Mvt Bruité) menait à l'augmentation du délai entre les deux trajectoires (corrLag), l'apparition d'un important biais dans la trajectoire suivie (augmentation significative de la métrique DFT) et impactait négativement le comportement du joystick (augmentation significative de la valeur moyenne du DIMSS, comportement moins stable). Les études dans la littérature de performance avec un bruit vibrationnel étaient conflictuels entre eux (les études montrant soit un impact négatif, soit une absence d'impact du bruit sur les performances). Ces différences observées dans la littérature ont été mis en évidence, entre autre, par (GAWRON, 1982) dans une étude générale sur l'impact du bruit sur des réalisations de différentes tâches en fonction de l'intensité du bruit, de type de tâche, de la complexité et des "connaissances a priori" des participants. Les résultats obtenus dans cette étude sont en partie cohérents avec ceux que nous avons obtenu au laboratoire EuroMov, à savoir un effet des vibrations sur les performances variant en fonction du type de tâche à réaliser. Les différences entre les études dans la littérature pourraient donc être expliquées comme issues des différentes tâches étudiées et de l'hétérogénéité des expérimentations menées (différentes intensités de bruit, différentes connaissances à priori, ...). Les expérimentations menées par Stave ((STAVE, 1979)) sur les décollages et les atterrissages, par exemple, étaient une combinaison de tâches de contrôleur et d'observateur dans un environnement visuo-vestibulaire, utilisant un bruit vibrationnel de fréquence entre 6 et 12Hz. L'amplitude maximale du bruit vibrationnel utilisé

dans ces expérimentations ne représentait que la moitié de l'amplitude des vibrations que nous avons utilisées dans nos études. Ainsi, les différences de performance observées entre les deux expérimentations EuroMov provenaient d'une part de la différence de tâche à effectuer (tâche de comparaison cognitive vs. tâche de contrôle actif), et d'autre part du fait que le bruit vibrationnel était d'une fréquence suffisamment basse pour perturber le moins possible les patterns de perception-action de contrôle et d'observation.

7.3 Observateur vs. Contrôleur

En plus de l'étude de l'impact d'un environnement multimodal et de l'impact de la dégradation des informations gravito-inertielles, les résultats des expérimentations menées à EuroMov tendent à montrer que les tâches de contrôleur et d'observateur influencent les mécanismes de perception dans un environnement donné. Comme mentionné précédemment, l'impact des stimuli optiques et gravito-inertiels différait légèrement en fonction de la tâche à accomplir pour chacun des deux lots d'expérimentations. Trois points principaux sont apparus au cours des expérimentations menées avec les participants naïfs au laboratoire EuroMov. D'une part, la condition visuelle non dégradée sans mouvements cabine (EVN - No Mvt) était suffisante pendant la tâche contrôleur pour produire une bonne performance, tandis que la tâche observateur nécessitait à la fois des stimulations optiques et gravito-inertielles (EVN - Mvt). D'autre part, les performances "passives" (tâche "Observateur") étaient plus sensibles au bruit optique (condition EVD) tandis que les performances "actives" (tâche "Contrôleur") étaient plus sensibles au bruit gravito-inertiel (condition Mvt Bruité). Au cours de la tâche "Contrôleur", l'absence de variations dans le champ gravito-inertiel (condition No Mvt) ne dégradait pas les performances des participants en comparaison des conditions de mouvement cabine (Mvt Bruité et Mvt), du moment que l'information optique spécifiait efficacement l'environnement (condition EVN). Cela supporte le fait que, quand les informations optiques en environnement uniquement visuel ne sont pas dégradées, la perception de l'altitude est précise et similaire à la perception en environnement visuo-vestibulaire congruent ((WINKEL et al., 2013)). Enfin, des différences entre les performances de contrôleur

et d'observateur en fonction du type de bruit (optique/GI) ont été trouvées. La commande motrice utilisée pour contrôler le joystick ((CULLEN, 2019)) était vraisemblablement moins bruitée durant la tâche observateur que durant la tâche contrôleur, car la commande moteur dans la tâche observateur reposait largement sur des comparaisons cognitives, c'est-à-dire sur des mécanismes d'intégration de plus haut niveau d'abstraction que le contrôle direct de la trajectoire de vol. En outre, les participants répondaient plus rapidement dans la tâche contrôleur (environ 0.01s) que dans la tâche observateur (environ 2.5s). Ainsi, nous pouvons suggérer que plus le participant doit répondre rapidement à un évènement, plus il est affecté par la dégradation des informations sensorielles. De plus, la différence d'impact des conditions expérimentales entre les deux tâches tend à démontrer que les participants prélevaient dans l'environnement des informations différemment en fonction de l'action à réaliser.

Les pilotes experts (expérimentations NASA) avaient néanmoins une interaction avec leur environnement différente de celle des participants naïfs. En effet, bien que l'on retrouve le même type de résultats pour l'expérimentation "NASA observateur" que pour les deux expérimentations EuroMov, à savoir que la présence d'informations optiques non dégradées suffisait pour une bonne perception de l'environnement et qu'à défaut (condition EVD) l'ajout de variations gravito-inertielles permettait de compenser les informations dégradées, l'expérimentation "NASA contrôleur" apporte d'autres résultats. Alors que l'apport d'informations gravito-inertielles améliorait les performances et le comportement dans les précédentes expérimentations, les pilotes experts avaient tendance à voler significativement plus haut que la trajectoire cible en présence de ces informations GI. Plus précisément, on observe une disparité dans le rapport à ces informations GI en fonction de la tâche que les pilotes experts devaient accomplir (une nette amélioration des performances en cas EVD lors de la tâche observateur et une possible dégradation des performances lors de la tâche contrôleur).

