



**HAL**  
open science

# Suivi du système sensorimoteur du pilote d'hélicoptère et application à la prédiction de la charge mentale

Dimitri Keriven Serpollet

► **To cite this version:**

Dimitri Keriven Serpollet. Suivi du système sensorimoteur du pilote d'hélicoptère et application à la prédiction de la charge mentale. Neurosciences. Université Paris Cité, 2024. Français. NNT : 2024UNIP7022 . tel-04917055

**HAL Id: tel-04917055**

**<https://theses.hal.science/tel-04917055v1>**

Submitted on 28 Jan 2025

**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.

# Université Paris Cité

*Ecole doctorale n°158 : Cerveau, Cognition, Comportement (ED3C)*

*Centre Borelli (CNRS/UMR 9010)*

Thèse en vue d'obtenir le grade de docteur en sciences cognitives

## Suivi du système sensorimoteur du pilote d'hélicoptère et application à la prédiction de la charge mentale

Présentée par Dimitri KERIVEN SERPOLLET

Dirigée par Pierre-Paul VIDAL

Soutenue publiquement le 29 Février 2024

Devant un jury composé de :

**Raphaëlle ROY**

*Professeure à l'ISAE-Supaéro, Toulouse*

Rapporteuse

**Jean-Christophe SARRAZIN**

*Directeur de recherche à l'ONERA, Salon de Provence*

Rapporteur

**Ioannis BARGIOTAS**

*Chercheur à l'ENS Paris-Saclay, Gif-sur-Yvette*

Examineur

**Aurélie CAMPAGNE**

*Maître de conférences à l'Université Grenoble-Alpes, Grenoble*

Examinatrice

**Jacqueline FAGARD**

*Directrice de recherche émérite CNRS, Paris*

Examinatrice

**Pierre-Paul VIDAL**

*Directeur de recherche CNRS, Paris*

Directeur de thèse

**Yannick JAMES**

*Ingénieur R&D à Thales AVS France, Osny*

Invité



*Life is and will  
ever remain an  
equation incapable of  
solution, but it contains  
certain known factors.*

Nikola Tesla (1935)



# Remerciements

---

“If it weren’t for you, I probably would’ve led a meaningless life. With you, I was able to see much of the world and meet so many people.”

*Final Fantasy IX* (Hironobu Sakaguchi, 2000)

“My old grandmother always used to say, summer friends will melt away like summer snows, but winter friends are friends forever.”

*A Dance With Dragons* (George R. R. Martin, 2011)

Il est presque devenu coutumier de dire qu’une thèse est un travail solitaire sur plusieurs années, et que là réside sa principale difficulté. Cette affirmation est au mieux approximative, au pire complètement erronée. Les travaux présentés dans ce manuscrit n’auraient jamais pu voir le jour sans une ribambelle de personnes dont j’ai croisé le chemin il y a un peu plus de trente ans (elle se reconnaîtra), presque dix ans (déjà...) ou quelques années. Peu importe depuis combien de temps nous nous connaissons, vous avez apporté une brique, un peu de ciment ou des meubles sans lesquels cette maison n’aura pu être terminée.

Pierre-Paul, merci d’avoir été un directeur de thèse à la fois fantasque (le nombre d’idées capables de fuser de votre esprit à la seconde est tout simplement impressionnant), dévoué (vous avez à cœur de prendre soin de vos étudiants) et cultivé (même s’il m’est arrivé d’en prendre pour mon grade). Vous avez été une boussole pour le jeune navigateur un peu perdu que j’ai pu être par moments. Ioannis, ευχαριστώ πολύ, tu m’as guidé dans ce monde inconnu pour moi, celui de la recherche. Il y a certaines étapes que je n’aurais pas réussi à franchir sans ton aide. Enfin, merci à Nicolas de m’avoir accueilli avec tant de facilité et de spontanéité dans le laboratoire.

Merci à Raphaëlle Roy et Jean-Christophe Sarrazin d'avoir accepté de rapporter ce manuscrit ; ainsi qu'à Aurélie Campagne et Jacqueline Fagard d'avoir accepté d'examiner mon travail. Je remercie également Francesco Lacquaniti et Jean-Louis Vercher d'avoir fait partie de mon comité de thèse, merci pour vos conseils avisés ces quatre dernières années.

J'aimerais également remercier Thales AVS France d'avoir financé cette thèse et d'avoir permis la réalisation des expériences présentées ci-après. Un grand merci à Yannick et Pascal, véritables artisans de la collaboration entre Thales et le Centre Borelli. Merci Christophe, le rôle de manager est parfois ingrat mais c'est toujours plus agréable quand ce dernier est endossé par une personne humaine qui sait reconnaître les qualités de ses équipes. Merci à tous les collègues et amis que j'ai pu me faire à Osny, vous étiez un peu loin pour que je puisse venir très régulièrement, mais c'était toujours un plaisir de passer une tête : Matthieu, Matthieu, Pierre-Nicolas, Jean-Yves et Christian. J'ai également une pensée chaleureuse pour Pierre Cousin. Enfin, merci à Stéphane et David, nous n'avons pas eu énormément d'occasions d'interagir, mais ce qui suit n'aurait pas été possible sans vous.

Un grand merci aux (ex-)doctorants du Centre Borelli : Matthieu, Myrto, Firas, Marie, Théo... Il est de notoriété plus ou moins publique que je suis d'une timidité malade, et pourtant vous m'avez accueilli avec bienveillance et j'ai passé d'excellents moments en votre compagnie. Un merci particulier à Mathilde, l'époque pré-Covid où le présentiel était la norme me paraît préhistorique, mais ce fut un plaisir de partager ton bureau à Cachan (même si j'ai déjà oublié toutes les capitales qu'on a mis tant d'efforts à apprendre). Enfin, un très gros merci à Alice et Axel, qui m'ont grandement aidé à accomplir les travaux présentés ci-après.

Merci également aux post-doctorants et aux chercheurs du laboratoire avec qui j'ai pu interagir ces quatre dernières années, particulièrement à Clément et Rémy qui m'ont fait découvrir le monde de l'hôpital (cette journée passée en immersion en anesthésie-réanimation restera gravée dans ma mémoire) ; et à Brian pour les (très) nombreuses discussions scientifiques que nous avons pu avoir, avec une mention spéciale au petit bonhomme topologique (et finalement, je pense que la Suisse attendra).

Ces dernières années auraient été beaucoup moins agréables sans mes amis. En particulier, merci Jean-Côme et Maud pour les sorties cinéma et les soirées Kubrick (ou plutôt merci pour Les Sentiers de la Gloire mais pas merci pour Shining) ; merci Agnès et Philippe pour le crew biologie en 3A ; et merci Arthur et Antoine pour les nombreuses soirées et week-ends passés à sauver Gravehold, éradiquer CodA ou détruire la machine infernale du Dr. Foo. Que ce soit à Paris, Poitiers, Reims ou Bassussarry, en compagnie de Lucie et Morgane, ces moments étaient des bouffées d'air frais salvatrices.

Pierre, mon ami de toujours, merci d'être toujours là dix-sept ans plus tard ; ça me paraît encore fou qu'une amitié si forte soit née de quelques mois simplement passés côte à côte en

maths et en chinois en classe de quatrième, à faire à peu près tout et n'importe quoi, sauf écouter les profs... J'ai également une pensée pour tes proches (Pulkita, Anna, Tristan, Joëlle et Thierry), ma famille d'adoption en quelque sorte. Enfin, merci infiniment Lugdiwine ; merci de m'avoir accueilli (avec Arnaud et Mistrale) chez toi à de si nombreuses reprises pour qu'on s'entraide à sortir du trou où on s'était fourrés sur fond de Pomodoro at Hogwarts. Merci pour les repas, les soirées, les cocktails, les GIFs, les jeux de société, les films (tous!), le bricolage et le soutien.

Merci à ma belle-famille : Jocelyne, Philippe, Corentin, Marion, Clémence, Anna, Patricia, Philippe, Marion, Aude, Christian et Angelina ; merci pour les déjeuners, les week-ends et les vacances passés ensemble.

Merci la Family (Michtu, Papounet, Lili, Luc, Bob, Virginie, Léa, Guillaume, Marilou, Tina, Laurie, Lina, Baptiste, Jules et Martin) pour ces (trop rares) moments passés tous ensemble, souvent synonymes de retrouvailles maintenant que nous sommes dispatchés un peu partout, entre Mamoudzou, Bordeaux, Genève, Paris, Crozon, Brest ou tout autour du monde ! J'ai une pensée particulière pour mes grands-parents qui ne pourront sans doute pas faire le déplacement pour la soutenance depuis la presqu'île mais à qui je dois tant. Et une pensée émue pour ceux qui ne sont plus là.

Je ne sais pas par où commencer pour te remercier, Maman. Tu sais l'admiration que je te porte, toi dont le courage semble infini et dont les sacrifices m'ont permis d'arriver où j'en suis aujourd'hui. Je sais que tu es fier de moi et j'espère que ce point final à mes études interminables ne fera pas exception. Merci pour tout.

Et enfin, merci Gladys. Merci de partager ma vie, d'être bon public et de rire à mes blagues nulles, de partager mes passions pour les jeux de société, le cinéma et les parcs d'attraction, et d'avoir été un soutien indéfectible ces dernières années (et merci en particulier pour la relecture finale du manuscrit). Merci d'avance pour les années à venir qui, j'en suis persuadé, seront *légèrement* plus agréables une fois cette thèse derrière nous. On ira fêter ça sur Taron.

# Résumé

---

Les facteurs humains constituent les contributions humaines à la réalisation d'une tâche, en termes d'interactions avec les outils technologiques à disposition, avec l'environnement dans lequel travaille l'opérateur, avec les procédures applicables et avec les autres opérateurs. C'est un des éléments clés de la sécurité aérienne, qui intervient aussi bien lors de la formation des pilotes, que lors des tâches courantes au quotidien, une fois l'opérateur dans son environnement de travail.

Cette thèse s'intéresse particulièrement au système sensorimoteur des pilotes d'hélicoptère. Nous avons étudié d'une part le comportement du système vestibulaire de pilotes professionnels lors d'une expérience psychophysique conduite en simulateur de vol ; et nous avons établi d'autre part un modèle prédictif de charge mentale lors de vols réalistes effectués sur le même simulateur.

Lors de la première expérience, qui s'intéresse au système sensoriel, neuf pilotes d'hélicoptère professionnels ont été placés dans un simulateur de vol de niveau D (plus haut niveau de certification existant) et avaient pour consigne de ramener ledit simulateur à la position neutre après un déplacement passif indépendant de leur volonté, et ce toutes lumières éteintes. Les résultats montrent que les pilotes sont plus précis en roulis (c'est-à-dire dans le plan frontal) qu'en tangage (c'est-à-dire dans le plan sagittal), de manière significative. A l'inverse, nous n'avons pas trouvé de différence entre le roulis gauche et le roulis droit, ni entre le tangage antérieur et le tangage postérieur. Enfin, il existe un biais vers l'angle initial : plus le déplacement passif est important, plus l'erreur des pilotes l'est également ; pour les angles utilisés, la relation trouvée est linéaire.

Lors de la seconde expérience, les pilotes étaient situés dans le même simulateur et ont été soumis à deux scénarios réalistes classiques (une mission de reconnaissance puis une mission d'évacuation sanitaire). Ces deux scénarios ont été construits de manière à induire de fortes variations de charge mentale, avec des moments très calmes et d'autres très intenses. Les pilotes étaient invités à évaluer subjectivement leur niveau de charge mentale lors de moments-clés préalablement identifiés par des experts aéronautiques. En parallèle, un certain nombre de paramètres de diverses origines ont été enregistrés (paramètres physiologiques, paramètres de la machine et paramètres de l'interface homme-machine). Par la suite, nous avons utilisé un modèle d'apprentissage automatique supervisé pour essayer de prédire le niveau de charge mentale des pilotes à tout instant. Le résultat principal de cette étude est que l'ensemble de paramètres le plus pertinent est celui de l'interface, qui constitue le reflet des actions du système moteur des pilotes.

Enfin, ces travaux sont également l'occasion pour nous de proposer un cadre de réflexion général sur les interfaces homme-machine utilisées par des opérateurs de machines complexes (aéronefs, centrales nucléaires, etc.). En effet, nous sommes en plein cœur de la quatrième révolution industrielle, portée par l'intelligence artificielle et l'internet des objets ; à la lumière des résultats obtenus précédemment cités, il nous semble pertinent de dessiner les contours que pourraient prendre deux nouvelles technologies permettant de renforcer la sécurité aérienne : d'une part le suivi longitudinal individuel d'un opérateur ; et d'autre part l'assistant personnel intelligent de ce dernier. Ces outils pourraient servir à la formation initiale et à l'entraînement continu des pilotes d'aéronef.

# Abstract

---

## **Helicopter pilot sensorimotor system monitoring and application to mental workload prediction**

Human factors are the human contributions to the accomplishment of a task, in terms of interactions with the available technological tools, the environment in which the operator works, the applicable procedures, and with other operators. It is one of the key elements of aviation safety, and comes into play during pilot training as well as in day-to-day tasks, once the operator is in the work environment.

This thesis focuses on the sensorimotor system of helicopter pilots. In other words, on the one hand, we studied the behavior of the vestibular system of professional pilots during a psychophysical experiment conducted in a flight simulator; and on the other hand, we established a predictive model of mental workload during realistic flights conducted on the same simulator.

In the first experiment, which focused on the sensory system, nine professional helicopter pilots were placed in a Level-D full-flight simulator (the highest level of certification available) and instructed to return the simulator to the neutral position with all lights off after a passive movement beyond their control. The results showed that the pilots were significantly more accurate in roll (i.e., in the frontal plane) than in pitch (i.e., in the sagittal plane). Conversely, we found no difference between left and right roll, nor between anterior and posterior pitch. Finally, there is a bias towards the initial angle: the greater the passive displacement, the greater the pilot error; for the angles used, the relationship found is linear.

In the second experiment, the pilots were placed in the same simulator and subjected to two classic realistic scenarios (a reconnaissance mission, and a medical evacuation mission). Both scenarios were designed to induce large variations in mental workload, with some very quiet moments and others very intense. The pilots were asked to subjectively assess their level of mental workload at key moments identified by aviation experts. In parallel, a number of parameters of different origins were recorded (physiological parameters, machine parameters, and human-machine interface parameters). We then used a machine learning model to try to predict the level of mental workload experienced by pilots at any given time. The main result of this study is that the most relevant set of parameters is that of the interface, which reflects the actions of the pilot's motor system.

Finally, this work is also an opportunity for us to propose a general framework for thinking about the human-machine interfaces used by operators of complex machines (aircraft, nuclear power plants, etc.). Indeed, we are in the midst of the Fourth Industrial Revolution, driven by artificial intelligence and the Internet of Things; in light of the above-mentioned results, we believe it is relevant to outline two new technologies that could improve aviation safety: on the one hand, the individual longitudinal monitoring of an operator; and on the other hand, his or her intelligent personal assistant. These tools could be used for the initial and continuous training of aircraft pilots.

# Mots-clés / Keywords

---

## **Mots-clés**

Interface homme-machine, ergonomie, système vestibulaire, charge mentale, suivi longitudinal, assistant personnel, intelligence artificielle.

## **Keywords**

Human-machine interface, ergonomics, vestibular system, mental workload, longitudinal monitoring, personal assistant, artificial intelligence.

# Table des matières

---

“You know what kind of plan never fails? No plan. No plan at all. You know why? Because life cannot be planned. [...] So, there’s no need for a plan. You can’t go wrong with no plans. We don’t need to make a plan for anything.”

*Parasite* (Bong Joon-ho, 2019)

<b>REMERCIEMENTS.....</b>	<b>5</b>
<b>RESUME .....</b>	<b>8</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>9</b>
<b>MOTS-CLES / KEYWORDS .....</b>	<b>10</b>
<b>TABLE DES MATIÈRES.....</b>	<b>11</b>
<b>AVANT-PROPOS.....</b>	<b>17</b>
I. Contexte.....	17
II. Contributions .....	18
III. Plan de lecture .....	19
<b>LISTE DES ABREVIATIONS.....</b>	<b>21</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>	<b>23</b>
<b>LISTE DES FIGURES .....</b>	<b>24</b>

<b>CHAPITRE 1 : INTRODUCTION .....</b>	<b>27</b>
<b>I. Des IA et des hommes .....</b>	<b>29</b>
1. L'essor de l'intelligence artificielle.....	29
2. Bouleversements dans le monde industriel .....	32
3. Vers une future omniprésence ? .....	33
a. Industrie automobile .....	34
b. Industrie aéronautique.....	35
<b>II. Les opérateurs d'IHM complexes .....</b>	<b>36</b>
1. L'évolution des IHM .....	36
a. Définition de la notion d'IHM .....	36
b. Evolution des métiers.....	37
c. Evolution des usages.....	38
2. Cas particulier des pilotes.....	39
<b>III. Des IHM sous IA .....</b>	<b>43</b>
1. IHM adaptatives.....	43
a. Le confort et la personnalisation .....	43
b. L'accessibilité.....	43
c. La sécurité.....	45
2. Assistants personnels .....	45
<b>IV. De la nécessité du suivi longitudinal individuel .....</b>	<b>47</b>
1. La sécurité au cœur des évolutions en aéronautique.....	47
2. L'opérateur doit en rester le maillon central .....	51
3. Accidentologie et enseignements.....	52
<b>V. Vers une évolution du cockpit.....</b>	<b>55</b>
1. Présentation de l'expérience .....	55
2. Protocole expérimental .....	55
a. Expérience psychomotrice 1 : vection.....	59
b. Expérience psychomotrice 2 : psychophysique vestibulaire .....	60
c. Scénarios réalistes .....	60
3. Finalités attendues.....	62
a. Psychophysique vestibulaire .....	62
b. Charge mentale .....	62
c. En-machine-ment .....	62
d. Mouvements naturels de la tête .....	64
e. Vers le suivi longitudinal individuel .....	64
<b>CHAPITRE 2 : PSYCHOPHYSIQUE DU SYSTEME VESTIBULAIRE .....</b>	<b>67</b>
<b>I. Les sens extéroceptifs et intéroceptifs .....</b>	<b>69</b>
<b>II. Le système vestibulaire .....</b>	<b>72</b>
1. Fonctionnement du système vestibulaire .....	73
a. Cellules sensorielles : les cellules ciliées.....	73
b. Anatomie des organes otolithiques .....	74
c. Fonctionnement des organes otolithiques.....	75

d. Anatomie des canaux semi-circulaires .....	76
e. Fonctionnement des canaux semi-circulaires .....	77
f. Système push-pull .....	78
g. Voie neuronale vestibulaire et noyaux vestibulaires.....	78
2. Autour du système vestibulaire.....	78
a. Le réflexe vestibulo-oculaire (VOR) .....	78
b. Pathologies .....	80
c. Vieillessement.....	80
<b>III. Illusions sensorielles liées au système vestibulaire.....</b>	<b>81</b>
1. Seuils vestibulaires.....	81
2. Différences entre pathologies vestibulaires et illusions vestibulaires.....	83
3. Illusions sensorielles d'origine vestibulaire .....	83
a. Leans.....	84
b. Piqué en vrille.....	85
c. Piqué en spirale .....	86
d. Illusion Coriolis .....	86
e. Inversion.....	87
f. Head-up.....	87
g. Head-down .....	88
<b>IV. Différences dans la perception des rotations frontales et sagittales .....</b>	<b>89</b>
1. Introduction.....	89
2. Matériels et méthodes .....	92
a. Sujets .....	92
b. Protocole expérimental.....	93
c. Mesures .....	95
d. Statistiques .....	95
e. Analyse .....	95
3. Résultats .....	96
4. Discussion .....	100
a. Contributions respectives des organes otolithiques et de la proprioception dans la perception du mouvement dans notre protocole .....	100
b. Pourquoi existe-t-il un biais dans la perception du mouvement par le système utriculaire ?.....	101
c. Doit-on tester régulièrement la fonction vestibulaire des pilotes professionnels ? .....	102
d. Limitations de l'étude.....	103
<b>CHAPITRE 3 : CHARGE MENTALE.....</b>	<b>105</b>
<b>I. Définition(s) .....</b>	<b>107</b>
1. Cadre théorique.....	108
2. Définitions.....	110
a. En tant que mesure subjective .....	110
b. Vers une tentative d'objectivation .....	111
c. Exigence vs. Ressources .....	113
<b>II. Mesure et prédiction.....</b>	<b>114</b>
1. Quantification .....	114
2. Mesure(s).....	116
a. Par les variables cardiovasculaires .....	117

b. Par l'électromyographie .....	117
c. Par l'électroencéphalographie.....	117
d. Par les mouvements des yeux.....	118
e. Par la conductance cutanée .....	119
3. Peut-on prédire la charge mentale ? .....	119
<b>III. Modèle prédictif de la charge mentale de pilotes d'hélicoptère.....</b>	<b>121</b>
1. Introduction.....	121
2. Matériels et méthodes .....	124
a. Sujets .....	124
b. Simulateur Full-Flight .....	125
c. Protocole de mesure – Scénarios .....	125
d. Capteurs .....	126
e. Auto-évaluation de la charge mentale .....	127
f. Index de Charge Mentale Brut (NASA-TLX Brut) .....	127
g. RTLX théorique .....	127
h. Caractéristiques.....	127
i. Physiologie.....	128
j. Machine.....	130
k. Interface homme-machine .....	131
l. Fenêtre d'évaluation .....	131
m. HBagging.....	133
3. Résultats .....	135
a. Evaluation subjective de la charge mentale .....	135
b. Auto-évaluation subjective vs. NASA-TLX.....	137
c. Visualisation.....	138
4. Discussion .....	139
a. Pertinence de la méthode .....	139
b. Vérité terrain .....	139
c. Paramètres physiologiques.....	140
d. Paramètres opérationnels.....	141
e. L'engagement.....	142
f. Limitations.....	142
5. Conclusion.....	143
<b>CHAPITRE 4 : DISCUSSION GENERALE.....</b>	<b>145</b>
<b>I. Le système sensorimoteur et la charge mentale, deux facettes d'une même pièce.....</b>	<b>147</b>
1. Le cerveau, un metteur en scène ?.....	147
a. Convergence des entrées sensorielles .....	147
b. Hétérogénéité des transformations sensorimotrices en fonction du contexte et du style perceptivo-moteur.....	148
c. En conclusion .....	151
2. Style perceptivo-moteur et fond commun .....	152
3. Mesurer l'un à travers l'autre, et vice-versa.....	154
a. Jumeau numérique et représentation interne .....	154
b. Mesure du style perceptivo-moteur .....	155
<b>II. Le suivi longitudinal individuel (SLI), une nécessité à l'heure de la complexité.....</b>	<b>157</b>
1. Sélection des paramètres dont la mesure semble pertinente .....	157

a. Au niveau du système vestibulaire .....	157
b. Au niveau de la charge mentale .....	158
2. Modalités de mise en œuvre d'un suivi longitudinal individuel (SLI) .....	160
a. Les deux modalités .....	160
b. La mise en œuvre .....	161
<b>III. L'assistant personnel de l'opérateur, outil de demain ? .....</b>	<b>162</b>
1. Le pilote automatique, pionnier des assistants intelligents .....	162
2. Contours et cahier des charges de l'assistant personnel.....	164
a. Cahier des charges.....	164
b. Contours.....	165
3. L'engagement, véritable défi à l'heure de l'IA.....	166
<b>IV. Perspectives.....</b>	<b>168</b>
1. Amélioration du modèle proposé.....	168
2. Réduction de la complexité par l'utilisation des mathématiques symboliques .....	169
3. Quelles évolutions pour le cockpit du futur ?.....	169
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE .....</b>	<b>171</b>
<b>REFERENCES.....</b>	<b>173</b>



# Avant-propos

---

« Permettez-moi de vous souhaiter la bienvenue. D'ailleurs, il ne faut pas rester debout, asseyez-vous, mettez-vous à l'aise. »

*La Classe Américaine* (Michel Hazanavicius, 1993)

## I. Contexte

Le 27 mars 1977, deux Boeing 747 (un de la compagnie néerlandaise KLM et un de la compagnie Pan American Airways) entrent en collision sur la piste de l'aéroport de Los Rodeos à Tenerife (aux îles Canaries). Avec 61 blessés et 583 décès, c'est l'accident aéronautique le plus meurtrier de l'Histoire. Les causes de cet accident sont multiples, dont certaines indépendantes de la volonté du personnel navigant : la fermeture inopinée de l'aéroport de Las Palmas à Grande Canarie (à cause d'une attaque à la bombe), de très mauvaises conditions météorologiques (nappes de brouillard épaisses au sol) et des infrastructures insuffisantes au regard de l'important trafic généré par le re-routage de multiples avions (à cause de la fermeture de Las Palmas). Les avions étant beaucoup trop nombreux pour une seule piste et un seul taxiway (voie de circulation des avions parallèle à la piste), certains d'entre eux sont contraints de remonter une partie de la piste à contre-sens avant de pouvoir rejoindre le taxiway. C'est notamment le cas de l'avion de Pan American Airlines ; avant que ce dernier n'ait pu tourner à droite pour rejoindre le taxiway (et ainsi quitter la piste de décollage), l'avion de KLM – malgré l'absence d'autorisation de la tour de contrôle – enclenche sa procédure de décollage. Quelques instants plus tard, les deux avions vont se percuter à plus de 300 km/h, entraînant le bilan humain susmentionné.

Les enquêteurs (espagnols, néerlandais et américains) ont conclu qu'une série de problèmes et de défaillances ont conduit à cette catastrophe, dont :

- Une mésentente linguistique entre l'équipage de l'avion KLM et le personnel de la tour de contrôle de Los Rodeos, car l'anglais n'était la langue maternelle ni des uns ni des autres ; à l'époque le vocabulaire aéronautique n'est pas encore standardisé.
- L'absence de visibilité au sol du fait des nappes de brouillard épaisses : l'avion américain – qui remonte la piste à contre-sens – n'a pas vu la bretelle qu'il aurait dû emprunter pour rejoindre le taxiway et il a continué plus longtemps que prévu à contre-sens.

- L'empressement dont fait preuve l'équipage de l'avion KLM à repartir. En effet, le retard pris en étant dérouté sur Tenerife exposait l'équipage à devoir passer la nuit à Las Palmas alors qu'il devait initialement rentrer à Amsterdam.
- Un respect hiérarchique trop strict au sein de l'équipage de l'avion KLM. Le commandant de bord était le membre le plus expérimenté (c'était même un des membres les plus expérimentés de KLM et il était formateur sur Boeing 747) et il a été le formateur de son copilote. D'après les enquêteurs, il est donc possible que le copilote et l'ingénieur de bord aient été « trop » respectueux envers lui et n'aient pas osé contester sa décision de procéder au décollage, alors même que la boîte noire a indiqué que l'ingénieur de bord avait des doutes sur la présence du second avion sur la piste (il a demandé au commandant de bord « l'avion de Pan American Airlines a-t-il bel et bien dégagé la piste », ce à quoi ce dernier a répondu, visiblement agacé par la question, « oui bien sûr »).

A la suite de ce terrible accident, l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI) a émis plusieurs recommandations pour éviter que ce genre de situation ne se reproduise, dont un vocabulaire standardisé, des procédures de communication entre avions et tour de contrôle définies, ainsi qu'un contrôle mutuel (entre pilote et copilote) plus formalisé et qui ne devra plus être entravé par le lien hiérarchique. La prise en compte des facteurs humains dans la formation et l'entraînement des équipages était née.

De nos jours, les appareils ont acquis un tel niveau de fiabilité que les facteurs humains sont un des enjeux centraux de la sécurité aérienne. Il est primordial de tenir compte de la faillibilité de l'être humain qui opère la machine pour s'assurer de son fonctionnement. C'est en ce sens – par exemple – que de nouvelles procédures de formation ont vu le jour à l'échelle de l'Union Européenne depuis une dizaine d'années, articulées autour du concept d'EBT (Evidence Based Training).

C'est également en ce sens que les travaux présentés ci-après ont été pensés : mesurer le comportement humain (à diverses échelles et dans différentes situations) afin de mieux le comprendre ; et grâce à cette compréhension, proposer des pistes d'amélioration du domaine étudié ; en l'occurrence : la formation et l'entraînement de pilotes d'hélicoptère.

## II. Contributions

Le Centre Borelli est né en 2020 de la fusion entre deux laboratoires : le CMLA (Centre de Mathématiques et Leurs Applications) et COGNAC-G (COGNition and ACTION Group), avec l'objectif commun de mesurer et de comprendre le comportement humain normal et pathologique, sur le terrain, dans différents secteurs (personnes sous anesthésie, patients en rééducation, sportifs de haut niveau, pilotes d'aéronefs, etc.). L'alliance au sein d'un même laboratoire de cœurs de métiers diversifiés (principalement les mathématiques appliquées du CMLA et l'étude des transformations sensorimotrices de COGNAC-G) permet de construire des projets cohérents (du point de vue de ce qui est envisageable vis-à-vis des neurosciences) et réalistes (du point de vue de ce qui est faisable mathématiquement parlant).

Les travaux présentés ci-après s'inscrivent dans cette démarche et portent principalement sur le système sensorimoteur et la charge mentale des pilotes d'hélicoptère.

Nous essaierons dans un premier temps d'évaluer la contribution vestibulaire à l'orientation des pilotes dans l'espace (en les plongeant dans le noir). Ces résultats ont fait l'objet d'une publication scientifique : Keriven Serpollet, D., Hartnagel, D., James, Y., Buffat, S., Vayatis, N., Bargiotas, I., & Vidal, P.-P. (2023). Tilt perception is different in the pitch and roll planes in human. *Physiological Reports*, 11(3), e15374.

Dans un second temps, nous essaierons de construire un modèle d'apprentissage automatique capable d'estimer à tout instant la charge mentale des pilotes d'hélicoptère. Ces résultats sont en cours de publication scientifique : Data-driven model of helicopter pilots' mental workload : inferring cognitive state from signals external to the operator (par Keriven Serpollet D., Roques A., Nicolai A., Buffat S., James Y., Vayatis N., Bargiotas I., Vidal P.-P.).

Enfin, nous proposerons dans un dernier temps, au regard des résultats obtenus, deux pistes pour améliorer la sécurité aérienne à travers le prisme de la formation et de l'entraînement : le suivi longitudinal individuel et l'assistant personnel intelligent.

### III. Plan de lecture

**LE PREMIER CHAPITRE** de ce manuscrit, l'introduction générale, revient sur un ensemble de notions dont deux sont capitales pour l'aéronautique à l'heure de la quatrième révolution industrielle : l'intelligence artificielle et l'interface homme-machine. C'est également l'occasion d'établir – à la lumière des enjeux de sécurité aérienne – la nécessité du suivi longitudinal individuel. Enfin, nous présenterons également le projet IKKY (Intégration du cockpit et de ses systèmes) et les différents enjeux inhérents à ce dernier.

**LE SECOND CHAPITRE** rentre plus particulièrement dans les détails d'une des expériences menées au cours du projet IKKY, lors de laquelle neuf pilotes d'hélicoptère professionnels ont été soumis à un protocole psychophysique centré sur le système vestibulaire. Ils avaient pour tâche de ramener le simulateur au point neutre après un déplacement passif indépendant de leur volonté.

**LE TROISIEME CHAPITRE** est centré sur la notion de charge mentale. Les neuf pilotes précédemment cités ont pris part à cette seconde expérience, cœur du projet IKKY. Ce chapitre présente les résultats de l'utilisation d'un modèle d'apprentissage automatique afin de prédire la charge mentale des pilotes à tout instant. La vérité terrain utilisée est l'auto-évaluation subjective formulée par les pilotes eux-mêmes à des moments clés des deux scénarios réalistes effectués.

**LE QUATRIEME CHAPITRE** est une discussion générale qui revient sur la pertinence des résultats obtenus au regard des problématiques soulevées en introduction. Nous verrons ainsi quelles sont les modalités de mise en œuvre du suivi longitudinal individuel d'une part, et quel est le cahier des charges de l'assistant personnel intelligent, qui constituerait une évolution notable de l'interface homme-machine.

Ces travaux ont été effectués sous la direction de Pierre-Paul Vidal au Centre Borelli (CNRS UMR 9010), sis 45 rue des Saints Pères 75270 Paris Cedex 06 au sein de l'Université Paris-Cité. Ils ont été co-encadrés par Ioannis Bargiotas, également rattaché au Centre Borelli, à l'antenne de l'ENS Paris-Saclay, sise 4 avenue des Sciences 91190 Gif-sur-Yvette. Ils ont été financés par Thales AVS France, branche Training & Simulation, situé 1 rue du Général de Gaulle 95520 Osny et par l'Etat français par une convention CIFRE (ANRT n°2019/0295).



# Liste des abréviations

---

AESA	Agence Européenne de la Sécurité Aérienne
ANOVA	ANalysis Of VAriance
AoI	Area of Interest
AUC	Area Under the Curve
B2B	Business to Business
B2C	Business to Client
BEA	Bureau d'Enquêtes et d'Analyses
CC	Charge Cognitive
CM	Charge Mentale
CMS	Crew Monitoring System ©
CORAC	Conseil pour la Recherche Aéronautique Civile
CT	Charge de Travail
DARPA	Defence Advanced Research Projects Agency
DRAWS	Defence Research Agency Workload Scale
DSAC	Direction de la Sécurité de l'Aviation Civile
EBT	Evidence-Based Training
EC135	Eurocopter 135
ECG	Electrocardiogramme
EDA	ElectroDermal Activity
EEG	Electroencéphalogramme
EMG	Electromyogramme
EVASAN	EVAcuation SANitaire
fNIRS	functional Near InfraRed Spectroscopic imaging
GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
HR	Heart Rate
IA	Intelligence Artificielle
IBI	Inter-Beat Interval
IHM	Interface Homme-Machine
IKKY	Intégration du cockPit et de ses sYstèmes
IMC	Instrument Meteorological Conditions
IoT	Internet of Things
IRBA	Institut de Recherche Biomédicale des Armées
ISA	Instantaneous Self-Assessment

MCH	Modified Cooper-Harper scale
MWL	Mental Workload
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NASA-TLX	NASA-Task Load Index
OACI	Organisation de l'Aviation Civile Internationale
ONU	Organisation des Nations Unies
PA	Pilote Automatique
PTG	Perceptually-enabled Task Guidance
RTLX	Raw-Task Load Index
SAMU	Service d'Aide Médicale d'Urgence
SCL	Subjective Cognitive Load
SLI	Suivi Longitudinal Individuel
SPV	Subjective Postural Vertical
SVM	Support Vector Machine
SWAT	Subjective Workload Assessment Technique
UE	Union Européenne
VACP	Visual, Auditory, Cognitive, and Psychomotor
VPPB	Vertige Paroxystique Positionnel Bénin
VTC	Voiture de Transport avec Chauffeur
ZFT	Zero Flight Time

# Liste des tableaux

---

Table 1 : Nombre de passagers tués par millions de passagers-kilomètres en fonction du moyen de transport utilisé.....	48
Table 2 : Nombre de passagers tués par millions de passagers-heure en fonction du moyen de transport utilisé. ....	48
Table 3 : Nombre d'accidents aériens et nombre de victimes dus à ces accidents pour 2022.....	49
Table 4 : Moyenne et déviation standard de la précision des pilotes, ainsi que p-value du test des rangs signés de Wilcoxon. ....	97
Table 5 : Résultats des régressions linéaires. ....	99
Table 6 : Résultats des tests de Friedman. ....	99
Table 7 : Un exemple générique de l'échelle d'une auto-évaluation instantanée.. ....	115
Table 8 : Détails de la population étudiée.....	124
Table 9 : Résumé de la population.....	125
Table 10 : Liste de tous les paramètres utilisés par le modèle, regroupés selon les trois catégories principales auxquels ils appartiennent : la physiologie de l'opérateur, l'état de la machine et l'interaction de l'opérateur avec la machine.....	132
Table 11 : Médiane, premier quartile, troisième quartile, moyenne et écart-type de l'AUC individuelle pour chaque pilote. ....	135
Table 12 : Les paramètres utilisés plus de 45% du temps par le modèle, par ordre décroissant. ....	136
Table 13 : AUC globale pour chaque sous-ensemble de données testé.....	137
Table 14 : Moyenne et écart-type de l'AUC pour le NASA-TLX et ses sous-scores en tant que vérité terrain .....	137
Table 15 : Moyenne et écart-type de l'AUC pour le NASA-TLX théorique et ses sous-scores en tant que vérité terrain.....	138

# Liste des figures

---

Figure 1 : Exemple simple de classificateur binaire.....	30
Figure 2 : Représentation schématique d'un réseau de neurones simple. Chaque neurone récupère les sorties des neurones de la couche précédente et envoie son propre résultat sur tous les neurones de la couche suivante. Les couches intermédiaires permettent d'effectuer des calculs complexes. ....	30
Figure 3 : Photo d'un cockpit de Curtis JN-4 Jenny, avion militaire biplan de la première guerre mondiale produit à partir de 1916.....	40
Figure 4 : Photo d'un cockpit beaucoup plus récent. Les écrans sont beaucoup plus nombreux et les touches actionnables situées partout autour du pilote .....	40
Figure 5 : Schéma du simulateur utilisé pour l'expérimentation IKKY. La cabine utilisée était celle d'un Eurocopter 135, le pilote était assis à droite. Le dôme prenait l'intégralité du champ visuel et il était monté sur un système de vérins à six degrés de liberté.....	56
Figure 6 : En couleurs, les commandes de vol conventionnelles d'un hélicoptère. ....	57
Figure 7 : Photo d'un cockpit d'EC 135, avec les différents instruments et commandes de vol. ....	58
Figure 8 : Exemple de stimulation optocinétique pouvant induire une illusion de type vection. ..	59
Figure 9 : Schéma du déroulé de la deuxième expérience psychomotrice (psychophysique vestibulaire) effectuée par les pilotes. ....	60
Figure 10 : Le Crew Monitoring System® de Thales Equipment® enregistre et synchronise les données de tous les capteurs entourés en vert. ....	61
Figure 11 : Schéma expérimental de l'illusion de la main en caoutchouc. ....	63
Figure 12 : Sens externes du corps humain (non exhaustif). ....	70
Figure 13 : Sens internes du corps humain.....	71
Figure 14 : Coupe de l'oreille interne (système vestibulaire et système cochléaire).....	72
Figure 15 : Schéma des cellules ciliées de Type I (en calice) et de Type II (cylindrique).....	74
Figure 16 : Coupe d'un organe otolithique. Lors des mouvements de la tête, les statoconies entraînent la couche gélatineuse de glycoprotéines qui elle-même entraîne les stéréocils.....	75
Figure 17 : Effet de l'inclination de la tête sur les organes otolithiques.....	76
Figure 18 : Exemple du fonctionnement des canaux horizontaux lors d'une rotation de la tête dans le plan horizontal.....	77
Figure 19 : Représentation du mouvement de l'ampulla d'un canal semi-circulaire dans le cas d'une rotation vers la gauche dans son référentiel.....	77
Figure 20 : Représentation du réflexe vestibulo-oculaire. ....	79
Figure 21 : Plans et axes du corps humain.....	82
Figure 22 : Représentation schématique du leans.....	84
Figure 23 : Représentations schématiques des piqués en vrille (1 – 3) et en spirale (4 – 6).....	85
Figure 24 : Représentation schématique de l'effet Coriolis.....	86
Figure 25 : Représentation schématique de l'illusion d'inversion. ....	87
Figure 26 : Représentations des illusions de head-up et head-down. ....	88
Figure 27 : Exemples pour les rotations de $\pm 15^\circ$ degrés en tangage (à gauche) et en roulis (à droite).....	95
Figure 28 : Exemple de déplacement de la cabine du simulateur dans le plan sagittal. ....	96
Figure 29 : Précision moyenne absolue des essais en roulis et en tangage pour chaque pilote. ....	97

Figure 30 : Tendance de la précision moyenne pour les rotations en roulis. ....	98
Figure 31 : Tendance de la précision moyennne pour les rotations en tangage.....	99
Figure 32 : Evolution du nombre de passagers aériens dans le monde, en millions, de 1950 à 2013. ....	109
Figure 33 : Exemple de la première partie d'un questionnaire NASA-TLX, où le sujet doit répondre à six questions pour quantifier subjectivement son ressenti lors d'une tâche précédemment accomplie. Il devra ensuite comparer chacun des six facteurs avec les autres pour déterminer leurs importances relatives.....	112
Figure 34 : Exemple d'échelle modifiée de Cooper-Harper. ....	116
Figure 35 : Exemples de dispositifs de suivi oculaire (« eye-tracking » en anglais).....	119
Figure 36 : A, B : illustrations des différentes phases des deux scénarios. C : décomposition des événements inattendus du deuxième scénario. ....	126
Figure 37 : Diagramme représentant l'auto-évaluation de la charge mentale pour chaque pilote – dans le scénario 2 – avec deux méthodes : à l'oral et RTLX.. ....	134
Figure 38 : Exemples des règles de décision apprises par l'algorithme HBagging sur l'intégralité des données.. ....	134
Figure 39 : Extraits de la prédiction continue de la charge mentale pour le sixième pilote (en haut) et le troisième (en bas) dans le deuxième scénario. ....	138
Figure 40 : Représentation schématique du signe de Romberg.....	149
Figure 41 : Représentation schématique du test de marche de Fukuda. ....	149
Figure 42 : Représentation des scores d'instabilité posturale (mesure comme l'aire de déplacement du centre de pression) cumulée pour trois modalités. Figure reproduite avec autorisation.....	151



# Chapitre 1 : Introduction

---

“And now, let us step out into the night and pursue that flighty temptress, adventure.”

*The Half-Blood Prince* (J.K. Rowling, 2005)

<b>I. Des IA et des hommes</b> .....	<b>29</b>
1. L'essor de l'intelligence artificielle.....	29
2. Bouleversements dans le monde industriel .....	32
3. Vers une future omniprésence ? .....	33
a. Industrie automobile .....	34
b. Industrie aéronautique.....	35
<b>II. Les opérateurs d'IHM complexes</b> .....	<b>36</b>
1. L'évolution des IHM .....	36
a. Définition de la notion d'IHM .....	36
b. Evolution des métiers.....	37
c. Evolution des usages.....	38
2. Cas particulier des pilotes.....	39
<b>III. Des IHM sous IA</b> .....	<b>43</b>
1. IHM adaptatives.....	43
a. Le confort et la personnalisation .....	43
b. L'accessibilité.....	43
c. La sécurité.....	45
2. Assistants personnels .....	45
<b>IV. De la nécessité du suivi longitudinal individuel</b> .....	<b>47</b>
1. La sécurité au cœur des évolutions en aéronautique.....	47
2. L'opérateur doit en rester le maillon central .....	51
3. Accidentologie et enseignements.....	52
<b>V. Vers une évolution du cockpit</b> .....	<b>55</b>
1. Présentation de l'expérience .....	55
2. Protocole expérimental .....	55
a. Expérience psychomotrice 1 : vexion .....	59
b. Expérience psychomotrice 2 : psychophysique vestibulaire .....	60
c. Scénarios réalistes .....	60
3. Finalités attendues.....	62
a. Psychophysique vestibulaire .....	62
b. Charge mentale .....	62
c. En-machine-ment .....	62
d. Mouvements naturels de la tête .....	64
e. Vers le suivi longitudinal individuel .....	64



Nous avons vu dans l'avant-propos que les facteurs humains sont un des enjeux centraux de la sécurité aérienne. A l'heure de la quatrième révolution industrielle, deux champs sont susceptibles de bousculer la façon dont la sécurité aérienne est envisagée : l'intelligence artificielle (IA) et l'interface homme-machine (IHM). Après être revenu sur chacune de ces deux notions, nous verrons comment elles peuvent être combinées ; puis nous proposerons deux approches pour intégrer l'IA et l'évolution des IHM à la boucle de l'amélioration de la sécurité aérienne : le suivi longitudinal individuel (SLI) et l'évolution du cockpit – à travers une expérience dont les résultats seront présentés dans la suite du manuscrit.