Ainsi, dans l'idée de l'étude menée par (C. E. SCHROEDER et al., 2010), des différences d'impact des conditions expérimentales ont été trouvées entre les deux tâches à réaliser (observateur vs. contrôleur). Ces différences peuvent s'expliquer par l'utilisation de mécanismes de perceptions adaptés à la tâche en cours. Lors de la tâche d'observateur, les pilotes se basent sur des processus à haut niveau d'abstraction de comparaisons cognitives (même processus cognitif que celui utilisé, par exemple, au

cours de l'étude de (GRAY et al., 2008)), tandis que notre tâche contrôleur reposait sur des mécanismes actifs de plus bas niveau, de perception et de contrôle direct de la trajectoire de vol.

7.4 Naïfs vs. Experts

Comme expliqué succinctement précédemment, d'importantes différences ont été trouvées entre les expérimentations avec les pilotes naïfs (Laboratoire EuroMov) et les expérimentations avec les pilotes experts (NASA). Premièrement, les résultats obtenus lors des expérimentations "EuroMov observateur" et "NASA observateur" diffèrent en partie. En effet, les pilotes naïfs avaient toujours tendance à voir leur temps de réaction à la perturbation s'améliorer en présence de mouvements cabine, mais sans impact sur leurs performances en elles-mêmes (paramètre HR). De leur côté, les pilotes experts voyaient leurs performances (paramètre MBE) s'améliorer en présence de mouvements cabine uniquement lorsque les informations optiques ne spécifiaient pas bien l'environnement (condition EVD), tandis que leur temps de réaction restait globalement inchangé. Ainsi, alors que les performances des pilotes naïfs nécessitaient un environnement visuo-vestibulaire pour être optimal, les pilotes experts n'avaient besoin que d'être en condition où l'environnement optique spécifiait efficacement l'environnement (condition EVN). Cela peut s'expliquer par les entraînements en simulateur effectués par les pilotes militaires au cours de leur formation, leur permettant d'atteindre sans difficulté des performances optimales avec un minimum de stimuli.

Dans un autre ordre d'idée, les expérimentations "EuroMov contrôleur" et "NASA contrôleur" mettent également en évidence des différences de mécanismes de perception-action entre novices et experts. Les participants naïfs de l'expérimentation "EuroMov contrôleur", en mettant de côté la question du bruit gravito-inertiel, obtenaient le comportement le plus stable avec le meilleur temps de réaction (corrLag) dans les conditions où le visuel spécifiait efficacement l'environnement (condition EVN, quelle que soit la condition de mouvement), et dans la condition où les informations optiques étaient dégradées et qu'on rajoutait des variations dans le champ gravito-inertiel (condition EVD - Mvt), l'information gravito-inertielle aidant alors à compenser la dégradation de ces informations visuelles. Les pilotes experts de l'expérimentation "NASA contrôleur" avaient quant à eux des résultats sensiblement

opposés à ceux de l'expérimentation menée à EuroMov. En effet, alors que comme attendu la dégradation des informations optiques affectait négativement les performances des pilotes experts, l'ajout de variations gravito-inertielles cohérentes avec la tâche (condition Mvt) augmentait significativement la valeur de leur MBE. Plusieurs raisons peuvent expliquer ces différences de résultats entre les pilotes experts et novices. La première est dans la continuité de la raison donnée précédemment pour les différences observées lors de la tâche observateur et concerne le possible effet d'apprentissage des formations subies par les pilotes militaires au cours de leur entraînement. En effet, il a été montré que le nombre d'heures de vols (réel et simulateur) a un impact sur les mécanismes et stratégies de perception de l'environnement utilisés par les pilotes ((YANG et al., 2013)). Bien que considérés comme pilotes "experts", les participants des expérimentations menées à la NASA avaient un nombre d'heures de vol, ne serait-ce qu'en simulateur, variant de 100 à 1000h. Il est possible qu'en étudiant les résultats des expérimentations NASA de manière individuelle, la transition des résultats obtenus avec les participants naïfs d'EuroMov soit plus progressive que celle observée actuellement dans les moyennes (l'écart de résultats obtenus, impact mélioratif vs. impact négatif) et soit issue de phénomènes d'apprentissage. D'autre part, ces différences peuvent également s'expliquer du fait que deux simulateurs différents ont été utilisés pour générer les variations gravito-inertielles dans les deux expérimentations. Au laboratoire EuroMov, le simulateur iMose dispose d'une amplitude de mouvement verticale de 3 mètres, rendant ainsi nécessaire d'utiliser un ratio de 1 :4 entre les variations de hauteur dans l'environnement virtuel et les variations de hauteur réelles de la cabine du simulateur. De l'autre côté, le Vertical Motion Simulator (VMS) utilisé au cours des expérimentations menées au laboratoire Ames de la NASA dispose d'une amplitude verticale de mouvement d'environ 20 mètres, permettant une reproduction par le simulateur des mouvements dans l'environnement virtuel avec un ratio de 1 :1. Cette différence de ratio de reproduction des variations du champ gravito-inertiel, et donc cette forte différence de fidélité des simulations effectuées, peut expliquer en partie les résultats obtenus.

7.5 Analyse du DIMSS

La variabilité des mouvements joystick de report de l'altitude a été analysée lors des expérimentations menées au laboratoire EuroMov en utilisant la métrique du DIMSS. Il a été montré que la mesure comportementale qu'est le DIMSS ((ROSCOE et WILKINSON, 2002)) différenciait le type de tâche en cours d'exécution. Cette mesure a montré que la manipulation du joystick était différente entre les expérimentations "Observateur" et "Contrôleur" menées au laboratoire EuroMov, l'amplitude de StdJ étant quatre fois supérieure dans la seconde par rapport à la première, et le NCR, nombre d'inversions de contrôle avec le joystick, était cinq fois inférieur dans la première par rapport à la deuxième. L'utilisation de fenêtres glissantes dans le calcul du DIMSS permet de capturer les différences dans les temps de réponse causées par les influences optiques et gravito inertielles, représentées par le temps de réaction dans l'expérimentation "Observateur" et par le coefficient de délai dans l'expérimentation "Contrôleur", mais ne reflétait pas précisément l'amplitude des mouvements joystick dans des situations de perception-action continues (expérimentation "Contrôleur"). La métrique du DIMSS était identique aux résultats temporels observés dans chaque expérimentation menée au laboratoire EuroMov, où les réponses rapides correspondaient à des mouvements stables ou à faible variabilité du joystick. De plus, en accord avec les précédents résultats obtenus avec le DIMSS (e.g. (JENNINGS et al., 2005) au cours d'une étude sur la charge de travail), le comportement des pilotes en situation environnementale dégradée était difficile à décrire précisément. Par exemple, en condition visuelle dégradée (dans chacune des expérimentations menées au laboratoire EuroMov), la métrique du DIMSS a montré que les participants avaient un contrôle à faible variabilité similaire, à la fois dans les conditions Mvt et Mvt bruité. Néanmoins, des mouvements similaires à faible variabilité n'impliquent pas forcément les mêmes performances. Alors qu'en condition de contrôle actif avec mouvements bruités la réponse des participants était peu précise, la condition avec mouvement congruent (pour les deux expérimentations) produisait des réponses précises. Les situations environnementales dégradées impliquaient vraisemblablement des réponses rapides mais peu précises. Nous avons calculé les composantes d'amplitude et de fréquence du DIMSS séparément. Dans l'expérimentation "Contrôleur", nous avons montré que la décomposition du DIMSS en ses deux composantes principales, StdJ et NCR, entraînait des valeurs significativement plus

faibles de StdJ en condition Mvt Bruité par rapport à la condition Mvt, suggérant que le contrôle du mouvement était plus abrupt dans la première condition. Ainsi le DIMSS caractérise le comportement temporel global, mais a besoin d'être associé à la performance de tâche dans le but de mieux décrire les réponses comportementales.

7.6 Fidélité des simulateurs

Finalement, les résultats obtenus lors de ces expérimentations ont également des conséquences pour la question de la fidélité des simulations. Comme nous l'avons vu précédemment, les simulateurs de mouvement ont des limitations physiques et un fort coup de production, raison pour laquelle la plupart des simulateurs d'entraînement et expérimentaux sont composés de plate-formes à base fixe, comme les simulateurs hexapodes (e.g. (PADFIELD, LEE et BRADLEY, 2003)), les simulateurs centrifugeuse (e.g. ()) et les simulateurs "chaise tournante" (en anglais "Rotating chair", e.g. (FOUQUE et al., 1999)). Ils permettent de recréer des environnements avec un haut niveau de fidélité visuelle mais avec des interactions visuo-vestibulaire limités (car devant jouer sur l'effet du "Tilt coordination" pour recréer des accélérations linéaires). L'une des principales raisons de ces limitations, d'après la littérature, est le seuil de perception de mouvements angulaires du système vestibulaire (e.g. (ASADI et al., 2014)). Différentes études, comme celle de (STRATULAT et al., 2011), essayent de contourner ce problème en utilisant des simulateurs à base mobile simple (dans l'étude donnée en exemple, un simulateur hexapode étant situé sur une plate-forme X-Y mobile) et en combinant accélérations linéaires réelles faibles et rotations pour recréer des accélérations linéaires de forte amplitude et/ou de longue durée. Ces études cherchent à améliorer le réalisme de la simulation par des stimulations vestibulaires en cherchant le meilleur ratio accélération linéaire / rotation améliorant les performances des individus au cours d'une tâche (ou à défaut les perturbant le moins possible). Néanmoins, nos expérimentations menées avec le simulateur VMS au laboratoire Ames de la NASA ne vont pas complètement dans le sens de ces études. En effet, alors que les résultats de l'expérimentation "NASA observateur" allaient dans le sens de la littérature, en montrant l'amélioration des performances en présence de variations gravito-inertielles cohérentes et fidèles, les performances

des pilotes lors de l'expérimentation "NASA contrôleur" ont été quant à elles dégradées en présence de telles variations GI. Cela pourrait laisser sous entendre que la présence d'un environnement multimodal peut donner lieu à un comportement plus réaliste (e.g. plus prudent dans une manoeuvre d'évitement d'obstacle) mais ne soit pas nécessairement accompagné d'une amélioration de la performance dans la réalisation d'une tâche. L'amélioration des performances des participants observée au cours des expérimentations menées à EuroMov pourrait quant à elle s'expliquer par la présence de variations GI cohérentes (accélération linéaire simulée avec une accélération linéaire et non une rotation) mais moins réaliste du fait d'amplitudes réduites (ratio de 1 :4). Les simulateurs de mouvement sont utilisés dans un grand nombre de domaines, allant des jeux vidéo aux expérimentations sur la perception humaine. Alors que dans le domaine du loisir l'objectif est d'offrir des expériences d'environnement positives et aidant à réaliser une tâche spécifique (et ne nécessitant donc pas forcément un haut niveau de fidélité multimodal, comme dans le cas des expérimentations menées à EuroMov), les simulateurs utilisés dans un cadre scientifique se doivent de recréer des environnements multimodaux cohérents et réalistes (comme dans le cas des expérimentations menées à la NASA), l'objectif étant cette fois-ci de s'approcher des comportements naturels. L'étude de la perception et du contrôle du mouvement propre en vol nécessite donc l'utilisation de plate-formes de simulation à base mobile, pour pouvoir générer de vraies accélérations linéaires.