## I. Des IA et des hommes

“I got you to look after me, and  
you got me to look after you, and that's  
why.”

*Of Mice and Men* (John Steinbeck,  
1937)

### 1. L'essor de l'intelligence artificielle

Les progrès de l'intelligence artificielle (IA) se sont faits en plusieurs vagues disjointes, entrecoupées de périodes de disettes appelées « les hivers de l'IA » (Muthukrishnan et al., 2020).

Le Perceptron est le premier algorithme d'apprentissage supervisé, développé en 1957 par Frank Rosenblatt au laboratoire aéronautique de l'université de Cornell (Rosenblatt, 1958). C'est un algorithme de classificateurs binaires ; ces derniers sont des fonctions qui peuvent décider si une entrée appartient – ou non – à une certaine classe.

Le Perceptron de Rosenblatt est le premier réseau de neurones artificiel mis en œuvre. Les réseaux de neurones constituent une catégorie de modèles d'apprentissage automatique, une branche de l'IA. Ils sont inspirés du fonctionnement des neurones biologiques, modélisés par le neurone formel. Ce dernier est une fonction mathématique qui prend une ou plusieurs entrées pondérées (qui correspondent aux neurones en amont) pour produire une sortie (qui correspond au signal propagé le long de l'axone) dont la valeur dépend des poids d'entrée et d'une fonction d'activation. La phase d'apprentissage d'un réseau de neurones permet d'ajuster la valeur des poids afin d'obtenir une sortie la plus proche possible d'une valeur cible (dans le cas d'un apprentissage supervisé où les valeurs cibles sont connues). Un réseau de neurones est une agrégation de neurones formels organisés en différentes couches.

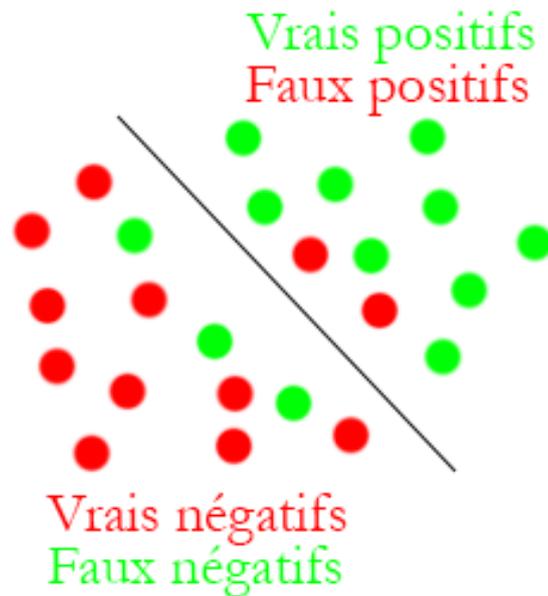


Figure 1 : Exemple simple de classificateur binaire. Le classificateur doit trouver la meilleure frontière (en noir) pour que le maximum de points rouges soit à gauche tout en ayant le maximum de points verts à sa droite. Les points bien placés sont « vrais positifs » ou « vrais négatifs » selon leur classe ; les points mal placés sont « faux positifs » ou « faux négatifs » selon leur classe. Ce genre de classification est notamment utilisé en médecine, lors du dépistage d'une maladie. Son utilisation en apprentissage automatique constitue le premier algorithme d'apprentissage supervisé, le Perceptron.

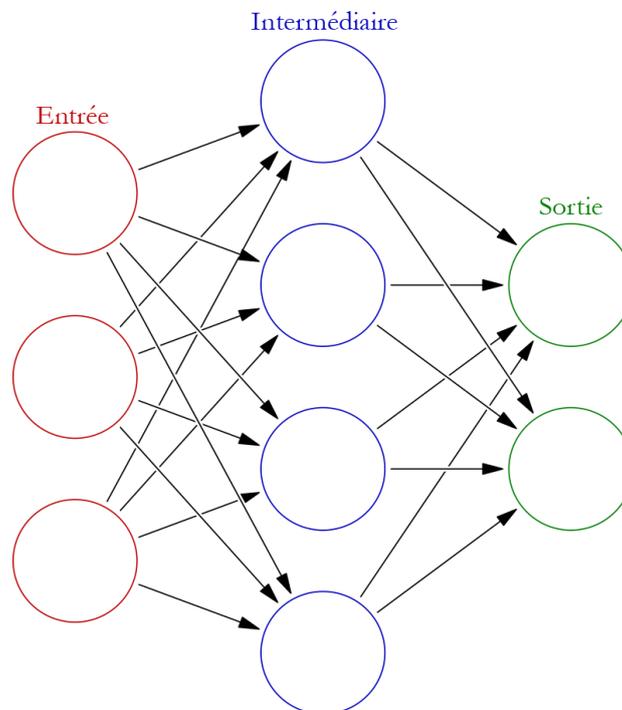


Figure 2 : Représentation schématique d'un réseau de neurones simple. Chaque neurone (c'est-à-dire chaque rond) récupère les sorties des neurones de la couche précédente et envoie son propre résultat sur tous les neurones de la couche suivante. Les couches intermédiaires permettent d'effectuer des calculs complexes.

Malgré l'engouement autour de ces découvertes, les prémices du premier hiver de l'IA vont apparaître en 1969 lorsque Marvin Minsky et Seymour Papert vont publier un livre, *Perceptrons*, dans lequel ils décrivent certaines limitations de l'algorithme Perceptron et des réseaux de neurones. Leurs conclusions seront mésinterprétées, certains croiront – à tort – que Minsky et Papert ont montré que les réseaux de neurones sont *fondamentalement* limités. Quelques années plus tard, le mathématicien britannique James Lighthill produira un rapport à destination du parlement du Royaume-Uni, dans lequel il se montre pessimiste et conclut que « dans aucun domaine [de l'IA], les découvertes faites jusqu'à présent n'ont eu l'impact majeur promis » ; ce rapport eut pour conséquence le démantèlement complet de la recherche en IA au Royaume-Uni de 1973 à 1983. Enfin, la DARPA (Defence Advanced Research Projects Agency) Etats-Unienne opère une coupe similaire dans les budgets de recherche à destination de l'IA, suite au manque de retour sur investissement constaté après une dizaine d'années à dépenser sans compter.

Les perspectives qui se dessinent au début des années quatre-vingts sont toutefois encourageantes, avec la découverte du Néocognitron en 1979 et des réseaux Hopfield en 1982. Le premier est l'ancêtre des réseaux de neurones convolutifs (très utilisés en analyse d'images) et a été utilisé initialement pour effectuer de la reconnaissance d'écriture manuscrite de caractères japonais. Le second est la première implémentation des réseaux de neurones récurrents, qui sont une grande catégorie de modèles qui peuvent garder en mémoire certaines informations en modifiant leurs entrées en fonction des sorties obtenues. Le réseau Hopfield est un des modèles utilisés pour comprendre le fonctionnement de la mémoire humaine.

Toutefois, le deuxième hiver de l'IA débute en 1987, à cause du retard pris par le développement de la puissance de calcul des ordinateurs. En effet, les possibilités de l'IA sont grandissantes au fur et à mesure des découvertes depuis plusieurs années, mais sont systématiquement confrontées à un manque de puissance de calcul. De plus, la recherche en intelligence artificielle états-unienne (pionnière en IA) était quasi-exclusivement développée en langage Lisp, alors que le matériel du commerce était optimisé pour des langages assembleurs ou Fortran, ce qui exacerbait les besoins des machines en puissance de calcul (c'est-à-dire en rapidité des processeurs et en capacité de mémoire). Enfin, la révolution des ordinateurs personnels à la fin des années quatre-vingts (i.e. la démocratisation de la possession d'un ordinateur personnel au sein du foyer familial) va porter le coup de grâce aux « machines Lisp » : il n'est plus du tout rentable pour les entreprises spécialisées en informatique de les construire. L'effondrement de ce marché sera l'événement précurseur du deuxième hiver de l'IA.

Cela va changer à la fin des années quatre-vingt-dix lorsque les ordinateurs deviendront capables de soutenir – par leur puissance de calcul – le développement des réseaux de neurones. L'entreprise américaine IBM fera démonstration de ces nouvelles capacités de calcul en développant un programme de jeu d'échecs baptisé initialement *Deep Blue* (qui perdra contre le champion du monde en titre Garry Kasparov en 1996) puis *Deeper Blue* (qui gagnera contre Kasparov en 1997). Certains programmes d'échecs à la pointe, comme Stockfish et Leela Chess Zero, utilisent d'ailleurs des réseaux de neurones pour évaluer une position donnée sur l'échiquier.

Depuis 2005, le développement de l'intelligence artificielle est entré dans une phase que certains appellent « l'été de l'IA » par opposition aux hivers. Il se caractérise par une explosion des investissements, du nombre de brevets déposés, d'articles publiés ou encore du nombre

d'emplois sur le marché. L'IA a depuis effectué d'importantes avancées dans différents domaines : la reconnaissance d'images, la traduction, les jeux (échecs et go), l'exploration de données ou la génération de texte.

## 2. Bouleversements dans le monde industriel

Ces avancées se traduisent par des bouleversements dans le monde industriel. En effet, les outils développés grâce à l'intelligence artificielle permettent de déléguer à la machine des tâches auparavant effectuées par des êtres humains, voire des tâches auparavant irréalisables. Cela permet donc trois évolutions, détaillées ci-après :

- Une réduction des coûts à grande échelle
- L'arrivée d'outils internes ou B2B (« business to business », de professionnel à professionnel)
- De nouveaux usages B2C (« business to client », de professionnel à particulier)

La première catégorie est encore un peu « futuriste ». Elle tire parti des nouveaux outils type « ChatGPT » qui, au-delà d'un simple chatbot conversationnel, permet également de générer du code informatique automatiquement. Cela pourrait permettre de diminuer les besoins en masse salariale de développeurs. On voit également fleurir un certains nombres de start-ups basées sur des approches « no code », où les créateurs d'entreprises n'ont plus besoin d'expertise en informatique, les outils à base d'intelligence artificielle se chargeant de ce travail pour eux.

La deuxième catégorie est beaucoup plus concrète, puisque nous en voyons déjà les effets au sein de la société. Cela concerne essentiellement la réalisation par l'IA de tâches auparavant difficiles (voire impossibles) à réaliser par un être humain. Le meilleur exemple est sans doute l'utilisation qui est faite des algorithmes d'analyse de données à grande échelle pour détecter la fraude fiscale par le ministère des finances. La quantité de données disponibles était bien trop importante pour réaliser l'ensemble des vérifications à la main, et les outils développés grâce à l'IA permettent maintenant de détecter plus facilement et systématiquement les fraudes. Cela se traduit notamment par une augmentation des détections depuis 2020 :

- 8,2 milliards d'euros en 2020
- 13,4 milliards d'euros en 2021
- 14,6 milliards d'euros en 2022

La loi permettant l'utilisation d'outils numériques dans le cadre de la détection de fraude fiscale (notamment des outils basés sur l'intelligence artificielle) a été promulguée en 2018 et monte encore en puissance. En effet, en 2022 « seul » un tiers des contrôles s'appuie sur ces nouvelles méthodes.

La troisième catégorie découle de l'ouverture d'un nouveau champ des possibles à destination des clients ou des usagers de divers types d'entreprise. L'exemple le plus courant de nos jours côté « vie civile » est l'utilisation de plus en plus systématique de chatbots pour faire office de premier contact dans le cas des services clients. En tant que premier point de contact, ces chatbots permettent de réduire la pression sur les services clients humains, qui ne sont sollicités que si le problème n'a pas pu être résolu par l'intermédiaire du chatbot. Il existe d'autres

applications novatrices dans cette catégorie, dont nous allons parler plus en détails dans la suite de cette introduction ainsi que dans plusieurs chapitres ultérieurs du présent manuscrit.

Ces évolutions sont toutefois encore balbutiantes, potentiellement en raison du manque de recul existant sur ces nouvelles technologies d'une part, et sur les fantasmes entourant le concept même d'intelligence artificielle d'autre part. Ces fantasmes ont alimenté un très grand nombre d'œuvres de fiction (dans la littérature depuis les années cinquante et au cinéma depuis les années quatre-vingts) rivalisant de créativité pour imaginer les contours que pourraient prendre l'intelligence artificielle au quotidien. Tantôt optimistes et « robot-philes » (depuis *Le Cycle des Robots* d'Isaac Asimov publié dans les années cinquante jusqu'au très récent *The Creator* de Gareth Edwards sorti en salles en 2023), tantôt pessimistes et « robot-sceptiques » (*Terminator* de James Cameron en 1984 ; *Matrix* des sœurs Wachowski en 1999 ou encore *Les Cantos d'Hypérion* de Dan Simmons en 1989-1990), ces œuvres façonnent notre imaginaire et la façon dont le grand public perçoit l'intelligence artificielle.

Un sondage publié début novembre 2023 montre d'ailleurs le scepticisme encore prégnant dans les sociétés occidentales concernant l'intelligence artificielle. Seuls 27% des adultes (états-uniens) interrogés pensent que l'IA va rendre leur vie meilleure, 40% pensent que l'IA aura un impact négatif sur les prochaines élections présidentielles (en 2024) et 58% pensent que l'IA va accroître la propagation de désinformations et fausses nouvelles.

Ces inquiétudes du grand public ne sont pas ignorées par les pouvoirs publics, bien au contraire. Le gouvernement du Royaume-Uni a organisé début novembre 2023 un sommet mondial chargé de rassembler un groupe d'experts qui sera force de proposition – sur le modèle du GIEC pour le climat – pour réguler le développement mondial de l'IA. Sobrement surnommée « doom summit » (sommet de l'apocalypse) par la presse anglo-saxonne, cette conférence fait suite à d'autres initiatives (notamment au sein de l'Union Européenne et aux Etats-Unis) visant à encadrer cette nouvelle technologie. Les Etats-Unis d'Amérique semblent le pays le plus strict en la matière, un décret ayant été signé fin octobre 2023, à la suite d'engagements volontaires pris par les géants de la « tech » (Google, Amazon, Microsoft, Meta, OpenAI, etc.). A l'inverse, les dispositions réglementaires au sein de l'Union Européenne ont du plomb dans l'aile : la France et l'Allemagne (soutenues par l'Italie) se sont opposées à toute régulation concernant l'IA dite générative (les outils capables de créer du texte et des images). Cette opposition a un fondement économique : la France et l'Allemagne craignent, en régulant trop rapidement et trop tôt, de répéter les erreurs des années 90-2000, à la suite desquelles aucun « géant de la tech » n'a pu émerger en Europe. Les pouvoirs publics vont donc devoir jongler entre une opinion publique frileuse à l'égard de l'IA et un secteur économique qui veut garder les coudées franches.

### 3. Vers une future omniprésence ?

Nous avons vu quelques exemples dans la partie précédente, qui sont les premiers signes d'une prochaine – pour l'instant potentielle – omniprésence de l'intelligence artificielle dans la vie quotidienne, tant personnelle que professionnelle. Outre la détection de fraude fiscale et les chatbots, d'autres secteurs sont en train d'opérer des révolutions systémiques en se reposant sur l'intelligence artificielle.

## *a. Industrie automobile*

L'industrie automobile s'intéresse depuis une cinquantaine d'années à la question de la conduite autonome des véhicules. Le premier prototype créé au Japon date de 1977 par un laboratoire de robotique, et le premier constructeur industriel à s'y intéresser est Mercedes-Benz, avec un véhicule qui circulera jusqu'à 100 km/h sur un réseau routier (sans trafic) en 1984. Les arguments principaux en faveur du développement des véhicules autonomes avancés par les acteurs du secteur sont :

- L'amélioration de la sécurité routière. L'humain est par essence faillible (90% des accidents de la route sont d'origine humaine), il possède un temps de réaction minimum, une capacité attentionnelle limitée, il est soumis à des états cognitifs tels que la fatigue et il est – parfois – irresponsable (conduite en état d'ivresse, etc.), alors que la machine n'est pas soumise à ces travers : temps de réaction très faible, prise de décision rapide, pas de fatigue, pas de stupéfaction, etc. Toutefois, ce gain de sécurité est à envisager à long terme ; il est fort probable que l'opinion publique n'adhère à la conduite autonome qu'une fois ce gain devenu très substantiel. En effet, là où un accident causé par un être humain peut être expliqué par la faillibilité susmentionnée, un accident impliquant un véhicule autonome peut s'apparenter à un dilemme du tramway : le programme peut se retrouver dans une situation où il doit choisir entre sauver ou sacrifier les occupants du véhicule selon la situation.
- Une plus grande autonomie pour les personnes âgées ou en situation de handicap, qui pourraient se déplacer grâce à un véhicule motorisé plus facilement sans avoir nécessairement recours à l'assistance d'un tiers (chauffeur spécialisé, membre de la famille, etc.).
- Une réduction de la congestion du trafic routier. Les véhicules autonomes pourraient permettre de réduire les situations d'accordéon, où le trafic routier est très congestionné, notamment aux heures de pointe.

Afin d'accomplir cette mutation, plusieurs acteurs industriels (par exemple Ford et Tesla aux Etats-Unis, Valeo en France) mènent des recherches pour rendre les voitures individuelles autonomes, c'est-à-dire conduites sans intervention humaine. Les nouveaux outils développés pour accomplir cette transformation reposent en grande partie sur diverses techniques d'intelligence artificielle :

- La reconnaissance d'images. Un véhicule autonome est équipé de capteurs d'images (caméras, radars, lidars et/ou sonars) afin de reconnaître son environnement : autres véhicules, panneaux, obstacles, piétons, etc. Cette reconnaissance d'images s'effectue grâce à des algorithmes basés sur l'apprentissage automatique.
- Les véhicules possèdent également une deuxième brique algorithmique basée sur de l'IA pour décider des actions à prendre en fonction de la situation reconnue.

## ***b. Industrie aéronautique***

L'industrie aéronautique développe également de nouvelles technologies se reposant sur l'intelligence artificielle. Pour des raisons réglementaires, l'autonomie totale des avions n'est pas encore à l'ordre du jour et se cantonne pour l'instant aux applications militaires d'engins de plus faibles envergures (notamment les drones). En effet, l'évolution de la réglementation internationale aéronautique est bien plus inertielle que celle de l'industrie automobile. Les évolutions se reposant sur l'intelligence artificielle sont donc actuellement de simples preuves de concept, comme le projet DragonFly d'Airbus. Ce projet n'est *stricto sensu* pas l'équivalente avionique des voitures autonomes, mais il en porte un certain nombre de caractéristiques, comme la possibilité, en cas d'incapacité totale du personnel navigant, de re-router et faire atterrir l'avion sans intervention humaine.

Nous verrons plus loin dans ce manuscrit certaines applications de l'intelligence artificielle au secteur aéronautique.

## II. Les opérateurs d'IHM complexes

« C'est un cercle vicieux. Plus nos rapports au monde sont interfacés, plus nos corps sont des îlots dans un océan de données et plus nos esprits éprouvent, inconsciemment, cette coupure, qu'ils tentent de compenser. Et ils compensent en se reliant à des objets, en touchant et parlant à des dispositifs qui nous rassurent – et nous distancent en même temps. Un réseau social est un tissu de solitudes reliées. Pas une communauté. »

*Les Furtifs* (Alain Damasio, 2019)

### 1. L'évolution des IHM

De nombreux usages métiers ont évolué ces dernières décennies au gré des évolutions en terme d'interfaces homme-machine (IHM). Certains métiers sont passés de métiers techniques à des métiers de supervision, tandis que certains usages de la vie quotidienne sont passés de la pression d'un bouton à la gestion d'une interface.

#### *a. Définition de la notion d'IHM*

La notion même d'interface homme-machine telle que nous l'entendons aujourd'hui est apparue avec l'informatique. C'est d'ailleurs dans ce domaine que beaucoup de standards aujourd'hui encore utilisés ont été définis : l'écran principal d'un ordinateur s'appelle un bureau, on y trouve des répertoires appelés dossiers, dans lesquels on range des fichiers appelés documents, auxquels on accède par des interfaces graphiques appelées fenêtres, etc. La nécessité de nommer les outils d'interface complexes et novateurs d'après des concepts préexistants de la vie quotidienne est un leitmotiv puissant en ergonomie afin de faciliter l'adhésion de nouveaux usagers à l'utilisation d'une IHM.

Les IHM sont toutefois plus diverses que ce qu'on trouve en informatique. On peut également considérer l'habitacle d'une voiture ou le cockpit d'un avion comme autant d'IHM à disposition du conducteur/pilote pour manœuvrer son véhicule : le volant, la boîte de vitesse, les pédales, le tableau de bord, les instruments de vol, le manche à balai, etc.

Au-delà de simplement nommer les IHM d'après des concepts de la vie quotidienne, elles sont également le plus souvent conçues avec un paradigme proche d'une expérience naturelle

pour l'utilisateur. En effet, cela permet à ce dernier de s'approprier plus rapidement et facilement l'interface qu'il doit prendre en main. Ainsi, on retrouve différentes interactions que l'on peut répertorier ainsi :

- Les interactions visuelles : images, interfaces graphiques, objets animés, etc. C'est ce qu'on retrouve notamment sur l'écran d'un ordinateur.
- L'écriture, avec notamment l'utilisation d'un clavier pour interagir.
- L'échange oral : commande vocale, etc. C'est le mode privilégié par les assistants personnels virtuels (voir ci-après).
- Le tactile et la gestuelle : les souris d'ordinateur, les écrans tactiles, les commandes à retour d'effort, etc. C'est ce dernier mode qui est notamment utilisé pour les commandes de vol d'un aéronef (avion et hélicoptère) : bien qu'elles soient maintenant principalement électriques, les commandes de vol possèdent toujours une sensation de retour d'effort qui correspond à l'effort que produirait une commande de vol hydraulique.

Tous ces modes de communication entre l'homme et la machine sont utilisés, soit seuls soit combinés, afin de créer des IHM. On peut, selon les modes utilisés, classer ces IHM en trois grandes catégories :

- Les interfaces d'acquisition : ce sont les interfaces qui permettent à l'utilisateur de renseigner des informations, ou d'interagir avec un système, comme le clavier ou la souris d'un ordinateur, les pédales d'une voiture ou les commandes de vol d'un avion. C'est via ces systèmes que l'opérateur peut apporter des modifications à la machine afin de lui faire réaliser l'action souhaitée (comme écrire un manuscrit de thèse).
- Les interfaces de restitution : ce sont les interfaces qui permettent à la machine de restituer à l'utilisateur un certain nombre d'informations utiles pour interagir avec le système sous-jacent, comme le tableau de bord d'une voiture ou les instruments de vol d'un aéronef. L'opérateur n'interagit pas *stricto sensu* avec la machine via ces interfaces, mais elles sont indispensables à l'opérateur pour qu'il puisse effectuer les bonnes actions via les interfaces d'acquisition précédemment citées.
- Les interfaces combinées : ces interfaces sont généralement réactives, elles réagissent à l'action de l'utilisateur. Dans une certaine mesure, c'est le cas des écrans tactiles, qui sont à mi-chemin entre une interface classique clavier/souris et un écran conventionnel. C'est également le cas des commandes à retour d'effort, qui ajustent ledit retour d'effort en fonction de l'intensité de l'action de l'opérateur produite sur la commande.

## ***b. Evolution des métiers***

Au cours de l'Histoire, les grandes ruptures technologiques se sont accompagnées de changements radicaux dans la manière de produire et ont provoqué des évolutions profondes (et souvent irréversibles) de la nature même du travail.

Lors de la première révolution industrielle (1750 – 1820), l'utilisation de l'eau et de la vapeur a permis de passer d'un mode production essentiellement manuel à une production à

l'aide des premières machines (qui fonctionnaient notamment à la vapeur). Cela va également permettre le développement des premiers modes de déplacement « motorisés » grâce aux véhicules à vapeur. La combinaison de ces deux évolutions va permettre l'apparition des premières usines (la simplification du déplacement permettant de regrouper un grand nombre d'ouvriers en un lieu unique, et les machines améliorant leur rentabilité), au détriment des ateliers à plus petite échelle et à l'artisanat (notamment dans l'industrie textile, l'industrie sidérurgique et l'industrie agroalimentaire).

Lors de la seconde révolution industrielle (1870 – 1910), l'amplification de ces phénomènes grâce à la découverte de nouvelles sources d'énergie (le pétrole et l'électricité) va amener de nouveaux bouleversements. L'augmentation de la puissance et de la précision des machines va permettre une croissance économique rapide, doublée d'une hausse du chômage (les machines étant en mesure de remplacer les ouvriers) ; le développement du train et des nouveaux moyens de télécommunication (la généralisation du télégraphe) va permettre un accroissement du trafic des personnes et des idées ; l'industrie automobile va inventer, Ford en tête, les lignes de production modernes et le travail à la chaîne, etc.

La troisième révolution industrielle (1950 – 2000), aussi appelée « révolution numérique », est marquée par un ralentissement des innovations technologiques et de l'industrialisation par rapport aux époques précédentes. Elle est essentiellement caractérisée par la généralisation de l'informatique et l'arrivée de nouveaux outils de communication, notamment via l'internet (courriels, messageries instantanées, etc.). Cette période va voir l'automatisation poussée un cran plus loin, avec l'arrivée des robots. Désormais il n'y a plus, dans les usines, des ouvriers et des machines qui travaillent de concert, mais des machines qui ont remplacé la quasi-intégralité de la main d'œuvre et des techniciens chargés de les superviser. Le développement de l'informatique a également ouvert un nouveau champ des possibles, grâce à la programmation, certains allant jusqu'à comparer les développeurs en informatique comme les nouveaux travailleurs de la mine.

Enfin, la quatrième révolution industrielle (depuis 2010) repose sur les percées effectuées dans divers domaines, tels que l'intelligence artificielle, l'internet des objets (IoT pour « Internet of Things »), la robotique ou encore l'impression en 3 dimensions. Il existe notamment depuis quelques années des usines dites « 4.0 » - ou Smart Factory -, dont l'humain est totalement absent. La seconde avancée majeure – d'un point de vue industriel – des usines de demain est leur plus grande flexibilité. Les machines de production étant de plus en plus connectées, il est possible pour le consommateur ou un partenaire industriel d'ajuster ses demandes en fonction des possibilités des machines ; il est donc possible d'envisager à l'avenir des possibilités de productions industrielles à grande échelle qui soient personnalisables.

### **c. Evolution des usages**

Le monde industriel n'est pas le seul milieu impacté par la quatrième révolution industrielle, c'est en réalité l'intégralité de la société et la plupart de nos usages qui sont amenés à évoluer depuis une dizaine d'année, et *a fortiori* ces dernières années. Il suffit pour s'en convaincre de regarder l'évolution de quelques usages de la vie courante qui ont énormément changé, ou s'apprêtent à fortement évoluer dans les années à venir :

- **Le déplacement en voiture individuelle.** Depuis les années cinquante, les véhicules individuels ont subi plusieurs petites révolutions, que l'on peut citer pêle-mêle : la

direction assistée qui a facilité l'utilisation des commandes, la radio qui a transformé l'habitacle d'un moyen de locomotion pure à un espace de divertissements, le régulateur qui a transformé l'approche des trajets longue distance, ou encore – à l'avenir – l'autonomie totale des véhicules.

- **La domotique.** Bien qu'encore peu répandue, la domotique – pour les foyers qui en sont équipés – modifie profondément la gestion de l'éclairage et du chauffage d'une maison ou d'un appartement. Ces nouveaux outils ont transformé l'allumage d'une lampe de la simple pression d'un bouton à la gestion d'une véritable interface.
- **La téléphonie mobile personnelle.** De simples appareils composés d'une dizaine de touches à l'origine, les téléphones portables personnels sont maintenant des outils à haute valeur technologique, composés d'un écran tactile, d'un processeur et d'un appareil photo qui transcendent bien souvent leur fonction initiale. Sur ces appareils, il est maintenant possible de naviguer sur internet, d'assister à des visio-conférences, de regarder des vidéos ou des films, de jouer à des jeux-vidéo, etc.
- **L'informatique.** Des premiers modèles à cartes perforées jusqu'aux modèles les plus récents (hybrides tablette tactile – ordinateur conventionnel, portable, etc.) l'informatique destinée au grand public a effectué une mue axée sur l'accessibilité. Ce domaine ayant été le fer de lance de l'apparition des IHM, il est depuis un certain temps stabilisé.
- **L'information.** Prendre des nouvelles du monde nécessitait auparavant d'effectuer une des deux actions suivantes : acheter un journal papier, ou appuyer sur une touche de la télécommande de sa télévision à vingt heures. Il n'est pas possible – sans que cela ne prenne une place exagérée du présent manuscrit – de décrire l'intégralité des nouveaux usages qui permettent de s'informer. Du simple site web des journaux papiers conventionnels aux réseaux sociaux en passant par les chaînes d'information en continu, le développement des nouveaux outils en termes d'IHM et d'intelligence artificielle ont – pour le meilleur et pour le pire, notamment au regard des fausses informations – facilité et accéléré l'accès à l'information (il ne s'écoule rarement plus de quelques minutes avant qu'une nouvelle importante n'ait fait le tour du monde). En effet, cette dernière est de nos jours majoritairement consommée via des outils numériques, au détriment des moyens traditionnels (journaux papier, télévision, et/ou radio). Un sondage récent (novembre 2023) estime que 86% des adultes états-unis utilisent « régulièrement ou parfois » (dont 56% régulièrement) un outil numérique (smartphone, tablette, ordinateur, etc.) pour consulter l'actualité. Les médias traditionnels sont également appelés à muter sous cette nouvelle contrainte ; à titre d'exemple, le journal quotidien français Le Monde est tiré (en moyenne) à 105.000 exemplaires quotidiens en papier, alors qu'il compte plus de 550.000 visiteurs sur son site internet (dont les trois quarts utilisent un smartphone).

## 2. Cas particulier des pilotes

Le métier de pilote d'aéronef n'est pas étranger aux évolutions des IHM des cinquante dernières années. Les cockpits des avions et des hélicoptères n'ont cessé de se complexifier avec

l'ajout régulier de nouveaux capteurs, de nouveaux instruments de vol, de nouvelles commandes, etc. Ces évolutions de l'interface de travail se sont nécessairement accompagnées d'évolutions dans la manière de former les pilotes, ainsi que dans l'exercice de leurs fonctions.



*Figure 3 : Photo d'un cockpit de Curtiss JN-4 Jenny, avion militaire biplan de la première guerre mondiale produit à partir de 1916. L'IHM de cet appareil était extrêmement rudimentaire (le « manche » était un simple bâton). Cette simplicité n'enlève toutefois rien à ses qualités, cet avion était réputé fiable, stable et maniable. C'est sur cet aéronef qu'a débuté Charles Lindbergh, qui deviendra par la suite le premier être humain à traverser l'océan Atlantique par les airs en solitaire et sans escale.*



*Figure 4 : Photo d'un cockpit beaucoup plus récent. Les écrans sont beaucoup plus nombreux et les touches actionnables situées partout autour du pilote (devant, entre les pilotes, au-dessus de leurs têtes, etc.).*

Aux origines, le métier de pilote était proche d'être un métier essentiellement technique. L'aviation n'ayant pas toujours été aussi sûre qu'elle ne l'est aujourd'hui, il fallait qu'un pilote puisse réparer – même sommairement – son aéronef s'il venait à se poser en urgence en rase campagne, sans moyens de communiquer ou de se déplacer. Il va sans dire que cela était d'autant plus vrai pour l'aviation militaire, où par essence les « chasseurs » (comprendre les pilotes d'avions de chasse) étaient amenés à évoluer au-delà des lignes de défense ennemies.

Sans aller jusqu'à la caricature la plus extrême, il a longtemps été demandé aux pilotes, lors de leurs formations, de connaître des détails technico-techniques de leurs appareils jusque dans les moindres détails (couple de serrage des boulons, etc.). Les IHM des cockpits ayant grandement évolué depuis cette période révolue, la formation (et même le métier au sens général) des pilotes a elle aussi profondément changé. Depuis bientôt une dizaine d'années, elle s'articule – à l'échelle européenne – autour d'un concept, l'EBT (de l'anglais « evidence-based training »).

L'amélioration de la fiabilité des aéronefs (diminution des erreurs par l'ajout d'automatismes, diminution des pannes, etc.) ainsi que les changements des fonctions du pilote (augmentation du nombre de capteurs et systèmes à bord, coordination de l'équipage, etc.) ont conduit les directions aéronautiques (nationales, régionales et internationales) à s'accorder sur un nouveau programme de formation. Auparavant, la formation était centrée sur des situations impliquant des duos pannes/réponses essentiellement techniques et sur un panel d'exercices qui n'a peu ou pas évolué depuis les années soixante, tout en étant saturée : à mesure que les évolutions technologiques le requerraient, de nouveaux items de formation était ajoutés, sans pour autant épurer l'existant. C'est pourquoi le programme EBT s'appuie sur des compétences clés transverses, que le pilote doit maîtriser pour effectuer des vols en toute sécurité. Ces compétences sont :

- L'application des procédures
- La communication
- La gestion des trajectoires de vol manuellement
- La gestion des trajectoires de vol en pilotage automatique
- Les connaissances théoriques
- Le leadership et le travail d'équipe
- La résolution de problèmes/pannes et la prise de décision
- La connaissance de la situation
- La gestion de la charge de travail

Comme nous pouvons le constater, seule la moitié des compétences est à proprement parler « technique » comme nous pouvions l'entendre auparavant : les connaissances théoriques, la gestion des trajectoires, les procédures et la résolution des problèmes. L'autre moitié des compétences est de l'ordre de la gestion ou du contrôle. Cela pose de nouveaux défis en termes d'évaluation de la formation. Les items purement techniques, sont « simples » à évaluer : le pilote

sait ou ne sait pas, connaît ou ne connaît pas (une procédure, réaliser une tâche, une caractéristique de son appareil, résoudre une panne, etc.).

A l'inverse, les items non-techniques (la communication, le travail d'équipe, la charge de travail, etc.) sont le plus souvent subjectifs et soumis à l'appréciation de l'instructeur. Cette appréciation peut varier d'un instructeur à l'autre et ces derniers ne disposent pas encore d'outils robustes pour les aider à rendre leurs appréciations objectives.

## III. Des IHM sous IA

“Keep your head down, there’s  
two of us in here now. Remember?”

*Halo 3* (Bungie Studios, 2007)

Nous venons de voir en deux temps les bouleversements liés à l’émergence et aux progrès de l’intelligence artificielle d’une part, et ceux liés aux évolutions des interfaces homme-machine d’autre part. Il existe une intersection non-nulle entre ces deux domaines, dont nous allons voir des exemples ci-après.

### 1. IHM adaptatives

Les enjeux qui entourent le concept d’IHM adaptative sont nombreux et divers :

- Le confort et la personnalisation : permet de donner le choix à l’utilisateur des éléments qu’il désire afficher sur l’IHM.
- L’accessibilité : les besoins varient d’un utilisateur à l’autre, notamment chez les personnes ayant une ou plusieurs déficiences (surdité, cécité, handicap moteur, etc.).
- La sécurité : selon l’urgence d’une situation (danger en approche, panne du véhicule, etc.), les informations nécessaires à l’utilisateur pour la résoudre ne sont pas forcément les mêmes qu’en situation nominale.

#### *a. Le confort et la personnalisation*

La multiplication des interfaces (que ce soit au sein de l’environnement personnel comme professionnel) amène les usagers à avoir des habitudes, des configurations d’interfaces favorites. Cela permet, à force d’habitude, de s’y retrouver plus facilement et d’accéder aux fonctions primordiales des machines plus rapidement. Il n’est pas non plus inenvisageable d’avoir une forme d’IA qui puisse, après avoir appris comment un usager donné préfère utiliser une interface donnée, réarranger la disposition des éléments pour en faciliter l’utilisation.

#### *b. L’accessibilité*

La société poussant le curseur de la numérisation plus loin chaque année (c’est devenu un véritable défi d’utiliser certains services publics... sans passer par un ordinateur et internet !), la question de l’accessibilité à l’informatique est cruciale, d’autant plus pour certaines catégories de la population ayant des difficultés intrinsèques à utiliser une interface qui n’a pas été pensée pour eux (cécité, handicap moteur, etc.).

Les personnes atteintes de cécité utilisent une technologie de « lecture d’écran », qui utilise une voix artificielle pour lire le contenu d’un écran, que ce soit du texte ou les icônes/boutons

d'un navigateur internet. Elles ont également à leur disposition des commandes spécifiques pour les aider à se repérer :

- Sur un ordinateur conventionnel, grâce à une commande vocale ou des touches aux actions prédéfinies.
- Sur un écran tactile (comme sur la plupart des téléphones actuels), il est possible de configurer certaines actions. Par exemple un « triple clic » peut indiquer à haute voix quel est l'élément qui a été visé sur l'écran.

Les personnes doublement atteintes de surdité et de cécité (qui ne peuvent donc pas utiliser tous les substituts vocaux vus précédemment) peuvent utiliser des pages braille, outil électro-mécanique qui peut transcrire en braille le contenu affiché sur un écran. Cet outil utilise une ligne de picots qui, en se levant, forment des caractères en braille. Ces outils fonctionnent parfaitement pour transcrire du texte, mais ne peuvent prendre en charge les images. Les outils d'intelligence artificielle récemment développés (comme ChatGPT), couplés à ces technologies robustes existantes, pourraient pallier cette carence.

L'accessibilité à la technologie s'applique également aux personnes atteintes de handicaps moteurs. Les personnes atteintes de syndrome d'enfermement (locked-in syndrome) ne peuvent majoritairement effectuer plus que deux mouvements moteurs :

- L'ouverture et la fermeture des paupières.
- Bouger les yeux verticalement.

Quand bien même elles sont affectées d'un point de vue cognitif (Schnakers\* et al., 2008; Smith & Delargy, 2005), il est primordial de trouver des moyens pour eux de communiquer avec leur environnement. Les initiatives les plus prometteuses dans ce domaine utilisent :

- Le suivi du regard. Cette méthode, peu invasive, utilise le suivi du regard du patient. Lorsque ce dispositif est connecté à un ordinateur, il permet l'utilisation de ce dernier. Le clic de la souris est remplacé par un temps de fixation prédéfini (c'est-à-dire : si l'utilisateur fixe un endroit précis de l'écran pendant une durée minimale, cela actionnera un clic gauche de la souris) et le clavier est affiché à l'écran. Bien que rudimentaire, cette technique permet l'utilisation d'un ordinateur et l'utilisation d'un clavier numérique pour communiquer (écrire un mail, un courrier, etc.) (Farr et al., 2021). Cette méthode est également utilisable par les patients atteints de forme sévère du syndrome d'enfermement, où le seul le mouvement oculaire vertical est possible (Cross et al., 2022).
- L'analyse de l'activité cérébrale. Cette méthode utilise principalement les potentiels évoqués. Ces derniers sont une modification du potentiel électrique du système nerveux suite à une stimulation externe. L'IHM (en l'occurrence, l'interface *cerveau-machine*) la plus courante mesure l'EEG du patient pendant qu'il regarde un clavier numérique qui illumine, une par une, les touches d'un clavier. En se concentrant suffisamment sur la lettre qu'il veut taper, lorsque cette dernière sera illuminée, cela déclenchera un potentiel évoqué. Les outils récents combinent cette approche avec des méthodes d'intelligence artificielle pour parvenir à de meilleurs résultats (S. Majumdar et al., 2023; Milekovic et al., 2018). Cette méthode permet aux patients

atteints du syndrome d'enfermement de taper des lettres ou des mails, leur permettant ainsi de communiquer.

### c. La sécurité

Au sein d'une machine complexe, la quantité d'informations visualisables est parfois trop importante pour qu'un seul opérateur puisse, en permanence, les avoir toutes sous les yeux. Par exemple, sur une voiture, toutes les informations ne sont pas immédiatement à la disposition du conducteur, seules celles qui lui permettent de circuler en toute sécurité le sont (vitesse du véhicule, rotation du moteur, carburant restant, etc.). Certaines informations – vitales pour le bon fonctionnement de la voiture mais dont la vitesse d'évolution ne nécessite pas un affichage permanent, comme la pression des pneus – ne sont accessibles qu'après avoir appuyé sur un ou plusieurs boutons (en naviguant dans un menu de l'interface par exemple). En d'autres termes, à moins de dépasser une certaine valeur critique (par exemple dans le cas de la pression des pneus, à cause d'une crevaison), il est du ressort du conducteur de vérifier la valeur de ces paramètres, notamment lors de situations particulières (comme un trajet long sur autoroute dans le cas de la pression des pneus).

De même, dans le cas d'un avion, et ce afin de diminuer la quantité d'informations affichées en même temps, on observe une tendance à diminuer le nombre d'affichages dans le cockpit. Cette tendance peut s'expliquer par la volonté de fluidifier la prise d'informations : un plus petit nombre d'affichages à la disposition des pilotes implique un chemin oculaire plus court pour effectuer leur prise d'informations. Toutefois, ce genre d'interfaces se doit d'être réactif et intelligent : il peut arriver – au même titre que pour la pression des pneus pour une voiture – qu'une information vitale ne soit pas *actuellement* affichée à l'écran mais qui soit *nécessaire* à la bonne tenue de l'avion. Il faut alors que la machine elle-même pousse les informations et les mette en exergue auprès du ou des pilotes.

Toutefois, le concept même d'utiliser une alarme pour prévenir le pilote qu'une information critique doit être intégrée immédiatement est à prendre avec la plus grande précaution. En effet, plusieurs travaux ont montré ces dernières décennies que les pilotes d'avion peuvent se retrouver dans des situations de « surdité attentionnelle » ou de « cécité attentionnelle ». Ces troubles de l'attention se caractérisent : 1) par l'incapacité du sujet à intégrer une information capitale vis-à-vis de la sécurité de la situation et, par ce manquement, 2) par la mise en danger de l'intégrité de l'appareil.

Ces situations pourraient toutefois se voir évitées grâce à l'intervention d'assistance au pilotage, notamment via un assistant personnel virtuel du pilote.

## 2. Assistants personnels

Les assistants personnels au sens général du terme existent depuis plus d'une dizaine d'années sur le marché, notamment dans le milieu des constructeurs de téléphones, et sont intrinsèquement liés à l'histoire de la reconnaissance vocale par intelligence artificielle.

Les pionniers de la reconnaissance vocale sont des entreprises et organismes dont nous avons déjà parlé auparavant : IBM pour le privé et la DARPA états-unienne pour les agences gouvernementales. Le premier outil de reconnaissance vocale, présenté par IBM en 1962 était

capable de reconnaître une dizaine de mots ainsi que les chiffres de zéro à neuf. Les recherches se sont poursuivies dans les années soixante-dix et quatre-vingts au sein de la DARPA, avec le développement d'un outil capable de reconnaître environ 1000 mots individuels dans les années soixante-dix, puis des séquences de mots dans les années quatre-vingts.

Les assistants personnels numériques tels que nous les entendons aujourd'hui ont été introduits sur le marché des smartphones en 2010-2011, via le programme Siri sur l'iPhone 4S© : l'entreprise Apple, constructrice des smartphones iPhone©, a fait l'acquisition de Siri, une entreprise qui émane du Stanford Research Institute (maintenant connu sous le nom de SRI international), institut de recherche financé par la DARPA. Siri permet notamment d'interagir avec son téléphone : envoi de messages, passages d'appel, réponse à des questions qu'on lui pose, lancer de la musique, etc.

Depuis Siri, les assistants personnels numériques se sont multipliés, notamment développés par les géants du web (les « GAFAM ») :

- Amazon a lancé Alexa en 2014, en même temps que son enceinte connectée Amazon Echo©. Alexa est un robot conversationnel avec lequel l'utilisateur peut converser ou auquel l'utilisateur peut demander des services pré-programmés (mettre un réveil, de la musique, donner les prévisions météo, modifier l'agenda, etc.). Via le kit de compétences fournis aux développeurs, il est possible d'enrichir les capacités d'Alexa pour lui permettre d'accomplir des tâches plus complexes (commander une pizza, commander un taxi ou un VTC, gérer la domotique du foyer, etc.).
- Microsoft a lancé Cortana en 2014. Sa particularité est l'utilisation d'un bloc-notes, au sein duquel Cortana peut stocker des informations sur son utilisateur pour affiner ses réponses ultérieures (centres d'intérêt, position, tâches, heures de creux, etc.). Cortana utilise le moteur de recherche Bing© (propriété de Microsoft) pour répondre aux questions de ses utilisateurs, elle peut par exemple donner un résultat sportif, la météo actuelle à un emplacement donné ou encore lire la biographie de quelqu'un).
- Google a lancé son Assistant Google en 2016. Comme ses concurrents ci-dessus, l'Assistant Google peut consulter la météo ou répondre à des questions qu'on lui pose (via Google). Toutefois, grâce au programme de langage naturel de Google, celui-ci est capable de soutenir une conversation. Il peut également reconnaître une chanson chantée, fredonnée ou sifflée par son utilisateur.

La DARPA est également, depuis 2021, en train de développer un assistant personnel intelligent et virtuel à destination de l'armée états-unienne. Ce programme, le PTG (de l'anglais « Perceptually-enabled Task Guidance », guidage des tâches basé sur la perception), permettra à des individus instrumentés (caméras, micros, centrales inertielles, etc.) de recevoir une assistance dans la réalisation de leur tâche via un casque de réalité augmentée. Cette assistance sera fournie par des algorithmes d'intelligence artificielle. D'après la DARPA, ce genre d'assistant permettrait à leurs utilisateurs d'agrandir leurs panels de compétences : par exemple un mécanicien automobile serait alors en mesure de réparer un plus grand nombre de types de véhicules différents, car il aurait moins de choses spécifiques aux différents modèles à retenir (PTG étant en mesure de lui fournir les informations qui viendraient à lui manquer, en affichant le manuel d'un véhicule spécifique en réalité augmentée, par exemple).

## IV. De la nécessité du suivi longitudinal individuel

« Nous devons analyser [le crash du Rio-Paris en 2009] à partir d'une approche systémique, dans un système technologie/homme qui doit coopérer, ce qui implique la conception des avions ainsi que la certification, la formation et les facteurs humains. »

Chesley "Sully" Sullenberger  
(pilote ayant posé un Airbus A320 sur l'Hudson, 2011)

### 1. La sécurité au cœur des évolutions en aéronautique

Le secteur aéronautique – en particulier l'aviation civile – est régi par des règles et des normes édictées par deux types d'organismes :

- Les instances internationales, au premier rang desquelles l'OACI (Organisation de l'Aviation Civile Internationale), agence qui dépend directement de l'ONU (Organisation des Nations Unies) dont le rôle est d'élaborer des politiques et des normes afin de standardiser les vols internationaux. A l'échelle européenne, ces politiques et normes sont portées par l'AEASA (Agence de l'Union Européenne pour la Sécurité Aérienne), agence de l'UE (Union Européenne) basée à Cologne. Cette dernière a pour rôle de faciliter l'adoption de ces normes par les pays membres de l'UE. Ces règles ne régissent que les vols internationaux, les vols nationaux (dits intérieurs) ne sont pas concernés.
- Les instances nationales, au premier rang desquelles la DSAC (Direction de la Sécurité de l'Aviation Civile). Cette dernière est notamment compétente en matière de sécurité des vols nationaux. La DSAC est une instance qui est née dans le cadre de la mise en conformité de la France avec la politique de ciel unique européen.

On peut distinguer plusieurs types de transports aériens (au sein desquels on confond avions et hélicoptères) : l'aviation civile (qui transporte des passagers d'aéroport en aéroport ou d'héliport en héliport), l'aviation générale (formation, loisir, vols privés, etc.) et l'aviation militaire.

Fin 2020, on comptait environ 550.000 avions et 70.000 hélicoptères en circulation dans le monde, tous types de transports confondus.

Il est souvent admis que « l'avion est le moyen de transport le plus sûr au monde », mais cette affirmation est en réalité à relativiser en fonction de la méthode de calcul : doit-on compter le nombre de victimes par rapport au nombre de passagers transportés ? Par rapport au nombre de kilomètres parcourus ? Par rapport au nombre de vols effectués ? Par rapport à la durée du transport ? Si l'avion est bel et bien le moyen de transport le plus sûr par kilomètres parcourus, il se fait damer le pion par le train et le bus si l'on regarde par rapport à la durée du transport. Les TABLE 1 et TABLE 2 ci-dessous récapitulent ces deux données pour l'ensemble des moyens de transports existants en 1999 et en 2001-2002 au sein de l'UE.

Moyen de transport	Passagers tués par 100 millions de passagers-kilomètres (UE à 15)	
	1999	2001-2002
Deux-roues motorisés	16	13,8
Déplacement pédestre	7,5	6,4
Bicyclette	6,3	5,4
Voiture	0,8	0,7
Navire transbordeur	0,33	0,25
Autobus et autocar	0,08	0,07
Train	0,04	0,05
Air (aviation civile)	0,08	0,035

*Table 1 : Nombre de passagers tués par millions de passagers-kilomètres (c'est-à-dire en fonction de la distance parcourue) en fonction du moyen de transport utilisé. Source : Conseil Européen de la Sécurité des Transports.*

Moyen de transport	Passagers tués par 100 millions de passagers-heures (UE à 15)	
	1999	2001-2002
Deux-roues motorisés	500	449
Bicyclette	90	75
Déplacement pédestre	30	25
Voiture	30	25
Air (aviation civile)	36,5	16
Navire transbordeur	10,5	8
Train	3	3
Autobus et autocar	2	2

*Table 2 : Nombre de passagers tués par millions de passagers-heure (c'est-à-dire en fonction de la durée du trajet) en fonction du moyen de transport utilisé. Source : Conseil Européen de la Sécurité des Transports.*

D'après les données fournies par le bureau d'accidentologie d'Airbus, sur la période 1958 – 2022, le taux d'accidents aériens dans l'aviation civile est en tendance baissière quasi-permanente. En 2022, ce taux atteint 0,07 (par million de vols) lorsque l'on ne regarde que les accidents mortels, et 0,26 (par million de vols) lorsque l'on regarde les accidents à l'issue desquels l'avion n'est plus réparable (« hull loss » en anglais).

Toutefois, ces chiffres ne prennent pas en compte les autres types de transports aériens (aviation générale et militaire). En 2022 – hors conflit russo-ukrainien – 65 accidents aériens ont été recensés, dont 8 accidents d'hélicoptère. Ils ont causé le décès de 357 personnes (passagers, pilotes, équipages) dont 40 en hélicoptère (voir TABLE 3). Il est intéressant de noter que la flotte aérienne mondiale est composée de 11% d'hélicoptères, 12% des accidents sont des accidents d'hélicoptère et 11% des victimes ont été causés par ces derniers, soulignant par là une sécurité équivalente entre l'avion et l'hélicoptère.

Mois (2022)	Accidents	Dont hélicoptère	Décès	Dont en hélicoptère
Janviers	9	2	10	4
Février	5	0	24	0
Mars	12	2	155	15
Avril	6	1	10	3
Mai	4	0	38	0
Juin	6	1	19	7
Juillet	3	1	11	2
Août	3	0	8	0
Septembre	4	1	18	3
Octobre	6	0	20	0
Novembre	9	1	49	7
Décembre	7	1	5	3
Total	65	8	357	40

*Table 3 : Nombre d'accidents aériens (total et hélicoptère) et nombre de victimes (total et hélicoptère) dus à ces accidents pour l'année 2022. Le conflit russo-ukrainien n'est pas pris en compte. Le mois de mars a été si mortel du fait du crash d'un avion de ligne chinois qui a causé 132 victimes. Source : (Liste d'accidents Aériens En 2022)*

La sécurité aérienne est pensée comme une chaîne dont chaque maillon doit répondre à certaines exigences (comme les normes édictées par l'OACI, par exemple). Les maillons sur lesquels les autorités agissent et régulent sont les suivants :

- La maintenance. Les constructeurs d'aéronefs doivent fournir aux compagnies aériennes un programme d'entretien, qui pourra être adapté en fonction du domaine d'exploitation (fréquence des vols, distances parcourues, etc.). La maintenance est majoritairement prédictive : le but est d'éviter que les problèmes ne surviennent,

plutôt que de résoudre des problèmes déjà apparus. Cette maintenance est effectuée par des ateliers spécialement agréés.

- Les pilotes. La formation initiale des pilotes se déroule dans des écoles spécialisées agréées par les autorités compétentes. Les objectifs de formation sont fixés par la réglementation et peuvent changer en fonction de l'évolution des usages et des aéronefs (voir la partie sur l'EBT ci-dessus).
- Les compagnies aériennes sont notamment en charge du maintien de compétence des pilotes et de la maintenance de leurs aéronefs (qu'elle soit assurée directement par leurs soins ou sous-traitée à des entreprises spécialisées). Ce sont également les compagnies aériennes qui sont chargées des opérations aériennes préparatoires (gestion des temps de vol des pilotes, chargement des aéronefs, ravitaillement en carburant, etc.) et d'assurer le bon déroulement des vols (anticipation de la météo, gestion des imprévus, etc.). Les compagnies aériennes doivent disposer d'un agrément fourni par les autorités compétentes.
- Les aérodromes (aéroports et héliports) sont également soumis à certification. Ils doivent disposer d'infrastructures suffisantes et de qualité (hangars, pistes de décollage, voies de circulation, etc.) pour permettre le décollage et l'atterrissage en toute sécurité.
- Le contrôle aérien est le dernier maillon de la chaîne et non le moindre. Il fait l'objet de certification sur plusieurs points. Le volet humain (les contrôleurs aériens) doit recevoir une formation spécifique. Le volet technique doit disposer d'infrastructures suffisantes pour assurer le rôle du contrôle aérien : radars, moyens de communication, etc.).

Les autorités régulatrices disposent donc d'un ensemble de facteurs sur lesquels elles peuvent agir pour garantir et améliorer la sécurité de l'espace aérien.

Toutefois, depuis les années quatre-vingts, cette approche prescriptive (qui conduit à produire des réglementations détaillées, par exemple) a été amendée pour prendre en compte les facteurs humains. L'industrie aéronautique a alors reconnu que les erreurs humaines sont inévitables et qu'il faut mieux les prendre en compte pour poursuivre l'amélioration de la sécurité aérienne.

C'est en ce sens que la formation et l'entraînement des pilotes s'est vu modifier, avec notamment l'apparition de nouvelles approches (voir l'EBT évoqué précédemment). C'est également la raison pour laquelle l'étude des interactions entre le pilote et sa machine est primordiale, sous deux angles :

- Il faut s'assurer que les opérateurs sachent utiliser leur appareil (ce qui constitue une approche traditionnelle de la formation).
- Mais il pourrait également être pertinent de réfléchir à des moyens de rendre la machine plus « permissive » aux erreurs humaines, en étant capables de les corriger ou de les ajuster par exemple. Le déploiement et la généralisation d'assistants personnels pourraient être une façon de répondre à cette exigence.

## 2. L'opérateur doit en rester le maillon central

Nous voyons donc que l'opérateur – de par sa faillibilité – est le maillon central de la chaîne de la sécurité aérienne. Il hérite à la fois de l'intégralité de l'amont de la chaîne, qu'il doit mettre en œuvre (protocoles, réglementation, formation, etc.) ; et il est responsable de la bonne tenue de la chaîne en aval (c'est lui qui prend les décisions et actionnent les commandes de vol).

Dès lors, peut-on envisager de court-circuiter ce maillon ? Il semble que la société ne soit pas encore prête à effectuer une telle mutation. Selon les sondages, entre 15 et 60% de la population serait prête à monter dans un avion sans pilote. Cette disparité s'explique par la terminologie utilisée dans les différents sondages. Dans ceux récoltant les plus hauts scores, la question est souvent posée de la façon suivante : « Seriez-vous prêt à monter dans un avion sans pilote *au cours de votre vie* ? », l'horizon temporel n'étant pas précisé.

Il est intéressant de se pencher sur l'acceptation des voitures autonomes pour évaluer l'opinion du public à ce sujet. Alors que les études « initiales » (c'est-à-dire menées à l'aube du déploiement des véhicules autonomes, en 2017-2018) avaient tendance à montrer une bonne acceptation des voitures autonomes (Nordhoff et al., 2018), les sondages plus récents montrent au contraire une méfiance accrue envers ces véhicules. Lors de sondages récents (2023) menés aux Etats-Unis, environ 70% des répondants sont « mal à l'aise », voire « effrayés » par les voitures autonomes, quand 90% d'entre eux affirment même qu'il devrait toujours y avoir un conducteur « de secours » humain derrière le volant.

Toutefois, en conservant l'opérateur au cœur de la chaîne sécuritaire, il convient de porter une attention particulière à certains facteurs aggravant de risques, comme la fatigue due à l'utilisation prolongée d'un appareil ou encore la perte de distance (ou de la réalité) entraînée par le niveau d'abstraction parfois élevé des interfaces utilisées pour opérer la machine. L'Histoire n'est malheureusement pas exempte d'exemples d'accidents résultant d'une déconnexion entre les actions de l'utilisateur et leurs résultats attendus (l'utilisateur ne se rend plus compte de l'impact de ses actions) ou d'un défaut de conception des interfaces (l'utilisateur ne sait plus quelles actions effectuer pour opérer correctement sa machine). Les exemples sont pléthoriques mais nous pouvons en citer les plus emblématiques :

- L'affaire Kerviel de 2008, lors de laquelle un homme désintéressé (Jérôme Kerviel ne retire aucun bénéfice personnel sur ses investissements) perdit pied avec la réalité et le sens des chiffres qu'il mania. Les sommes qu'il engage sur la période 2005 – 2007 sont supérieures aux fonds propres de la Société Générale, mettant en danger la survie de son entreprise si sa fraude était découverte par des concurrents mal intentionnés.
- La catastrophe nucléaire de Tchernobyl de 1986, provoquée par l'explosion du réacteur n°4, découle à la fois d'une série de décisions discutables par le personnel qualifié et par une mauvaise compréhension du cours des événements (procédure d'essai rédigée par des ingénieurs ignorant le comportement du réacteur dans le domaine d'utilisation, fermeture manuelle et prolongée du système de refroidissement de secours du cœur, nombre de barres de contrôles hors du cœur trop faible pendant une durée prolongée, quasi-arrêt involontaire du réacteur).

- Le crash dans l'océan Atlantique du vol Air France AF447 entre Rio de Janeiro et Paris résulte d'une série de problèmes techniques (le gel des sondes Pitot), d'errements du pilote de droite (maintien du stick en position arrière, ce qui eut pour effet de relever le nez de l'avion en permanence, alors que l'avion n'a jamais « piqué du nez » par lui-même, aboutissant au décrochage de l'appareil), ainsi qu'une conception imparfaite de certains éléments d'interface et de pilotage (d'une part le pilote de gauche ne s'est jamais rendu compte des agissements de son collègue, et d'autre part les commandes ne sont pas couplées : les agissements du pilote de droite n'étaient pas répercutés sur les commandes du pilote de gauche, comme c'est normalement le cas sur ce type d'appareil).

Ces quelques exemples mettent en lumière la nécessité de réfléchir aux outils de demain sous l'angle de la gestion de contrôle et de la sécurité. L'élaboration et la création d'interfaces homme-machine (IHM) permettant de répondre à ce besoin grandissant d'amélioration de la sécurité et de réduction des risques résultent d'une interaction multidisciplinaire riche : neurosciences, ergonomie, informatique, design, électronique, etc. Les travaux présentés ci-après ne prétendent pas répondre de façon exhaustive à une problématique générale. Bien au contraire, nous présenterons ici des résultats parcellaires sur une problématique définie : nous allons mettre en évidence, à l'aide des neurosciences et des mathématiques appliquées, quelques clés permettant de comprendre comment un pilote d'hélicoptère professionnel interagit avec son environnement de travail.

### 3. Accidentologie et enseignements

La conduite d'hélicoptère n'est, elle non plus, pas exempte d'exemples tragiquement célèbres (civils comme militaires) d'accidents qui auraient pu être évités (c'est-à-dire qui sont partiellement ou totalement dus aux facteurs humains) :

- Le 14 janvier 1986, un hélicoptère Aérospatiale AS350 Ecureuil comportant cinq personnes (dont le chanteur Daniel Balavoine et l'organisateur du rallye Paris-Dakar Thierry Sabine) s'écrase dans le Sahara malien. Malgré le manque de visibilité dû à la nuit et à une tempête de sable, et alors que l'hélicoptère s'est arrêté pour ces raisons et qu'un véhicule terrestre est en route pour ramener les passagers au camp, il redécolle inexplicablement. L'appareil volait en rase-motte du fait de la faible visibilité et a heurté une dune avec ses patins.
- Le 9 mars 2015, deux hélicoptères Aérospatiale AS350 Ecureuil, transportant cinq passagers chacun (dont la navigatrice Florence Arthaud, la nageuse Camille Muffat et le boxeur Alexis Vastine) dans le cadre du tournage d'une émission de télévision, se percutent puis s'écrasent en Argentine. Les enquêteurs argentins concluent à un problème de détection visuelle des appareils entre eux, probablement causé par la pression liée aux prises de vue. Les pilotes auraient pu être distraits par les requêtes des caméramans, modifiant leurs trajectoires et amenant à leur collision.
- Le 25 novembre 2019, un hélicoptère Tigre et un hélicoptère Cougar des forces armées françaises se percutent puis s'écrasent dans le désert malien, emportant treize soldats français. L'enquête du BEA-E (bureau enquêtes accidents pour la sécurité

aéronautique d'Etat) conclut à une compréhension erronée de la situation par les équipages et stipule que les causes de l'accident relèvent exclusivement du domaine des facteurs organisationnels et humains. Le rapport note notamment une charge mentale accrue pour le chef de patrouille, une ergonomie perfectible du poste de pilotage du Tigre et une focalisation de l'attention des membres d'équipage sur la zone de combat. Il déclare enfin que certaines des défaillances peuvent avoir été provoquées par une charge mentale de travail élevée pour les équipages en lien avec la complexité de la mission.

- Le 26 janvier 2020, un hélicoptère Sikorsky S-76 s'écrase aux alentours de Los Angeles aux Etats-Unis. Il transportait neuf personnes, dont le joueur américain Kobe Bryant et deux enfants de treize ans. La cause retenue par le Conseil National de la Sécurité des Transports (*National Transportation Safety Board*, NTSB) est une désorientation spatiale du pilote, due à sa décision de maintenir le vol à vue alors que les conditions météorologiques s'étaient dégradées et auraient dû l'inciter à voler aux instruments.
- Le 7 mars 2021, un hélicoptère Aérospatiale AS350 Ecureuil s'écrase à Touques dans le Calvados, avec à son bord le pilote accompagné de l'homme d'affaires et l'homme politique Olivier Dassault. Les pâles du rotor principal ont percuté un arbre à dix-neuf mètres de haut. L'enquête conclut sans certitude qu'une multitude de facteurs ont pu contribuer à l'accident. La zone d'atterrissage et de décollage était exiguë et c'était la première fois que le pilote la pratiquait sans instructeur, le pilote était âgé (74 ans) avec une vision nécessitant le port de verres correcteurs mais il n'en portait pas au moment du décollage, et le contraste lumineux était faible rendant les branches (dégarnies de feuilles) de l'arbre difficilement visibles.

D'une manière plus générale, sur la période 2020 – 2022, le Bureau d'Enquêtes et d'Analyses pour la sécurité de l'aviation civile (BEA), chargé des enquêtes sur les aéronefs civils non affrétés par l'Etat, a publié trente rapports relatifs à des accidents ou incidents survenus lors de l'exploitation d'hélicoptères de 2017 à 2021. Sur ces trente rapports, presque deux tiers (dix-neuf) font état d'accidents provoqués par le pilote et qui auraient pu être évités. Par ordre décroissant du nombre d'accidents au sein de chaque catégorie causale :

- Douze rapports font état d'une perte de contrôle de l'hélicoptère par le pilote. Sur ces douze accidents, sept sont dus à une mauvaise prise en compte du vent par les pilotes. Ces cas entraînent un départ en lacet que le pilote ne parvient pas à maîtriser.
- Trois rapports portent sur des vols trop proches du relief. Deux concernant des pilotes qui avaient connaissance de leur environnement et qui avaient a priori repéré les éléments qu'ils ont percuté. Le troisième cas est un vol à faible hauteur volontaire ; d'après le BEA, ce genre de situations se produit régulièrement, lorsque le pilote souhaite faire démonstration aux passagers de ses prouesses de pilotage.
- Deux pilotes avaient une charge mentale trop élevée lors de vols effectués par nuit noire. Le premier cas résulte d'un manque de surveillance des paramètres de vol lors d'une phase à charge mentale élevée, débouchant sur une erreur de sélection du mode de pilotage automatique (quasi-collision avec la surface de l'eau). Le second cas

découle d'une perte de conscience de la situation de l'hélicoptère vis-à-vis du relief (entraînant la collision avec la végétation).

- Enfin, deux situations ont été causées par un suivi médical parcellaire des pilotes, l'un omettant ses problèmes cardio-vasculaires et de sciatique ; l'autre omettant de mentionner des vertiges probablement dus à des troubles vestibulaires. Le BEA note qu'il est possible que ces omissions aient été motivées par la crainte d'une suspension de leurs licences de vol si les pilotes venaient à s'en ouvrir auprès des autorités médicales compétentes.

Certains de ces accidents retiennent particulièrement notre attention. Concernant les deux accidents impliquant une charge mentale trop élevée du pilote, il est légitime de se demander s'ils n'auraient pas pu être évités grâce à des moyens de mesure objectifs du niveau de charge mentale du pilote. Cette question est en réalité multiple : qu'est-ce que la charge mentale ? Est-ce une mesure quantifiable et, le cas échéant, mesurable ? De quels paramètres dépend-elle ? Ces paramètres sont-ils mesurables dans un cadre expérimental ? Dans un cadre opérationnel ? Cette dernière question notamment est pertinente. Pour la raison évoquée par le BEA ci-dessus (crainte d'une perte de la licence de vol), les pilotes peuvent parfois être rétifs à toute mesure de paramètres physiologiques pendant le vol.

D'autre part, il est également intéressant de se pencher sur le cas des pilotes omettant volontairement de mentionner leurs soucis médicaux. En effet, les systèmes sensoriels sont soumis à une dégénérescence liée à l'âge. C'est notamment vrai pour le système visuel, mais également pour le système vestibulaire. Dans le premier cas, il est courant pour la population humaine de voir sa vision se dégrader, entraînant le port de verres correcteurs. Dans le second cas, comme cela a été le cas dans un des accidents mentionnés ci-dessus, l'âge augmente les risques de troubles vestibulaires, qui entraînent l'apparition de vertiges. C'est particulièrement dérangeant pour la population des pilotes, amenés à se déplacer dans les trois dimensions de l'espace au quotidien.

Enfin, dans tous les cas mentionnés (perte de contrôle, distance au relief, charge mentale et problèmes médico-physiologiques), il semble pertinent de s'interroger sur les problématiques soulevées par les interfaces homme-machine (IHM). Les IHM d'un hélicoptère ont-elles vocation à être suffisamment autonomes pour pallier les défaillances du pilotage (enclenchement automatique du pilotage automatique lorsque l'aéronef s'approche trop près d'une surface de collision) ? Peuvent-elles pallier les défaillances physiologiques (maintien de l'assiette lorsque le pilote n'est plus en état de maintenir l'appareil dans sa position ou lorsqu'il est sujet à une désorientation spatiale) ? Sont-elles, d'une manière générale, adaptée pour répondre de manière pertinente et rapide au déclenchement d'une situation critique à l'issue potentiellement fatale ?

## V. Vers une évolution du cockpit

“The concept of progress acts as a protective mechanism to shield us from the terrors of the future.”

*Dune* (Frank Herbert, 1965)

### 1. Présentation de l'expérience

L'expérimentation IKKY (Intégration du cockpit et de ses systèmes) est un projet de recherche et développement dont le but final est de fournir aux industriels des outils afin de préparer puis d'intégrer des innovations aux fonctions et systèmes des cockpits d'aéronefs (avions et hélicoptères). C'est un projet mené par un consortium mi-industriel de l'aéronautique (Thales AVS France, Airbus Helicopters), mi-académique (Centre Borelli, Institut de Recherche Biomédicale des Armées), le CORAC (Conseil pour la Recherche Aéronautique Civile).

Cette expérience s'articule autour de plusieurs objectifs, parmi lesquels :

- Evaluation de l'état psychophysique du pilote d'hélicoptère en temps réel, interfaces homme-machine, etc.
- Amélioration de la compréhension des facteurs humains dans la relation instructeur-élève (développement de métriques objectives pour évaluer les capacités d'un élève à accomplir une tâche donnée)

### 2. Protocole expérimental

Pour cette expérience, le consortium CORAC a fait appel à neuf pilotes d'hélicoptère professionnel, qui ont été évalués sur un simulateur Full-Flight de niveau D. Ce niveau de certification est le plus élevé pour un simulateur aéronautique, et il est qualifiant en ZFT (« Zero-Flight Time »), ce qui signifie qu'un pilote peut obtenir une qualification ou une certification donnée uniquement sur ce simulateur (et donc, sans jamais l'avoir appliquée au préalable sur un aéronef réel, d'où l'appellation ZFT). Le simulateur était une propriété de Thales AVS France, branche Training & Simulation.

En sus, un panel d'experts a également participé à l'élaboration du protocole expérimental. Ces experts peuvent être divisés en plusieurs catégories selon leurs contributions respectives :

- Une psychologue, qui a effectué les débriefings avec les pilotes à la fin de l'expérience, a produit les comptes rendus et a réalisé les questionnaires NASA-TLX auxquels ont répondu tous les pilotes.

- Les ingénieurs de Thales Training & Simulation ont créé la chaîne de mesure. Cette chaîne avait plusieurs caractéristiques à son cahier des charges. La première était de réunir l'intégralité des données dans un même écosystème (le Crew Monitoring System©) : capteurs physiologiques, caméras, données simulateur, etc. La seconde était que ces données soient synchronisées dès l'enregistrement.
- Plusieurs spécialistes en facteurs humains (notamment issus de l'IRBA, l'Institut de Recherche Biomédicale des Armées) ont été chargés de préparer certaines interfaces spécialement pour cette expérience.
- Deux spécialistes en aéronautique ont été chargés de créer les deux scénarios réalistes selon un cahier des charges précis. Le premier scénario devait être simple, homogène et sans surprise. Le second scénario devait être complexe, varié et apporter son lot de rebondissements (pannes, changement de mission, etc.).
- Des chercheurs spécialistes du système sensorimoteur ont construit deux expériences préalables aux scénarios réalistes, auxquels tous les pilotes ont participé (voir ci-après).
- Des chercheurs spécialistes en analyse de données, en mathématiques appliquées et en machine learning ont dépouillé les données pour les analyser, soit à des fins statistiques, soit pour créer un modèle d'apprentissage automatique.

Le simulateur utilisé est montré ci-dessous en [FIGURE 5](#). Afin d'être qualifié de « Full Flight niveau D », le simulateur doit remplir un certain nombre de conditions et d'exigences, notamment en terme de fidélité vis-à-vis de la réalité. Le système de mouvement du simulateur doit comporter six degrés de liberté, le système de visualisation doit avoir un champ horizontal d'au moins 150°, les visuels doivent être capables d'afficher des conditions de jour, de crépuscule et de nuit, et un système dynamique de ressenti des forces normalement subies en vol.

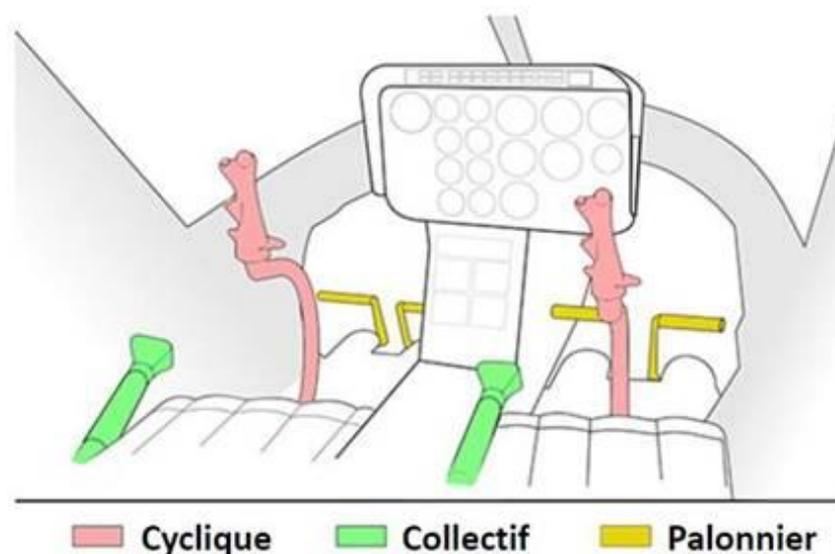


*Figure 5 : Schéma du simulateur utilisé pour l'expérimentation IKKY. La cabine utilisée était celle d'un Eurocopter 135, le pilote était assis à droite. Le dôme prenait l'intégralité du champ visuel et il était monté sur un système de vérins à six degrés de liberté.*

La cabine utilisée était celle d'un Eurocopter 135 (EC135), hélicoptère civil notamment utilisé pour les missions de secours (en France, il fait partie de la flotte du Service d'Aide Médicale d'Urgence, le SAMU). Cela inclut les commandes de vol (voir [FIGURE 6](#)) et les instruments de vol (voir [FIGURE 7](#)).

Il y a trois types de commandes de vol aux rôles distincts :

- Le collectif (en vert sur le schéma) est la commande qui permet d'ajuster la puissance du rotor principal de l'hélicoptère. En d'autres termes, lorsque la commande est tirée vers le haut par le pilote, la puissance du rotor principal augmente et l'hélicoptère gagne de l'altitude.
- Le cyclique (en rouge sur le schéma) est la commande généralement appelée « manche » ou « manche à balai ». Elle permet de modifier l'orientation des pales de l'hélicoptère. En d'autres termes, c'est la commande qui permet de modifier l'inclinaison de l'hélicoptère. Lorsque le cyclique est poussé en avant, le nez de l'hélicoptère va plonger vers l'avant, etc.
- Le palonnier (en jaune sur le schéma) est constitué de deux pédales que le pilote actionne pour gérer la puissance du rotor anticouple (ou « rotor de queue »). Ce rotor secondaire permet de compenser le couple induit par le rotor principal (opposé au sens de rotation des pales) ; sans ce dernier, l'hélicoptère tournerait sur lui-même en permanence. Le rotor anticouple permet également au pilote de déplacer l'hélicoptère en lacet (dans le plan horizontal).



*Figure 6 : En couleurs, les commandes de vol conventionnelles d'un hélicoptère. En vert, le collectif permet de gérer la puissance du rotor principal ; en rouge le cyclique permet de modifier l'inclinaison des pales ; en jaune le palonnier permet de modifier la puissance du rotor anticouple.*

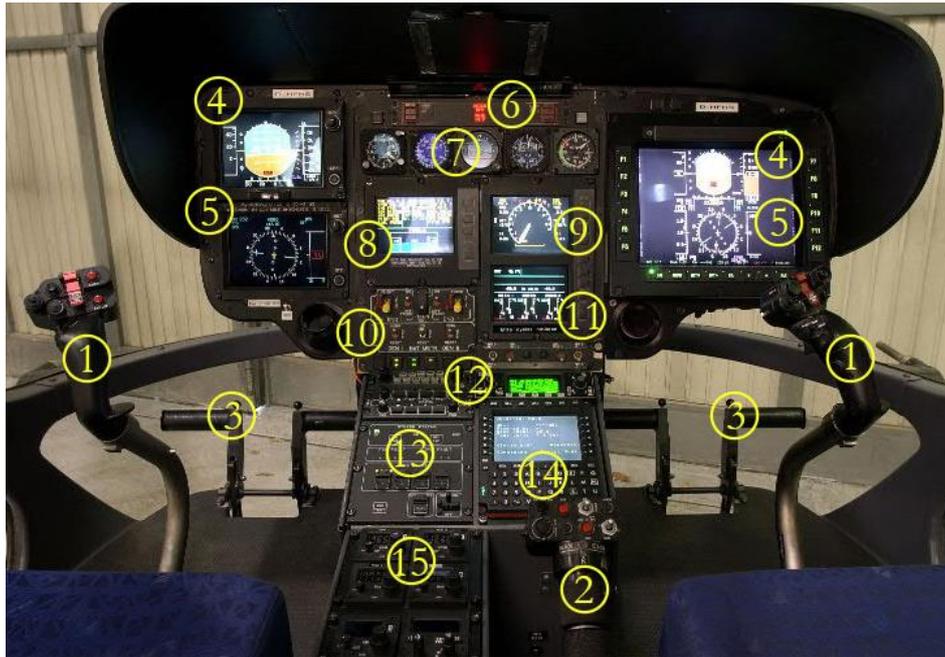


Figure 7: Photo d'un cockpit d'EC 135, avec les différents instruments et commandes de vol. 1: le cyclique, pour incliner les pales. 2: le collectif, pour modifier la puissance du rotor principal. 3: le palonnier, pour modifier la puissance du rotor anticouple. 4: écran de vol principal (PFD, de l'anglais Principal Flight Display) qui regroupe les informations essentielles, comme la vitesse verticale ou l'altitude. 5: écran de navigation (ND), sur lequel on retrouve notamment le cap et sur lequel on peut afficher une carte. 6: unité d'avertissement, qui regroupe les alertes et les pannes principales (niveau de carburant bas, défaillance du pilote automatique, etc.). 7: instruments analogues de secours (altimètre, vitesse, etc.). 8: affichage d'avertissements (CAD), pour les alertes et les pannes non-critiques (pilote automatique non enclenché, moteur en mode manuel, etc.). 9: Indicateur de limite FLI (couple moteur, température de sortie de turbine et vitesse du compresseur) et moment du mât (forces agissant perpendiculairement à l'arbre du rotor principal). 10: Contrôle numérique du moteur (FADEC), qui permet notamment l'allumage ou la relance des moteurs. 11: Affichage de surveillance du véhicule et du moteur (VEMD), qui affiche la pression et la température de l'huile des moteurs, le niveau de batterie et la température extérieure. 12: contrôleurs des affichages. 13: panneau de gestion des modes du pilote automatique 14: écran de contrôle multifonctions. 15: panneau de gestion des systèmes de communication.

Les pilotes étaient présents pendant deux journées chacun. Ils sont tous passés par les mêmes étapes. La première journée était décomposée ainsi :

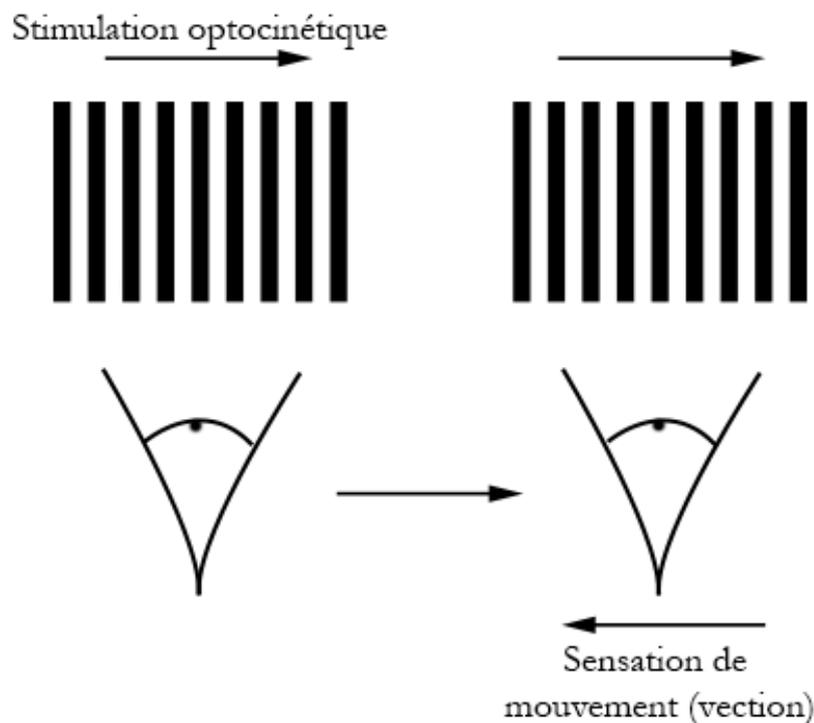
- Une prise en main du simulateur afin de se familiariser avec les équipements et leurs spécificités.
- Deux expériences « psychomotrices » décrites ci-après.
- Un premier scénario réaliste, plutôt simple en termes de tâches à réaliser, d'une heure environ, lors duquel ils étaient instrumentés.

La deuxième journée se passait comme suivant :

- Un deuxième scénario réaliste, plus long et plus complexe, d'une heure et demi à deux heures environ, lors duquel ils étaient instrumentés.
- Un débriefing avec une psychologue, lors duquel ils étaient invités à répondre à un questionnaire type de NASA-TLX.

## a. Expérience psychomotrice 1 : vection

Lors de cette première expérience psychomotrice, les pilotes étaient soumis à des stimulations visuelles susceptibles d'induire un sentiment de vection. La vection est la sensation de mouvement propre d'un sujet, provoquée par une stimulation optocinétique. En d'autres termes, ce phénomène survient lorsque l'environnement d'un sujet est en mouvement alors que ce dernier est immobile : il peut alors avoir l'impression d'être lui-même en mouvement. C'est par exemple le cas en train, lorsque le train à côté de celui du sujet quitte la gare alors que le sien est immobile, le sujet peut avoir l'impression, pendant un bref instant, que c'est son propre train qui quitte la gare (voir [FIGURE 8](#)).



*Figure 8: Exemple de stimulation optocinétique pouvant induire une illusion de type vection. La direction de l'illusion est toujours opposée à la direction de la stimulation optocinétique et reproduit généralement sa géométrie. Si la stimulation est sphérique, la vection sera une rotation ; si la stimulation est linéaire, la vection sera une translation.*

La stimulation optocinétique était délivrée grâce à l'interface visuelle du simulateur. En lieu et place de l'environnement réaliste normalement diffusé, les ingénieurs participant à l'expérience avaient développé un nuage de points qui pouvaient se déplacer dans une direction donnée (d'avant en arrière, en rotation vers la gauche, etc.). Lors de cette première expérience, les pilotes devaient appuyer sur un bouton lorsque le sentiment de vection apparaissait.

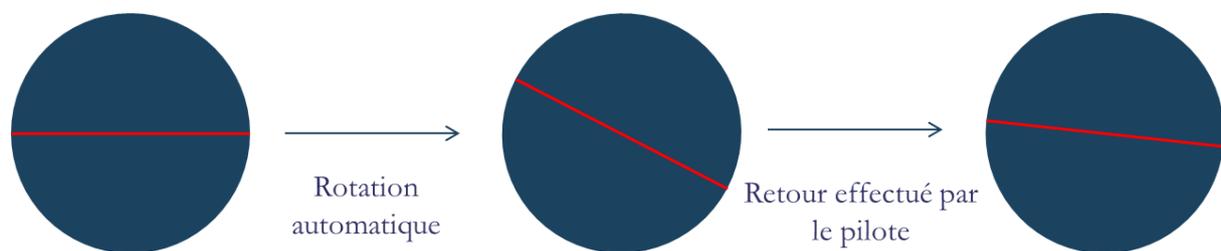
En effet, la vection est une sensation d'illusion provoquée par une stimulation du système visuel lorsque cette dernière est en accord avec le système vestibulaire. Le système vestibulaire étant sensible aux accélérations uniquement, lorsque la stimulation optocinétique est effectuée à vitesse constante (et donc en accord avec la stimulation vestibulaire, puisque le sujet est immobile, et donc à vitesse constante également, même si nulle), la sensation de vection peut

apparaître au bout de quelques secondes ou dizaines de secondes selon la sensibilité du sujet et le contexte dans lequel il se trouve (Cardullo & Zaychik, 2013; Howard & Howard, 1994).

## ***b. Expérience psychomotrice 2 : psychophysique vestibulaire***

Lors de cette seconde expérience psychomotrice, nous avons conduit un protocole similaire à une expérience psychophysique vestibulaire. Le but d'une expérience de psychophysique vestibulaire est généralement de déterminer un seuil vestibulaire. Le seuil vestibulaire peut se définir comme la frontière entre un mouvement perceptible et un mouvement imperceptible par le système vestibulaire d'un sujet. Pour effectuer ce genre de mesures, les sujets sont soumis à une stimulation vestibulaire en l'absence (autant que faire se peut) de stimulations d'autres sources (visuelles, proprioceptives, etc.).

Les stimulations vestibulaires étaient ici délivrées grâce au simulateur de vol, dont la cabine était plongée dans le noir pour minimiser la présence d'indices visuels sur le comportement du simulateur. A plusieurs reprises, le simulateur était automatiquement penché dans une direction donnée jusqu'à une inclinaison donnée. Une fois cette rotation automatique effectuée, le pilote devait, à l'aide d'un joystick, remettre le simulateur dans sa position initiale (voir [FIGURE 9](#)). Une fois cette manœuvre effectuée, ce dernier devait presser un bouton indiquant qu'il avait terminé le trajet « retour ». Il est alors possible de mesurer l'erreur effectuée par le pilote, représentée par l'angle final du simulateur dans le plan de la rotation initiale.



*Figure 9 : Schéma du déroulé de la deuxième expérience psychomotrice effectuée par les pilotes. Dans un premier temps, le simulateur entrait en rotation seul, jusqu'à se stabiliser à un angle donné. Dans un second temps, le pilote avait la main sur les commandes de vol pour ramener le simulateur le plus proche possible de sa position initiale.*

Tous les détails et résultats de cette expérience sont à retrouver au chapitre 2, dans la partie [IV. DIFFERENCES DANS LA PERCEPTION DES ROTATIONS FRONTALES ET SAGITTALES](#) du présent manuscrit.