7.7 Limitations et perspectives de l'étude

Dans le but de simplifier cette étude multidisciplinaire, plusieurs points ont été gardés à une valeur minimale ou bien n'ont pas été traités.

D'une part, comme précisé précédemment, les deux lots d'expérimentations menées (pilotes novices (laboratoire EuroMov) vs. pilotes experts (NASA)) différaient dans leur environnement simulé par leur degré de fidélité. Cette différence est intrinsèquement liée aux différents simulateurs utilisés et à leurs limites physiques. Pour pouvoir investiguer et comparer avec plus de précision les différences d'impact visuo-vestibulaire sur les performances et le comportement de différentes catégories de pilotes, l'utilisation d'un simulateur du type VMS (avec la possibilité de reproduire les variations réalistes gravito-inertielles en ratio 1 :1 dans un contexte de vol)

est nécessaire. Cependant l'accès à de tels simulateurs est très compliqué de par leur rareté et leur coût d'utilisation. En outre, nous ne savons toujours pas si les différences de résultats observés entre les expérimentations menées à EuroMov et celles menées à la NASA proviennent simplement de la différence d'expertise ou bien des environnements simulés (ratio de variations GI cabine/virtuel en 1 :4 à EuroMov et 1 :1 à la NASA). Une étude plus approfondie sur l'impact de l'intensité des champs gravito-inertiel simulés serait ainsi nécessaire.

D'autre part, le modèle hélicoptère utilisé pour contrôler les mouvements verticaux avec le joystick lors des expérimentations menées au laboratoire EuroMov était une simple fonction de transfert linéaire du second ordre et manquait d'une dynamique de réponse et d'une sensibilité réaliste. La dynamique de mouvement de l'hélicoptère simulé à laquelle les participants naïfs ont été soumis pourrait être complexifiée, cependant cela augmenterait considérablement la complexité de la tâche et limiterait le transfert des résultats pour les participants naïfs. Par exemple, les expérimentations menées à EuroMov n'impliquaient un déplacement dans l'espace qu'en deux dimensions (déplacement sagittal et vertical), sans possibilité de rotation ou de déplacements latéral. Un vol réel implique des variations selon les 6 degrés de liberté. Augmenter le réalisme du déplacement augmenterait cependant également la complexité de la tâche et elle nécessiterait un certain niveau d'expertise de la part des participants pour être accomplie. Ainsi, de la même manière que précédemment, il pourrait être intéressant d'étudier l'impact du modèle hélicoptère présenté sur les performances des participants. Dans les expérimentations menées au cours de cette thèse, les participants novices et experts utilisaient chacun un type différent de modèle hélicoptère (modèle réaliste et complet pour les experts, modèle simplifié en deux dimensions pour les novices), du fait des différences d'expertise. Une possibilité pour étudier ce problème serait de créer un modèle hélicoptère un peu plus réaliste et complexe que celui utilisé à EuroMov, permettant par exemple de contrôler les mouvements d'un hélicoptère simplifié dans un environnement en trois dimensions, puis de créer les catégories novices et experts pour ce modèle donné (en demandant par exemple à différents groupes de participants de s'entraîner avec ce modèle un nombre de fois différents). Cette configuration permettrait à la fois de comparer facilement les résultats entre les différentes catégories d'experts, mais également de pouvoir observer de possibles mécanismes d'apprentissage.

Enfin, les expérimentations menées à la NASA n'avaient pas exactement le même

plan expérimental que celles réalisées au laboratoire EuroMov. En effet, les pilotes experts n'ont pas eu de conditions expérimentales où la modalité gravito-inertielle était dégradée, empêchant donc la comparaison de résultats avec l'impact d'une telle dégradation sur les pilotes naïfs. En outre, seul un type de bruit optique et de vibration GI a été testé. Différentes fonctions optiques et GI bruitées pourraient être utilisées, avec des fréquences et des amplitudes différentes pour pouvoir tester l'impact de multiples bruits sur la performance, résultats qui pourraient être croisés avec le niveau d'expertise des participants.

7.8 Conclusion

Pour résumer, les résultats obtenus au cours de cette étude confirment les tendances observées dans le domaine de la performance en pilotage. Ils ancrent les découvertes précédentes dans un contexte généralisé sur les comparaisons entre perception et contrôle pour différentes combinaisons de stimulations gravito-inertielle et optique, nous aidant à mieux comprendre quelles combinaisons sont plus ou moins bénéfiques pour la performance humaine. Ainsi, dans le cas spécifique du Vol à basse Hauteur, trois résultats principaux ont été trouvés au cours de cette thèse. D'une part, comme on pouvait s'y attendre au regard de la littérature, nous avons démontré que la présence de variations gravito-inertielles impactait les performances d'observation et de contrôle du mouvement propre en vol. Même si cet impact reste encore à préciser du fait des différences entre les protocoles expérimentaux utilisés à EuroMov et à la NASA, il reste néanmoins irréfutable que le comportement et les performances des pilotes dépendent de l'environnement dans lequel ils évoluent. Ainsi, il paraît nécessaire de considérer des environnements multimodaux dans les processus d'entraînement des pilotes et d'étude des mécanismes de perception-action.

Dans la continuité de ce résultat, nous avons également montré qu'un environnement visuo-vestibulaire réaliste ne signifiait pas forcément un environnement améliorant les performances (voir expérimentation "NASA contrôleur"). Cela remet ainsi en question l'appréciation de la fidélité des simulateurs dans la littérature. En effet, même s'il peut sembler logique de créer un environnement agréable et aidant à la

réalisation d'une tâche spécifique dans le domaine du loisir, la recherche expérimentale sur la perception humaine se doit quant à elle d'étudier des environnements visuo-vestibulaires réalistes et impliquant des comportements pilotes naturels.

Enfin, nous avons montré que les tâches d'observateur et de contrôleur impliquaient des mécanismes de perception de l'environnement différents. Alors que la tâche observateur repose sur des mécanismes à haut niveau d'abstraction de comparaison cognitive, la tâche de contrôleur repose sur un contrôle direct et en temps réel du mouvement propre et de la trajectoire de vol. Ainsi, la dégradation d'informations environnementales (nuit, brouillard, ...) impacte différemment les performances et le comportement des pilotes. La différence de mécanismes employés entraîne le fait qu'un contexte environnemental dégradé peut impacter très différemment les performances des pilotes en fonction de la tâche à réaliser (comme on l'observait dans les différences d'impact de bruit GI dans les expérimentations EuroMov).

Ces résultats sont importants pour le monde de la simulation, les performances des pilotes dépendant de l'environnement simulé, de son niveau de fidélité et de la tâche à réaliser (et donc des mécanismes perceptifs mis en jeu). La simulation d'environnements multimodaux cohérents est nécessaire pour l'observation de comportements réalistes de la part des pilotes et pour une meilleure confrontation à la réalité lors des entraînements en vol simulé.

Annexe A

Tableau récapitulatif - Observateur

EuroMov

Paramètre	
Hauteur des arbres (tous les mêmes)	5m
Diamètre du houppier des arbres	4m
Densité des arbres	500/km ²
Hauteur-sol initiale	12.5m (2.5 arbres) +/- random(0;1) * 1.25ft
Hauteur au dessus des arbres	7.5m
Phase 1	
Hauteur de la colline	12.5m
Longueur du plateau initial	260m (12.5s)
Longueur de la montée	52m (2.5s)
Phase 2	
Altitude des plateaux bas	0m
Altitude des plateaux hauts	25m
Longueur des plateaux	208m (10s)
Longueur des montées/descentes	104m (5s)
Amplitude et direction de la perturbation	+/- 5m , pente aléatoirement positive ou négative
Vitesse initiale (Variable indépendante)	75 et 125 km/h
Durée d'un essai	70s

Annexe B

Tableau récapitulatif - Contrôleur

EuroMov

Phase 2	
Altitude des plateaux bas	0m
Altitude des plateaux hauts	25m
Longueur des plateaux	208m (10s)
Longueur des montées/descentes	104m (5s)
Perturbation du relief	Survient 20s après le début de la phase 2, 30m
Vitesse initiale (Variable indépendante)	75 et 125 km/h
Durée d'un essai	90s

Annexe C

Tableau récapitulatif - Observateur

NASA

Paramètre	
Hauteur des arbres (tous les mêmes)	18ft (+/- 1ft)
Diamètre du houppier des arbres	15ft (+/- 1ft)
Densité des arbres	193/mile ²
Hauteur-sol initiale	45ft (2.5 arbres) +/- random(0;1) * 4.5ft
Hauteur au dessus des arbres	27 ft
Phase 1	
Hauteur de la colline	78.7ft
Longueur du plateau initial	843.9ft (9.1s)
Longueur de la montée, Angle d'attaque	168.8ft (1.8s), 25°
Phase 2	
Altitude des plateaux bas	0ft
Altitude des plateaux hauts	157.4ft
Longueur des plateaux	675.1ft (7.3s)
Longueur des montées/descentes, angle d'attaque	337.5ft (3.6s), 25°
Amplitude et direction de la perturbation, présentée aléatoirement entre 10 et 55s après le début de la phase 2	+/- 18ft (+/- 1ft), pente aléatoirement positive ou négative
Vitesse initiale (Variable indépendante)	55 knots
Longueur d'un essai	6413.67ft, 90s

Annexe D

Tableau récapitulatif - Contrôleur NASA

Paramètre	
Hauteur des arbres (tous les mêmes)	18ft (+/- 1ft)
Diamètre du houppier des arbres	15ft (+/- 1ft)
Densité des arbres	193/mile ²
Hauteur-sol initiale	45ft (2.5 arbres) +/- random(0;1) * 4.5ft
Hauteur au dessus des arbres	27 ft
Phase 1	
Hauteur de la colline	78.7ft
Longueur du plateau initial	843.9ft (9.1s)
Longueur de la montée, Angle d'attaque	168.8ft (1.8s), 25°
Phase 2	
Altitude des plateaux bas	0ft
Altitude des plateaux hauts	157.4ft
Longueur des plateaux	675.1ft (7.3s)
Longueur des montées/descentes, angle d'attaque	337.5ft (3.6s), 25°
Hauteur et position de la ligne électrique, présentée aléatoirement entre 10s et 55s après le début de la phase 2	55ft de haut
Amplitude et direction de la perturbation, présentée aléatoirement entre 10 et 55s après le début de la phase 2	+/- 18ft (+/- 1ft), pente aléatoirement positive ou négative
Vitesse initiale (Variable indépendante)	55 knots
Longueur d'un essai	6413.67ft, 90s