## ***c. Scénarios réalistes***

Lors des deux scénarios réalistes, en plus d'enregistrer les variables physiologiques issus des capteurs montrés en [FIGURE 10](#), les pilotes étaient également invités à donner à l'oral, à des moments précis prédéterminés, une auto-évaluation de leur niveau de charge mentale. Les capteurs utilisés pour l'analyse de données ultérieure sont entourés en vert.

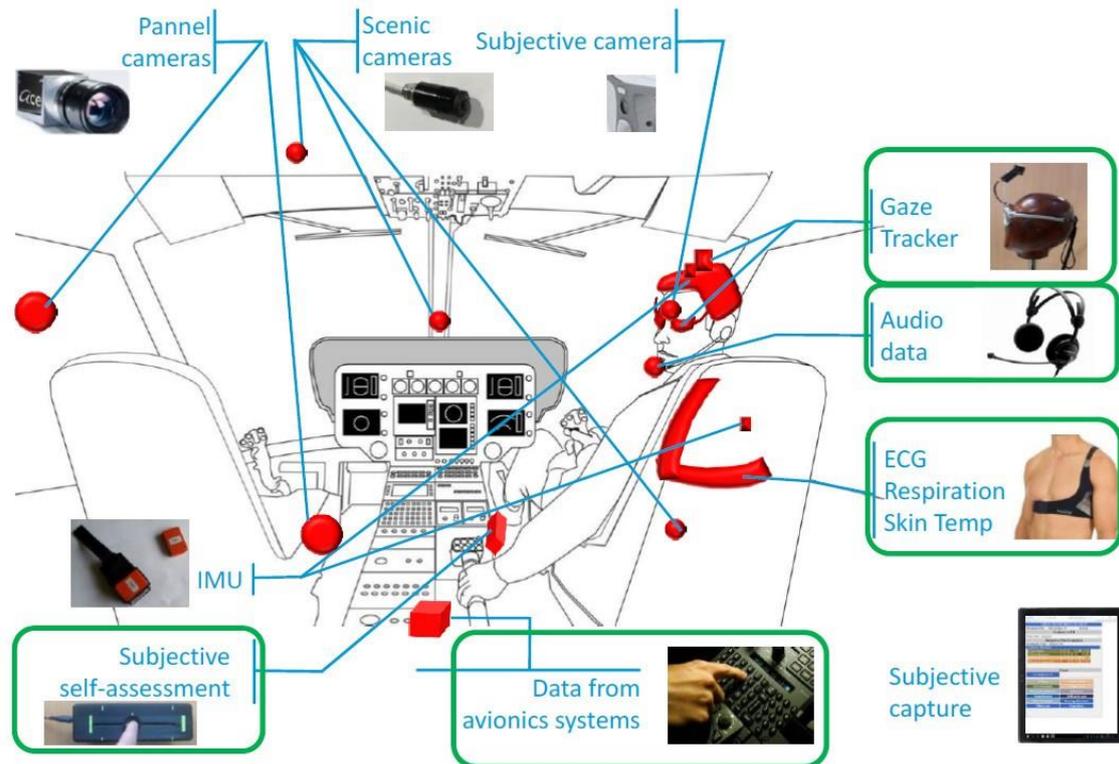


Figure 10: Le Crew Monitoring System® de Thales Equipment® enregistre et synchronise les données de tous les capteurs entourés en vert. Des capteurs additionnels (caméras, centrales inertielles, etc.) ont été utilisés pour vérifier et valider le fonctionnement des capteurs. Abréviations: IMU = Inertial Measurement Unit (centrale inertielle). La saisie subjective est un outil à disposition des instructeurs pour noter tout événement qu'ils jugeraient nécessaires (comme les valeurs données à l'oral par les pilotes lors des auto-évaluations de charge mentale).

Les scénarios utilisés ont été construits spécialement pour cette expérience par les experts en aéronautique impliqués sur le projet IKKY. Ils l'ont été en suivant les deux paradigmes suivants :

- Pour le premier scénario, ce dernier devait être simple, sans surprise et ne devait faire appel qu'à des compétences maîtrisées par les pilotes.
- Pour le second scénario, ce devait être tout l'inverse : il devait être complexe, avec des rebondissements, varié en terme d'intensité opérationnelle (des moments calmes et d'autres surchargés) et pouvait faire appel à des qualifications qui n'étaient pas nécessairement acquises par les pilotes (pannes moteurs, évacuation sanitaire d'urgence, etc.).

Le but de cette expérience impliquant deux scénarios réalistes lors desquels les pilotes étaient instrumentés et questionnés régulièrement sur leur niveau estimé de charge mentale était de récolter un maximum de données, afin de pouvoir créer un modèle mathématique de charge mentale. Tous les détails et les résultats de cette expérience sont à retrouver au chapitre 3, dans la partie III. MODELE PREDICTIF DE LA CHARGE MENTALE DE PILOTES D'HELICOPTERE du présent manuscrit.

## 3. Finalités attendues

### a. Psychophysique vestibulaire

Le système vestibulaire est un acteur extrêmement important dans le métier de pilote. Ce système est à l'origine d'un certain nombre d'illusions sensorielles (que nous verrons plus loin) subies par les pilotes en vol, et donc indirectement responsable d'accidents. C'est pourquoi comprendre le fonctionnement du système vestibulaire dans le cadre de tâches de pilotage – ou de tâches s'en rapprochant – est primordial pour orienter la formation et l'entraînement des pilotes.

Enfin, cette expérience nous permettra également de mesurer certaines différences intra et inter individuelles dans la réalisation d'une tâche impliquant le système vestibulaire.

### b. Charge mentale

L'expérience des scénarios réalistes possède plusieurs finalités attendues. La première et principale d'entre elles est la création d'un modèle d'apprentissage automatique, capable de prédire la charge mentale des pilotes grâce au jeu de données récolté. Dans l'idéal, il faudrait que ce modèle puisse être facilement adaptable et transposable à d'autres domaines (opérateur de centrale nucléaire, par exemple). Indirectement, cela permettra également de trouver quels sont les paramètres les plus pertinents à mesurer : le modèle devrait se reposer sur certains d'entre eux plutôt que d'autres.

Les conséquences à plus long terme de cette expérience viseront plutôt à utiliser l'outil développé (le modèle) dans des conditions opérationnelles plutôt qu'expérimentales. Par exemple, si cet outil s'avère suffisamment robuste pour mesurer la charge mentale de pilotes d'aéronef dans de nouvelles conditions (aéronef jamais vu par le modèle, manié par un pilote jamais mesuré), il pourrait être un apport formidable pour les instructeurs de vol. Cet outil servirait à rendre objectifs les jugements (par nature subjectifs) de ces derniers, en indiquant quelle est la charge mentale du pilote à tâche donnée.

Enfin, cet outil pourrait également être utilisé par les ergonomes en charge d'apporter des évolutions aux cockpits d'aéronef. En mesurant la charge mentale d'un pilote utilisant une ancienne puis la nouvelle version d'une IHM donnée à tâche donnée, l'ergonome serait capable de mesurer si ses apports permettent un abaissement de la charge mentale.

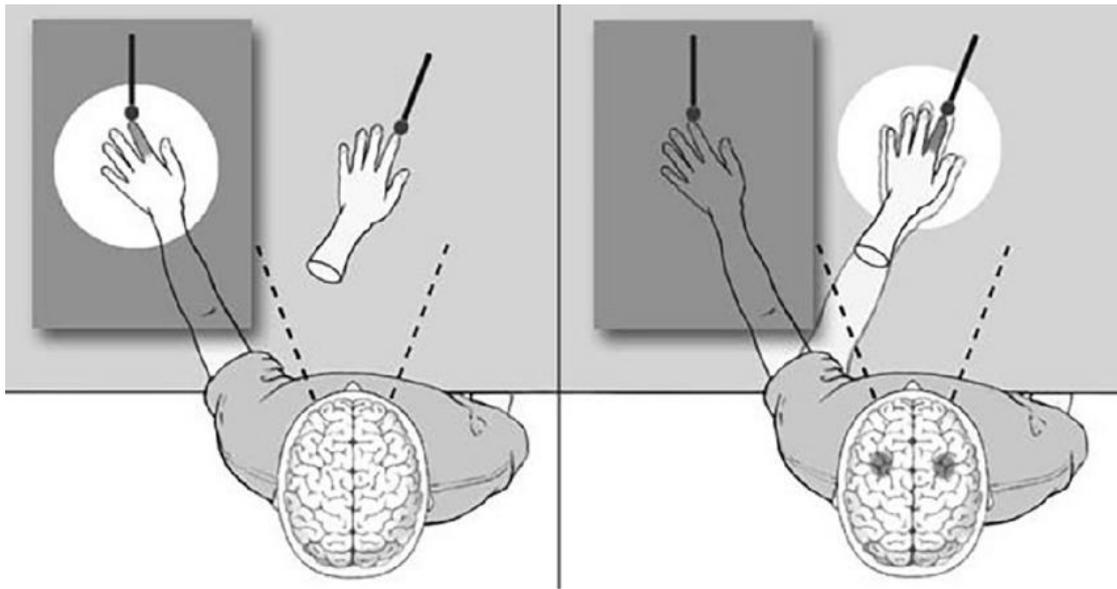
### c. En-machine-ment

L'embodiment – ou la cognition incarnée en français – est un concept de psychologie cognitive qui stipule que notre cognition (au sens général) et notre comportement s'entre-nourrissent, selon deux modes de fonctionnement :

- En « bottom-up » (de bas en haut), les informations sensorielles (visuelles, auditives, proprioceptives, etc.) influencent notre cognition. En d'autres termes, ces informations sont transformées en représentations mentales auxquelles le cerveau pourra faire appel ultérieurement pour reproduire (ou éviter de reproduire) une expérience passée. Par exemple, la sensation provoquée par la coupure d'un couteau

sera associée à une douleur vive ; ainsi, une personne en ayant déjà fait l'expérience sera précautionneuse en cuisinant.

- En « top-down » (de haut en bas), les informations cognitives influencent notre comportement (notamment sensorimoteur). En d'autres termes, il est possible de réactiver nos expériences sensorielles passées simplement en pensant ou envisageant une situation. Par exemple, l'illusion de la main en caoutchouc permet de reproduire les sensations produites par contact sur notre main, alors qu'elles sont effectuées sur une fausse main en caoutchouc.



*Figure 11 : Schéma expérimental de l'illusion de la main en caoutchouc. La situation réelle est à gauche : le sujet a sa main masquée dans un dispositif opaque. Grâce à un système vestimentaire, le sujet est amené à croire (visuellement) que la main en caoutchouc est la sienne. Dans un premier temps, l'expérimentateur stimule les deux mains de la même façon (par exemple, en les caressant avec un pinceau). Dans un second temps, une fois l'embodiment accompli, l'expérimentateur se contente de stimuler la main en caoutchouc. Bien que la vraie main ne soit pas stimulée, l'embodiment provoquera chez le sujet la sensation qu'elle l'est.*

Nous avons exploré le concept d'embodiment à la lumière du pilotage d'un hélicoptère, en deux temps. Dans un premier temps, nous avons comparé les stimulations vestibulaires subies par des sujets en conditions normales et naturelles (dans la vie quotidienne) et celles subies par des pilotes lors des scénarios réalistes. Dans un second temps, nous avons analysé précisément les mouvements de l'hélicoptère induits par les actions effectuées par les pilotes sur les commandes de vol. Les résultats de cette étude montrent :

- Que les pilotes, lors des tâches de pilotage, subissent des stimulations vestibulaires sensiblement similaires à celles rencontrées dans la vie quotidienne (au sol, par tous types de sujets).
- Que les mouvements de l'hélicoptère possèdent une plus grande liberté d'action dans le plan horizontal que dans le plan vertical. L'exploration spatiale en hélicoptère est donc le plus similaire possible à celle de la marche à pied.

Enfin, l'étude des séquences lors desquelles le pilotage automatique est activé – ou non – a montré que l'anti-corrélation des mouvements de la tête (d'une part) et de l'hélicoptère (d'autre part) en roulis est plus grande lorsque les pilotes sont en contrôle total de l'appareil (c'est-à-dire lorsque le pilotage automatique est désactivé).

Ces résultats laissent entendre que les pilotes limitent les capacités réelles de leur appareil pour ne reproduire que des mouvements proches de ce qu'ils connaissent « au sol ». Cette limitation pourrait se modéliser comme une anthropomorphisation de l'utilisation de l'interface homme-machine. La combinaison de cette anthropomorphisation et du concept d'embodiment pourrait être fusionné en un nouveau concept : l'enmagement.

Ces travaux ont notamment fait l'objet d'une communication (un poster) lors de la 32<sup>ème</sup> conférence annuelle de la Neural Control of Movement Society (Roques & Vidal, 2023).

#### ***d. Mouvements naturels de la tête***

Cette quatrième étude approfondit les résultats préliminaires précédents concernant les stimulations vestibulaires ressenties par les pilotes d'hélicoptère en vol. Cette dernière part de la comparaison de trois situations distinctes :

- Le pilotage d'un simulateur d'hélicoptère
- Une marche naturelle au sein de bureaux
- Une tâche d'exploration visuelle en étant assis

De façon similaire à la littérature existante (Carriot et al., 2014, 2017), cette étude montre que le spectre de puissance des stimulations vestibulaires subies lors de la marche naturelle peut être modélisé comme la combinaison de deux lois de puissance, avec une fréquence de transition qui dépend de l'intensité de la tâche. D'autre part, les deux tâches « assises » (pilotage en simulateur et exploration visuelle) présentent des spectres de puissance décrits par une courbe en U inversée dans tous les plans de l'espace.

En somme, cette étude conduit à plusieurs résultats :

- La posture (marche vs. assis) induit des modifications dans le contenu fréquentiel de l'information vestibulaire.
- Les pilotes opèrent leurs appareils de façon à ne pas provoquer de stimulations vestibulaires qui seraient radicalement différentes de celles ressenties en conditions écologiques.
- Néanmoins, les IHM utilisées en tant que moyen de navigation imposent des contraintes contextuelles non-naturelles à leurs opérateurs.

Cette étude a fait l'objet d'une publication scientifique dans le Journal of NeuroPhysiology (JNP) (Roques et al., 2023).

#### ***e. Vers le suivi longitudinal individuel***

Nous nous intéresserons dans le présent manuscrit aux deux premières finalités (psychophysique vestibulaire et charge mentale), qui constituent les deux faces d'une même

pièce : le système sensorimoteur des pilotes. Le lecteur intéressé par les deux sujets suivants (l'enmachinement et l'étude des mouvements naturels de la tête) est invité à se référer aux travaux d'Axel ROQUES, doctorant du Centre Borelli en convention CIFRE avec Thales AVS France, branche Training & Simulation. Au-delà des références fournies dans les paragraphes précédents, il devrait soumettre et soutenir sa thèse, intitulée « Analyse multimodale du comportement d'un opérateur d'interface homme-machine complexe », à l'horizon 2025.

En ce qui nous concerne, il convient de comprendre, dans un premier temps, quel est le lien entre une expérience psychophysique vestibulaire (CHAPITRE 2 : PSYCHOPHYSIQUE DU SYSTEME VESTIBULAIRE) et la création d'un modèle mathématique de prédiction de charge mentale (CHAPITRE 3 : CHARGE MENTALE). Ces deux sujets sont les deux extrémités du système sensorimoteur des pilotes d'hélicoptère. Nous verrons dans un premier temps l'importance, le rôle et le comportement d'une partie du système sensoriel des pilotes en situation quasi-réaliste (le système vestibulaire) ; et dans un second temps nous verrons comment se comporte le système moteur des pilotes en situations réalistes. Le système moteur sera étudié indirectement, en évaluant le niveau de charge mentale des pilotes lors de tâches de pilotage ; nous verrons comment lier le comportement du système moteur des pilotes à leur niveau de charge mentale. Nous ferons enfin la synthèse de ces deux sujets, en évaluant les tenants et les aboutissants du suivi longitudinal du système sensorimoteur des pilotes.



# Chapitre 2 : Psychophysique du système vestibulaire

---

« J'avais les nuits, répondit Faria.

– Les nuits ! êtes-vous donc de la nature des chats et voyez-vous clair pendant la nuit ?

– Non ; mais Dieu a donné à l'homme l'intelligence pour venir en aide à la pauvreté de ses sens : je me suis procuré de la lumière. »

*Le Comte de Monte-Cristo*  
(Alexandre Dumas, 1844)

<b>I. Les sens extéroceptifs et intéroceptifs .....</b>	<b>69</b>
<b>II. Le système vestibulaire .....</b>	<b>72</b>
1. Fonctionnement du système vestibulaire .....	73
a. Cellules sensorielles : les cellules ciliées.....	73
b. Anatomie des organes otolithiques .....	74
c. Fonctionnement des organes otolithiques.....	75
d. Anatomie des canaux semi-circulaires .....	76
e. Fonctionnement des canaux semi-circulaires .....	77
f. Système push-pull .....	78
g. Voie neuronale vestibulaire et noyaux vestibulaires.....	78
2. Autour du système vestibulaire.....	78
a. Le réflexe vestibulo-oculaire (VOR) .....	78
b. Pathologies .....	80
c. Vieillesse.....	80
<b>III. Illusions sensorielles liées au système vestibulaire.....</b>	<b>81</b>
1. Seuils vestibulaires.....	81
2. Différences entre pathologies vestibulaires et illusions vestibulaires.....	83
3. Illusions sensorielles d'origine vestibulaire .....	83
a. Leans.....	84
b. Piqué en vrille.....	85
c. Piqué en spirale .....	86
d. Illusion Coriolis .....	86
e. Inversion .....	87
f. Head-up.....	87
g. Head-down .....	88

<b>IV. Différences dans la perception des rotations frontales et sagittales .....</b>	<b>89</b>
1. Introduction .....	89
2. Matériels et méthodes .....	92
a. Sujets .....	92
b. Protocole expérimental .....	93
c. Mesures .....	95
d. Statsitiques .....	95
e. Analyse .....	95
3. Résultats .....	96
4. Discussion .....	100
a. Contributions respectives des organes otolithiques et de la proprioception dans la perception du mouvement dans notre protocole .....	100
b. Pourquoi existe-t-il un biais dans la perception du mouvement par le système utriculaire ? .....	101
c. Doit-on tester régulièrement la fonction vestibulaire des pilotes professionnels ? .....	102
d. Limitations de l'étude.....	103

Nous avons mis en évidence dans l'introduction le besoin d'un suivi longitudinal individuel et comment cela s'articule autour d'une meilleure compréhension des mécanismes qui affectent les pilotes, tant lors des vols qu'en dehors des vols.

Nous verrons dans ce chapitre comment l'étude du système vestibulaire peut faire partie de la solution des questions soulevées précédemment. Dans un premier temps, nous ferons des rappels quant à l'anatomie et au fonctionnement général du système vestibulaire. Puis, après avoir mis en lumière certaines caractéristiques propres à celui-ci, nous présenterons les principales illusions sensorielles d'origine vestibulaire auxquelles peuvent être soumis les pilotes d'aéronef. Enfin, nous présenterons les résultats d'une expérience menée sur simulateur Full-Flight avec des pilotes professionnels, avant de discuter de ces résultats à la lumière du suivi longitudinal individuel.

## I. Les sens extéroceptifs et intéroceptifs

“Your eyes can deceive you; don't trust them.”

*A New Hope* (George Lucas, 1977)

Le corps humain possède plusieurs systèmes sensoriels qui peuvent être divisés en deux grandes catégories : les sens externes (ou extéroceptifs) et les sens internes (ou intéroceptifs). Les sens externes renseignent le cerveau sur l'environnement au sein duquel il évolue. Les plus connus sont les « cinq sens d'Aristote » :

- La vue, qui permet de voir et de réagir à l'environnement grâce au rayonnement lumineux, via les yeux.
- Le toucher, qui donne des informations par contact avec la surface des corps solides et par exposition aux fluides, via la peau.
- L'ouïe, capacité à percevoir des sons, via les oreilles.
- L'odorat, qui analyse les substances chimiques volatiles (les odeurs), via le nez.
- Le goût, qui permet d'identifier les substances chimiques liquides et solides par l'intermédiaire de chémorécepteurs appelés récepteurs de Vugo, via la langue.

Le corps humain possède également un sens capable de détecter des variations de la température par les flux de chaleur : la thermoception. Les vertébrés possèdent pour ce faire deux types de capteurs : ceux qui détectent le chaud et ceux qui détectent le froid.

Il existe d'autres sens externes moins connus, pour la plupart absents du corps humain, mais présents chez certains animaux. Les deux principaux sont l'électroperception (capacité qu'ont certains animaux à détecter les champs électriques) et la magnétoception (idem pour les

champs magnétiques). L'électroperception s'observe principalement chez les animaux vivant dans l'eau (poissons, requins, raies, etc.) mais aussi chez l'ornithorynque. L'être humain peut faire montre d'une électroperception indirecte, notamment via l'effet que peuvent avoir les champs électriques sur les poils. La magnétoception est présente chez les oiseaux (comme les pigeons qui l'utiliseraient pour s'orienter) ainsi que certains insectes comme les abeilles. Enfin, parmi les sens extéroceptifs, on peut également citer l'écholocalisation, qui permet d'identifier un environnement autrement que par la vue. Grâce à l'écho produit sur l'environnement par des sons auto-générés, certains animaux (comme le dauphin et la chauve-souris) arrivent à se déplacer sans voir. L'être humain (plus particulièrement lorsqu'aveugle, privé de la vue), peut développer une aptitude à l'écholocalisation grâce à la plasticité cérébrale.

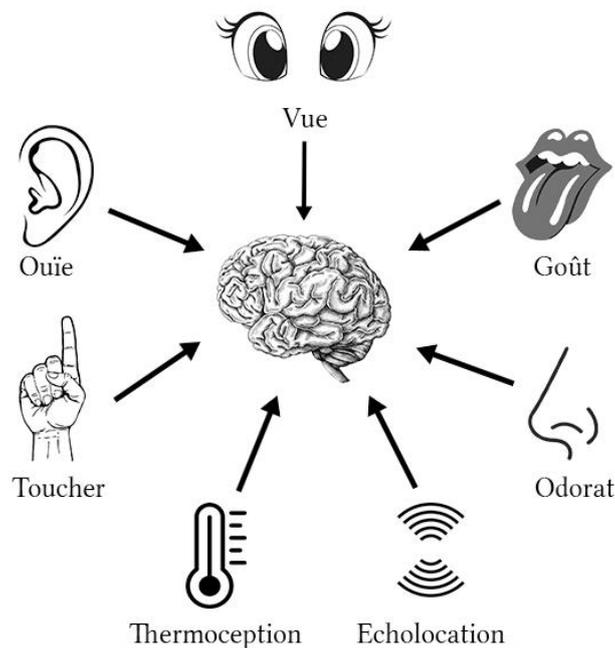
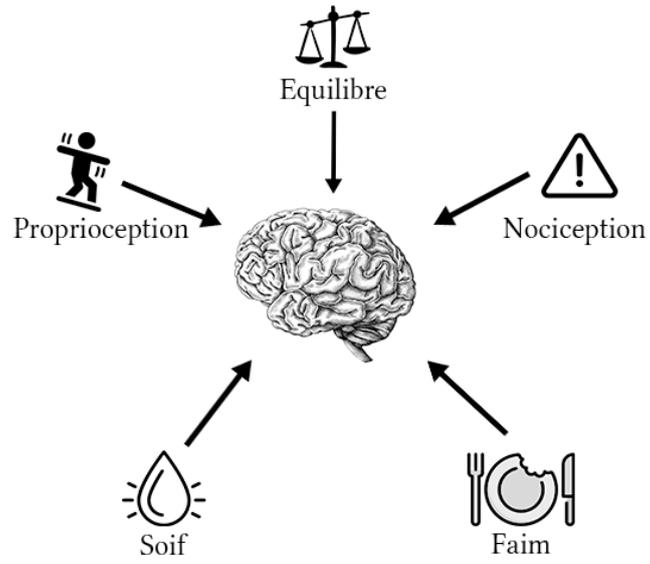


Figure 12 : Sens externes du corps humain (non exhaustif).

Les sens internes fonctionnent quant à eux en cycle fermé et renseignent le cerveau sur le fonctionnement du corps : par exemple la proprioception renseigne le cerveau sur la position relative des membres les uns par rapport aux autres. La lectrice ou le lecteur de ces lignes n'a pas besoin d'un autre sens (comme la vue) pour savoir où et comment se trouvent ses jambes (pliées, tendues, sous son siège, croisées, décroisées, etc.), la proprioception lui suffit. Parmi les sens internes, on retrouve également la nociception (chargée de protéger l'intégrité du corps contre les stimuli nocifs), la faim ou encore la soif.

Le sens interne d'intérêt pour la suite de cette introduction est l'équilibre, ou équilibration, qui met notamment en jeu, en plus du système visuel et de la proprioception, le système vestibulaire.



*Figure 13: Sens internes du corps humain (non exhaustif). La proprioception permet de connaître la position de son propre corps ; la nociception est le sens qui prévient le cerveau d'un danger.*

## II. Le système vestibulaire

“Of course it is happening inside your head, but why on earth should that mean that it is not real?”

*The Deathly Hallows* (J. K. Rowling, 2007)

Le rôle du système vestibulaire est double : il contribue à l'équilibre général ainsi qu'à la sensation de mouvement propre du corps humain. Ainsi, c'est un système crucial pour l'orientation spatiale. Il est composé de deux labyrinthes postérieurs (situés de part et d'autre du crâne dans l'oreille interne, derrière les mastoïdes), du nerf vestibulocochléaire (nerf crânien VIII) et de ses noyaux encéphaliques. Chaque labyrinthe est lui-même composé de cinq cavités :

- Trois canaux semi-circulaires orthogonaux entre eux, qui permettent la détection des rotations et accélérations angulaires de la tête.
- Deux organes otolithiques (l'utricule et le saccule), qui renseignent sur les accélérations linéaires subies par la tête (et notamment la gravité).

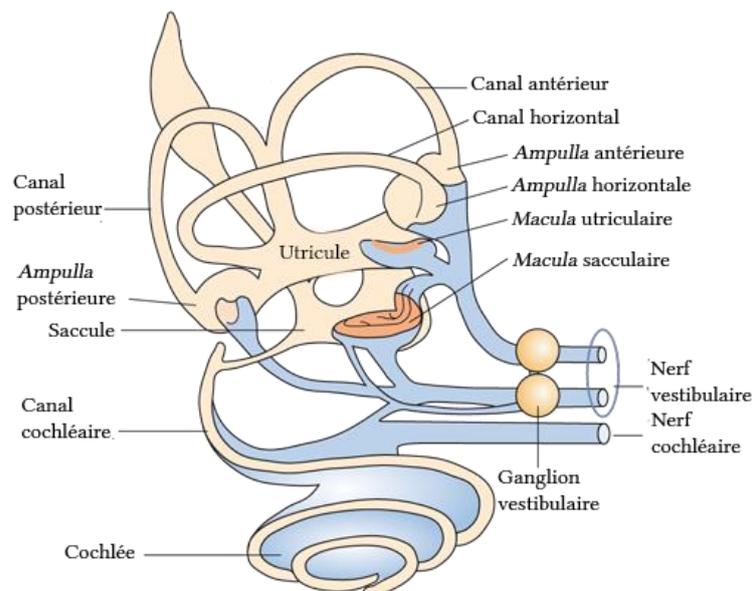


Figure 14 : Coupe de l'oreille interne (système vestibulaire et système cochléaire).

# 1. Fonctionnement du système vestibulaire

## a. Cellules sensorielles : les cellules ciliées

Les cellules ciliées sont les cellules sensorielles du système vestibulaire. Ce sont des mécanorécepteurs responsables de transformer un signal mécanique (en l'occurrence, un mouvement rotatif ou linéaire de la tête) en influx nerveux (permettant de renseigner le cerveau sur la nature et l'orientation de ce mouvement). Elles sont appelées « ciliées » en raison des structures filamenteuses, les stéréocils, qui les composent.

On distingue deux types de cellules ciliées, aux rôles distincts et à la forme différente. Les cellules de Type I sont en forme de calice avec leur noyau à la base, tandis que les Type II sont cylindriques avec un noyau central. Bien que présentes en proportions égales chez tous les mammifères, y compris les êtres humains, leur répartition est aléatoire au sein des cavités. Les Type I possèdent plus de stéréocils que les Type II.

La structure en calice (ou en poire) des cellules ciliées de Type I leur permet de se connecter à plusieurs neurones afférents par cellule. A l'inverse, un neurone afférent peut innervier plusieurs cellules de Type II. Cette différence de structures entraîne une asymétrie dans la répartition des connexions afférentes. Bien que les deux types soient présents en proportions égales, les cellules de Type I possèdent 90% des connexions neuronales afférentes.

Ces cellules sont qualifiées de « ciliées » parce qu'elles sont composées de stéréocils (entre quarante et soixante-dix par cellule) et d'un kinocil. Les stéréocils sont immobiles, parallèles entre eux, et rangés par ordre de taille croissant vers le kinocil. Le kinocil est unique par cellule et situé à l'extrémité de la cellule ciliée. C'est le cil le plus long de chaque cellule.

Sous l'effet des mouvements de la tête (rotatifs ou linéaires), les stéréocils vont se déplacer. Lorsqu'ils se rapprochent du kinocil, la cellule ciliée est dépolarisée et le taux d'activation du nerf crânien VIII augmente. A l'inverse, lorsque les stéréocils s'éloignent du kinocil, la cellule ciliée est hyperpolarisée et le taux d'activation du nerf crânien VIII diminue.

## Les deux types de cellules ciliées

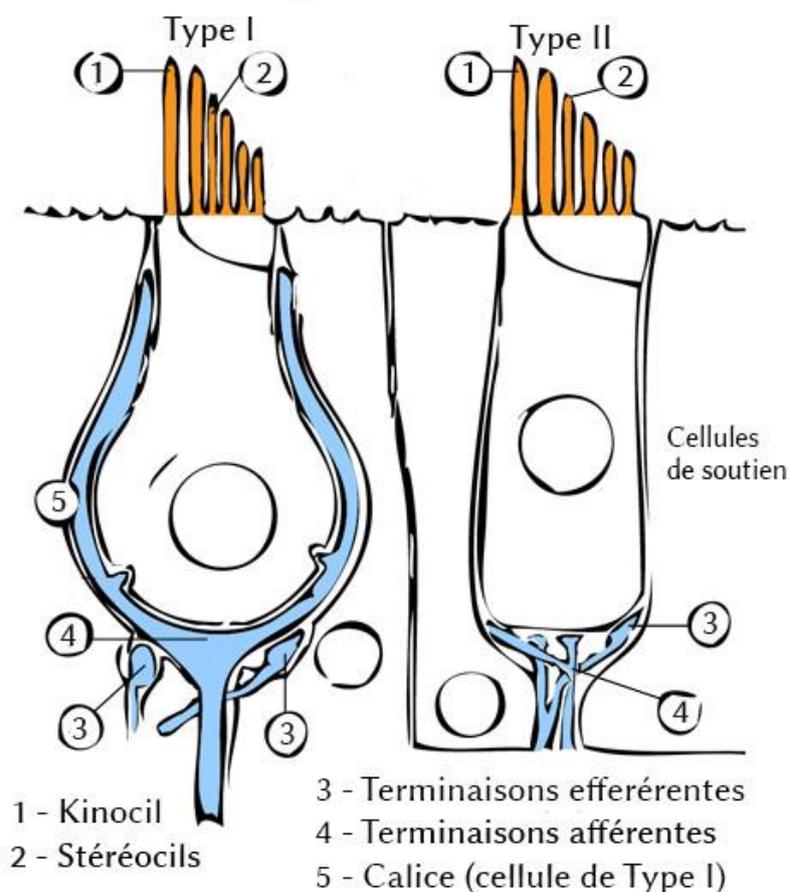


Figure 15 : Schéma des cellules ciliées de Type I (en calice) et de Type II (cylindrique).

### b. Anatomie des organes otolithiques

L'être humain possède quatre cavités otolithiques (généralement appelées otolithes), un saccule et un utricule de chaque côté de la tête. Les otolithes permettent au système nerveux de détecter les accélérations linéaires. Le saccule, plus gros que l'utricule, est situé au-dessus de l'utricule et permet de détecter les accélérations dans le plan vertical. L'utricule permet quant à lui de détecter les accélérations dans le plan horizontal.

Les cellules ciliées des saccules et des utricules sont situées dans leur *maculae* respectives. Elles sont prises dans une couche gélatineuse composée de glycoprotéines, formant la membrane otolithique. Au-dessus de cette membrane se trouvent les statoconies – aussi appelées otolithes, d'où le nom de ces organes – qui sont des cristaux de carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ). La macula de l'utricule est horizontale et située en bas de ce dernier, tandis qu'elle est verticale et située sur la face antérieure du saccule.

De ces *maculae* partent des fibres nerveuses qui rejoignent le nerf crânien VIII.

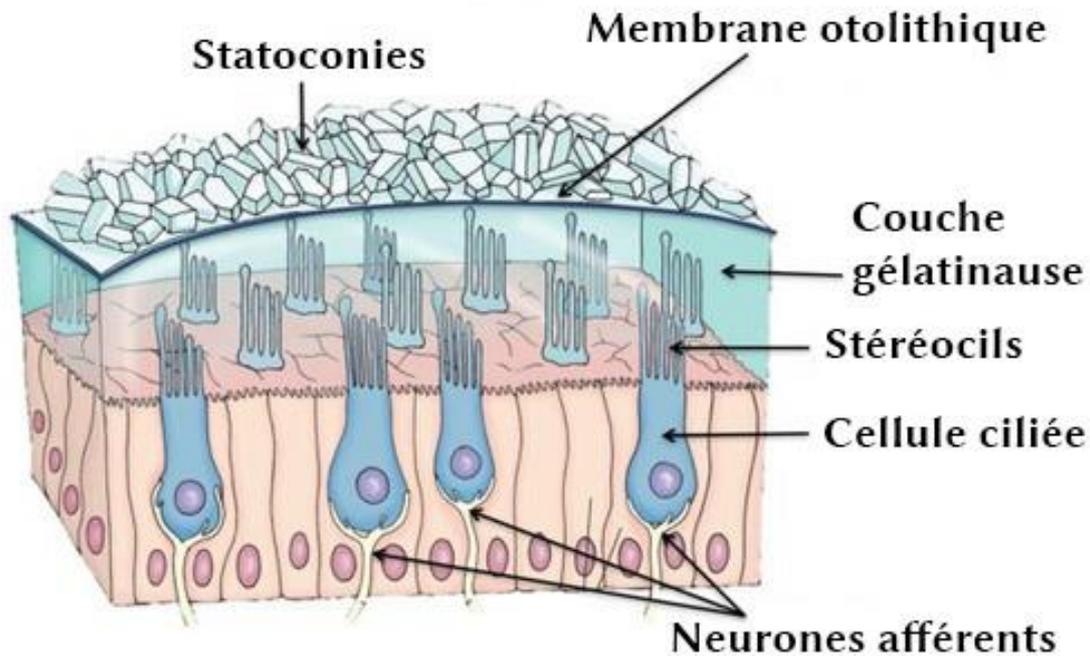


Figure 16 : Coupe d'un organe otolithique. Lors des mouvements de la tête, les statoconies entraînent la couche gélatineuse de glycoprotéines qui elle-même entraîne les stéréocils.

### c. Fonctionnement des organes otolithiques

Les cellules ciliées au repos produisent environ quatre-vingt-dix à cent potentiels d'action par seconde. En l'absence de mouvement de la tête, le cerveau n'en tient pas compte, puisqu'il reçoit le même nombre de potentiels d'action des otolithes gauche et droit.

Lorsqu'une accélération linéaire dans le plan horizontal ou vertical se produit, les statoconies de l'utricule ou du saccule sont entraînées par le fluide dans lequel elles baignent (l'endolymphe, lui-même entraîné par le mouvement de la tête). Lors de leur déplacement, les statoconies vont indirectement entraîner le mouvement des stéréocils (voir [FIGURE 17](#)) qui :

- Dépolarisent les neurones afférents s'ils se rapprochent du kinocil, entraînant une augmentation du nombre de potentiels d'action transmis au nerf crânien VIII
- Hyperpolarisent les neurones afférents s'ils s'éloignent du kinocil, entraînant une diminution du nombre de potentiels d'action transmis au nerf crânien VIII

Les *maculae* étant bidimensionnelles, les otolithes sont également sensibles aux accélérations angulaires dans leur plan préférentiel. Toutefois, le système vestibulaire possède un ensemble de cavités spécifiquement dédié à cela : les canaux semi-circulaires.

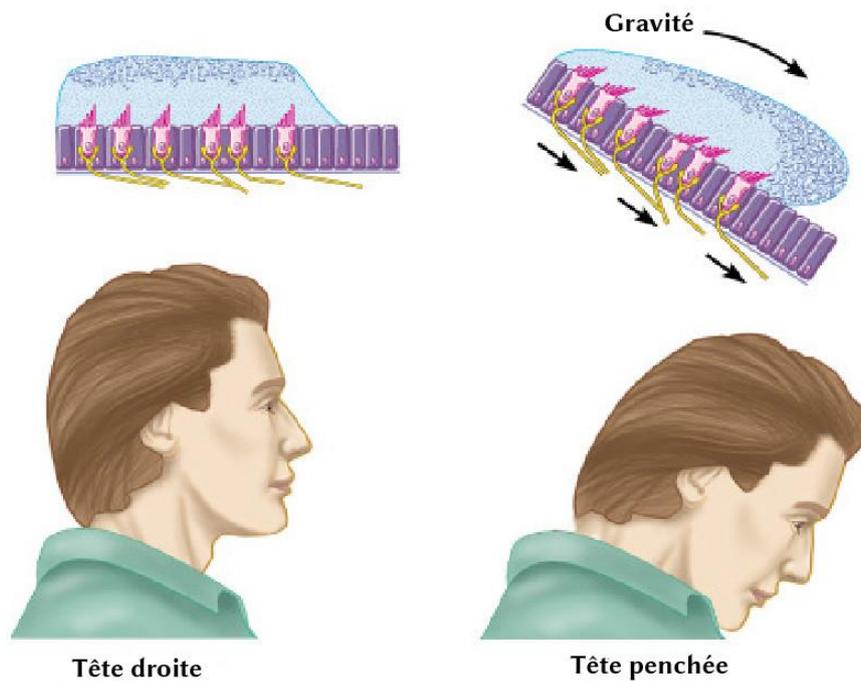


Figure 17: Effet de l'inclinaison de la tête sur les organes otolithiques. Lorsque la tête est penchée, les statoconies entraînent la couche gélatineuse qui entraîne les stéréocils.

#### d. Anatomie des canaux semi-circulaires

Les canaux semi-circulaires sont six cavités – trois de chaque côté de la tête – orthogonales entre elles, sensibles aux accélérations angulaires de celle-ci. Chaque canal possède à sa base une zone en forme de bulbe appelée *ampulla*. C'est dans ce bulbe que se trouvent les cellules ciliées. Au-dessus de ces dernières se trouve la *cupula*, une masse gélatineuse hermétique formant une barrière qui empêche l'endolymphe de circuler de part et d'autre.

Les trois canaux sont :

- Les canaux supérieurs : l'antérieur et le postérieur. Ils sont orthogonaux au canal horizontal, orthogonaux entre eux et orientés de 45° par rapport au plan médio-sagittal (orientation diagonale par rapport au droit devant).
- Le canal horizontal qui est légèrement incliné vers le haut (d'environ 30° chez l'être humain) lorsque la tête est au repos.

L'évolution de la morphogénèse des vertébrés montre que les canaux supérieurs sont apparus en premier, en même temps que les cellules ciliées. Le canal horizontal est apparu quant à lui plus tard, chez l'embranchement des vertébrés Gnathostomes.

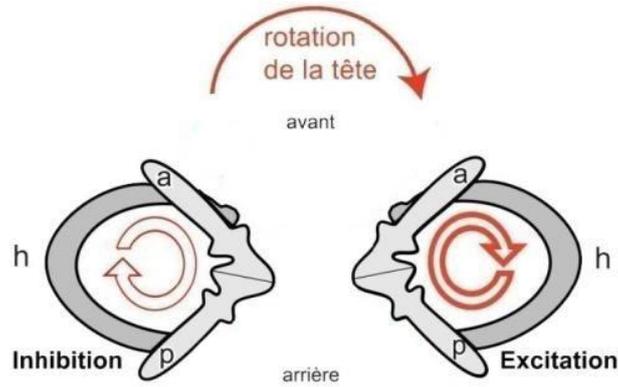


Figure 18 : Exemple du fonctionnement des canaux horizontaux lors d'une rotation de la tête dans le plan horizontal. Légende : h = canaux horizontaux ; a = canaux antérieurs ; p = canaux postérieurs. Les canaux sont orthogonaux entre eux et le canal horizontal est apparue après les autres. Il est de plus orienté de 30° par rapport à l'horizontale.

### e. Fonctionnement des canaux semi-circulaires

Contrairement aux otolithes, les cellules ciliées des canaux semi-circulaires sont toutes organisées telles que leurs kinocils pointent dans la même direction. Cela permet d'accroître la sélectivité des canaux : si la tête effectue un mouvement orthogonal à la direction des kinocils, il n'y aura pas de réponse du canal correspondant. De plus, la forme circulaire des canaux les rend insensibles aux accélérations linéaires : une telle accélération produit une force égale sur les deux côtés de la *cupula*, ce qui n'entraîne aucun mouvement des cellules ciliées.

Lors d'une accélération angulaire, l'endolymphe se déplace dans le canal semi-circulaire, entraînant par la même occasion la *cupula*. Cette dernière se déplace alors, et entraîne à son tour les cellules ciliées. De la même manière que pour les organes otolithiques, si les stéréocils se rapprochent de leur kinocil, les neurones afférents connectés à l'*ampulla* seront dépolarisés et le nombre de potentiels d'action va augmenter ; à l'inverse, si les stéréocils s'éloignent de leur kinocil, les neurones seront hyperpolarisés et le nombre de potentiels d'action transmis au nerf crânien VIII va diminuer.

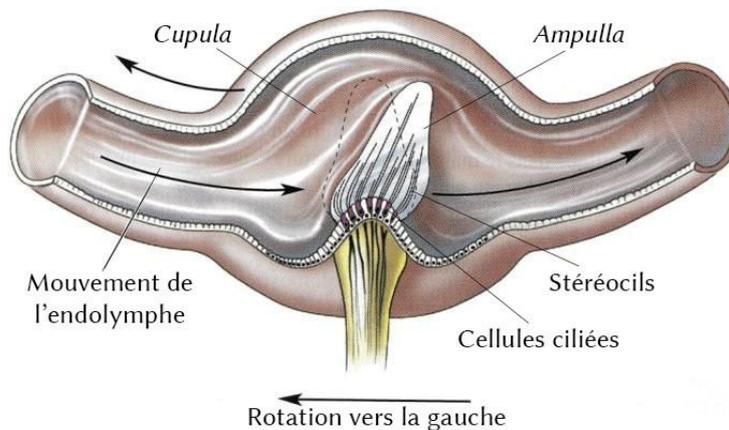


Figure 19 : Représentation du mouvement de l'ampulla d'un canal semi-circulaire dans le cas d'une rotation vers la gauche dans son référentiel. L'endolymphe - et donc l'ampulla - sont entraînés dans le sens opposé à la rotation de la tête.