Bibliographie

- ANGELAKI, D. et K. CULLEN (2008). « Vestibular system : the many facets of a multimodal sense ». In : *Annu. Rev. Neurosci.* 31, p. 125-150.
- APONSO, B. L., S. D. BEARD et J. A. SCHROEDER (2009). « The NASA Ames Vertical Motion Simulator—A Facility Engineered for Realism ». In : *Proceedings of the royal aeronautical society spring flight simulation conference*, p. 4.
- ASADI, H. et al. (2014). « Adaptive translational cueing motion algorithm using fuzzy based tilt coordination ». In : *International Conference on Neural Information Processing*. Springer, p. 474-482.
- BELLMAN, T. et al. (2011). « The DLR Robot Motion Simulator ». In : *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation Shanghai* 18.
- BENSON, A. J. (1990). « Sensory functions and limitations of the vestibular system ». In : *Perception and control of self-motion*, p. 145-170.
- (1999). « Spatial disorientation-general aspects ». In : *Aviation medicine*, p. 419-436.
- BENSON, A. J., E. C. HUTT et S. F. BROWN (1989). « Thresholds for the perception of whole body angular movement about a vertical axis. » In : *Aviation, space, and environmental medicine*.
- BERTHIER, N. E. et al. (1996). « Visual Information and Object Size in the Control of Reaching ». In : *Journal of Motor Behaviour* 28.3, p. 187-197.
- BISDORFF, A. R. et al. (1996). « The perception of body verticality (subjective postural vertical) in peripheral and central vestibular disorders ». In : *Brain* 119.5, p. 1523-1534.
- BRITTEN, K. H. (2008). « Mechanisms of self-motion perception ». In : *Annu. Rev. Neurosci.* 31, p. 389-410.
- BRITTON, Z. et Q. ARSHAD (2019). « Vestibular and multi-sensory influences upon self-motion perception and the consequences for human behavior ». In : *Frontiers in neurology* 10, p. 63.
- CASNER, S. M., R. W. GEVEN et K. T. WILLIAMS (2013). « The effectiveness of airline pilot training for abnormal events ». In : *Human factors* 55.3, p. 477-485.

- CLARK, B. (1971). « Pilot reports of disorientation across 14 years of flight. » In :
- CLARK, G. A. (2007). « Helicopter handling qualities in degraded visual environments ». Thèse de doct. University of Liverpool.
- CULLEN, K. (2019). « Vestibular processing during natural self-motion : implication for perception and action ». In : *Nature Reviews Neurosciences* 20.6, p. 346-363.
- CUTTING, J. E. et P. M. VISHTON (1995). « Perceiving layout and knowing distances : The integration, relative potency, and contextual use of different information about depth ». In : *Perception of space and motion*. Elsevier, p. 69-117.
- DAY, B. L. et R. C. FITZPATRICK (1974). « The vestibular system ». In : *Current biology* 6, p. 3-154.
- DEANGELIS, G. C. et D. E. ANGELAKI (2012). « Visual-vestibular integration for self-motion perception ». In : *The neural bases of multisensory processes*. CRC Press/Taylor & Francis.
- DENQUIN, F et al. (2021). « Optical and gravito-inertial contributions to the perception and control of height in a simulated Low-Altitude flight context ». In : *Ergonomics* just-accepted, p. 1-30.
- DERAVET, N. et al. (2018). « Weighted integration of short-term memory and sensory signals in the oculomotor system ». In : *Journal of vision* 18.5, p. 16-16.
- DICHGANS, J. et T. BRANDT (1978). « Visual-vestibular interaction : Effects on self-motion perception and postural control ». In : *Perception*. Springer, p. 755-804.
- EWERTSEN, H. W. et H. B. NIELSEN (1971). « A comparative analysis of the Audio-visual, Auditive and Visual perception of Speech ». In : *Acta Oto-Laryngologica* 72.16, p. 201-205.
- FAJEN, R. B. (2005). « The scaling of information to action in visually guided braking ». In : *Journal of experimental psychology : human perception and performance* 31.5.
- FERRÈ, E. R., L. E. WALTHER et P. HAGGARD (2015). « Multisensory Interaction between Vestibular, Visual and Somatosensory Signals ». In : *PloS One* 10.4.
- FETSCH, C. R., G. C. DEANGELIS et D. E. ANGELAKI (2010). « Visual-vestibular cue integration for heading perception : application of optimal cue integration theory ». In : *European Journal of Neuroscience* 31.10, p. 1721-1729.
- FETSCH, C. R., A. H. TURNER et al. (2009). « Dynamic reweighting of visual and vestibular cues during self-motion perception ». In : *Journal of Neuroscience* 29.49, p. 15601-15612.

- FETTER, M. (2007). « Vestibulo-ocular reflex ». In : *Neuro-Ophthalmology*. T. 40. Karger Publishers, p. 35-51.
- FLACH, J. M., B. A. HAGEN et J. F. LARISH (1992). « Active regulation of altitude as a function of optical texture ». In : *Perception and Pyschophysics* 51.6, p. 557-568.
- FLACH, J. M. et R. WARREN (1995). « Low Altitude Flight ». In : *Local Applications of the Ecological Approach To Human-Machine Systems* 2, p. 65-103.
- FOUQUE, F. et al. (1999). « Action and intermodal information influence the perception of orientation ». In : *Ecological Psychology* 11.1, p. 1-43.
- GANIER, F., C. HOAREAU et J. TISSEAU (2014). « Evaluating of procedural learning transfer from a virtual environment to a real situation : a case study on tank maintenance training ». In : *Ergonomics* 57.6.
- GAWRON, V. J. (1982). « Performance effects of noise intensity, psychological set, and task type and complexity ». In : *Human factors* 24.2, p. 225-243.
- GIBB, R., R. GRAY et L. SCHARFF (2016). *Aviation visual perception : Research, misperception and mishaps*. Routledge.
- GIBSON, J. J. (1950). « The Perception of Visual Surfaces ». In : *American Journal of Psychology* 63.3.
- (1971). « The Information Available in Pictures ». In : *JSTOR*.
- (1986). « The ecological approach to visual perception ». In : *Erlbaum*.
- GIBSON, J. J., P. OLUM et F. ROSENBLATT (1955). « Parallax and perspective during aircraft landings ». In : *The American journal of psychology* 68.3, p. 372-385.
- GODFROY-COOPER, M. et al. (2020). « Influence of optical and gravito-inertial cues to height perception during supervisory control ». In : *Vertical Flight Society's-76th Annual forum & Technology Display*.
- GOODALE, M. A. et D. A. MILNER (1992). « Separate visual pathways for perception and action ». In :
- GRADWELL, D. et D. RAINFORD (2006). In : *Ernsting's aviation medicine* 4E 3.
- GRAY, R. (2007). « 2D vs. 3D Visual Cues for Altitude Maintenance in Low-Altitude Flight ». In : *Proceedings of the Human, Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 51.19, p. 1287-1290.
- GRAY, R. et al. (2008). « The Role of Visual Occlusion in Altitude Maintenance During Simulated Flight ». In : *Journal of Exprimental Psychology : Human Perception and Performance* 34.2, p. 475-488.

- GUEDRY, F. E. (2005). « Vestibular System Part 2 : Psychophysics, Applied Aspects and General Interpretations ». In : *Handbook of Sensory Physiology* 15.15, R583-R586.
- GUEDRY, F. E., J. M. LENTZ et R. M. JELL (1979). « Visual-vestibular interactions : I. Influence of peripheral vision on suppression of the vestibulo-ocular reflex and visual acuity ». In : *Aviat. Space Environ. Med.* 50.3.
- GUEDRY, F. E., J. M. LENTZ, R. M. JELL et J. W. NORMAN (1981). « Visual vestibular interactions : II. The directional component of visual background movement ». In : *Aviat. Space Environ. Med.* 52.5.
- HABER, R. N. et L. HABER (2003). « Perception and attention during low-altitude high-speed flight ». In : *Principles and practice of aviation psychology*, p. 21-68.
- HELMERT, J. R. et al. (2005). « Two visual systems and their eye movements : Evidence from static and dynamic scene perception ». In : *Proceedings of the Annual Meeting of the Cognitive Science Society*. T. 27. 27.
- HILLIS, J. M. et al. (2004). « Slant from texture and disparity cues : Optimal cue combination ». In : *Journal of vision* 4.12, p. 1-1.
- HOUIX, O. (2003). « Catégorisation auditive des sources sonores ». In : *Thesis*.
- HU, Y. et M. A. GOODALE (2000). « Grasping after a delay shifts size-scaling from absolute to relative metrics ». In : *Journal of Cognitive Neuroscience* 12.5, p. 856-868.
- ISRAEL, I. et al. (1997). « Spatial memory and path integration studied by self-driven passive linear displacement. I. Basic properties ». In : *Journal of neurophysiology* 77.6, p. 3180-3192.
- JENNINGS, S. et al. (2005). « Evaluation control activity as a measure of workload in flight test ». In : *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 49.1, p. 64-67.
- JOHNSON, W. W. et C. A. AWE (sept. 1994). « The selective use of functional optical variables in the control of forward speed ». In : *NASA TM 108849* 3.
- JURGENS, R. et W. BECKER (2011). « Human spatial orientation in non-stationary environments : relation between self-turning perception and detection of surround motion ». In : *Experimental Brain Research* 215, p. 327-344.
- KLEISS, J. A. et D. C. HUBBARD (1993). « Effects of three types of flight simulator visual scene detail on detection of altitude change ». In : *Human factors* 35.4, p. 653-671.

- KNOL, H. (2016). « The perception of size and its influence on motor control ». In : *Thesis*.
- KOENDERINK, J. J. et A. J. Van DOOM (1981). « Exterospécific component of the motion parallax field ». In : *JOSA* 71.8, p. 953-957.
- KOPPEN, M. G. M., A. C. ter HORST et W. P. MEDENDORP (2019). « Weighted visual and vestibular cues for spatial updating during passive self-motion ». In : *Multisensory Research* 32.14.
- KORDING, K. P. et al. (2007). « Causal inference in multisensory perception ». In : *PloS One* 2.9.
- KRAL, K. (1999). « Binocular vision and distance estimation ». In : *The Praying Mantids : Research Perspectives*. Johns Hopkins University Press, Baltimore, MA, p. 114-140.
- KUGLER, P. N. et M. T. TURVEY (1987). « Information, natural law, and the self-assembly of rhythmic movement ». In : *Erlbaum*.
- LARISH, J. F. et J. M. FLACH (1990). « Sources of optical information useful for perception of speed of rectilinear self-motion ». In : *Journal of Experimental Psychology* 16.2, p. 295.
- LAURENT, M., G. MONTAGNE et A. DUREY (1996). « Binocular invariants in interceptive tasks : a directed perception approach ». In : *Perception* 25.12, p. 1437-1450.
- LEE, D. N. (1998). « Guiding Movement by Coupling Taus ». In : *Ecological Psychology* 10, p. 221-250.
- (2008). « How movement is guided ». In : *Retrieved August 20*.
- LEUNG, T. et J. MALIK (1997). « On perpendicular texture or : Why do we see more flowers in the distance? » In : *Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, p. 807-813.
- LEWKOWICZ, R. et M. P. BIERNACKI (2020). « A survey of spatial disorientation incidence in Polish military pilots ». In : *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health* 33.6, p. 791-810. ISSN : 1232-1087. DOI : 10.13075/ijomch.1896.01621. URL : <http://dx.doi.org/10.13075/ijomch.1896.01621>.
- MACNEILAGE, P.R. et al. (2010). « Vestibular heading discrimination and sensitivity to linear acceleration in head and world coordinates ». In : *Journal of Neuroscience* 30.27, p. 9084-9094.