## **f. Système push-pull**

Les canaux semi-circulaires gauches et droits sont symétriques par rapport au plan sagittal. Découle de cette symétrie leur fonctionnement en « push-pull ».

Prenons l'exemple d'une rotation de la tête dans le plan horizontal vers la gauche (voir FIGURE 19). Dans cette situation, le canal semi-circulaire horizontal gauche va dépolariser et augmenter son taux d'activation (on parle alors d'excitation), tandis que le droit va hyperpolariser et diminuer son nombre de potentiels d'action (on parle au contraire d'inhibition). Cette configuration permet de détecter tous les sens de rotations. Le canal gauche est « spécialisé » dans la détection des rotations vers la gauche, le droit vers la droite.

## **g. Voie neuronale vestibulaire et noyaux vestibulaires**

Les neurones connectés au système vestibulaire se projettent sur les quatre noyaux vestibulaires (inférieur, médian, latéral et supérieur). Ces noyaux ne sont en réalité pas uniquement vestibulaires : ils reçoivent des informations d'autres sources issues de la proprioception et la vision. Ces noyaux sont donc au cœur du système sensoriel relatif au maintien de l'équilibre, puisqu'ils reçoivent des informations des trois systèmes sensoriels impliqués dans celui-ci (vestibule, proprioception, vision).

Les noyaux sont situés dans la *medulla oblongata* (moelle allongée, partie inférieure du tronc cérébral) pour trois d'entre eux (inférieur, médian et latéral) et dans le pont (partie centrale du tronc cérébral) pour le supérieur. Le noyau inférieur reçoit ses signaux des organes otolithiques et se projette sur le cervelet et la moelle épinière. Les noyaux médian et supérieur reçoivent leurs informations des canaux semi-circulaires et se projettent sur le thalamus, les noyaux oculomoteurs et la moelle épinière. Ce sont donc eux qui sont responsables du réflexe vestibulo-oculaire (expliqué ci-après). Le noyau latéral reçoit les potentiels d'action des neurones issus des organes otolithiques et des canaux semi-circulaire et se projette sur les motoneurones de la moelle épinière.

Les noyaux vestibulaires sont donc afférents (ils reçoivent et transmettent les informations sensorielles aux centres nerveux supérieurs comme le thalamus) et efférents (ils envoient les informations reçues vers les motoneurones via la moelle épinière, le cervelet ou encore le nerf crânien III dans le cadre du réflexe vestibulo-oculaire).

## **2. Autour du système vestibulaire**

### **a. Le réflexe vestibulo-oculaire (VOR)**

La façon la plus évidente de mettre en évidence le rôle du système vestibulaire vis-à-vis du système moteur est le réflexe vestibulo-oculaire (VOR). La lectrice ou le lecteur qui souhaite en faire l'expérience peut procéder de la manière suivante :

- Placer une main (la gauche ou la droite, cela n'a pas d'importance) à quelques dizaines centimètres de ses yeux.

- Dans un premier temps : bouger la main, comme pour faire une salutation, de façon très rapide. Les doigts apparaissent flous et ne peuvent pas être suivis par les yeux, ils bougent trop rapidement.
- Dans un second temps, garder la main fixe et faire l'inverse, c'est-à-dire faire des « non » de la tête rapidement. Cette fois-ci le système vestibulaire, grâce au VOR, permet de stabiliser les yeux et de suivre les doigts.

Le réflexe vestibulo-oculaire permet de compenser les mouvements de la tête en bougeant les yeux : lorsque la tête bouge vers la gauche, les yeux bougent vers la droite et vice-versa. Ce réflexe est fondamental pour la stabilisation de la vision : les personnes qui ont un déficit à ce niveau ont des difficultés à lire, par exemple (car elles ne sont pas capables de compenser les micromouvements de la tête).

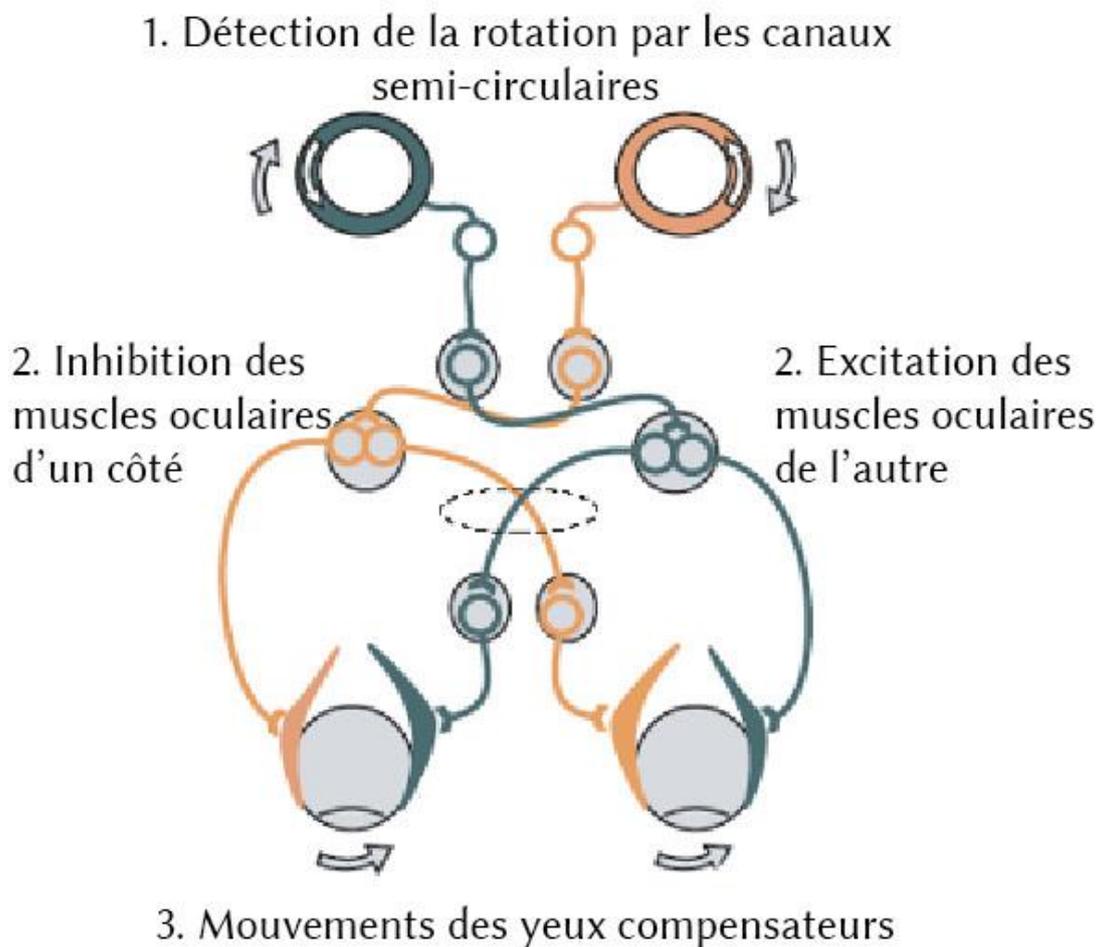


Figure 20: Représentation du réflexe vestibulo-oculaire. Les yeux effectuent un mouvement compensateur dans la direction opposée à la rotation de la tête.

## ***b. Pathologies***

Il existe plusieurs pathologies affectant le système vestibulaire. Ces pathologies causent généralement des vertiges et/ou des pertes d'équilibres et peuvent être accompagnées de nausées.

Les plus courantes sont la névrite vestibulaire (aussi appelée labyrinthite), la maladie de Ménière (de son découvreur Prosper Ménière) et le Vertige Paroxystique Positionnel Bénin (VPPB).

Les causes des deux premières ne sont que peu voire pas connues. La labyrinthite pourrait être due à une infection virale ou bactérienne, voire causée par le stress, une allergie, un traumatisme à la tête ou encore une réaction médicamenteuse. L'origine de la maladie de Ménière est quant à elle inconnue.

Les causes du VPPB sont mieux renseignées. Cette pathologie est due à la migration (par gravité) de statoconies de l'utricule dans un des canaux semi-circulaires (le plus souvent le postérieur). L'origine est souvent l'altération de la macula utriculaire, à cause du vieillissement, d'une infection, d'une chirurgie ou d'un traumatisme.

## ***c. Vieillesse***

A l'instar de tous les systèmes du corps humain, le système vestibulaire vieillit. Cela se traduit notamment par des troubles de l'équilibre et des vertiges chez les personnes âgées de plus de soixante ans. En effet, environ 30% de cette population fait l'expérience, à un moment ou un autre, de ces symptômes.

Cela se traduit par des enjeux importants, tant d'un point de vue de santé publique que d'un point de vue industriel.

Du côté de la santé publique, ces troubles de l'équilibre et vertiges impliquent bien souvent chez le patient atteint une forme de fragilité ou bien des chutes qui peuvent conduire à une hospitalisation. Cela s'accompagne d'un coût colossal pour le système de soins public et c'est pourquoi il apparaît nécessaire de diagnostiquer et de prévenir au mieux les troubles vestibulaires liés à l'âge, afin d'éviter les chutes et donc l'hospitalisation, ainsi qu'un traumatisme pour le patient.

D'un point de vue industriel, certains secteurs se doivent d'être attentifs à la dégénérescence vestibulaire de leurs travailleurs afin de minimiser les risques d'accidents dans le cadre du travail. Par exemple, les travailleurs du bâtiment en fin de carrière doivent redoubler de vigilance, une chute du haut du toit d'une maison ou d'un immeuble est autrement plus fatale qu'une chute depuis la terre ferme. Les métiers liés à l'aéronautique doivent également redoubler de vigilance. En effet, comme nous le verrons plus loin, ces métiers sont constamment soumis à de potentielles illusions sensorielles inhérentes à leurs activités. Le risque d'accident est démultiplié par la potentialité d'une illusion sensorielle, surtout si elle est doublée d'une dégénérescence vestibulaire liée à l'âge.

# III. Illusions sensorielles liées au système vestibulaire

“I don't expect many of you to appreciate the subtle science and exact art that is potion-making. However, for those select few who possess the predisposition, I can teach you how to bewitch the mind and ensnare the senses.”

*The Sorcerer's Stone* (J. K. Rowling, 1997)

## 1. Seuils vestibulaires

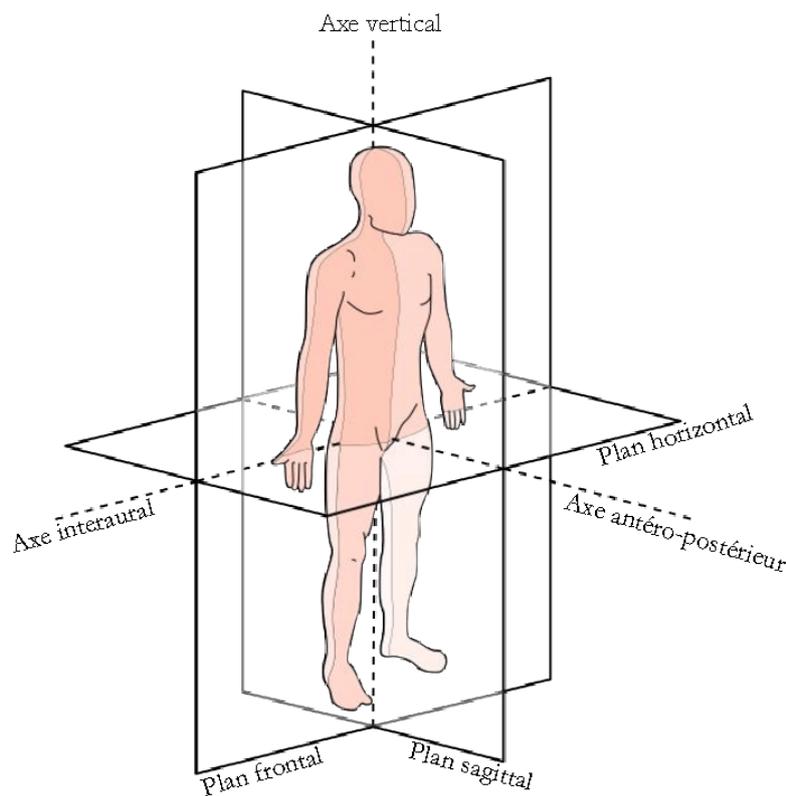
Le seuil vestibulaire peut être défini comme le plus petit stimulus perceptible par le système vestibulaire. Une autre définition – équivalente – considère le seuil comme étant le plus petit stimulus différentiable du bruit. La bonne maîtrise et la bonne compréhension de ce mécanisme de seuil sont essentielles pour certains domaines, notamment en aéronautique. Prenons l'exemple de la simulation (nous verrons les implications sur les vols réels plus loin, lorsque nous aborderons la notion d'illusions sensorielles vestibulaires) : les simulateurs de vol (hélicoptère comme avion) font en partie reposer leur réalisme sur les seuils vestibulaires. En effet, si le simulateur effectue un mouvement sous le seuil de détection vestibulaire, le sujet ne se rendra pas compte dudit mouvement. C'est notamment sur ce principe que repose la façon dont un simulateur façonne un mouvement vers l'avant en continu :

- Dans un premier temps, le simulateur se penche en avant à une vitesse de rotation supérieure au seuil vestibulaire. Concomitamment, le visuel du simulateur avance droit devant.
- Dans un second temps, une fois à vitesse constante et tout en maintenant un visuel qui avance droit devant, le simulateur se redresse vers sa position initiale à une vitesse de rotation dite sous-vestibulaire (c'est-à-dire sous le seuil vestibulaire).

Le système vestibulaire n'étant sensible qu'aux accélérations, ce dernier n'est de toute façon pas stimulé lorsque le sujet est à vitesse constante dans une direction donnée. Ainsi, si la rotation retour s'est bel et bien effectuée à une vitesse sous-vestibulaire, le sujet aura toujours

l'impression d'avancer droit devant, quand bien même le simulateur est revenu à sa position initiale (c'est-à-dire fixe et en position neutre !). Cette continuité de l'immersion est permise par un deuxième mécanisme, lavection (voir [A. EXPERIENCE PSYCHOMOTRICE 1 : VECTION](#) pour une explication du phénomène devection).

C'est la somme de ces deux phénomènes physiologiques (les seuils vestibulaires et lavection) qui permet une simulation la plus réaliste possible. Ils mettent en jeu deux des trois systèmes les plus importants pour la perception du mouvement propre : le système vestibulaire et le système visuel (le troisième étant la proprioception).



*Figure 21 : Plans et axes du corps humain. L'axe vertical est aligné avec la gravité terrestre. Les trois rotations utilisées en aéronautique sont : 1) le lacet (dans le plan horizontal) ; 2) le tangage (dans le plan sagittal) ; 3) le roulis (dans le plan frontal).*

Les seuils vestibulaires se mesurent généralement selon une direction de translation ou de rotation. Les directions utilisées sont :

- Pour les translations : verticale (alignée avec la gravité terrestre), interaurale (ou transversale, de gauche à droite) ou antéro-postérieure (d'avant en arrière).
- Pour les rotations : en lacet (dans le plan horizontal), en roulis (dans le plan frontal) ou en tangage (dans le plan sagittal).

Il n'est pas facile de déterminer un seuil pour un organe donné (par exemple l'utricule), on parlera plutôt de seuil vestibulaire global. En effet, si l'on prend l'exemple d'une rotation en roulis, pour cette seule direction, l'utricule, le saccule et les trois canaux semi-circulaires sont

activés (le canal horizontal est situé à 30° par rapport à l'horizontal, il n'est donc pas orthogonal à une rotation dans le plan frontal).

Les seuils sont également dépendants de la fréquence. On retrouve pour chaque direction une relation de type :  $seuil = f(\text{fréquence})$ . Cette fonction est généralement décroissante (voir (Fitze et al., 2023) pour une revue récente de la littérature à ce sujet) : plus la fréquence du mouvement est basse, plus sa vitesse doit être importante pour être détecté par le système vestibulaire.

## 2. Différences entre pathologies vestibulaires et illusions vestibulaires

Il faut bien différencier les deux car dans les deux cas, le sujet ressent des « vertiges ». Dans l'aéronautique, les pilotes parlent souvent de « vertiges » pour décrire leurs sensations lors d'une illusion vestibulaire. Nous emploierons ici celui de « désorientation spatiale ».

Le « vertige » est spécifique aux pathologies d'origine vestibulaire ou aux troubles liés à l'ingestion de médicaments. Lors d'une illusion sensorielle, il est préférable d'employer le terme de désorientation spatiale.

C'est trompeur pour les pilotes car les sensations sont les mêmes. Le diagnostic est donc primordial et il est essentiel que les pilotes ne cachent pas ces faits à leurs équipes médicales. D'un point de vue de la sécurité des vols, il est important de savoir si un « vertige » ressenti par un pilote est le résultat d'une illusion sensorielle ou constitue les prémices d'une pathologie vestibulaire.

## 3. Illusions sensorielles d'origine vestibulaire

Les illusions sensorielles d'origine vestibulaire sont source, pour les pilotes d'aéronefs, au mieux d'une désorientation spatiale temporaire (« bénigne »), au pire d'un accident impliquant le décès de l'intégralité des occupants.

Ces illusions ont souvent pour origine des situations où le pilote n'est pas en mesure de se repérer spatialement à l'aide de son système visuel. Ce genre de situations survient dans plusieurs cas (cette liste ne prétend pas être exhaustive) :

- La nuit lors d'un vol au-dessus du plafond nuageux (situation qui est aggravée si la Lune n'est pas levée)
- A toute heure au-dessus de l'océan, notamment en journée par temps découvert. Il peut alors arriver que l'océan et le ciel se confondent et rendent la ligne d'horizon difficile à distinguer
- Une forte luminosité, notamment pour les pilotes de chasse qui se retrouvent contraint de voler en direction du soleil

Plusieurs études ont montré que la désorientation spatiale était notamment mortelle chez les pilotes d'avion de chasse. Une étude des forces armées canadiennes conclut que les désorientations spatiales sont responsables du quart des accidents mortels en son sein.

Il existe deux grandes catégories d'illusions vestibulaires :

- Les somatogyres, liées aux canaux semi-circulaires et impliquant des rotations : le leans, le piqué en vrille (graveyard spin en anglais), le piqué en spirale (graveyard spiral en anglais) et l'illusion Coriolis.
- Les somatograviques, liées aux organes otolithiques et impliquant des accélérations linéaires : l'inversion, le head-up et le head-down.

### a. Leans

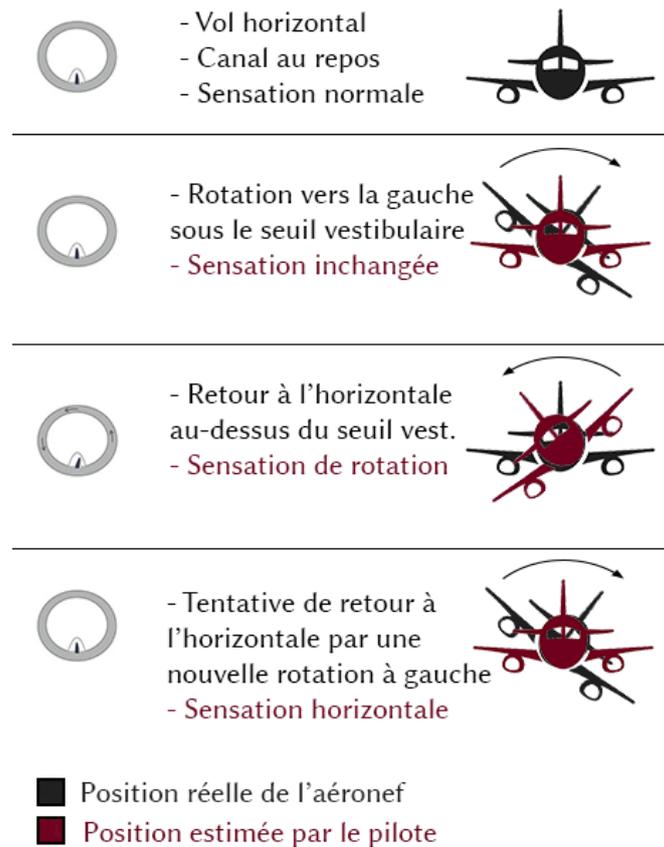


Figure 22: Représentation schématique du leans. La première colonne montre l'état du système vestibulaire à chaque étape. Les aéronefs en noirs représentent la situation réelle, ceux en rouges la situation telle que la perçoit le pilote. On voit que le leans induit chez ce dernier une sensation de « droit devant horizontal » alors que son appareil est en rotation (c'est-à-dire effectue un virage).

Cette illusion est une conséquence directe des seuils vestibulaires. Elle apparaît lorsque le pilote retourne brusquement à l'état neutre (ailes horizontales par rapport au sol), après une période prolongée d'inclination faible des ailes dans le plan frontal (par exemple, à droite). Si l'inclination était suffisamment faible, l'accélération angulaire résultante était alors sous le seuil de détection des canaux semi-circulaires. Il en résulte que lors du retour à l'état neutre, le pilote a l'impression d'avoir penché ses ailes dans la direction opposée au leans (par exemple, à gauche). Il va donc corriger son orientation en penchant réellement ses ailes dans la direction initiale (par exemple, à droite). In fine, l'aéronef sera donc penché dans la direction du leans (par exemple, à droite), alors que le pilote pense avoir son aéronef en position neutre.

## b. Piqué en vrille

La vrille est une trajectoire descendante accompagnée d'un mouvement d'auto-rotation de l'aéronef. C'est une situation de décrochage asymétrique : l'aéronef est en situation de décrochage avec une aile qui génère plus de portance que l'autre, d'où l'auto-rotation. Sauf dans le cas précis de la voltige aérienne, la vrille est une situation anormale et dangereuse de laquelle les pilotes cherchent à sortir le plus rapidement possible pour éviter un contact avec l'environnement.

Lors d'une vrille, si celle-ci est prolongée (et donc l'accélération angulaire nulle), le pilote finira par être moins sensible à la rotation au fur et à mesure de la vrille. Ainsi, au même titre que pour le leans, lorsque le pilote tentera de corriger la vrille, il aura l'impression d'avoir déclenché une vrille dans l'autre direction. Par conséquent, dans un second temps le pilote corrigera dans la direction initiale et ré-entrera dans la vrille initiale.

Si le pilote ne consulte pas ses instruments de vol pour sortir de ce cercle vicieux, un contact avec l'environnement est inévitable.

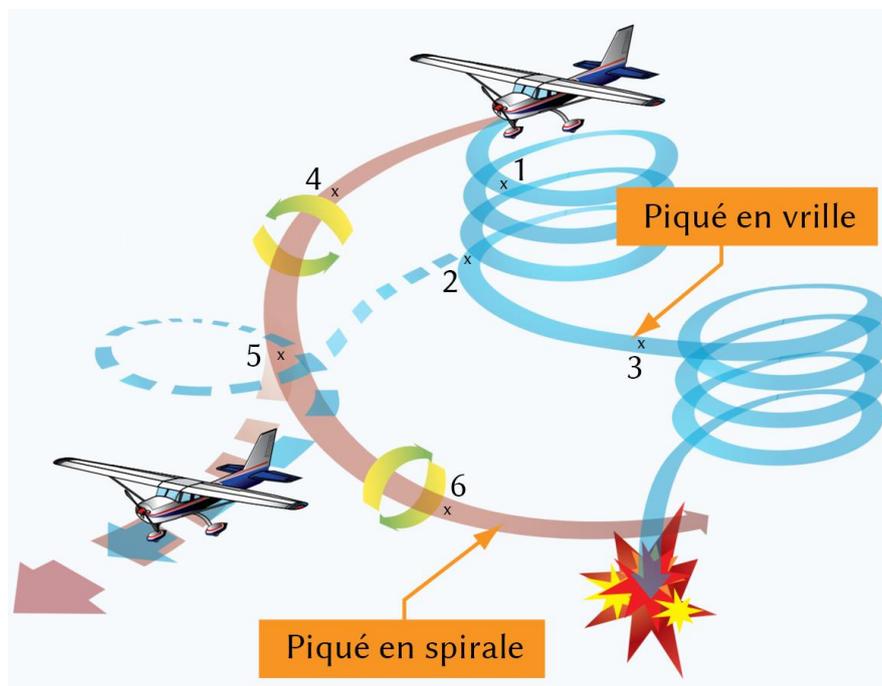


Figure 23 : Représentations schématiques des piqués en vrille (1 - 3) et en spirale (4 - 6).

*Vrille. 1 : début de la vrille ; si le pilote reste trop longtemps dans cet état, il va progressivement perdre la sensation vestibulaire de rotation. 2 : moment critique où le pilote essaie de sortir de la vrille (vers le chemin en pointillés). S'il ne regarde pas assez ses instruments, il risque d'avoir la sensation (via le système vestibulaire) d'avoir déclenché une vrille dans l'autre sens. 3 : la sensation de vrille opposée incite le pilote à déclencher une vrille dans le sens initial. Il est souvent trop tard pour s'en sortir à ce stade.*

*Spirale. 4 : au même titre que le leans, un virage lent sous-vestibulaire détecté tardivement incite le pilote à remettre son aéronef en position neutre. 5 : moment critique où le pilote doit maintenir son cap en faisant confiance à ses instruments (vers la trajectoire en pointillés). 6 : toutefois, au même titre que le leans, la correction rotative au-dessus du seuil vestibulaire induit le pilote à re-pencher son aéronef dans la direction initiale.*

### c. Piqué en spirale

Le piqué en spirale est une variante du leans dans laquelle l'aéronef a une attitude descendante. Alors que dans un premier temps, comme nous l'avons vu avec le leans, le pilote ré-entre de lui-même dans le virage initial (qu'il n'avait pas détecté), dans un second temps il va essayer de corriger la trajectoire descendante de son aéronef, en tirant sur le manche principal. Le résultat d'une telle manœuvre lors d'un virage descendant est de resserrer le virage, avec pour conséquence d'accélérer la chute plutôt que de redresser l'aéronef. De même que précédemment, un contact avec l'environnement est inévitable si le pilote ne réagit pas (grâce à ses instruments ou la prise en compte, visuellement, de son environnement).

### d. Illusion Coriolis

Cette illusion apparaît lorsque l'aéronef est en accélération angulaire et que le pilote bouge brusquement sa tête dans une direction donnée (par exemple, vers le bas pour consulter ses documents sur ses genoux, ou vers le haut pour consulter un instrument de vol). Cette situation conduit les trois canaux semi-circulaires à être stimulés simultanément. Le pilote aura alors une sensation de nausée accompagnée de l'impression de tourner dans les trois directions de l'espace à la fois (lacet, tangage et roulis). Cette illusion est souvent comparée à la sensation provoquée par le dévalement d'une colline en roulant sur soi-même. La désorientation spatiale résultante peut conduire à la perte de contrôle de l'aéronef.

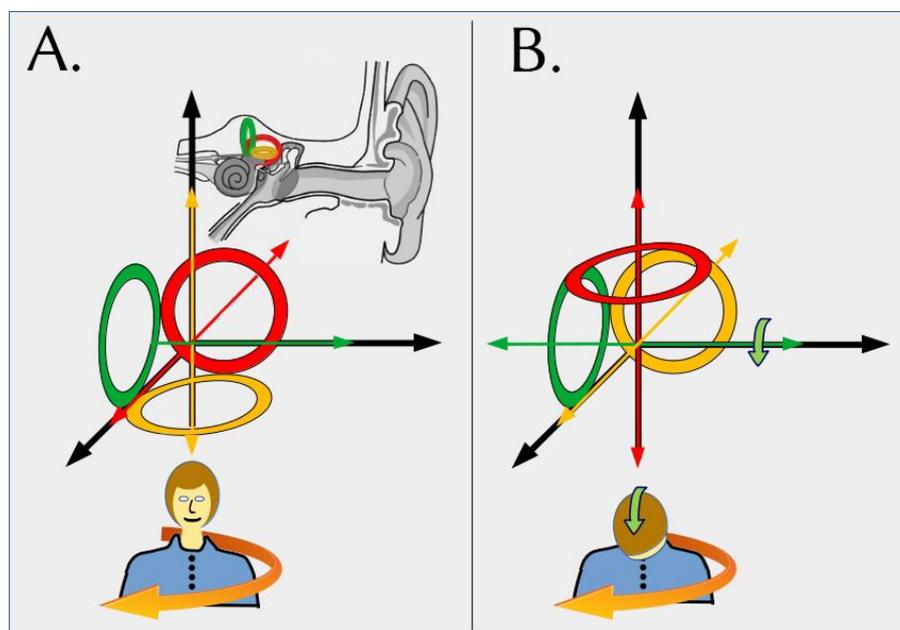


Figure 24 : Représentation schématique de l'effet Coriolis. A : rotation dans le plan horizontal qui stimule le canal jaune. B : rotation brusque de la tête vers l'avant, qui stimule le canal en vert ; la rotation initiale stimule quant à elle le canal rouge dans cette position. Les trois canaux sont donc activés en même temps dans un très court intervalle.

## e. Inversion

Le changement brusque d'inclination de l'aéronef depuis une position ascendante vers un vol droit devant à l'horizontal peut amener à une stimulation des organes otolithiques pour donner l'impression au pilote qu'il est en train d'effectuer une culbute vers l'arrière. Toute tentative de correction de cette culbute (inexistante) peut mener à la perte de contrôle de l'appareil.

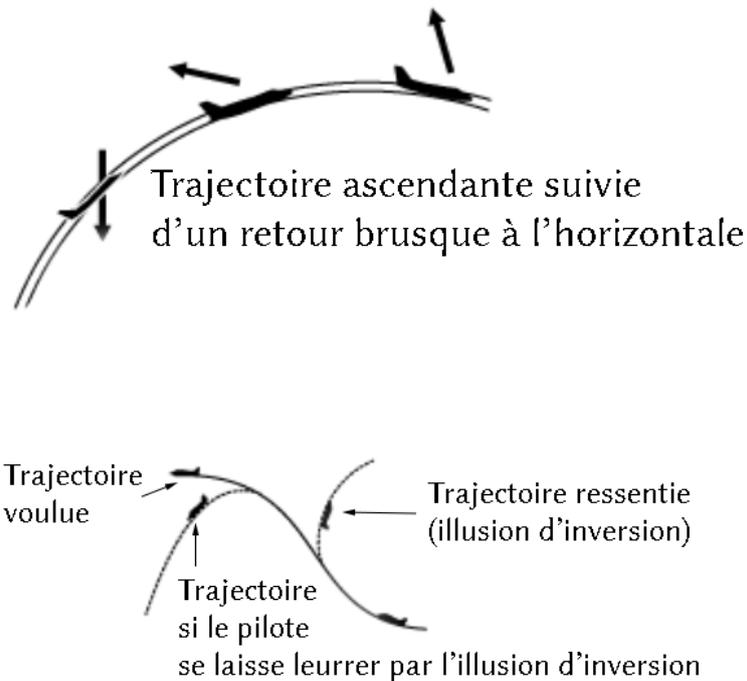


Figure 25: Représentation schématique de l'illusion d'inversion. Si le retour à l'horizontale est trop brusque, le pilote aura l'impression d'effectuer une culbute arrière. S'il se laisse leurrer par l'illusion, il aura tendance à faire piquer son appareil pour compenser la culbute ressentie.

## f. Head-up

Cette illusion et la suivante sont similaires. Le head-up implique une accélération soudaine et brusque vers l'avant. La stimulation des organes otolithiques est dans ce cas suffisante pour excéder la stimulation due à la gravité. Le système vestibulaire a alors du mal à discriminer les deux. De plus, le système nerveux étant habitué à ce que la composante la plus forte subie par les otolithes soit la gravité, qu'il mésinterprète cette accélération linéaire (horizontale) comme étant la gravité. Le pilote va alors avoir l'impression que le nez de son appareil pointe vers le haut (« head-up », pour avoir la « fausse gravité » vers le bas) et le cas échéant va pousser son aéronef à pointer vers le bas. Le résultat, si cette désorientation spatiale n'est pas corrigée, est le contact avec l'environnement.

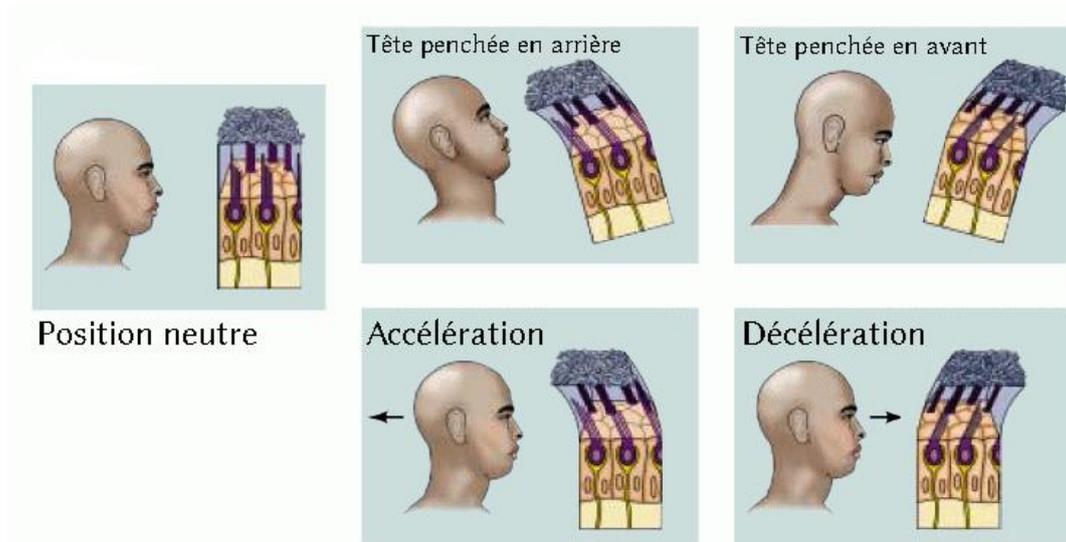


Figure 26: Représentations des illusions de head-up et head-down. Schématiquement, l'utricule est stimulé de façon similaire lorsque la tête se penche en arrière (respectivement en avant) et lorsqu'elle accélère (respectivement décélère).

### ***g. Head-down***

Le head-down est similaire au head-up mais survient, à l'inverse, lorsque l'aéronef subit une brusque décélération linéaire (par exemple lors d'un freinage violent). La stimulation des otolithes est cette fois-ci telle que le pilote aura l'impression que son appareil a le nez pointé vers le bas. Afin de corriger cela, il va relever le nez de son appareil. Cette illusion peut paraître moins dangereuse que la précédente, mais selon le régime de l'appareil, il peut en réalité conduire à un décrochage de l'aéronef, entraînant un contact avec l'environnement.

## IV. Différences dans la perception des rotations frontales et sagittales

« Oublie que t'as aucune chance, vas-y, fonce ! On sait jamais, sur un malentendu, ça peut marcher ! »

*Les Bronzés font du ski* (Patrice Leconte, 1979)

Cette partie est tirée de la publication de l'article de recherche suivant (Keriven Serpollet et al., 2023) :

Keriven Serpollet, D., Hartnagel, D., James, Y., Buffat, S., Vayatis, N., Bargiotas, I., & Vidal, P. (2023). Tilt perception is different in the pitch and roll planes in human. *Physiological Reports*, 11(3), e15374.

### 1. Introduction

La perception de l'orientation du corps dans l'espace se base sur l'intégration des informations visuelles, vestibulaires et somesthésiques (c'est-à-dire le toucher et la proprioception) par rapport à la gravité. Cependant, les contributions respectives de ces systèmes sensoriels (c'est-à-dire le poids attribué par le système nerveux central durant le processus d'intégration) sont toujours débattues. Le sujet de cette étude étant le rôle du système vestibulaire dans la perception du mouvement, nous ne discuterons que des contributions respectives des informations vestibulaires et somesthésiques.

D'un côté, les enregistrements électrophysiologiques de la décharge des neurones otolithiques en réponse à une rotation de la tête (Fernandez & Goldberg, 1976; Jamali et al., 2009; Sadeghi et al., 2007) montrent que les organes otolithiques signalent à la fois l'orientation statique de la tête par rapport à la gravité, mais aussi les changements d'orientation qui accompagnent les déplacements angulaires de la tête (Benson, 1990). De plus, chez les rongeurs, après une lésion vestibulaire unilatérale (qu'elle soit globale ou sélective), leur posture reste inclinée de façon permanente malgré le processus de compensation ; cela montre que l'information otolithique asymétrique reste asymétrique malgré la persistance d'une information somesthésique symétrique. Chez l'être humain, les seuils vestibulaires ont été très étudiés (voir (Kobel et al., 2021) pour une revue récente), plus particulièrement les seuils de rotation dans le plan frontal (Hartmann et al., 2014; King et al., 2019; Lim et al., 2017; Valko et al., 2012).

(Rosenberg et al., 2018) démontre une relation entre le seuil de perception vestibulaire des rotations dans le plan frontal d'un individu et sa performance dans une tâche de contrôle manuel. Les auteurs de cet article suggèrent que la précision sensorielle est un facteur déterminant critique pour la performance en contrôle manuel. La corrélation entre la performance en contrôle manuel et le seuil suggère que la précision vestibulaire détermine la performance. Les patients atteints de migraine vestibulaire sont anormalement sensibles aux rotations dans le plan frontal, qui co-activent l'activité des canaux semi-circulaires et des organes otolithiques (King et al., 2019). (Israel & Berthoz, 1989) ont soumis des sujets humains à des déplacements linéaires horizontaux le long de l'axe interaural dans l'obscurité. Les sujets étaient assis dans un chariot se déplaçant le long d'un rail linéaire. D'une part, ils ont montré qu'une estimation approximative du déplacement de la tête peut être dérivée de l'accélération linéaire mesurée par les organes otolithiques. D'autre part, des patients ayant subi une double labyrinthectomie n'étaient pas en mesure de stabiliser leur regard ou d'approximer le déplacement de leur tête. Cela montre que la performance observée par les auteurs est d'origine vestibulaire. De plus, (Walsh, 1961) a montré que les seuils de détection vestibulaire des translations sont environ dix fois plus élevés que la normale chez les patients sourds sans mise en évidence de réflexe vestibulo-oculaire. En outre, afin d'évaluer la contribution du système vestibulaire à la discrimination du mouvement du corps dans l'obscurité, (Valko et al., 2012) a mesuré puis modélisé le seuil vestibulaire de reconnaissance de la direction en fonction de la fréquence du mouvement pour les rotations dans le plan horizontal (en lacet), les translations verticales (alignées avec la gravité), les translations latérales (interaurales) et les rotations dans le plan frontal (en roulis) sur des sujets sains et des patients ayant subi une ablation vestibulaire bilatérale totale. Ces derniers ont un seuil de détection significativement plus élevé pour toutes les rotations, y compris en roulis (dans le plan frontal). (Suri & Clark, 2020) ont cherché à quantifier la différence entre le seuil vestibulaire dans le plan frontal (en roulis) et dans le plan sagittal (en tangage) grâce à des techniques de psychophysique. En utilisant un modèle linéaire général, ils ont montré que le seuil vestibulaire en tangage est significativement plus élevé qu'en roulis sur une large gamme de fréquence (de 0,15 à 1 Hz). Ce résultat est corrélé par d'autres études (Israël & Giannopulu, 2012; Karmali et al., 2021). In fine, il paraît possible de sonder la contribution otolithique à la détection de l'orientation du corps dans l'espace en utilisant des stimuli en-dessous du seuil d'activation des canaux semi-circulaires, et ce malgré la nature multimodale inhérente à la détection du mouvement.

D'un autre côté, des expériences conduites en environnement microgravité ont souligné l'importance des signaux somesthésiques pour la perception de l'orientation du corps (Lackner & DiZio, 1993, 2000). (Gianna et al., 1996) a rapporté une très légère augmentation du seuil de détection de translations chez les sujets dont le système vestibulaire est défaillant. Durant l'immersion ou dans un état de flottant, le système somesthésique a un accès limité à l'information issue de la gravité, alors que la gravité agit toujours sur le système vestibulaire. La réponse posturale de sujets sains à qui l'on demandait d'identifier la verticale sous l'eau était étonnamment peu précise, avec une erreur d'inclinaison qui peut aller de 7,3 degrés (Massion et al., 1995) à 13,2 degrés (Ross et al., 1970). Cela suggère que les signaux somesthésiques basés sur la gravité pourraient jouer un rôle plus important dans la perception de l'orientation statique du corps. (Bringoux et al., 2003) a montré que le seuil de perception d'une rotation du corps était plus grand quand le corps était complètement emprisonné dans un plâtre que lorsqu'il n'était que partiellement contraint. Les auteurs concluent donc qu'à de très faibles vitesses, les signaux issus

du système vestibulaire ne sont pas naturellement efficaces en condition quasi-statique pour percevoir précisément l'orientation du corps par rapport à la gravité. D'un autre côté, l'information somesthésique comme les signaux tactiles, proprioceptifs (Higashiyama & Koga, 1998) et interoceptifs (Mittelstaedt, 1992) joue un rôle prééminent dans l'orientation posturale.

La raison d'être de la perception de l'orientation du corps dans l'espace via l'intégration de signaux visuels, vestibulaires et somesthésiques basés sur la gravité est qu'un contrôle moteur précis et exact est obligatoire pour survivre dans la vie quotidienne, d'autant plus lorsqu'on est pilote d'aéronef. Cependant, les réponses sensorimotrices et la perception sont intrinsèquement imprécises à cause du bruit présent dans les systèmes neuronaux (Faisal et al., 2008). En effet, la variabilité motrice du réflexe vestibulo-oculaire provoqué durant une rotation dans le plan horizontal (en lacet) chez le singe rhésus (Haburcakova et al., 2012) et chez l'humain (Nouri & Karmali, 2018; Seemungal, 2014) est similaire au seuil de perception humain des mêmes rotations (en lacet), suggérant une source sensorielle commune dudit bruit.