- MANTEL, B. et al. (2015). « Exploratory movement generates higher-order information that is sufficient for accurate perception of scaled egocentric distance ». In : *PloS One* 10.4.
- MILNER, A. D. et M. A. GOODALE (1995). « The visual brain in action ». In : *Oxford University Press*.
- MISHKIN, M., L. G. UNGERLEIDER et K. A. MACKO (1983). « Object vision and spatial vision : two cortical pathways ». In : *Trends in neurosciences* 6, p. 414-417.
- MOSKALIUK, J., K. BERTRAM et U. CRESS (2013). « Training in virtual environments : putting theory into practice ». In : *Ergonomics* 56.2.
- NEWMAN, D. G. et AFAIM FAICD (2007). *An overview of spatial disorientation as a factor in aviation accidents and incidents*. B2007/0063. Australian Transport Safety Bureau Canberra City,, Australia.
- OKADA, T. et al. (1999). « Vestibular perception of angular velocity in normal subjects and in patients with congenital nystagmus ». In : *Brain* 122.7, p. 1293-1303.
- PADFIELD, G. D., D. N. LEE et R. BRADLEY (2003). « How do helicopter pilots know when to stop, turn or pull up? (Developing guidelines for vision aids) ». In : *Annual forum proceedings - American helicopter society* 57.2, p. 1476-1490.
- PARISE, C. V. et M. O. ERNST (2016). « Correlation detection as a general mechanism for multisensory integration ». In : *Nature communications* 7.1, p. 1-9.
- PEARL, J. (2009). « Causal inference in statistics : An overview ». In : *Statistics surveys* 3, p. 96-146.
- (2010). « Causal inference ». In : *Causality : Objectives and Assessment*, p. 39-58.
- PENNINGS, H. J. et al. (2020). « Spatial Disorientation Survey Among Military Pilots ». In : *Aerospace medicine and human performance* 91.1, p. 4-10.
- PERRONE, J. A. (1991). « The perception of surface layout during Low-Level Flight ». In : *NASA CP3118*.
- RANDOMSKY, A. S., A. J. OUIMET et al. (2006). « Psychometric properties of the french and english versions of the claustrophobia questionnaire ». In : *Journal of Anxiety Disorders* 20.11.
- RANDOMSKY, A. S., S. RACHMAN et al. (2001). « The claustrophobia questionnaire ». In : *Journal of Anxiety Disorders* 15.4, p. 287-297.
- RICCIO, G. E., E. J. MARTIN et T. A. STOFFREGEN (1992). « The role of balance dynamics in the active perception of orientation ». In : *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance* 18.3, p. 624.

- ROSCOE, M. et C. WILKINSON (2002). « DIMSS-JSHIP's M&S Process for Ship/HELICOPTER Testing & Training ». In : *AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit 1*, p. 4597.
- ROSENBLUM, L. D. et H. M. SALDAÑA (1996). « An audiovisual test of kinematic primitives for visual speech perception. » In : *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance* 22.2, p. 318.
- SCHROEDER, C. E. et al. (2010). « Dynamics of active sensing and perceptual selection ». In : *Current opinion in neurobiology* 20.2, p. 172-176.
- SHAMS, L. et U. R. BEIERHOLM (2010). « Causal inference in perception ». In : *Trends in cognitive sciences* 14.9, p. 425-432.
- STAPPERS, P. J., W. W. GAVER et C. J. OVERBEEKE (2004). « Beyond the limits of real-time realism : Uses, necessity and theoretical foundation of non-realistic virtual reality ». In : *Psychological issues design use of adaptive, virtual interfaces*, Erlbaum.
- STAVE, A. M. (1979). « The influence of low-frequency vibration on pilot performance (as measured in a fixed base simulator) ». In : *Ergonomics* 22.7.
- STOFFREGEN, T. A. et B. G. BARDY (2001). « On specifications and the senses ». In : *Behavioral and Brain Sciences* 24.2, p. 195-213.
- STOFFREGEN, T. A., B. G. BARDY et al. (2003). « Action and intermodal information influence the perception of orientation ». In : *Virtual and adaptive environments : Applications, implications, and human performances issues*, p. 111-128.
- STOFFREGEN, T. A. et G. E. RICCIO (1988). « An ecological theory of orientation and the vestibular system ». In : *Psychological review* 95.1, p. 3-14.
- STRATULAT, A. et al. (2011). « Improving the realism in motion-based driving simulators by adapting tilt-translation technique to human perception ». In : *2011 IEEE Virtual Reality Conference*, p. 47-50.
- TOROK, A. et al. (2017). « Up, down, near, far : an online vestibular contribution to distance judgement ». In : *PloS One* 12.1.
- VALKO, Y., R. F. LEWIS et D. M. MERFELD (2012). « Vestibular labyrinth contributions to human whole-body motion discrimination ». In : *Journal of Neuroscience* 32.39, p. 13537-13542.
- WARREN, W. H., D. S. YOUNG et D. N. LEE (1986). « Visual control of step length during running over irregular terrain ». In : *Journal of experimental psychology : human perception and performance* 12.3, p. 259-266.

- WIENER, E. L. et D. C. NAGEL (1988). « Human factors in aviation ». In : *Gulf Professional Publishing*.
- WINKEL, K. N. De et al. (2013). « Integration of visual and inertial cues in the perception of angular self-motion ». In : *Experimental brain research* 231.2, p. 209-218.
- WRIGHT, G. W., P. DIZIO et R. J. LACKNER (2005). « Vertical linear self-motion perception during visual and inertial motion : More than weighted summation of sensory inputs ». In : *Journal of Vestibular Research* 15.4, p. 185-195.
- YANG, J. H. et al. (2013). « Pilot performance : assessing how scan patterns & navigational assessments vary by flight expertise ». In : *Aviation, space, and environmental medicine* 84.2, p. 116-124.