Dans ce contexte, la perception du mouvement basée sur les signaux vestibulaires et somesthésiques est utile non seulement pour le diagnostic de pathologies d'origine vestibulaire ou somesthésique, mais également pour le suivi longitudinal des opérateurs d'interface homme-machine complexe, comme les pilotes d'hélicoptères, où cela devient un problème de prévention des accidents et donc de survie. En effet, les pilotes d'aéronef sont sujets à se retrouver dans de nombreuses situations dans lesquelles ils doivent être capables de s'orienter sans aucun repère visuel. Par exemple, lors des vols de nuit à haute altitude, les pilotes d'avion doivent se reposer sur leurs instruments de vol plutôt que sur les signaux visuels (venant de l'extérieur) ou sensoriels (voir la partie précédente sur les illusions). Les phénomènes appelés « RWB » (de l'anglais Rotary-Wing Brownout, que nous appellerons dans la suite « Brownout ») et « Voile Blanc » (que nous appellerons dans la suite par son terme anglais, « Whiteout ») sont d'autres exemples spécifiques au pilote de l'hélicoptère. Comme décrit par (Priot, 2012), ces phénomènes sont déclenchés par la circulation de l'air du souffle descendant du rotor principal de l'appareil lorsque celui-ci décolle ou atterrit dans un environnement aride (pour le brownout) ou enneigé (pour le whiteout). La poussière, le sable ou la neige soulevés par ce souffle descendant rendent la visibilité de l'extérieur presque nulle, voire inexistante, ce qui réduit fortement la quantité de signaux visuels sur lesquels l'équipage peut se reposer pour manœuvrer. Cette perte d'informations visuelles peut aussi survenir lors de conditions météorologiques de vol aux instruments (IMC, de l'anglais Instrument Meteorological Conditions) lorsque les conditions météorologiques sont mauvaises. Dans cette situation (et dans l'aviation d'une manière générale), le système vestibulaire peut devenir un acteur majeur de la conscience du pilote de sa propre situation – notamment pour caractériser le mouvement propre et différencier les mouvements de tête passifs des mouvements de tête actifs (Cullen, 2014) – et un élément clé des processus de prise de décision. D'un côté, comme nous venons de le voir, dans le cas limité des décollages et atterrissages des hélicoptères, les signaux vestibulaires peuvent s'avérer utiles. D'un autre côté, dans le cas d'un vol coordonné (que ce soit en avion ou en hélicoptère), se reposer uniquement sur les signaux vestibulaires peut être une erreur fatale.

Il convient de noter que ces points n'excluent pas l'utilité de tester régulièrement la perception du mouvement par les pilotes. Un vieillissement anormal, une pathologie plus ou moins bien rééduquée et/ou un traitement médical du système vestibulaire pourraient toujours introduire un biais dans la perception des pilotes. Enfin, les désorientations spatiales et illusions

d'origine vestibulaire (cf. précédemment) sont une cause significative des crashes aériens. Dans les accidents qui impliquent une désorientation spatiale, 85% d'entre eux sont la conséquence d'une mauvaise évaluation de ladite désorientation lors de scénarios de vol complexes (Stott, 2013).

Comme souligné précédemment, excepté dans de rares cas de pathologies spécifiques, il est possible d'espérer, au mieux, démêler l'influence déroutante des différentes sources d'informations sensorielles lors de l'évaluation de la perception du mouvement. Ce point plaide en faveur du développement de tests psychométriques en situations réalistes, particulièrement pour le suivi des pilotes d'aéronefs, étant donné que la perception de soi est dépendante du contexte, mais que l'évaluation des seuils vestibulaires ne permet pas de sonder les informations sensorielles extra-vestibulaires.

Néanmoins, à notre connaissance, seulement quelques études se sont concentrées sur ce sujet en utilisant des simulateurs de vol (Heerspink et al., 2005; Hosman & Van der Vaart, 1978; Zaichik et al., 1999) ou à la fois un simulateur de vol et un appareil réel (Tribukait, Bergsten, et al., 2016; Tribukait, Ström, et al., 2016). Il a été montré dans ces études que le seuil en lacet (rotation à l'horizontale) est le plus grand des trois (parmi le lacet, le roulis et le tangage). Par conséquent, il paraît légitime de se demander si la richesse des données psychophysiques accumulées sur des sujets sains naïfs ou des patients en utilisant des tests psychophysiques rigoureux dans un environnement de laboratoire contrôlé peut être transférée à des opérateurs d'interfaces homme-machine complexes comme des pilotes d'aéronef. Dans la mesure où nous avons utilisé le simulateur de vol le plus réaliste possible, nous nous attendons à ce que nos résultats soient généralisables à la perception de l'inclinaison (*i.e.* des rotations) dans le contexte de vols réels opérationnels. Cela justifierait l'implémentation de tests réguliers des fonctions vestibulaires des pilotes lors de leurs exercices de routine en simulateur. Cela ouvre également la question de la dépendance au contexte de la détection par l'être humain de son mouvement propre en situations réalistes. Pour répondre à ces questions, nous avons étudié la perception du mouvement propre de pilotes d'hélicoptère professionnels en utilisant un simulateur de vol. Nous nous sommes d'abord concentrés sur le rôle des contributions otolithiques et somesthésiques sur un déplacement initial en tirant avantage du fait que pour des petites inclinaisons (environ 10°) en-deçà de 1 Hz, parmi les organes vestibulaires, ce sont les otolithes qui jouent un rôle prédominant dans la détection des mouvements. Par contre, des stimulations à fréquence plus élevée seraient détectées par les canaux semi-circulaires (Nashner, 1971; Ormsby & Young, 1977). De plus, les vitesses des déplacements initiaux ont été dans une gamme inférieure au seuil moyen des canaux semi-circulaires (1,5 °/s, (T. L. Lee et al., 2020).

## 2. Matériels et méthodes

### a. Sujets

Neuf hommes pilotes d'hélicoptères professionnels et opérationnels, âgés de 31 à 48 ans ( $39 \pm 5,7$ ) ont participé à cette étude. Aucun n'avait d'antécédent connu de troubles de l'équilibre ou de vertiges. Ces pilotes avaient entre 300 et 5000 heures de vol d'hélicoptère (tous appareils confondus) au moment de l'expérience. Le Comité de Protection des Personnes de Paris-Descartes (CERES N°2017-35 daté du 23/05/2017) a approuvé le protocole expérimental en suivant la Déclaration d'Helsinki de 1964.

## ***b. Protocole expérimental***

Toutes les expériences ont été menées sur un simulateur d'hélicoptère illustré [FIGURE 5](#). Ce dernier inclut un environnement visuel immersif au sein duquel est plongée une réplique de cabine d'hélicoptère, le tout supporté par un support motorisé. Les moteurs asservis à la position produisent des inclinaisons antérieures/postérieures du support et du dôme visuel, avec les axes de rotation centrés 2,6 mètres sous la tête du sujet et colinéaires au plan horizontal. Le level-D est le plus haut niveau de certification pour un simulateur, et le seul niveau qui permette de suivre une formation ZFT (« Zero Flight Time », une formation ZFT est qualifiante même si l'intégralité de celle-ci est faite sur un simulateur). Le simulateur était équipé avec une cabine d'hélicoptère EC135 (EuroCopter). Un joystick (Logitech Extreme 3D Pro (X3D)) était utilisé par le pilote pour déplacer le simulateur, à la place des commandes habituelles. Un programme informatique spécifique a été développé pour piloter la plateforme de mouvement six axes avec le joystick. Le simulateur était programmé pour qu'il y ait une relation linéaire entre le mouvement appliqué au joystick et la vitesse de rotation du simulateur. Les deux axes du joystick étaient utilisés de façon à ce que le pilotage soit naturel : avant/arrière pour une rotation dans le plan sagittal (en tangage) et gauche/droite pour une rotation dans le plan frontal (en roulis). Pour effectuer une rotation dans le plan horizontal (en lacet), les pilotes pouvaient pivoter le joystick dans le plan horizontal. Avant l'expérience, tous les pilotes sont passés par une phase de stimulation réaliste afin de se familiariser avec ce simulateur spécifique.

Durant l'intégralité de l'expérience, les pilotes étaient assis dans le simulateur Full Flight de Level-D dans l'obscurité la plus totale. Tous les signaux visuels ont été supprimés et les lumières ont été éteintes. Puis la cabine du simulateur s'est inclinée (automatiquement) à quatorze reprises : six fois dans le plan frontal (en roulis), six fois dans le plan sagittal (en tangage) et deux fois dans le plan horizontal (en lacet). Les rotations étaient centrées 2,6 mètres sous la tête des pilotes (voir [FIGURE 27](#)). Les rotations en lacet étaient de  $-10^\circ$  et  $10^\circ$  ; les rotations en roulis et en tangage étaient de  $-15^\circ$ ,  $-10^\circ$ ,  $-5^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$  et  $15^\circ$ , avec une vitesse maximum de  $0,85^\circ/\text{s}$  et une accélération maximale de  $0,2^\circ/\text{s}^2$ . La séquence des quatorze rotations était tirée aléatoirement. La vitesse de déplacement de la cabine était sous le seuil moyen des canaux semi-circulaires ( $1,5^\circ/\text{s}$ , (T. L. Lee et al., 2020)) et durait entre dix et vingt secondes. Après chaque rotation automatique, les pilotes devaient remettre la cabine dans le plan horizontal et « droit devant » (*i.e.* dans sa position initiale, neutre) sans aucun indice visuel ni contrainte de temps. L'opération de retour de la cabine était libre dans la mesure où :

- La vitesse maximum que les pilotes pouvaient atteindre en poussant le joystick au maximum était  $1,7^\circ/\text{s}$ .
- Pour s'assurer que les pilotes n'endommagent pas le simulateur, les mouvements étaient contraints dans le plan de la rotation initiale. Par exemple, si la cabine s'était penchée à  $10^\circ$  dans le plan sagittal initialement, alors le pilote ne pouvait bouger la cabine que dans le plan sagittal.

Une fois que le pilote pensait être revenu à la position neutre, il devait presser un bouton. Une fois ce bouton pressé, la cabine revenait à sa véritable position initiale (*i.e.* elle corrigeait l'approximation commise par le pilote) et l'essai suivant démarrait dans les 45 secondes qui suivaient. Si lors d'un essai un pilote ne touchait à aucune commande alors que c'était à son tour

de manœuvrer le simulateur, la cabine revenait automatiquement à son état initial après une latence de 45 secondes. L'expérience a duré approximativement vingt minutes pour chaque pilote. Tous les participants ont donné leur consentement écrit.

Pour l'inclinaison initiale du simulateur, nous souhaitions minimiser les informations somesthésiques ainsi que celles provenant des canaux semi-circulaires, ainsi notre but était de mesurer la contribution des organes otolithiques à la perception du mouvement. Du fait des fortes contraintes temporelles qui pesaient sur les pilotes (professionnels), nous n'avons pas pu mesurer, par des tests psychophysiques, les seuils vestibulaires individuels des participants. Par conséquent, nous avons décidé de limiter notre vitesse maximale à  $0,85\text{ }^\circ/\text{s}$  pour tous les participants, en se basant sur l'étude de (T. L. Lee et al., 2020) des seuils vestibulaires des canaux semi-circulaires. Dans cette étude, les auteurs ont montré que le seuil moyen est de  $1,5\text{ }^\circ/\text{s}$  (pour des cycles de 1 Hz) mais que la gamme s'étend en réalité de  $0,69$  à  $2,99\text{ }^\circ/\text{s}$  avec seulement un de leurs quinze participants qui a un seuil inférieur à  $0,8\text{ }^\circ/\text{s}$ . De plus, d'après (Grabherr et al., 2008), le seuil des canaux semi-circulaires atteint un plateau à 1 Hz autour de  $0,71\text{ }^\circ/\text{s}$  (voir la Figure 2 de l'article), ce qui est en accord avec (T. L. Lee et al., 2020). (Grabherr et al., 2008) a également montré que le seuil des canaux semi-circulaires augmente de  $0,85$  à  $3\text{ }^\circ/\text{s}$  lorsque la fréquence diminue de 1 à  $0,05\text{ Hz}$ . La fréquence de nos rotations est située autour de  $0,02\text{ Hz}$ . In fine, nous étions plutôt confiants qu'en gardant la vitesse sous  $0,85\text{ }^\circ/\text{s}$  nous ne stimulerions pas les canaux semi-circulaires.

D'autre part, nous n'avons pas imposé de limitation de vitesse sur les trajectoires retour du simulateur (lorsque c'est le pilote qui manœuvre). La raison est que nous souhaitions que les pilotes soient les plus précis possible quand ils repositionnaient le simulateur dans sa position initiale, en utilisant toutes les informations sensorielles disponibles, en incluant les canaux semi-circulaires.

Concernant les potentielles autres sources d'informations : 1) tous les écrans et instruments de vol étaient éteints et comme la cabine du simulateur est un environnement clos, l'obscurité était maximale ; 2) le seul stimulus auditif présent pendant l'expérience était le bruit des moteurs lorsque la cabine était en déplacement, qui était strictement le même quelle que soit la direction (lacet, roulis et tangage) et qui n'était pas modulé par la position de la cabine.

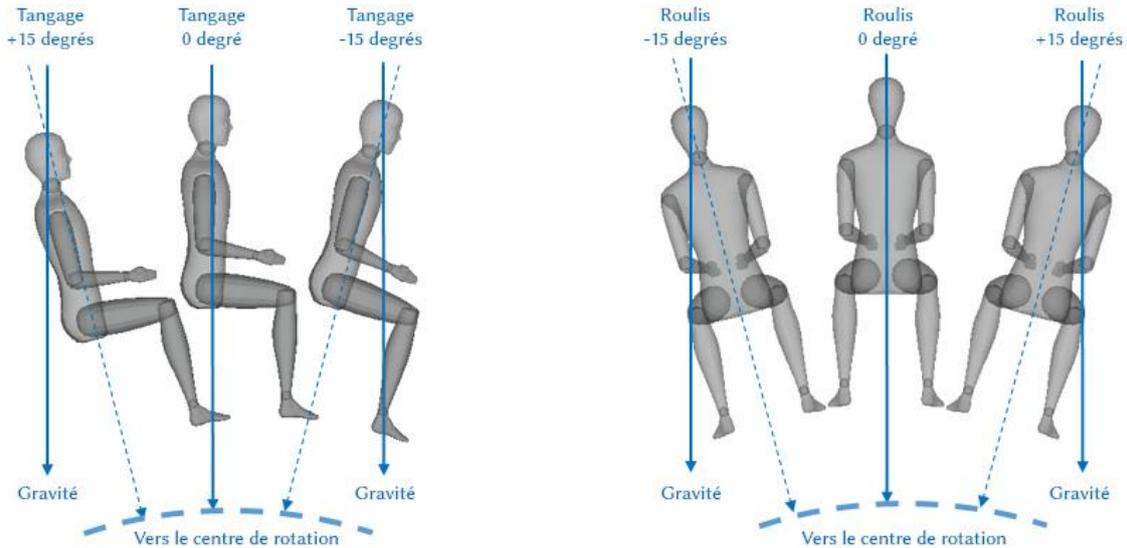


Figure 27: Exemples pour les rotations de  $\pm 15^\circ$  degrés en tangage (à gauche) et en roulis (à droite). Toutes les rotations étaient centrées 2,6 mètres sous la tête des pilotes.

### c. Mesures

Les pilotes n'avaient pas de temps limité pour effectuer leur tâche. Ainsi, les seuls facteurs pris en compte pour l'analyse de données étaient : 1) l'angle initial d'inclinaison imposé par la cabine ; 2) la précision des pilotes à retourner à la position initiale. Nous avons défini la précision comme étant l'angle d'inclinaison du simulateur une fois que les pilotes considéraient avoir remis la cabine dans sa position initiale (c'est-à-dire une fois qu'ils ont pressé le bouton idoine).

### d. Statistiques

Pour chaque pilote, nous avons calculé la précision moyenne du repositionnement de la cabine dans sa position initiale pour chaque plan de l'espace (horizontal après un lacet, frontal après un roulis sagittal après un tangage). Nous avons utilisé le test des rangs signés de Wilcoxon (Wilcoxon sign-ranked test) pour effectuer un test de différence par paire (paired difference test) entre les rotations en roulis et en tangage. Nous avons préféré ce test à un test de Student, car la distribution des échantillons pour les rotations en roulis ne pouvait pas être supposée normalement distribuée. Le test de Shapiro-Wilk (pour vérifier l'hypothèse de normalité) retourne bel et bien une distribution normale pour les rotations en tangage ( $p=0.335$ ) mais une distribution non-normale pour les rotations en roulis ( $p=0.004$ ). Le test de Friedman a été utilisé pour évaluer la précision des pilotes en fonction de l'angle initial d'inclinaison de la cabine, afin de trouver de potentielles relations ou tendances entre la précision et l'inclinaison initiale.

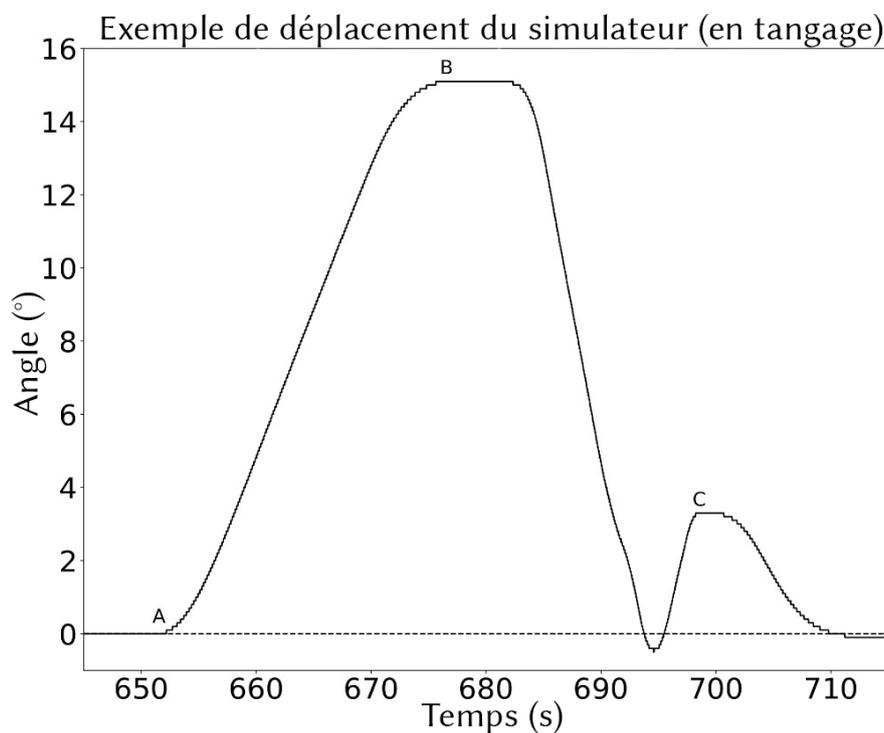
### e. Analyse

Toutes les analyses ont été faites en utilisant une version récente de Python (3.10.0) avec un Jupyter Notebook.

### 3. Résultats

La précision moyenne absolue (sur l'ensemble des neuf pilotes et tous leurs essais) pour les mouvements en lacet (plan horizontal) a été de  $10,6^\circ \pm 3,6^\circ$  et  $8,7^\circ \pm 2,7^\circ$  pour les rotations à droite et à gauche respectivement. La cabine bougeait aléatoirement à droite ou à gauche et aucun des pilotes n'a réussi à recouvrer la position « droit devant » après un déplacement automatique en lacet. Il s'est avéré que seuls cinq des dix-huit essais ont conduit à une tentative de ramener le simulateur en position initiale, mais sans y parvenir. Lors des treize essais restants, soit les pilotes n'ont pas détecté le mouvement automatique dans le plan horizontal, soit ont renoncé à essayer de corriger la position du simulateur, du fait d'informations sensorielles insuffisantes sur leur déplacement passif.

La FIGURE 28 ci-dessous montre un déplacement angulaire typique de la cabine du simulateur dans le plan sagittal.



*Figure 28 : Exemple de déplacement de la cabine du simulateur dans le plan sagittal. Il y a trois moments clés. A : début du déplacement initial (automatique) vers  $+15^\circ$ ; B : fin du déplacement automatique, le pilote doit maintenant ramener le simulateur dans sa position initiale; C : le pilote arrête de manoeuvrer le simulateur (en appuyant sur le bouton idoïne pour indiquer qu'il a terminé sa tâche) et quelques instants plus tard, le simulateur retourne de lui-même en position initiale.*

La précision moyenne absolue (sur l'ensemble des neuf pilotes et tous leurs essais) pour les essais en roulis a été de  $1,15^\circ$ , contre  $2,89^\circ$  pour les essais en tangage (voir FIGURE 29). Le test des rangs signés de Wilcoxon montre que les pilotes ont été significativement plus précis en roulis (p-value inférieure à 0,01). Cependant, au sein d'un plan de l'espace (sagittal ou frontal), aucune différence statistique n'a été trouvée entre : 1) les roulis à gauche et les roulis à droite ; 2) les tangages en avant et les tangages en arrière. Les deux p-value étaient supérieures à 0,05 (respectivement 0,48 et 0,15).

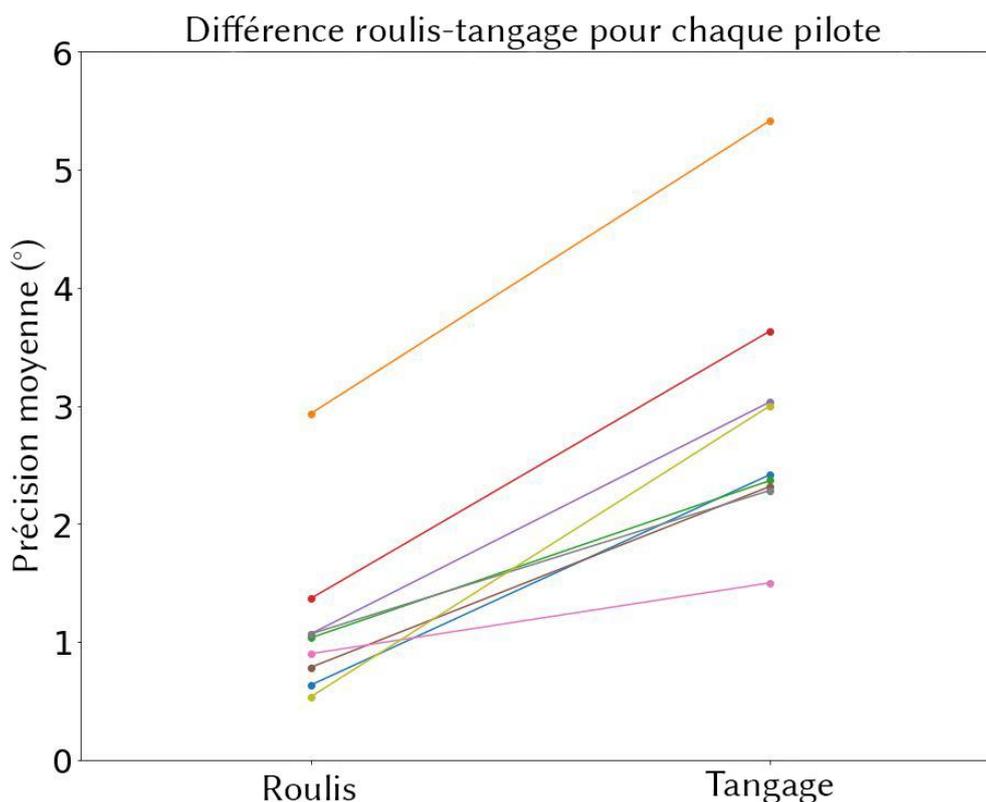


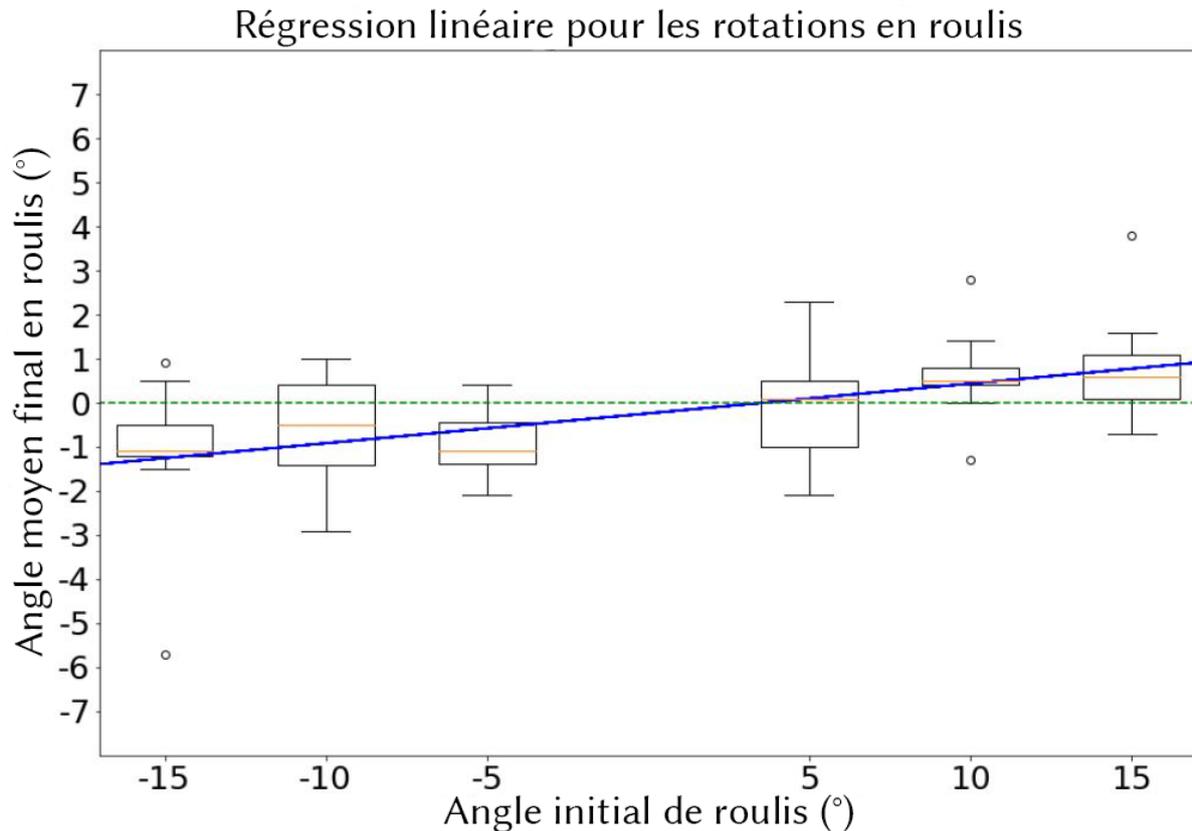
Figure 29: Précision moyenne absolue des essais en roulis et en tangage pour chaque pilote. Chaque couleur correspond à un pilote différent, qui obtient donc deux scores répertoriés sur cette figure : le score à gauche est sa précision moyenne absolue en roulis (rotation dans le plan frontal) ; le score à droite est sa précision moyenne absolue en tangage (rotation dans le plan sagittal).

La TABLE 4 ci-dessous résume ces résultats : p-value des tests de Wilcoxon et précision absolue (moyennée sur tous les pilotes) avec déviation standard. En outre, comme illustré par la FIGURE 30 et la FIGURE 31, l'analyse de la précision en fonction de l'angle d'inclinaison initial (-15°, -10°, -5°, 5°, 10° ou 15°) a montré que plus l'angle initial était important, plus la précision des pilotes était faible, bien que ces derniers restent biaisés par la direction d'inclinaison initiale. Un test de Friedman a été utilisé et a montré que les différences au sein d'un même plan de l'espace sont statistiquement significatives (p-value inférieure à 0,01 pour les rotations en roulis et p-value inférieure à 0,0001 pour les rotations en tangage).

	Moyenne	Ecart-type	p-value de Wilcoxon	Valeur statistique
Roulis (moyennés)	1.15°	0.67°	<0.01	0
Tangage (moyennés)	2.89°	1.06°		
Roulis gauche	1.35°	1.20°	0.4838	13
Roulis à droite	0.94°	0.54°		
Tangage avant	2.38°	0.82°	0.1548	10.5
Tangage arrière	3.42°	1.92°		

Table 4: Moyenne et déviation standard de la précision des pilotes, ainsi que p-value du test des rangs signés de Wilcoxon.

Enfin, nous avons effectué des régressions linéaires pour vérifier s'il existait une relation linéaire entre l'angle initial d'inclinaison et la précision des pilotes. En prenant en compte la taille de la population étudiée (neuf pilotes), le coefficient de détermination pour les deux régressions était tout à fait acceptable (0,92 pour les rotations en roulis, 0,94 pour celles en tangage). En outre, les pentes ont montré que la tendance en tangage (pente = 0,23) était plus importante que la tendance en roulis (pente = 0,068). Les [FIGURE 30](#) et [31](#) montrent les résultats de la régression linéaire, respectivement pour les rotations en roulis et en tangage. La [TABLE 5](#) résume les résultats de cette analyse (pentes et coefficient de détermination). La [TABLE 6](#) résume quant à elle les statistiques du test de Friedman.



*Figure 30: Tendence de la précision moyenne pour les rotations en roulis. Les valeurs négatives correspondent au roulis à gauche; les valeurs positives au roulis à droite. Cette figure montre la tendance de la précision moyenne en fonction de l'angle d'inclinaison initial (moyenné sur tous les pilotes) pour les rotations en roulis uniquement. Même si la pente est faible (0,068), il y a une claire tendance de biais vers la rotation initiale : plus l'angle initial était important, moins les pilotes étaient précis, tout en maintenant un biais dans la direction de la rotation initiale. En outre, un test de Friedman a montré que ce biais était statistiquement significatif ( $p$ -value inférieure à 0,01).*

### Régression linéaire pour les rotations en tangage

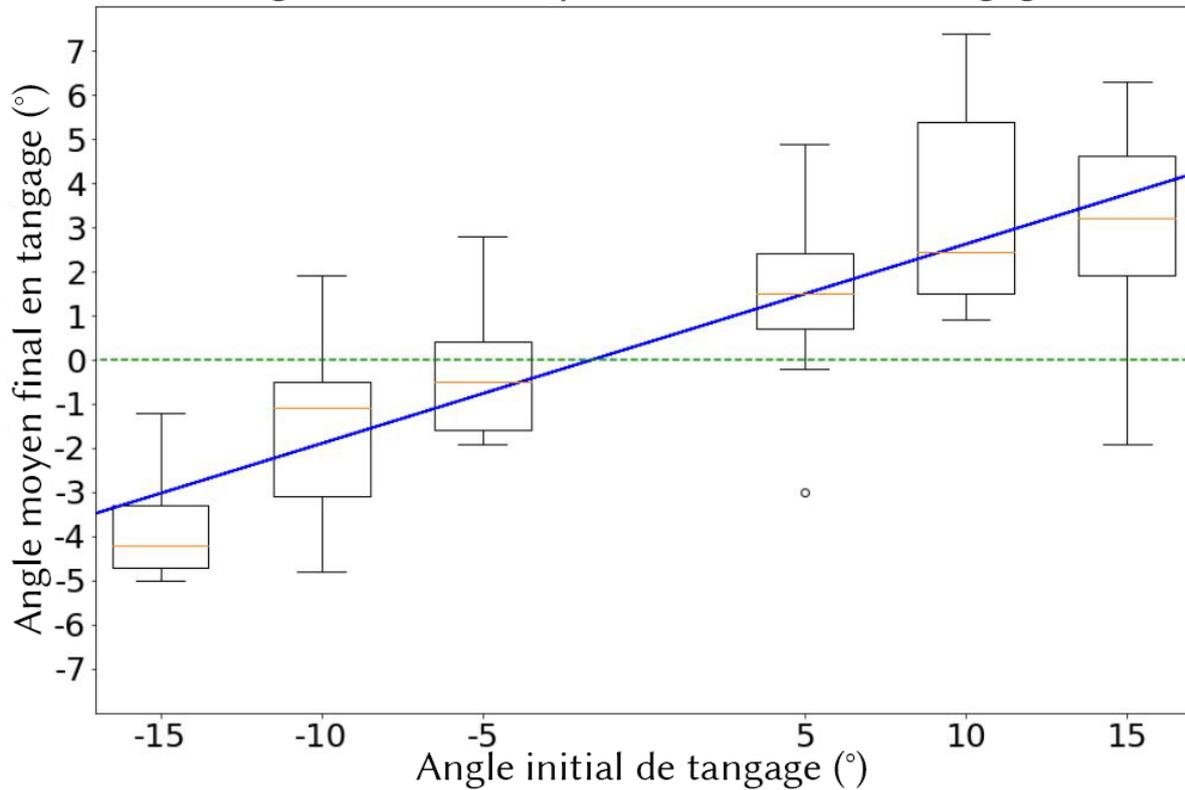


Figure 31: Tendence de la précision moyenne pour les rotations en tangage. Les valeurs négatives correspondent au tangage en avant; les valeurs positives au tangage en arrière. Cette figure montre la même chose que la FIGURE 30 mais pour les rotations en tangage. Le résultat est similaire mais plus important, ici la pente de la régression linéaire est de 0,22. Un test de Friedman a également montré que le biais vers la rotation initiale était statistiquement significatif ( $p$ -value inférieure à 0,0001).

	Rotations en roulis	Rotations en tangage
Coefficient de détermination	0.92	0.94
Pente	0.068	0.22
$p$ -value	0.002	0.001

Table 5: Résultats des régressions linéaires.

	Rotations en roulis	Rotations en tangage
$p$ -value	< 0.01	< 0.0001
Valeur statistique	19.05	33.82

Table 6: Résultats des tests de Friedman.

## 4. Discussion

Dans cette étude, nous avons mesuré la précision de neuf pilotes d'hélicoptère professionnels à qui nous avons demandé de remettre un simulateur full-flight de niveau D dans sa position initiale après avoir été incliné en roulis ou en tangage à un angle inconnu, sans aucun repère visuel. Il apparaît que les pilotes ont été significativement moins précis en tangage (rotation dans le plan sagittal) qu'en roulis (rotation dans le plan frontal). En outre, les pilotes ont montré un biais en direction de l'angle d'inclinaison initial. Nous avons montré que plus l'angle initial était élevé, moins les pilotes étaient précis. Ce résultat est valable pour les rotations en roulis comme pour les rotations en tangage, même si l'effet est plus important en tangage qu'en roulis.

### *a. Contributions respectives des organes otolithiques et de la proprioception dans la perception du mouvement dans notre protocole*

Les informations auditives, vestibulaires, proprioceptives et visuelles auraient pu jouer un rôle dans la détection des mouvements de la cabine (Bronstein, 1999; Kavounoudias et al., 1999; Roll et al., 2002). Cependant, certaines de ces informations étaient exclues de l'étude (repères visuels), minimisées (le retour d'informations tactiles car les pilotes avaient la peau couverte), ou contrôlées (repères auditifs). Malgré cela, les informations proprioceptives ne peuvent pas être totalement exclues. En effet, les pilotes professionnels sont notoirement connus pour être une population capable d'utiliser les signaux proprioceptifs pour désambiguïser leur perception du mouvement en cas de conflits sensoriels, incluant la graviception somatique du tronc (Rupert, 2000). Toutefois, nous n'avons pas observé de différences dans la performance des pilotes entre les rotations en tangage avant et en tangage arrière, malgré la grande différence d'informations proprioceptives générées dans les deux cas (les pilotes n'avaient pas d'appui-tête). De plus, les pilotes n'ont pas été capables de s'orienter lors des rotations en lacet (où les signaux vestibulaires otolithiques sont absents), donc les entrées proprioceptives et auditives n'ont sans doute joué qu'un rôle mineur dans notre tâche.

Concernant les informations d'origine vestibulaire, les canaux semi-circulaires et les organes otolithiques constituaient deux sources putatives de signaux d'entrée. Néanmoins, la majorité de la contribution des canaux semi-circulaires lors du déplacement initial de la cabine peut être exclue pour trois raisons. Premièrement, les mouvements de la cabine ont eu lieu à une vitesse maximale inférieure à  $1,5 \text{ }^\circ/\text{s}$ , qui est sous le seuil vestibulaire d'activation des canaux semi-circulaires (T. L. Lee et al., 2020). Deuxièmement, le spectre de fréquence des mouvements de la cabine n'englobait pas de fréquence supérieure à  $0,02 \text{ Hz}$  ; sous cette fréquence, les organes otolithiques jouent un rôle prédominant dans la perception du mouvement (Nashner, 1971; Ormsby & Young, 1977). Troisièmement, les mouvements de la cabine dans le plan horizontal (rotations en lacet), qui ne peuvent être détectés par le système vestibulaire qu'à travers les canaux semi-circulaires, n'ont pas été perçus ; de plus, d'après (Benson et al., 1986), le seuil de détection des accélérations linéaires dans le plan horizontal est de  $0,05 \text{ m/s}^2$  pour les organes otolithiques. Dans notre cas, l'accélération linéaire est de  $0,01 \text{ m/s}^2$  ; ainsi les organes otolithiques n'ont pas détecté la composante linéaire du mouvement de la cabine.

Dans l'ensemble, les informations d'origine otolithiques apparaissent importantes pour la détection du mouvement propre du corps humain. Dans cette lignée, le contrôle postural des patients atteint d'une lésion vestibulaire unilatérale est plus affecté dans le plan frontal que dans le plan sagittal (Mbongo et al., 2004; Pavlovic, 2019). En outre, des cobayes avec une lésion unilatérale de l'utricule ont montré une inclinaison de l'ensemble de leur corps dans le plan frontal et une inclinaison vers l'avant dans le plan sagittal après une lésion utriculaire bilatérale (De Waele et al., 1989).

## ***b. Pourquoi existe-t-il un biais dans la perception du mouvement par le système utriculaire ?***

Quelle pourrait être la cause de l'asymétrie de perception observée entre le plan frontal et le plan sagittal ? Plusieurs explications mutuellement non-exclusives peuvent être avancées. Premièrement l'utricule joue un rôle prééminent dans la perception de la verticalité, donc la perception de la verticalité propre pourrait se traduire dans le cerveau par une différence nulle entre les signaux issus des utricules gauche et droit. En considérant que les mouvements du simulateur étaient strictement contraints dans le plan frontal ou dans le plan sagittal, cela montre que cette « différence nulle » est plus précise lors des rotations dans le plan frontal, c'est-à-dire lorsque les utricules fonctionnent en système « push-pull », plutôt que dans le plan sagittal, lorsqu'ils fonctionnent de manière synergistique.

Deuxièmement, (Suri & Clark, 2020) ont proposé une hypothèse impliquant la géométrie des organes otolithiques. La *maculla* utriculaire est environ au niveau dans le plan frontal, mais inclinée d'environ 30° dans le plan sagittal. Ainsi, les rotations en roulis (dans le plan frontal) produisent une plus grande stimulation dans le cisaillement utriculaire que les rotations en tangage. Néanmoins l'orientation anatomique des organes otolithiques devrait également induire une différence entre les tangages avant et arrière, ce que nous n'avons pas montré ici.

Troisièmement, le corps humain dispose d'un plus grand nombre de degrés de liberté dans le plan sagittal que dans le plan frontal, notamment au niveau de la colonne vertébrale, des genoux, des hanches et du cou. En conséquence, le système nerveux dispose d'un grand nombre d'informations diverses d'origine proprioceptive pour appréhender la perception du mouvement du corps dans le plan sagittal. Cela est moins le cas dans le plan frontal, où le rôle de l'information utriculaire devrait être plus important.

(Heerspink et al., 2005), en utilisant des virages coordonnées d'aéronefs (en vols réels et en centrifugeuse), ont étudié sélectivement le rôle de l'information donnée par les canaux semi-circulaires dans la perception du mouvement propre des pilotes. Ils ont trouvé une sous-estimation prononcée des déplacements angulaires en roulis et en tangage. La variabilité inter-individuelle était également considérable. En d'autres termes, chez les pilotes d'aéronef, les canaux semi-circulaires et les organes otolithiques fournissent des informations biaisées et sous-estimées. Cela contribue certainement aux mouvements de désorientation spatiale fréquemment signalés lors des vols.

Un champ de recherche particulièrement pertinent dans les études passées sur ce sujet est la verticale posturale subjective (SPV, pour l'anglais « Subjective Postural Vertical »). Notamment (Bergmann et al., 2020) ont montré que « l'évaluation de la SPV lorsque le sujet est assis induit

une gamme de SPV rapportées plus grande par rapport à l'évaluation de la SPV lorsque le sujet est debout, indiquant une plus grande insécurité dans l'estimation de la verticalité lorsque le sujet est assis. » Les auteurs attribuent ce point à « une plus grande disponibilité ou fiabilité des signaux somatosensoriels lorsque le sujet est debout. » De manière intéressante, cela pourrait suggérer que les pilotes se reposent plus sur leur système vestibulaire du fait de leur position assise, ce qui plaide en faveur d'un test régulier des fonctions vestibulaires pour les pilotes. De plus, en accord avec nos résultats, (Bergmann et al., 2020) ont trouvé que la gamme d'auto-évaluation de la SPV est plus grande en tangage (dans le plan sagittal) qu'en roulis (dans le plan frontal). Toutefois, la différence de précision dans nos résultats entre le roulis et le tangage est certainement due à des méthodes d'analyse différentes (nous avons pris en compte l'erreur absolue, ce que n'ont pas fait (Bergmann et al., 2020)), ce qui rend la comparaison des résultats difficile.

Enfin, nous n'avons trouvé aucune relation claire entre les résultats présentés dans cette étude et d'autres paramètres comme l'expérience (nombre d'heures de vol) ou l'âge des participants.

### ***c. Doit-on tester régulièrement la fonction vestibulaire des pilotes professionnels ?***

Il est possible de tester la perception du mouvement de pilotes d'aéronefs professionnels en utilisant des aéronefs réels, des simulateurs de vol ou encore des centrifugeuses. En particulier, le test des canaux semi-circulaires et des organes otolithiques que nous avons décrit ici pourrait être implémenté lors des sessions de simulateurs obligatoires que les pilotes doivent faire tous les six mois. A l'appui de cette proposition, nous pouvons donner plusieurs arguments. Premièrement, les grandes différences inter-individuelles observées dans diverses études (la présente comme celles citées) sur les pilotes sujets : par exemple nous avons eu un pilote qui a significativement été moins bon que les autres (en orange sur la [FIGURE 29](#)), alors que son âge et son expérience étaient dans la moyenne. Deuxièmement, la carrière des pilotes s'étale sur plusieurs décennies, et les systèmes sensoriels vieillissent (Boisgontier et al., 2012; Brosel et al., 2016; Sloane et al., 1989). Troisièmement, durant l'entraînement ou lors de la vie professionnelle, l'apprentissage perceptif est possible dans toutes les modalités sensorielles (Ertl et al., 2020). Quatrièmement, il existe une potentielle relation entre les fonctions vestibulaires et le contrôle manuel des tâches de pilotage. En effet, (Rosenberg et al., 2018) ont étudié une tâche de contrôle manuel « vestibulaire » lors de laquelle les sujets devaient essayer de se maintenir droit debout à l'aide d'un joystick, en annulant des perturbations pseudo-aléatoires du mouvement de roulis de leur chaise dans l'obscurité. Ils ont trouvé une corrélation significative entre le seuil de perception vestibulaire des sujets et leur performance dans la tâche de contrôle manuel, ce qui est cohérent avec le fait que l'imprécision sensorielle a un effet négatif sur la précision fonctionnelle. Cinquièmement, un processus de vieillissement anormal, une pathologie vestibulaire plus ou moins bien rééduquée ou compensée et/ou un traitement médical altérant le système vestibulaire peuvent biaiser la perception des pilotes, comme observé cliniquement chez les patients atteints de troubles vestibulaires (Zalewski, 2015).

Une augmentation de 0,2 Hz du seuil de perception vestibulaire en roulis peut provoquer une augmentation jusqu'à un facteur six du risque de chute (Agrawal et al., 2009; Bermúdez Rey et al., 2016; Beylergil et al., 2019; Karmali et al., 2017). En d'autres termes, notre étude suggère

également que vérifier la perception du mouvement dans les plans frontal et sagittal en utilisant un dispositif plus simple que le simulateur de vol pourrait également s'avérer utile pour identifier les pertes de fonctions vestibulaires liées à l'âge et les risques de chute, ce qui est également souligné dans la revue de (Kobel et al., 2021).

#### ***d. Limitations de l'étude***

Notre étude présente plusieurs limitations qui réduisent son champ d'application. Avant toute chose, il n'y a pas de groupe contrôle : les seuls sujets ayant pris part à l'expérience sont des pilotes professionnels d'hélicoptère, une population qui est susceptible d'avoir un système vestibulaire aguerri aux situations auxquelles ils ont été soumis ici. On peut donc se demander si nos résultats s'appliquent tels quels à la population générale. Malheureusement, nous n'avons pas été en mesure d'effectuer des mesures supplémentaires sur un groupe témoin, notamment à cause du coût élevé et de la faible disponibilité des équipements utilisés pour cette expérience (notamment le simulateur de vol). Si notre proposition de tester le système vestibulaire des pilotes de façon routinière était acceptée, il faudrait tout d'abord effectuer une nouvelle batterie de mesures avec un groupe contrôle.

De plus, lors des rotations initiales et des trajectoires retour utilisées par les pilotes, nous ne pouvons pas exclure à 100% l'implication des signaux d'origine proprioceptive. En raison des contraintes temporelles imposées sur les pilotes, nous n'avons pas non plus pu mesurer les seuils vestibulaires individuels des pilotes (à travers une méthodologie psychophysique rigoureuse).

Nous avons également une contrainte sur les déplacements du simulateur : pour améliorer la sécurité de l'expérience, les pilotes ne pouvaient manœuvrer le simulateur que dans le plan de la rotation initiale automatique. Cela a pu induire des biais dans les données. En effet, seul le simulateur était contraint dans un plan donné, les pilotes pouvaient quant à eux utiliser le joystick dans toutes les directions de l'espace (même si une seule aboutissait à un mouvement concret).

Nous avons aussi des vitesses limites différentes entre le mouvement initial automatique et la manœuvre des pilotes. Pour le mouvement initial, nous avons choisi une vitesse qui permette de tester les organes otolithiques ; pour la manœuvre des pilotes, nous avons l'impression qu'il était important que les pilotes soient libres de choisir leur propre allure afin de ne pas biaiser leur estimation de leur déplacement, quitte à aller au-delà du seuil de perception des canaux semi-circulaires.

Enfin, la possibilité que le pilote qui a performé moins bien que les autres soit une anomalie (et que ses données auraient dues être écartées) demeure. Par exemple, un manque d'attention sélective pourrait être en cause.



# Chapitre 3 : Charge mentale

---

“All we have to decide is what to do with the time that is given to us.”

*The Fellowship of the Ring* (J. R. R. Tolkien, 1954)

<b>I. Définition(s)</b> .....	<b>107</b>
1. Cadre théorique .....	108
2. Définitions.....	110
a. En tant que mesure subjective .....	110
b. Vers une tentative d’objectivation .....	111
c. Exigence vs. Ressources .....	113
<b>II. Mesure et prédiction</b> .....	<b>114</b>
1. Quantification .....	114
2. Mesure(s).....	116
a. Par les variables cardiovasculaires .....	117
b. Par l’électromyographie .....	117
c. Par l’électroencéphalographie.....	117
d. Par les mouvements des yeux .....	118
e. Par la conductance cutanée .....	119
3. Peut-on prédire la charge mentale ? .....	119
<b>III. Modèle prédictif de la charge mentale de pilotes d’hélicoptère</b> .....	<b>121</b>
1. Introduction .....	121
2. Matériels et méthodes .....	124
a. Sujets .....	124
b. Simulateur Full-Flight .....	125
c. Protocole de mesure – Scénarios .....	125
d. Capteurs .....	126
e. Auto-évaluation de la charge mentale .....	127
f. Index de Charge Mentale Brut (NASA-TLX Brut) .....	127
g. RTLX théorique .....	127
h. Caractéristiques.....	127
i. Physiologie.....	128
j. Machine .....	130
k. Interface homme-machine .....	131
l. Fenêtre d’évaluation .....	131
m. HBagging.....	133

3. Résultats .....	135
a. Evaluation subjective de la charge mentale .....	135
b. Auto-évaluation subjective vs. NASA-TLX.....	137
c. Visualisation.....	138
4. Discussion .....	139
a. Pertinence de la méthode .....	139
b. Vérité terrain .....	139
c. Paramètres physiologiques.....	140
d. Paramètres opérationnels.....	141
e. L'engagement.....	142
f. Limitations.....	142
5. Conclusion.....	143

Nous venons de voir au chapitre précédent que le système vestibulaire et la proprioception sont des modalités sensorielles qui pourraient et devraient être prises en compte pour le suivi longitudinal des pilotes professionnels. Toutefois, cette étude directe du système vestibulaire et indirecte du système proprioceptif reste cantonnée à un environnement contrôlé. En effet, bien qu'ayant eu lieu dans un simulateur Full-Flight répliquant très fidèlement un hélicoptère réel, l'expérience présentée au chapitre précédent ressemble à ce que l'on peut trouver en laboratoire : commandes simples (par un joystick uniquement), environnement dégradé au maximum (sujets plongés dans le noir), tâches répétitives et cadrées, tâches qui sont également dissociées d'un objectif de performance habituel pour un pilote professionnel (réussite d'une mission par exemple), etc.

Dans ce chapitre, nous allons présenter une seconde expérience réalisée sur le même simulateur, tirant cette fois partie de tout le potentiel que peut offrir un tel équipement, notamment en termes de réalisme et d'immersion du sujet dans l'expérience.

Nous reviendrons dans un premier temps sur la définition d'un concept-clé, la charge mentale. Nous verrons sa définition dans plusieurs contextes : dans le cas général puis dans le cas particulier de l'aéronautique. Dans un second temps, nous présenterons un état de l'art des méthodes les plus usitées pour la mesurer (que ce soit en environnement contrôlé ou en environnement opérationnel). Puis dans un troisième temps nous exposerons de nouvelles méthodes de mesures basées sur la prédiction grâce aux algorithmes d'apprentissage automatique. Enfin, après avoir présenté notre expérience et ses résultats, nous discuterons des intérêts de la mesure et de la prédiction de la charge mentale dans un contexte aéronautique, notamment en ce qui concerne le suivi longitudinal individuel des pilotes.

## I. Définition(s)

“He was staring at the instruments with the air of one who is trying to convert Fahrenheit to centigrade in his head while his house is burning down.”

*Life, the Universe and Everything*  
(Douglas Adams, 1982)

La charge mentale est – en français – un terme qui regroupe plusieurs concepts différents en psychologie cognitive :

- La charge cognitive (CC), terme usité en psychologie cognitive pour modéliser la capacité de stockage de la mémoire de travail (qui est un système de stockage d'informations temporaire).
- La charge de travail (CT), terme qui définit la quantité de travail qu'un individu doit faire pour accomplir une tâche.
- La charge mentale (CM), qui a vu sa définition évoluer au cours des années, mais qui pourrait schématiquement se définir comme la charge de travail perçue par l'individu, quelles que soient la difficulté de la tâche et/ou la quantité réelle de travail effectué.

C'est ce dernier concept qui nous intéresse pour la présente étude et à laquelle nous allons essayer de donner un cadre théorique.

## 1. Cadre théorique

La charge mentale (CM) est un concept apparu dans les années soixante-dix, essentiellement sous l'impulsion de deux communautés : l'aéronautique (pour étudier les pilotes d'avions de chasse et de transport) et l'aérospatial (pour étudier les astronautes, notamment par la NASA (National Aeronautics and Space Administration)).

Cet intérêt est motivé, pour l'aéronautique, par plusieurs facteurs. Le principal est l'augmentation importante du nombre de passagers transportés par l'aviation civile chaque année depuis la seconde guerre mondiale, augmentation qui ne s'est tarie qu'à de rares reprises lors de crises mondiales (guerre Iran-Irak dans les années quatre-vingts, guerre du Golfe en 1990-1991, les attentats du 11 septembre 2001, la crise financière mondiale de 2008 ou encore la pandémie de Covid-19 en 2020-2021). Toutefois, même si chaque crise a marqué un coup d'arrêt à l'essor de l'aviation civile mondiale, cette dernière a toujours su rebondir. Même après la crise la plus importante en matière de trafic aérien, la pandémie de Covid-19, le nombre de passagers transportés annuellement a toujours fini par repartir à la hausse. En atteste le record battu le 18 mai 2023, avec plus de 250.000 vols enregistrés en une seule journée. Cette augmentation permanente du nombre de personnes transportées fait peser sur l'industrie des interrogations auxquelles la charge mentale permet de répondre : quelle est la taille optimale de l'équipage nécessaire pour un avion d'une taille donnée ? Quelle est la durée de repos nécessaire entre deux périodes de travail ? Quel est le temps effectif de travail d'un équipage en vol ? Cet équipage doit-il être dédoublé ? Peut-il être assisté par l'intelligence artificielle ? Toutes ces questions nécessitent des études qui aboutissent en partie à une étude de la charge mentale.

Le deuxième facteur principal suscitant l'intérêt de l'industrie aéronautique pour la notion de charge mentale est l'évolution permanente du rôle de pilote d'aéronef. En effet, depuis l'apparition des premiers aéronefs, les fonctions du pilote à bord n'ont cessé d'évoluer : de pur opérateur des commandes de vol (d'abord intégralement mécaniques, puis progressivement hydrauliques et enfin, de nos jours, électriques), le pilote est progressivement passé à un rôle de gestionnaire du poste de pilotage (procédures en nombre croissant à vérifier, contact permanent avec le contrôle aérien, contrôle régulier des instruments de vol, superviseur des automatismes mis en place, etc.). L'évolution du rôle de pilote s'est donc accompagnée d'un accroissement de la

charge de travail à effectuer à vol donné. La quantification de la charge mentale permet là aussi de répondre aux questions que se pose l'industrie sur ces sujets : combien de pilotes sont nécessaires au bon déroulement d'un vol ? Le suivi des procédures peut-il être effectué par le même pilote que celui qui surveille les instruments de vol ? Faut-il dédoubler certaines tâches ? Certaines vérifications ? Combien de temps un pilote peut-il rester à poste avant d'avoir besoin de repos en raison d'une vigilance qui décroît ? L'intelligence artificielle peut-elle se substituer au co-pilote ou bien cela ne fera qu'augmenter la charge du pilote en exercice ?

Enfin, le troisième facteur, véritable leitmotiv de l'industrie aérospatiale en matière d'innovations et de recherche et développement, est la sécurité. En effet, toute évolution concernant le pilotage d'un aéronef, qu'elle soit conceptuelle (approche du métier, changement des procédures, etc.) ou pragmatique (changement de la configuration du cockpit, etc.) est vue sous le prisme de la question suivante : « ce changement augmente-t-il la sécurité du vol ? ». Ainsi, la mesure de la charge mentale permet de répondre à une autre série d'interrogations qui imprègne l'industrie : en cas de défaillance de l'appareil, le pilote saura-t-il réagir correctement ? En cas d'une panne donnée, les procédures prévues sont-elles adaptées ou bien seront-elles trop compliquées – compte tenu du niveau de stress important de la situation – pour être mises en œuvre ?

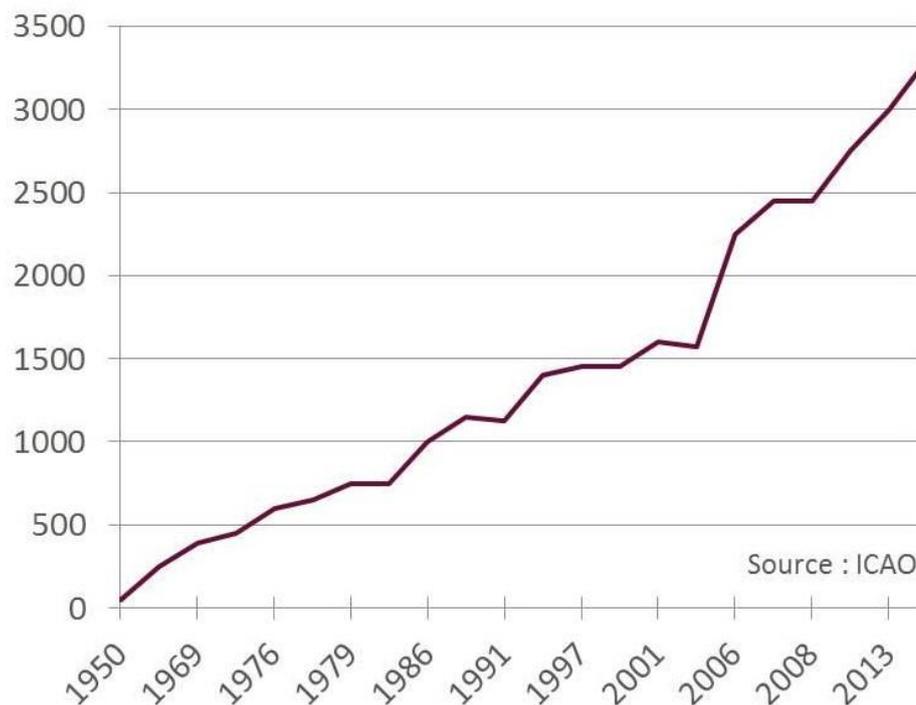


Figure 32 : Evolution du nombre de passagers aériens dans le monde, en millions, de 1950 à 2013. Nous pouvons visualiser les quelques coups d'arrêts qui ont toujours été suivis d'une forte reprise du trafic (guerre Iran-Irak, crise du Golfe, attentats du 11 septembre, crise financière mondiale de 2008 ; la pandémie de Covid-19 n'est pas représentée).

Une fois ces facteurs mis en lumière, il convient de se demander quelle forme doit prendre la métrique de charge mentale. Est-ce une donnée purement subjective ? Auquel cas le seul moyen de la quantifier serait de demander au sujet d'en donner une valeur, soit à un instant

T pendant l'expérience (ou, le cas échéant, en vol réel), soit a posteriori lors d'un compte-rendu (effectué soit seul, soit accompagné d'un expert, comme un psychologue). Ou bien, à l'inverse, est-ce une donnée quantifiable par la mesure ? Auquel cas, il convient de chercher les sources qui pourraient permettre de la mesurer, qui peuvent être multiples. Par exemple, il est légitime de penser d'emblée aux données neurophysiologiques, comme le rythme cardiaque, le rythme respiratoire, la conductance cutanée ou le mouvement des yeux. Mais on pourrait également se pencher du côté des commandes actionnées par le pilote, en tant que reflet des actions de son système sensorimoteur.

## 2. Définitions

On trouve dans la littérature plusieurs définitions et plusieurs moyens de mesurer la charge mentale. Nous allons voir dans un premier temps plusieurs façons d'envisager la charge mentale.

### a. En tant que mesure subjective

L'apparition d'une première définition de charge mentale est la conséquence d'un atelier qui a eu lieu en 1977 et qui a réuni les principaux acteurs de la communauté de chercheurs en facteurs humains. La conclusion principale de cet atelier a été la nécessité absolue d'avoir une théorie générale, une structure conceptuelle ou *a minima* un langage commun pour traiter la problématique de la charge mentale de façon constructive à l'échelle mondiale.

(Sheridan & Simpson, 1979) proposent, à la suite de cet atelier, des caractéristiques de ce qu'est et de ce que n'est pas la charge mentale :

- Ce n'est pas lié au travail physique, qui lui est facilement mesurable (ils proposent comme mesure le taux de conversion du dioxygène en dioxyde de carbone ou encore le rythme cardiaque).
- La charge mentale est liée au traitement des informations et à la prise de décision par les pilotes.
- La charge mentale pourrait être plus ou moins corrélée avec d'autres concepts comme l'attention, le stress, les émotions ou la fatigue.
- D'après eux, la charge mentale n'est pas directement mesurable, même par un électroencéphalogramme, c'est quelque chose de purement mental qui doit être inféré.
- Comparer la performance d'un pilote à un objectif fixé à atteindre n'est pas suffisant pour évaluer la charge mentale.
- En effet, la charge mentale est – par définition – « mentale » et peut être très différente d'un sujet à l'autre malgré un niveau de performance comparable (il suffit de penser à l'effort que doit produire un débutant sur une tâche donnée, versus la facilité qu'aurait un expert sur la même tâche).

La charge mentale serait donc, d'après eux, une combinaison de l'effort mental, du traitement de l'information et des émotions d'un sujet en réponse à l'exigence requise pour accomplir une tâche donnée. Bien qu'imparfaite, cette définition remplit plusieurs critères

intéressants : une quantité qui n'est pas directement mesurable, variable d'un sujet à l'autre à tâche donnée et qui est notamment liée à la capacité de prise de décision d'un sujet (et donc, qui peut évoluer selon son expertise).

## ***b. Vers une tentative d'objectivation***

Parallèlement à cette initiative, la NASA a créé dans les années quatre-vingts le Task Load Index (NASA-TLX), l'indice de charge de travail (Hart & Staveland, 1988). En se basant sur le fait que l'auto-évaluation subjective est ce qui se rapproche le plus de l'essence de la charge mentale, mais que la mémoire de travail ne stocke les informations que de façon temporaire (chaque tâche accomplie remplace la précédente en son sein), les auteurs en viennent à la conclusion qu'un questionnaire visant à quantifier la charge mentale *a posteriori* se doit d'être multidimensionnel. En effet, le sujet pourrait se souvenir de la charge mentale induite par une tâche, mais cette évaluation serait biaisée par ce dont le sujet se souvient. Peut-être répondrait-il la même chose à une tâche physiquement difficile (chez les pilotes – notamment dans les avions de chasse – certaines tâches de pilotage sont plus physiques que les autres car, malgré la présence de commandes électriques, ces dernières sont altérées pour refléter, en partie, la difficulté qu'aurait eue un pilote à effectuer la même manœuvre avec des commandes mécaniques) et à une tâche mentalement difficile, selon son souvenir desdites tâches.

C'est pourquoi (Hart & Staveland, 1988) ont demandé à 247 sujets de classer dix-neuf facteurs comme étant « équivalent », « apparenté » ou « sans rapport » avec la charge mentale. Leur étude les ont conduit à en conserver six, qui sont encore ceux utilisés aujourd'hui lors d'un NASA-TLX, questionnaire devenu véritable étalon de la mesure de la charge mentale :

- Exigence mentale : « Quelle était l'importance des activités mentale et perceptive requises (par exemple : penser, calculer, chercher, décider, etc.) dans la réalisation de la tâche ? Etait-elle simple ou complexe, indulgente ou exigeante ? »
- Exigence physique : « Quelle était l'importance de l'activité physique requise (par exemple : pousser, tirer, activer, etc.) dans la réalisation de la tâche ? Etait-elle lente ou rapide, reposante ou laborieuse ? »
- Exigence temporelle : « Quel niveau de pression temporelle avez-vous ressenti en raison de la cadence ou du rythme auquel la tâche s'est déroulée ? Le rythme était-il lent et tranquille ou rapide et effréné ? »
- Performance : « Dans quelle mesure pensez-vous avoir atteint les objectifs de la tâche ? Etes-vous satisfait de votre performance dans l'accomplissement de ces objectifs ? »
- Effort : « Quel niveau d'effort avez-vous dû fournir (mentalement et physiquement) pour atteindre votre niveau de performance ? »
- Frustration : « Dans quelle mesure vous êtes-vous senti découragé, en insécurité, stressé, ennuyé et irrité, ou au contraire gratifié, détendu, satisfait, détendu et en sécurité pendant l'accomplissement de la tâche ? »

Le sujet doit alors dans un premier temps répondre à ces six questions sur une échelle divisée en vingt échelons : chaque facteur est alors noté sur vingt. Dans un deuxième temps, le

sujet doit comparer chaque facteur aux autres en répondant à la question : « Lequel de ces deux facteurs a eu une plus grande influence sur la charge mentale ? ». Chaque facteur possède alors un méta-score sur cinq (pour un total de quinze points de méta-score répartis entre les différents facteurs).

Le score final du NASA-TLX pour une tâche donnée est la moyenne des réponses données par le sujet au questionnaire, moyenne pondérée par les méta-scores. Par exemple, si l'exigence temporelle a été considérée plus importante que trois autres facteurs, celle-ci comptera triple dans le score final. Ce dernier est généralement ramené sur cent points.

Nous voyons donc que le NASA-TLX est une façon de mesurer la charge mentale subjective (c'est le sujet qui répond aux questions selon son ressenti), multidimensionnelle (plusieurs facteurs sont évalués) et qui tient compte des différences interindividuelles (le sujet peut ordonner l'importance des différents facteurs selon son appréciation de la situation et sa personnalité).

Name	Task	Date
------	------	------

**Mental Demand**                      How mentally demanding was the task?

**Physical Demand**                      How physically demanding was the task?

**Temporal Demand**                      How hurried or rushed was the pace of the task?

**Performance**                      How successful were you in accomplishing what you were asked to do?

**Effort**                      How hard did you have to work to accomplish your level of performance?

**Frustration**                      How insecure, discouraged, irritated, stressed, and annoyed were you?

Figure 33 : Exemple de la première partie d'un questionnaire NASA-TLX, où le sujet doit répondre à six questions pour quantifier subjectivement son ressenti lors d'une tâche précédemment accomplie. Il devra ensuite comparer chacun des six facteurs avec les autres pour déterminer leurs importances relatives.

### *c. Exigence vs. Ressources*

Malgré les tentatives de définitions vues ci-dessus (en essayant de caractériser la charge mentale par ce qu'elle est et ce qu'elle n'est pas, puis en essayant de l'encadrer par des facteurs qui l'influencent), il n'existe pas de définition claire, établie et reconnue de charge mentale (Cain, 2007). L'auteur note que, selon les domaines de compétences et d'applications, chaque communauté a sa propre définition qu'elle continuera d'utiliser préférentiellement à celle de la communauté voisine, par « préférence culturelle ».

Toutefois, en recoupant les différentes définitions trouvées dans la littérature (Curry et al., 1979; Eggemeier & Wilson, 1991; Gopher & Donchin, 1986; Kramer et al., 1987; Lysaght et al., 1989), Cain (2007) parvient à une définition la plus consensuelle possible, que nous lui emprunterons pour définir la charge mentale : « La charge mentale peut être caractérisée comme une construction mentale qui reflète la pression mentale résultant de l'exécution d'une tâche sous des conditions opérationnelles et environnementales spécifiques, couplée à la capacité du sujet à répondre à ces exigences ».

Nous voyons donc apparaître ici une notion importante pour notre définition de charge mentale : la relation entre l'exigence requise par la tâche accomplie d'une part, et les ressources disponibles du sujet d'autre part. En d'autres termes, la charge mentale n'est plus simplement inhérente à la complexité de la tâche, mais va dépendre des capacités du sujet à la résoudre :

- Classiquement, si la tâche est trop exigeante pour le sujet, s'il n'a pas les ressources (mentales) nécessaires à sa réalisation, sa charge mentale sera trop élevée et le risque d'une mauvaise manipulation ou d'une mauvaise résolution de la situation augmente.
- Inversement, si la tâche est trop peu exigeante par rapport aux capacités du sujet (par exemple, car c'est un expert dans le domaine considéré et que la tâche est simple), alors sa charge mentale sera paradoxalement trop basse pour une résolution optimale du problème considéré. On peut par exemple imaginer que le sujet, devant l'apparente facilité de résolution attendue, soit en dilettante et en oublie certains points de procédure, par négligence.
- Enfin, on peut donc définir un registre médian de charge mentale, où celle-ci n'est ni trop élevée ni trop basse, qui correspond au régime optimal de résolution du problème posé au sujet.

## II. Mesure et prédiction

“I am putting myself to the fullest possible use, which is all I think that any conscious entity can ever hope to do.”

*2001: A Space Odyssey* (Stanley Kubrick, 1968)

### 1. Quantification

Nous avons vu précédemment de quelle façon les différentes communautés travaillant dans les facteurs humains ont été amenés à définir les contours du concept de charge mentale. Outre le NASA-TLX présenté ci-dessus, il existe de multiples façons de mesurer subjectivement la charge mentale. On retrouve parmi ces méthodes (cette liste ne prétend pas être exhaustive) :

- L'échelle modifiée de Cooper-Harper (MCH, pour Modified Cooper-Harper) est une échelle de performance monodimensionnelle utilisée en aéronautique pour évaluer la qualité de maniabilité d'un aéronef pendant le déroulement d'une tâche lors d'un test en vol (Cooper & Harper, 1969). L'échelle va de Un (très bonne maniabilité) à Dix (très mauvaise maniabilité).
- L'échelle du DRA (abrégée DRAWS, pour Defence Research Agency Workload Scale) est une technique de mesure qui demande au sujet d'évaluer leur perception de l'exigence des tâches d'entrée, centrale et de sortie (Farmer et al., 1995; Jordan et al., 1995).
- La technique d'évaluation subjective de la charge mentale (SWAT, pour Subjective Workload Assessment Technique) évalue le ressenti du sujet selon trois facteurs : la pression temporelle, l'effort mental et le stress psychologique ; chaque facteur étant évalué sur une échelle à trois niveaux : bas, normal ou haut (Reid et al., 1982; Reid, Shingledecker, & Eggemeier, 1981; Reid, Shingledecker, Nygren, et al., 1981).
- La méthode VACP (pour Visual, Auditory, Cognitive and Psychomotor) permet une mesure et une prédiction simpliste de la charge mentale d'un sujet (T B Aldrich et al., 1984; Theodore B Aldrich et al., 1989; McCracken & Aldrich, 1984). Lors de tâches standardisées, le sujet est mesuré selon les quatre dimensions VACP ; ces tests

standards permettent d'établir des seuils au-delà desquels la tâche évaluée sera considérée comme étant excessive.

- L'auto-évaluation instantanée (ISA, pour Instantaneous Self-Assessment) est une échelle créée dans les années quatre-vingt-dix au Royaume-Uni pour mesurer la charge mentale des contrôleurs aériens (Jordan & Brennen, 1992). Cette échelle a notamment été utilisée pour optimiser l'ergonomie des futurs systèmes de gestion du trafic. Elle consiste à presser un bouton allant de Un (« Je n'ai rien à faire, charge mentale basse, plutôt ennuyeux »), à Cinq (« En retard sur mes tâches, je perds le fil ») pendant l'exécution de la tâche, en général toutes les deux minutes. Ce dernier point est important : étant donné le caractère instantané de la mesure, cette méthode est difficile à mettre en œuvre en conditions réelles, car elle pourrait interférer avec le déroulement de la tâche. Elle est donc à privilégier pour des situations où l'interférence provoquée n'est peu ou pas problématique, typiquement lors d'un exercice en simulateur.
- En outre, il existe des outils tels que le WC FIELDE (pour Workload Consultant for FIELD Evaluation), développés dès les années quatre-vingts dans le but de fournir à qui de droit un moyen de choisir sa propre mesure de charge mentale, selon ses besoins (Casper et al., 1987).

Niveau	Charge mentale associée	Ressources en réserve	Description
5	Excessive	Aucune	En retard sur les tâches, l'opérateur perd petit à petit le fil.
4	Haute	Très faibles	Tâches non-essentiels non exécutées. Ne peut pas travailler à ce rythme sur le long terme.
3	Modérée	Un peu	Toutes les tâches sont exécutées. Rythme imposant mais stimulant. Pourrait rester à ce rythme sur le long terme.
2	Basse	Suffisamment	Plus de temps qu'il n'en faut pour exécuter toutes les tâches. Actif moins de 50% du temps.
1	Sous-charge	Beaucoup	Il n'y a rien à faire, c'est plutôt ennuyeux.

*Table 7: Un exemple générique de l'échelle d'une auto-évaluation instantanée. L'opérateur dispose généralement d'un panel de cinq boutons et doit presser celui qui lui correspond à intervalles réguliers (toutes les deux minutes par exemple).*

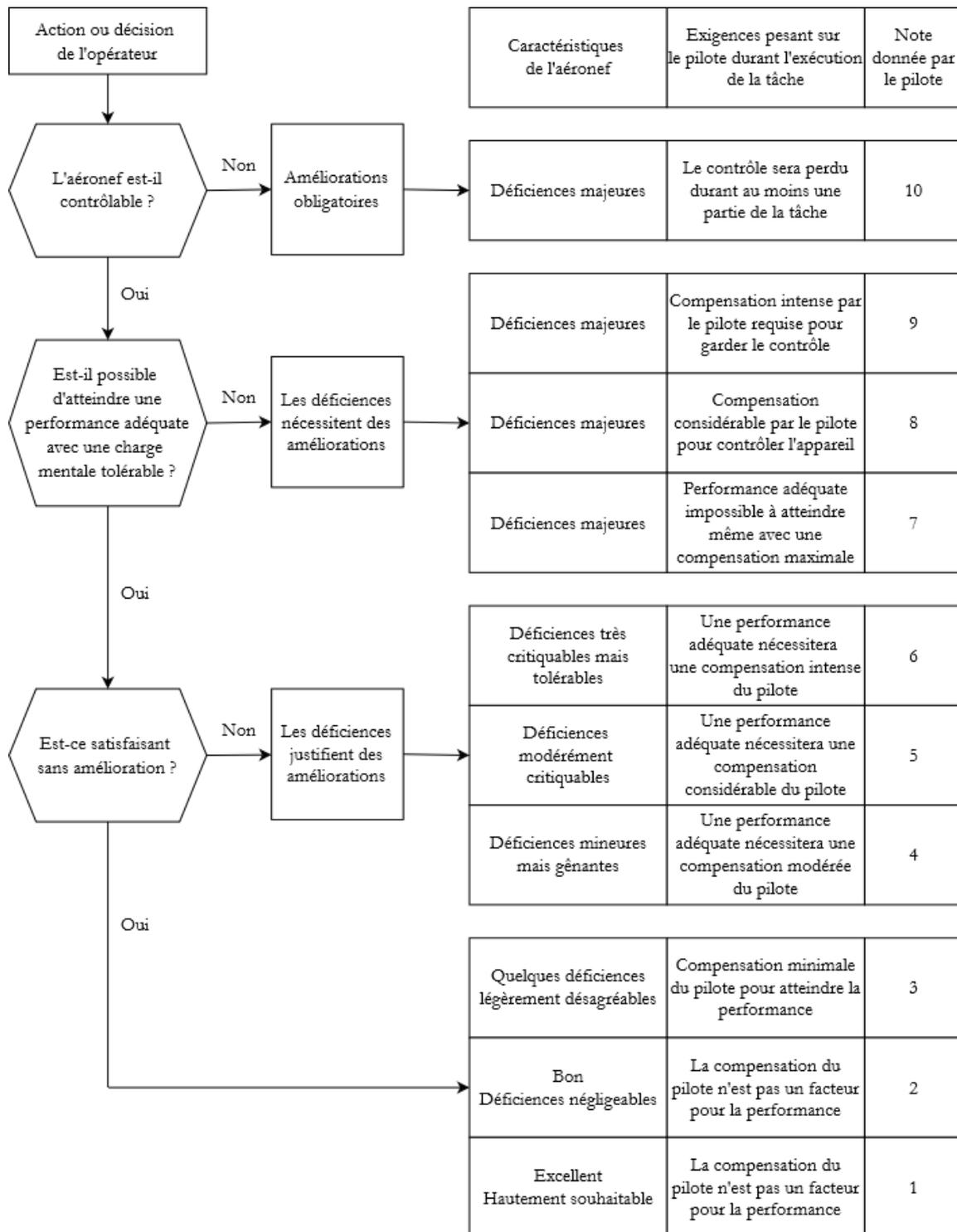


Figure 34 : Exemple d'échelle modifiée de Cooper-Harper.

## 2. Mesure(s)

Parallèlement à ces méthodes de mesures subjectives de la charge mentale, le développement des capacités de calcul informatique a permis, au cours des dernières décennies, l'élaboration de protocoles de recherche visant à établir un lien entre la charge mentale et différentes variables neurophysiologiques. (Tao et al., 2019) ont proposé une revue systématique de la pertinence de ces variables. Nous allons voir ici les principales d'entre elles.

## **a. Par les variables cardiovasculaires**

Au premier plan d'entre elles, les variables cardiovasculaires (rythme cardiaque, intervalle inter-battements, variabilité cardiaque, etc.) sont sans doute les plus étudiées, via l'enregistrement d'un électrocardiogramme (ECG). La moyenne du rythme cardiaque est la variable la plus simpliste mais est *a minima* indirectement liée à la charge mentale. En effet, lors de situations stressantes, le système nerveux autonome (sympathique) va augmenter la fréquence cardiaque pour préparer le corps à faire face à la difficulté de la situation (souvent résumée en situation de type « fight-or-flight », dans laquelle il faut se préparer à combattre ou fuir). Bien que la charge mentale ne soit pas *stricto sensu* équivalente à la notion de stress, on peut légitimement supposer qu'une situation où la charge mentale est élevée présente une prédisposition à stresser le sujet, et donc à une fréquence cardiaque élevée (Castaldo et al., 2018). C'est ce qui est montré dans l'étude de (Wilson, 2002), où la fréquence cardiaque moyenne des sujets augmente lors des phases les plus complexes (il s'agit du pilotage d'un aéronef, où les phases complexes sont le décollage, l'atterrissage et un touch-and-go). Toutefois, cette augmentation de la fréquence cardiaque moyenne n'est pas statistiquement significative (Mulder, 1973).

L'étude de la variabilité cardiaque donne quant à elle des résultats statistiquement probants. La métrique la plus couramment utilisée pour cela est d'étudier l'évolution de la bande de fréquence entre 0,06 et 0,14 Hz de l'intervalle R-R (l'idée est de se centrer autour de 0,10 Hz). Cette bande est la bande médiane et reflète les mécanismes impliqués dans la régulation à court terme de la pression artérielle (Aasman et al., 1987). La bande basse-fréquence (de 0,02 à 0,06 Hz, qui reflète la régulation de la température corporelle et les tendances lentes du rythme cardiaque) et la bande haute-fréquence (de 0,14 à 0,50 Hz, qui reflète l'activité respiratoire sur le rythme cardiaque) sont moins probantes (Aasman et al., 1987). L'intérêt de cette métrique pour évaluer la charge mentale se retrouve dans plusieurs études (Fallahi et al., 2016; Kamada et al., 1992; Murai et al., 2004) et notamment dans des études impliquant des pilotes d'aéronef (Durantin et al., 2014; Wilson, 2002).

## **b. Par l'électromyographie**

Selon l'hypothèse que l'augmentation de la charge mentale provoque des modifications dans le comportement sensorimoteur des sujets, il devrait être possible d'observer des modifications au niveau des enregistrements de l'électromyogramme (EMG). C'est notamment le cas dans l'étude de (Fallahi et al., 2016), qui constatent une augmentation de l'amplitude de l'EMG au niveau des trapèzes supérieurs lorsque la charge mentale est plus élevée. Toutefois, cette méthode n'est pas très répandue dans la littérature, notamment en raison de l'inconfort provoqué par les capteurs, qui sont susceptibles de perturber le sujet et donc d'introduire des biais dans les résultats.

## **c. Par l'électroencéphalographie**

De même, en tant que « construction mentale », il est légitime de se demander si la charge mentale ne pourrait pas être reflétée directement par l'électroencéphalogramme (EEG), miroir de l'activité cérébrale. Près d'un tiers de la littérature existante sur la charge mentale mesure l'EEG (voir (Tao et al., 2019) pour une revue). La plupart de ces études se place dans le domaine fréquentiel et compare la puissance des différentes bandes ( $\delta$  [ $<4$  Hz],  $\theta$  [ $4-7$  Hz],  $\alpha$  [ $8-12$  Hz],  $\beta$

[13-30 Hz] et  $\gamma$  [ $>30$  Hz]) entre des situations à charge mentale basse et des situations à charge mentale élevée. La bande la mieux corrélée avec une charge mentale élevée est la bande  $\theta$ , suivie des bandes  $\alpha$  et  $\beta$ . Les bandes  $\theta$  et  $\beta$  sont positivement corrélées à la charge mentale (Kosti et al., 2018), alors que la bande  $\alpha$  est négativement corrélée à la charge mentale (Jaquess et al., 2018). Ces résultats semblent cohérents avec les significations communément attribuées aux différentes bandes. En effet, la bande  $\alpha$  caractérise un état apaisé, lorsque le sujet a les yeux fermés ou non, situation peu compatible avec une charge mentale élevée ; cette bande est également caractéristique du stress (Brouwer et al., 2011; Frost et al., 1978). À l'inverse, La bande  $\theta$  est caractéristique de la mémorisation d'informations (Klimesch, 1999; Sauseng et al., 2010) et la bande  $\beta$  d'une activité mentale modérée ou intense, voire des états de concentration ou d'anxiété (Díaz et al., 2019; You, 2021) ; cela correspond typiquement à une charge mentale élevée. La bande  $\beta$  est également caractéristique de l'activité sensorimotrice, notamment au niveau des mains et des pieds (Nashmi et al., 1994; Neuper & Pfurtscheller, 2001).

#### *d. Par les mouvements des yeux*

Les mouvements oculaires regorgent d'informations grâce à la diversité des variables mesurables : amplitude des saccades, durée des fixations, taux de clignement, diamètre de la pupille, ratio entre la durée des fixations et celles des saccades, vitesse des poursuites, etc. Ils se sont donc naturellement imposés comme une possibilité robuste d'évaluer objectivement la charge mentale d'un sujet. De multiples études, depuis la démocratisation des outils de mesure idoines (oculomètres) dans les années quatre-vingts, ont essayé de déterminer si certains de ces paramètres pouvaient en effet être des estimateurs objectifs et robustes de la charge mentale. Parmi ceux-ci, l'analyse du diamètre de la pupille donne des résultats probants pour estimer les situations de sous-charge mentale, qui est plus important dans ces situations (de Greef et al., 2009; Tokuda et al., 2011). Toutefois, ces études ne montrent pas de différence significative du diamètre de la pupille entre les situations à charge mentale normale, et celles à charge mentale élevée. La durée moyenne des fixations oculaires est quant à elle dépendante de la situation. Si le contexte d'exécution de la tâche est banal, quotidien, alors la durée des fixations diminue avec la charge mentale ; à l'inverse, si la situation est inhabituelle, voire dangereuse, alors la durée des fixations augmente avec la charge mentale (de Greef et al., 2009; Foy & Chapman, 2018). Enfin, le taux de clignement des yeux est lui aussi variable selon la nature de la tâche exécutée : si la tâche est très visuellement dépendante ou exigeante (vérification régulière d'instruments de vol par exemple), alors le taux de clignement des yeux diminue ; à l'inverse si la tâche est peu visuellement dépendante (nécessité d'effectuer des calculs, de se rappeler d'une procédure d'urgence, etc.) alors le taux de clignement des yeux augmente (Marquart et al., 2015). Cette ambivalence de la plupart des paramètres oculaires rend leur mesure pour estimer la charge mentale incertaine, il faut être en mesure d'évaluer la tâche : est-elle habituelle ou inhabituelle, visuellement dépendante ou non, etc. ? De plus, les oculomètres posent des problèmes pratiques qui peuvent être rédhibitoires : pour assurer la qualité de la mesure, l'éclairage de l'environnement du sujet doit être contrôlé et suffisamment bon, ce qui n'est pas toujours possible en conditions opérationnelles. Par exemple, lors d'un vol de nuit dans un aéronef, l'éclairage du cockpit sera insuffisant pour mesurer le mouvement des yeux avec une qualité suffisante.

## e. Par la conductance cutanée

Enfin, l'activité électrodermale (EDA, de son acronyme anglophone « ElectroDermal Activity ») est une autre mesure indirecte de l'activité du système nerveux périphérique. En effet, en situation de « fight-or-flight », non seulement le rythme cardiaque s'accélère, mais la sudation du corps augmente également. Par conséquent, la conductance cutanée change et cela peut être mesuré via l'activité électrodermale. Plusieurs études montrent l'intérêt de cette mesure pour estimer la charge mentale d'un sujet. Toutes trouvent une corrélation positive entre la charge mentale et la réponse électrodermale, ce qui est en accord avec la remarque précédente (Ding et al., 2020; Kajiwara, 2014; Wilson, 2002). Toutefois, la mesure de la conductance cutanée est semi-invasive : bien que les électrodes soient posées à la surface de la peau, elles sont sur le bras du sujet, ce qui peut gêner ses mouvements et perturber (voire biaiser) la mesure, rappelant constamment au sujet qu'il est mesuré. Cette variable n'est donc pas optimale pour estimer la charge mentale en direct au sein d'une population en train de réaliser une tâche dans un cadre professionnel.

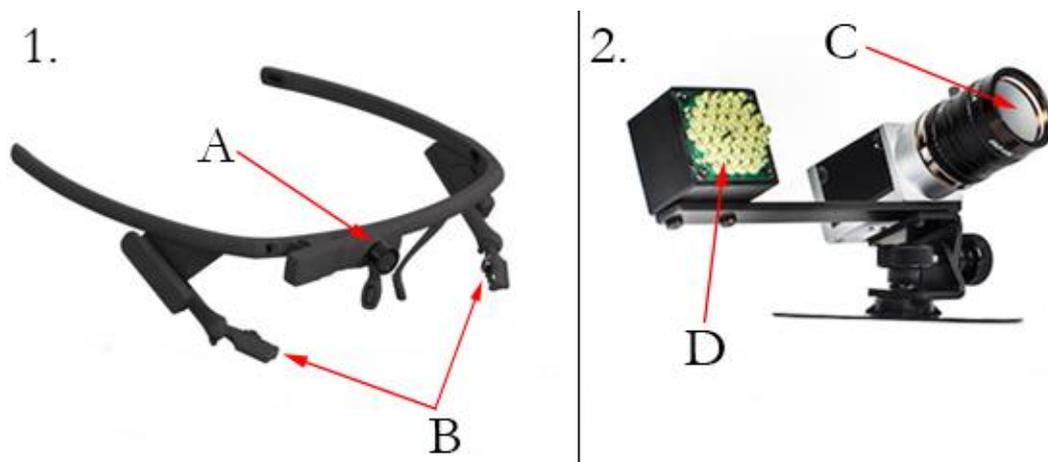


Figure 35: Exemples de dispositifs de suivi oculaire (« eye-tracking » en anglais). 1: à gauche, un dispositif à lunettes portées par le sujet ; A : caméra dite de scène qui filme le champ visuel du sujet ; B : caméra filmant les yeux. Crédits : PupillLabs®. 2: à droite, un dispositif fixe à distance du sujet ; C : caméra chargée de filmer les yeux du sujet ; D : dispositif lumineux chargé d'éclairer le sujet. Ce combo permet d'utiliser une lumière infrarouge, ce qui rend cette technique utilisable dans le noir. Crédits : SmartEye®.

## 3. Peut-on prédire la charge mentale ?

L'essor des techniques dites d'intelligence artificielle (« machine learning ») ouvre la voie à une nouvelle approche de l'évaluation de la charge mentale. En effet, les approches citées précédemment étaient « hors ligne » : l'évaluation de la pertinence des paramètres pour estimer la charge mentale a été faite, dans la majorité des études, *post hoc*. De plus, dans la plupart des cas, les auteurs utilisent des tests statistiques (T-test de Student, analyse de variance ANOVA, etc.) pour évaluer si, oui ou non, un paramètre physiologique donné est représentatif d'un changement de charge mentale. (Charles & Nixon, 2019) passent en revue plusieurs études qui essaient d'anticiper la charge mentale à travers de telles mesures : par exemple (Y.-H. Lee & Liu, 2003) trouvent un coefficient de corrélation positive de Pearson de 0,81 entre le score répondu au

NASA-TLX et le rythme cardiaque incrémental (différence entre la moyenne au repos et la moyenne en activité) ; de leur côté (Fairclough & Venables, 2006) ont défini un méta-paramètre « engagement du sujet dans la réalisation de sa tâche » (implication énergétique du sujet, motivation et concentration) dont la variance serait associée à l'évolution du rythme respiratoire : un rythme respiratoire plus élevé signifie que l'implication du sujet est également plus élevée.

Lorsque l'on parle de « modélisation », la plupart des études s'attachent à essayer de définir un cadre théorique de la charge mentale, une machine d'état à laquelle on peut ajouter des entrées et des sorties qui modéliseraient la charge mentale. C'est notamment le cas de (Loft et al., 2007), où les auteurs estiment que la charge mentale fonctionne en boucle de rétroaction. Le sujet possède une charge mentale cible, idéalement proche d'une valeur normale, et adapte sa stratégie – en fonction des exigences auxquelles il fait face – face à la tâche pour ajuster sa charge mentale réelle à la valeur cible.

Toutefois, il existe des études, telles que celle de (Hogervorst et al., 2014), dans laquelle les auteurs passent en revue une batterie de paramètres (EEG, conductance cutanée, respiration, ECG, diamètre de la pupille et taux de clignement des yeux) et utilisent des modèles de classification individuels pour obtenir les meilleurs paramètres capables d'évaluer objectivement la charge mentale. Les sujets ont passé chacun quatre sessions : les trois premières sessions ont servi à l'entraînement des modèles, tandis que la dernière et quatrième session a servi à évaluer la précision de la classification obtenue par les modèles. Les auteurs trouvent une précision globale de classification d'environ 90%.

Nous proposerons dans la suite de ce chapitre une approche novatrice visant, à terme, à être capable de mesurer et prédire la charge mentale en direct d'un sujet à partir de paramètres mesurés lors de l'exécution de sa tâche. Tout comme les études citées précédemment, notre approche va combiner des techniques de machine learning, de la classification et des tests statistiques.

# III. Modèle prédictif de la charge mentale de pilotes d'hélicoptère

“Difficult to see; always in motion  
is the future.”

*The Empire Strikes Back* (Irvin  
Kershner, 1980)

Cette partie est tirée d'un article de recherche en cours de publication : Data-driven model of helicopter pilots' mental workload : inferring cognitive state from signals external to the operator (par Keriven Serpollet D., Roques A., Nicolai A., Buffat S., James Y., Vayatis N., Bargiotas I., Vidal P.-P.).

## 1. Introduction

Comme nous l'avons vu précédemment, la charge mentale peut se définir comme l'expérience subjective ressentie par un sujet lorsqu'il accomplit une tâche donnée. En effet, pour une même tâche, différents facteurs comme les contraintes temporelles, l'environnement ou les expériences personnelles passées peuvent induire différents niveaux de charge mentale chez différents individus (Charles & Nixon, 2019). En d'autres termes, d'un point de vue ergonomique (Falzon & Sauvagnac, 2004; Leplat, 2002; Young et al., 2015), la charge mentale est un concept dynamique qui résulte de l'interaction entre la charge de travail de la tâche estimée par le sujet d'une part, et la disponibilité des ressources nécessaires pour répondre aux exigences de la tâche d'autre part (Cain, 2007; Chanquoy et al., 2007; Kramer, 2020; Leplat, 2002; Young et al., 2015). En conséquence, la charge mentale peut être considérée comme un continuum, dont l'état instantané dépend du ratio entre les exigences de la tâche et les ressources disponibles pour l'accomplir. A une extrémité du spectre, les ressources sont perçues comme plus que suffisantes pour répondre aux besoins de la situation : c'est la région de sous-charge. A l'autre extrémité, les ressources sont perçues comme insuffisantes : c'est la région de surcharge. Dans les deux cas, la charge mentale est sous-optimale, ce qui entraîne un risque accru de mauvaises performances, voire d'accidents (De Waard & Brookhuis, 1996).

S'assurer que la charge mentale reste dans une fourchette optimale est un problème critique, compte tenu de l'adoption croissante et rapide d'interfaces homme-machine de plus en plus complexes, ce qui pourrait entraîner une augmentation non négligeable du risque de catastrophes. Par exemple, la majorité des accidents aéronautiques implique des facteurs humains : environ 60 à 70% pour l'hélicoptère (A. Majumdar et al., 2009). Comme pour

beaucoup d'interfaces homme-machine complexes, les avancées technologiques dans les cockpits d'aéronef ont progressivement transformé le travail du pilote en un travail multitâche – piloter, communiquer avec le contrôle aérien, surveiller plusieurs systèmes, écrans et alertes, etc. (Burian et al., 2013) – de telle façon qu'un contrôle attentionnel efficace, et notamment une allocation efficace des ressources attentionnelles, s'avère crucial pour atteindre un bon niveau de performance (Gray et al., 2016). Par conséquent, la charge mentale se retrouve implicitement au premier plan des aspects opérationnels en aéronautique, conduisant les experts en avionique à recommander la surveillance de celle-ci chez les pilotes (Castor et al., 2003).

Nous avons vu précédemment qu'au cours des dernières décennies, plusieurs méthodes pour évaluer subjectivement la charge mentale ont été développées par la communauté des facteurs humains, la plupart étant post-hoc, renseignées par le sujet lui-même et multidimensionnelles. Nous avons mentionné l'échelle de Cooper-Harper (Cooper & Harper, 1969), la technique SWAT (Reid & Nygren, 1988) et le NASA-TLX (Hart & Staveland, 1988). Toutes ces méthodes ont des points communs : le sujet doit répondre à un questionnaire pour s'évaluer sur trois à six sous-scores, dont la combinaison formera le score de charge mentale final. En plus de ces échelles multidimensionnelles, on trouve également des scores unidimensionnels comme la Charge Cognitive Subjective (SCL, de l'anglais « Subjective Cognitive Load ») de Paas (Paas et al., 1994). Cette échelle utilise une gradation en neuf niveaux, « Un » étant associé à la tâche la moins exigeante, « Neuf » à la tâche la plus exigeante.

D'où la question suivante : quelle est la meilleure façon de quantifier la charge mentale ? Malheureusement, malgré l'intérêt généralisé de la charge mentale dans un large éventail de disciplines, il n'y a pas de consensus sur la manière de procéder. D'après (Rubio et al., 2004), les sujets eux-mêmes sont les mieux placés pour évaluer leur propre charge mentale. L'auto-évaluation a l'avantage d'intégrer plusieurs aspects difficilement mesurables : l'effort, l'attitude, l'engagement, la personnalité, la satisfaction à l'égard de la performance, etc. D'autre part, l'auto-évaluation a plusieurs limitations. En premier lieu, c'est un indicateur subjectif qui peut être involontairement biaisé par une sur- ou sous-estimation de la charge mentale, du fait des différences de personnalité idiosyncratiques des sujets. De plus, une auto-évaluation en temps réel, pendant l'exécution de la tâche contrôlée peut distraire le sujet dans l'accomplissement de celle-ci, biaisant également le résultat. Enfin, dans le cas des évaluations post-hoc, c'est souvent peu pratique – quand ce n'est pas tout bonnement impossible – étant donné que cela demande aux sujets de répondre à un questionnaire à chaque évaluation souhaitée, et ce pour chaque tâche (Muckler & Seven, 1992; Pauzié & Pachiardi, 1997; Rubio et al., 2004) !

Afin de contourner ces contraintes, nous avons vu que des recherches approfondies ont été menées sur la surveillance en direct de la charge mentale, à l'aide de divers signaux neurophysiologiques (voir (Charles & Nixon, 2019) pour une revue récente). (Rainieri et al., 2021) ont montré que lors d'un vol simulé en hélicoptère, les fixations des pilotes étaient plus courtes lors des tâches faiblement exigeantes. De façon cohérente, des chercheurs ont constaté que les variations de la variabilité cardiaque et de l'activité électrodermale ont augmenté chez des pilotes soumis brusquement à une situation très difficile comme la panne du moteur (Scarpari et al., 2021). Des techniques d'imagerie comme le fNIRS (l'imagerie spectroscopique proche infrarouge fonctionnelle, de l'anglais « functional Near InfraRed Spectroscopic imaging ») ont également été démontré comme étant pertinentes pour estimer la charge mentale de pilotes d'hélicoptère (Hamann & Carstengerdes, 2022).

Des approches plus intégratives ont été également proposées, qui combinent des paramètres provenant à la fois des données physiologiques du sujet et des données contextuelles afin d'améliorer l'estimation de la charge mentale (Bargiotas et al., 2018; Besson et al., 2013; Harrivel et al., 2017). Ces travaux ont montré que la charge mentale est mieux prédite par une combinaison de paramètres que par un seul paramètre (Besson et al., 2013; Lew, 2014; Solovey et al., 2014). Face à la diversité des signaux pouvant être mesurés – en conditions expérimentales comme en conditions réelles – et à la pléthore de métriques qui peuvent en dériver, des approches basées sur les données (et non sur le ressenti subjectif des sujets) ont été déployées pour étudier quelles sont celles qui sont les plus pertinentes pour quantifier la charge mentale (Besson et al., 2013; Harrivel et al., 2017; Moustafa et al., 2017). Pour donner un rapide aperçu des méthodes récentes, (Ding et al., 2020) ont trouvé que le rythme respiratoire et l'activité électrodermale sont les paramètres les plus pertinents pour évaluer la charge mentale lors de tâches effectuées sur un ordinateur.

Parmi les approches basées sur les données, les algorithmes à entraînement séquentiel (par exemple les forêts d'arbres décisionnels (random forest) à descente de précision moyenne (Barua et al., 2020) ou les classificateurs Adaboost (Mozos et al., 2017)) et les forêts d'arbres décisionnels pondérées (Jeong & Ko, 2018) constituent deux familles principales de modèles qui sélectionnent un sous-ensemble de paramètres pertinents pendant l'entraînement, qu'ils utilisent pour la phase de prédiction. Plusieurs articles ont combiné de tels algorithmes (basés sur l'approche par la donnée) avec des heuristiques permettant d'inférer des connaissances – expertes ou préalables, par exemple d'études précédentes – dans le problème de machine learning (Ji et al., 2004; Liang & Lee, 2014). D'autres équipes ont utilisé des index physiologiques (dérivés des mesures sur les sujets) en association avec le NASA-TLX comme vérité terrain pour créer un modèle qui estime la charge mentale de nouveaux conducteurs automobiles ; ils ont trouvé que le nombre d'erreurs de conduite était positivement corrélé au score du NASA-TLX (Yan et al., 2017). Enfin, en utilisant un simulateur d'avion simple, des classificateurs de machine learning et des données issus d'un EEG, (M. K. Johnson et al., 2015) ont conclu que les modèles prédictifs basés sur des techniques de machine learning doivent être individualisés (en fonction du sujet) pour avoir des résultats de prédiction suffisamment bons. Et cependant, encore aucune méthode de mesure en continu dans le domaine de la charge mentale des opérateurs d'interfaces homme-machine complexes ne s'est imposée, et ce dans un contexte où le nombre de ces interfaces et leur complexité ne cessent d'augmenter.

C'est pourquoi l'étude présentée ci-après propose un modèle d'estimation de la charge mentale novateur, basé sur un algorithme d'apprentissage automatique de pointe. Le modèle est axé sur les données d'entrée : seul un sous-ensemble des paramètres les plus pertinents sont sélectionnés (par le modèle) pour prédire la charge mentale instantanée des sujets. En utilisant des mesures physiologiques et contextuelles objectives, enregistrées en direct dans un simulateur d'hélicoptère Full-Flight, la charge mentale de neuf pilotes d'hélicoptère a été estimée avec succès ( $AUC = 0,805 \pm 0,085$  par rapport à l'auto-évaluation des pilotes). Nous proposons également une discussion concernant le choix de la vérité terrain la plus appropriée, en comparant les capacités prédictives de notre modèle en fonction de ladite vérité terrain : auto-évaluation orale pendant l'expérience, le questionnaire NASA-TLX rempli à l'issue de celle-ci et enfin un ensemble de scores NASA-TLX renseigné par des experts en aéronautique. Enfin, nous avons également comparé les capacités prédictives de notre modèle en fonction des données

d'entraînement. En d'autres termes, nous avons entraîné plusieurs modèles, chacun catégorisé selon les données d'entrées qui lui étaient fournies (par exemple, les paramètres physiologiques, les données de l'hélicoptère, etc.). Nous avons constaté qu'une estimation étonnamment bonne de la charge mentale pouvait être atteinte avec peu ou pas d'informations issues des mesures physiologiques des sujets. Autrement dit, notre modèle d'apprentissage automatique a été capable de prédire correctement la charge mentale des pilotes en utilisant uniquement des données issues des appareils utilisés. Nos résultats ouvrent la voie à des systèmes automatiques et intelligents capables de surveiller la charge mentale des opérateurs d'IHM complexes en temps réel, ce qui devrait permettre le déploiement d'outils adaptatifs (par exemple, un ajustement automatique des informations affichées dans le cockpit en fonction de la situation et de la charge mentale du pilote) (Besson et al., 2013; Hidalgo-Muñoz et al., 2018).

## 2. Matériels et méthodes

### a. Sujets

Neuf hommes, tous pilotes d'hélicoptère professionnels, âgés de 31 à 48 ans ( $39 \pm 5,7$ ) ont participé à cette étude. Ils avaient entre 300 et 5000 heures de vol en hélicoptère au moment des enregistrements (tous aéronefs compris). Les mesures collectées sur le premier et le deuxième pilote ont été exclus du jeu de données, à cause de problème à l'enregistrement (défectuosité de certains capteurs et trop haut niveau de bruit). Le Comité de Protection des Personnes de Paris-Descartes (CERES N°2017-35, daté du 25/05/2017) a approuvé le protocole expérimental, d'après la Déclaration d'Helsinki de 1964. Avant d'être testés, tous les participants ont donné leur consentement écrit. La [TABLE 8](#) et la [TABLE 9](#) résument les informations générales concernant les pilotes.

Pilote	Âge	Sexe	Expérience préalable sur EuroCopter 135 (heures)	Expérience de vol totale (heures)
1	43	Homme	600	2550
2	41	Homme	500	2100
3	36	Homme	650	2450
4	47	Homme	400	1840
5	34	Homme	180	300
6	34	Homme	500	1200
7	37	Homme	25	965
8	31	Homme	300	1000
9	48	Homme	45	5000

*Table 8 : Détails de la population étudiée.*

<b>Nombre de pilotes participant (total)</b>	9
<b>Nombre de pilotes (données utilisées)</b>	7 sur 9
<b>Âge</b>	39 ± 5,7
<b>Expérience de vol (total)</b>	1934 ± 1295 heures
<b>Expérience de vol (EuroCopter 135)</b>	356 ± 219 heures
<b>Sexe</b>	Tous des hommes

Table 9: Résumé de la population

## ***b. Simulateur Full-Flight***

Toutes les expériences présentées ci-après ont été menées sur le même simulateur que les expériences de psychophysique vestibulaire présentées au chapitre précédent (voir [FIGURE 5](#)). Pour rappel, c'est un simulateur Full-Flight de niveau D, soit le plus haut niveau de réalisme possible ; seul niveau qualificatif pour effectuer des sessions « ZFT » (pour Zero Flight Time), c'est-à-dire que les heures passées dans ce type de simulateur, bien que n'impliquant aucun vol réel (d'où l'appellation zero flight time), sont comptabilisées dans la formation du pilote comme s'il était en vol réel (ce qui est notamment utilisé pour valider des qualifications et des certifications). Ce simulateur possède un système de vérins à six degrés de liberté et un large écran immersif, afin de stimuler le pilote au plus proche des sensations de vol réel (Houck et al., 2005). Le simulateur était équipé d'une cabine répliquant l'hélicoptère EC135 (EuroCopter), environnement qui était familier de tous les pilotes (voir [TABLE 8](#)). Avant les mesures, tous les pilotes ont effectués un vol test afin de se familiariser aux spécificités de notre expérience.

## ***c. Protocole de mesure – Scénarios***

Tous les pilotes ont effectués deux scénarios réalistes désignés spécifiquement pour cette expérience (voir [FIGURE 36](#)). Le premier scénario était une mission typique de reconnaissance. Le pilote devait décoller, voler au large des côtes pour trouver un bateau suspecté de délester du carburant dans la mer et enfin revenir au point de décollage initial. Ce scénario référence était le plus simple des deux, durait environ une heure et n'était pas prévu pour mettre les pilotes en situation de charge mentale élevée. Le deuxième scénario possédait des similarités avec le premier mais impliquait des tâches plus complexes. Il commençait de la même manière mais les pilotes étaient alors rapidement réassignés – sans préavis – à une mission de sauvetage. Ce scénario s'est typiquement déroulé de la manière suivante. Après le décollage initial, le pilote était informé qu'il devait effectuer une EVASAN (EVAcuation SANitaire) en mer, et devait donc changer son plan de vol pour aller récupérer une équipe médicale à un hôpital proche. Une fois l'équipe médicale embarquée, le pilote devait voler jusqu'au bateau concerné par l'EVASAN, s'apponter puis préparer le vol retour jusqu'à l'hôpital pendant l'embarquement du patient. Sur le chemin du retour, le médecin exigeait un atterrissage d'urgence avant d'arriver à l'hôpital, en raison de la dégradation rapide de l'état de santé du patient. Après un bref arrêt avec des conditions de visibilité très basses, le pilote devait redécoller pour finir le trajet jusqu'à l'hôpital. Une fois ceci effectué, le pilote devait retourner à son point de départ, non sans rencontrer une panne moteur au passage. De toute évidence, ce scénario a été conçu par des pilotes et instructeurs expérimentés afin d'induire une charge mentale variable (et notamment élevée par moments) ;

d'un côté grâce au contexte de la mission – par nature difficile et stressante – mais également grâce aux éléments additionnels ajoutés en vue de déclencher de fortes variations de charge mentale – mauvaises conditions météorologiques, pannes des instruments ou moteur, etc. Chaque scénario a été analysé en détails à travers une analyse hiérarchique des tâches par des experts (Stanton, 2006) afin d'identifier les moments-clés en terme de variations de charge mentale (par exemple, l'appontage, les exigences du personnel médical, les pannes, les atterrissages d'urgence, etc.).

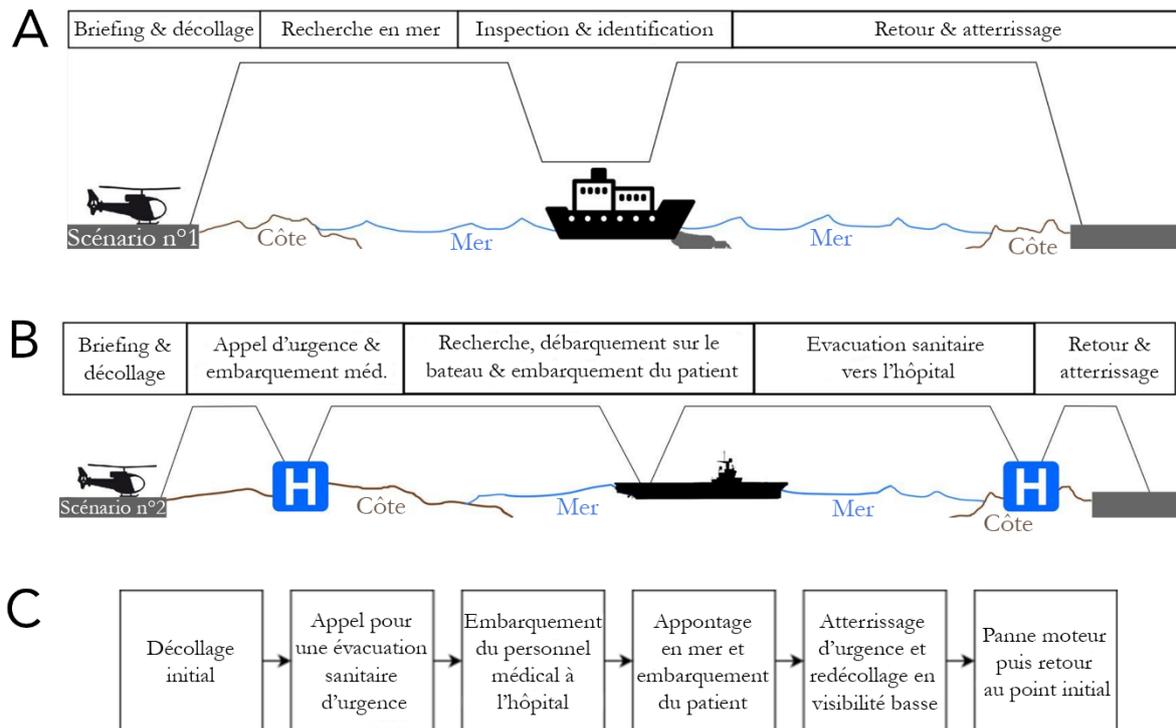


Figure 36: A, B: illustrations des différentes phases des deux scénarios. C: décomposition des événements inattendus du deuxième scénario.

#### d. Capteurs

Les pilotes étaient équipés avec plusieurs capteurs, entourés en vert sur la [FIGURE 10](#) : une ceinture électrocardiographique (Equivital®) qui enregistrerait un électrocardiogramme, le rythme cardiaque et le rythme respiratoire, un eye-tracker (Sensomotrics Instruments®) qui enregistrerait le mouvement des yeux dans le cockpit et un traqueur de tête (head tracker, Thales Hobit®) qui enregistrerait la position et la vitesse de la tête. Toutes les données ont été enregistrées et synchronisées grâce à un logiciel interne (Crew Monitoring System®).

En plus des données physiologiques, toutes les données opérationnelles issues du simulateur ont été enregistrées, c'est-à-dire les données relatives à l'état de l'hélicoptère (trajectoire, vitesse, altitude, orientation en lacet/roulis/tangage), ainsi que les informations des commandes de vol (déplacements et forces appliquées aux *manipulandum*, les transmissions audio, etc.

## ***e. Auto-évaluation de la charge mentale***

Pendant les deux scénarios, la charge mentale subjective a été mesurée en temps réel à des moments-clés identifiés par les instructeurs de vol. Les pilotes devaient s'auto-évaluer sur leur charge mentale perçue sur une échelle de zéro à cent, soit à l'oral – ils le disaient alors à haute voix – soit en utilisant un curseur – les pilotes devaient alors déplacer manuellement le curseur avec la main gauche jusqu'à leur estimation de charge mentale. Le dispositif du curseur a été créé spécifiquement pour cette expérience par l'Institut de Recherche Biomédicale des Armées (IRBA). Le curseur était un potentiomètre linéaire qui se réinitialisait automatiquement à zéro après chaque auto-évaluation du pilote. Cette technique d'évaluation de la charge mentale est proche de l'échelle unidimensionnelle SCL de (Paas et al., 1994) mais était en direct plutôt que *post-hoc*. Cela permet d'éviter des biais de mémoire (les pilotes se souviennent moins bien des événements moins marquants) mais a l'inconvénient de perturber le pilote pendant l'exécution de sa tâche.

## ***f. Index de Charge Mentale Brut (NASA-TLX Brut)***

Après avoir complété le deuxième scénario, les pilotes ont répondu à un questionnaire NASA-TLX pour évaluer six composantes de la charge mentale à des moments-clés de la mission : exigence mentale, exigence physique, exigence temporelle, performance, frustration et effort. Le score global du NASA-TLX est censé être une moyenne pondérée de ces six sous-scores, mais des recherches précédentes ont montré que le score dit « brut », c'est-à-dire la moyenne non pondérée, est sensiblement équivalent au score global (Hart, 2006). Dans cette étude, nous avons utilisé le RTLX (de l'anglais « Raw Task Load Index »), la moyenne non pondérée du NASA-TLX, comme vérité terrain alternative à l'auto-évaluation pour l'entraînement de nos modèles d'apprentissage automatique.

## ***g. RTLX théorique***

Afin de comparer les résultats donnés par le RTLX avec les connaissances des experts dans le domaine, nous avons développé une troisième vérité terrain. Nous avons demandé à deux pilotes et instructeurs professionnels de compléter un questionnaire NASA-TLX théorique, selon leurs propres prédictions de la charge mentale, à des moments-clés des scénarios. Le consensus de leur estimation a été rassemblé pour établir cette troisième vérité terrain, le RTLX théorique.

## ***h. Caractéristiques***

Un total de  $n_{total} = 76$  caractéristiques a été calculé. Elles ont été réparties en trois groupes principaux : les caractéristiques dérivées de la physiologie de l'opérateur ( $n_{opérateur} = 23$ ), les caractéristiques dérivées de l'état de la machine ( $n_{machine} = 28$ ) et les caractéristiques associées aux actions des pilotes sur les commandes et instruments de vol ( $n_{interface} = 25$ ). Les détails des calculs de chaque caractéristique peuvent être trouvés dans les paragraphes qui suivent, et un résumé de toutes les caractéristiques utilisées pour le modèle est présenté dans la [TABLE 10](#).

Un point important à noter est que dans l'objectif de créer un modèle généralisé à partir de données hétérogènes (physiologiques, machine, etc.) de sept pilotes différents, toutes les caractéristiques d'origine physiologique ont été normalisées. En effet, court-circuiter cette étape

de normalisation nous aurait exposé au risque de ne pas prendre en compte les potentielles différences idiosyncratiques dans les données. Cette méthode de normalisation a été prouvée comme étant de grande valeur pour tenir compte des variations interindividuelles dans la prédiction de la charge mentale (Haihong Zhang et al., 2014). Dans cette étude, les caractéristiques physiologiques de chaque pilote ont été normalisées en soustrayant à la valeur instantanée la valeur calculée sur l'ensemble du premier scénario. En d'autres termes, chaque caractéristique reflète la variation actuelle de la métrique par rapport à une base de référence personnelle à grande échelle de temps.

## i. Physiologie

**Rythme cardiaque et intervalle inter-battements.** Le rythme cardiaque (HR, de l'anglais « Heart Rate ») et l'intervalle inter-battements (IBI, de l'anglais « Inter-Beat Interval ») ont été calculés à partir du signal ECG enregistré par le capteur Equivital®. La localisation des complexes QRS a été effectuée au moyen d'une fonction de détection de pics (*find\_peaks*, du package *scipy* de Python). Il en a résulté un ensemble d'horodatages  $\{t_i, 0 \leq i \leq n_{R-R} - 1\}$ , avec  $n_{R-R}$  le nombre d'espaces R-R. Avec ce formalisme, le rythme cardiaque instantané  $hr_i$  (en bpm, battements par minute) à l'horodatage  $t_i$  prend la forme suivante :

$$hr_i = \frac{60}{t_{i+1} - t_i}.$$

De façon similaire, l'intervalle inter-battements instantané  $ibi_i$  (en millisecondes) peut s'exprimer comme suit :

$$ibi_i = 1000 * (t_{i+1} - t_i).$$

D'où les formules ci-après pour les moyennes du rythme cardiaque et de l'IBI, ainsi que les estimations sans biais de leurs écarts-types :

$$\begin{aligned} \bar{m}_{rythme\_cardiaque} &= \frac{1}{n_{R-R} - 1} \sum_{i=0}^{n_{R-R}-2} hr_i, \\ \bar{m}_{ibi} &= \frac{1}{n_{R-R} - 1} \sum_{i=0}^{n_{R-R}-2} ibi_i, \\ \sigma_{rythme\_cardiaque} &= \sqrt{\frac{1}{n_{R-R} - 2} \sum_{i=0}^{n_{R-R}-2} (hr_i - \bar{m}_{rythme\_cardiaque})^2}, \\ \sigma_{ibi} &= \sqrt{\frac{1}{n_{R-R} - 2} \sum_{i=0}^{n_{R-R}-2} (ibi_i - \bar{m}_{ibi})^2}. \end{aligned}$$

**Rythme respiratoire.** La fréquence respiratoire a été obtenue directement depuis le capteur Equivital®. En bref, le capteur renvoie une série temporelle contenant la fréquence respiratoire instantanée à différents instants  $\{t_i, 0 \leq i \leq n_{br} - 1\}$ , avec  $n_{br}$  le nombre de

mesures dans la fenêtre temporelle considérée. Soit  $br_i$  la fréquence respiratoire instantanée au temps  $t_i$ . La moyenne et l'écart-type de la fréquence ont été calculés d'après les formules suivantes :

$$\bar{m}_{fréquence\_respiratoire} = \frac{1}{n_{br} - 1} \sum_{i=0}^{n_{br}-2} br_i,$$

$$\sigma_{fréquence\_respiratoire} = \sqrt{\frac{1}{n_{br} - 2} \sum_{i=0}^{n_{br}-2} (br_i - \bar{m}_{fréquence\_respiratoire})^2}.$$

**Mouvements des yeux.** Les saccades et les fixations ont été identifiées à partir des données oculaires brutes en utilisant l'algorithme traditionnel I-VT de (Salvucci & Goldberg, 2000). Cet algorithme, simple mais puissant, utilise un seuil de vitesse pour discriminer les périodes de fixations et celles de saccades. Il faut noter ici que les mouvements des yeux ayant été enregistrés en conditions écologiques, les termes « fixations » et « saccades » ne sont pas complètement appropriés, étant donné que les mouvements des yeux mesurés peuvent en réalité être le résultat d'une superposition de plusieurs composantes du système oculomoteur. Ici, nous appelons donc « saccades » les mouvements balistiques rapides des yeux et « fixations » les périodes d'absence relative de saccades.

L'algorithme I-VT retourne une série  $n_f$  de séquences de fixation, et une série  $n_s$  de séquences de saccades. Soit  $\mathcal{J}_e^i$  l'ensemble des horodatages correspondant au  $i^{\text{ème}}$  événement  $e$ , avec  $e = f, s$  qui est soit une fixation (indice  $f$ ), soit une saccade (indice  $s$ ). La durée  $\Delta\mathcal{J}_e^i$  d'un événement correspond donc à la différence entre le dernier et le premier horodatage. Avec les notations précédentes, les durées moyennes des fixations et des saccades peuvent être facilement obtenues :

$$\bar{m}_{durée\_fixations} = \frac{1}{n_f} \sum_{i=0}^{n_f-1} \Delta\mathcal{J}_f^i,$$

$$\bar{m}_{durée\_saccades} = \frac{1}{n_s} \sum_{i=0}^{n_s-1} \Delta\mathcal{J}_s^i.$$

Soit  $\mathcal{J}^i$  la série d'indices correspondant à la  $i^{\text{ème}}$  saccade. L'amplitude d'une telle saccade correspond à la distance planaire entre le dernier  $\mathcal{J}_e^i$  et le premier  $\mathcal{J}_b^i$  échantillons, soit :

$$\bar{m}_{amplitude\_saccades} = \frac{1}{n_s} \sum_{i=0}^{n_s-1} d_i(\mathcal{J}_b^i, \mathcal{J}_e^i),$$

avec  $d_i$  la distance Euclidienne.

**Aire de l'ellipse du regard.** Le regard des participants a été projeté sur un plan bidimensionnel. La dispersion du regard a été quantifiée en utilisant l'aire de l'ellipse prédictive à

95%. Le calcul de cette aire de l'ellipse prédictive dépasse le cadre de cette étude, mais le lecteur intéressé peut se référer à (Schubert & Kirchner, 2014) pour plus de détails. Nous nous contenterons d'indiquer la formule pour son calcul :

$$95\%_{confidence\_ellipse} \approx 2 * \pi \frac{n+1}{n} \frac{n-1}{n-2} F_{1-\alpha, 2, n-2}^2 \sqrt{\det(S)},$$

où  $n$  est la durée du signal,  $F_{1-\alpha, 2, n-2}$  le quantile à 95% de la distribution de Fischer avec 2 et  $n-2$  degrés de liberté, et  $\det(S)$  le déterminant de la matrice de covariance  $S$  de l'échantillon.

**Position du regard (AoI).** Les différents instruments de vol présents dans le cockpit ont été précisément délimités en régions d'intérêt (AoI, de l'anglais « Area of Interest »). Le temps passé à regarder chaque AoI (en secondes) a été calculé. Plus précisément, soit  $\mathcal{AOI}$  l'ensemble des régions d'intérêts. Soit  $r \in \mathcal{AOI}$  l'ensemble de nombre cardinal  $|r|$  des indices d'horodatage qui correspondent aux moments où le regard s'est posé dans l'AoI correspondante. Si nous définissons la durée moyenne inter-échantillons  $\delta t$  du regard, la proportion de temps passé dans chaque région prend la forme suivante :

$$temps\_passé\_en\_r = \delta t |r|, \forall r.$$

## j. Machine

**Position de l'hélicoptère.** Les informations concernant la position de l'hélicoptère ont été mesurées directement depuis le simulateur en tant que série temporelle. La valeur moyenne des orientations en roulis et en tangage de l'hélicoptère, ainsi que l'écart-type de l'altitude et des signaux de lacet, roulis et tangage ont été calculé en utilisant les formules habituelles (comme celles illustrées ci-dessus pour les rythmes cardiaque et respiratoire). Afin de modéliser la fréquence d'évolution de chacun de ces signaux, le nombre de traversées de la moyenne – c'est-à-dire le nombre de fois où un signal traverse sa propre moyenne – a été calculé. Cette métrique a été pensée pour capturer une forme d'information fréquentielle, l'idée étant qu'un signal qui varie rapidement aura un plus grand nombre de traversées, tandis qu'un signal qui varie lentement en aura moins. Prenons  $S = (S_i)_{0 \leq i \leq N-1}$ , comme étant un des signaux représentatifs de l'hélicoptère (par exemple l'altitude) d'une durée  $N$ . Soit  $\hat{S}$  la moyenne centrée du signal  $S$ . Les points de traversée de la moyenne de  $S$  correspondent aux points de traversée de zéro de  $\hat{S}$ . Nous appellerons les points de passage à zéro l'ensemble des indices  $\mathcal{Z} = \{z_j \mid 0 \leq j \leq J-1, J \in \{0, \dots, N-1\}\}$ . Ils vérifient :

$$S_{z_{j-1}} S_{z_j} < 0, \forall j \in \{1, \dots, J-1\}.$$

Le nombre de traversées de la moyenne est simplement donné par le cardinal de  $\mathcal{Z}$  :

$$nombre\_de\_traversées\_de\_la\_moyenne = |\mathcal{Z}| = J.$$

**Pilote automatique.** Dans les hélicoptères, le pilotage automatique (PA) se décline en deux grandes catégories : le mode vertical et le mode horizontal. Chaque catégorie se divise elle-même en huit sous-modes. L'utilisation du PA a été enregistrée. Les deux signaux résultent en une succession de valeurs numériques qui correspondent à chacun des différents sous-modes. De la même façon qu'avec la position du regard, soit  $\mathcal{M}^c$  l'ensemble de tous les sous-modes de PA, avec  $c = v, h$  qui représente le mode vertical (v) ou horizontal (h). Soit  $m^c \in \mathcal{M}^c$  l'ensemble de nombre cardinal  $|m|$  des horodatages qui correspondent aux moments où le pilote utilisait un sous-mode spécifique. Si nous définissons également  $\delta t$  la durée moyenne inter-échantillons, la proportion de temps passé dans chaque sous-mode peut s'exprimer comme suit :

$$time\_spent\_in\_m = \delta t |m^c|, \forall m^c, c \in \{v, h\}.$$

## k. Interface homme-machine

**Communications radio.** La proportion de temps passé en communication (%) a été calculée à partir du signal « push-to-talk » (appuyer pour parler) de l'équipement radio. La durée durant laquelle le signal a la valeur « 1 » a été divisée par la durée totale de la fenêtre temporelle considérée.

**Commandes de vol.** Les capteurs du simulateur ont permis une quantification précise des actions sur les *manipulandum* par les pilotes. En particulier, le déplacement moyen (en pourcentage) et son écart-type, ainsi que la force appliquée moyenne et son écart-type (en *daN*) ont été mesurés pour les commandes suivantes : le collectif (qui règle la puissance du rotor principal), le pédalier (qui règle la puissance du rotor de queue) et le cyclique (manche principal, dont les données sont séparées entre les déplacements dans le plan du roulis et celui du tangage). Les paramètres correspondants ont été calculés en utilisant les formules décrites ci-dessus. Pour toutes les commandes citées, le nombre de traversées de la moyenne du déplacement et de la force a été calculé, avec la même formule que ci-dessus.

## l. Fenêtre d'évaluation

Lorsque le modèle d'apprentissage automatique a été entraîné avec l'auto-évaluation en tant que vérité terrain, les paramètres ont été calculés dans une fenêtre d'évaluation située autour de l'auto-évaluation du pilote. Afin de refléter au mieux la physiologie humaine, nous avons choisi une fenêtre de cinquante secondes, qui commence quarante secondes avant l'auto-évaluation et qui se poursuit dix secondes après celle-ci (Van Roon et al., 2004).

Lorsque les RTLX (subjectif ou théorique) ont été utilisés comme vérité terrain, les paramètres ont été calculés sur des fenêtres d'évaluation de durées variables, qui correspondaient au temps passé par le pilote à accomplir la tâche évaluée. Cela implique généralement des fenêtres beaucoup plus longues que lorsque l'auto-évaluation était utilisée – typiquement plusieurs minutes, selon la tâche – qui reflètent la résolution temporelle inhérente au questionnaire du NASA-TLX.

	Signal	Fréquence d'échantillonnage (Hz)	Paramètres	Unité
Physiologie	ECCG	256	Rythme cardiaque moyen Ecart-type du rythme cardiaque Intervalle inter-battements moyen Ecart-type de l'IBI	bpm bpm ms ms
	Pléthysmographie	0.068 +/- 0.020	Fréquence respiratoire moyenne Ecart-type de la fréquence respiratoire	bpm bpm
	Oculométrie	60	Durée moyenne des fixations Durée moyenne des saccades Amplitude moyenne des saccades	s s deg
	Regard (yeux + tête)	60	Aire de l'ellipse à 95% Temps passé dans chaque AoI	pixels <sup>2</sup> s
Machine	Position de l'hélicoptère	25	Ecart-type de l'altitude Traversées de la moyenne de l'altitude Ecart-type de l'orientation en lacet Traversées de la moyenne de l'orientation en lacet Moyenne de l'orientation en tangage Ecart-type de l'orientation en tangage Traversées de la moyenne de l'orientation en tangage Moyenne de l'orientation en roulis Ecart-type de l'orientation en roulis Traversées de la moyenne de l'orientation en roulis	ft deg deg deg deg deg deg
	Pilotage Automatique	Non applicable	Temps passé dans chaque sous-mode horizontal Temps passé dans chaque sous-mode vertical	s s
Interface Homme-Machine	Commandes de vol : collectif, pédalier, cyclique (tangage), cyclique (roulis)	25	Moyenne du déplacement de la commande Ecart-type du déplacement de la commande Traversées de la moyenne des déplacements Moyenne de la force appliquée aux commandes Ecart-type de la force appliquée aux commandes Traversées de la moyenne des forces appliquées	% % daN daN
	Communications radio	Non applicable	Proportion de temps passé en communication	%

Table 10: Liste de tous les paramètres utilisés par le modèle, regroupés selon les trois catégories principales auxquels ils appartiennent : la physiologie de l'opérateur, l'état de la machine et l'interaction de l'opérateur avec la machine. Abréviations : IBI = intervalle inter-battements, AoI = Area of Interest, région d'intérêt du regard, ft = feet.

### *m. HBagging*

Afin d'évaluer et de prédire la charge mentale à partir de sources d'informations multimodales, nous avons utilisé un algorithme Heuristique de Bagging (HBagging, Bagging étant lui-même l'acronyme de Bootstrap Aggregating) (Nicolai & Audiffren, 2018). L'algorithme HBagging est naturellement adapté pour l'évaluation de la charge mentale, car il combine des performances à la pointe avec une forte interprétabilité des résultats produits. Ce modèle repose sur une collection de classificateurs faibles – machines à vecteur de support (SVM) linéaires unidimensionnelles – pour produire une prédiction de l'état instantané de la charge mentale. Plus précisément, pour chaque paramètre présenté ci-dessus, un classificateur faible est entraîné pour trouver un seuil qui sépare le mieux possible les états « haut » et « bas » de la charge mentale (voir [FIGURE 37](#)). Pour ce faire, le problème de l'estimation de la charge mentale est d'abord transformé en un problème de classification, tel que les connus Arbres de Décision, AdaBoost (Freund & Schapire, 1997) ou l'algorithme de Bagging (Breiman, 1996). Cependant, le HBagging diffère de ces approches en utilisant une régularisation de l'espace du modèle basée sur des heuristiques. En d'autres termes, des connaissances d'experts sont infusées durant la phase d'apprentissage, qui prennent la forme des attentes de variation de la charge mentale avec l'augmentation ou la diminution des paramètres. Ainsi, en pratique, pour un paramètre qui est censé augmenter avec la charge mentale (comme le rythme cardiaque), le classificateur faible adéquat va trouver un seuil tel que les valeurs inférieures au seuil correspondront à une charge mentale basse et les valeurs supérieures au seuil à charge mentale élevée, et inversement pour les paramètres qui décroissent avec la charge mentale (telle que la variabilité cardiaque). Une telle régularisation basée sur des heuristiques accompagnée d'un algorithme de Bagging a été montrée comme surpassant d'autres méthodes pour l'étude du contrôle postural (Nicolai & Audiffren, 2018). En outre, l'algorithme HBagging hérite des bénéfices complets des méthodes d'apprentissage ensemblistes, tels que la robustesse face au bruit, aux données aberrantes et au sur-apprentissage, ainsi qu'une bonne interprétabilité.

Le lecteur habitué aux méthodes d'apprentissage automatique et aux problèmes de classification aura sans doute remarqué que l'utilisation de classificateurs faibles requiert la binarisation de la vérité terrain du modèle en état « charge mentale basse » et « charge mentale élevée ». Afin de prendre en compte les variations idiosyncratiques de l'auto-évaluation de la charge mentale par les pilotes (par exemple, causées par les différences de personnalité inter-pilotes), un seuil personnalisé a été calculé pour chacun d'entre eux individuellement. Ce seuil personnel permet de classer leurs réponses à l'auto-évaluation dans les états « charge mentale basse » et « charge mentale élevée ». Ces seuils ont été calculés via les données du premier scénario : la charge mentale a été considérée élevée lorsque la valeur donnée par le pilote était strictement supérieure au 75<sup>ème</sup> percentile du total de ses réponses. Ce choix du 75<sup>ème</sup> percentile a été fait en consultation avec les experts aéronautiques, par rapport à la difficulté globale du premier scénario. Pour binariser les résultats du RTLX, nous avons choisi un seuil basé sur les résultats d'une méta-analyse récente sur plusieurs dizaines d'articles de recherche qui utilisent le NASA-TLX (Grier, 2015). Parmi les 152 entrées étudiées qui avaient des tâches impliquant le « pilotage d'un aéronef », la réponse médiane est de 47,78. Comme nous n'avons aucune réponse entre 47 et 50, nous avons utilisé un seuil de 50 pour différencier les charges mentales « basses »

et « élevées » du RTLX. La [FIGURE 37](#) synthétise les résultats de la binarisation des auto-évaluations (à l'oral et via le NASA-TLX) de charge mentale dans le deuxième scénario.

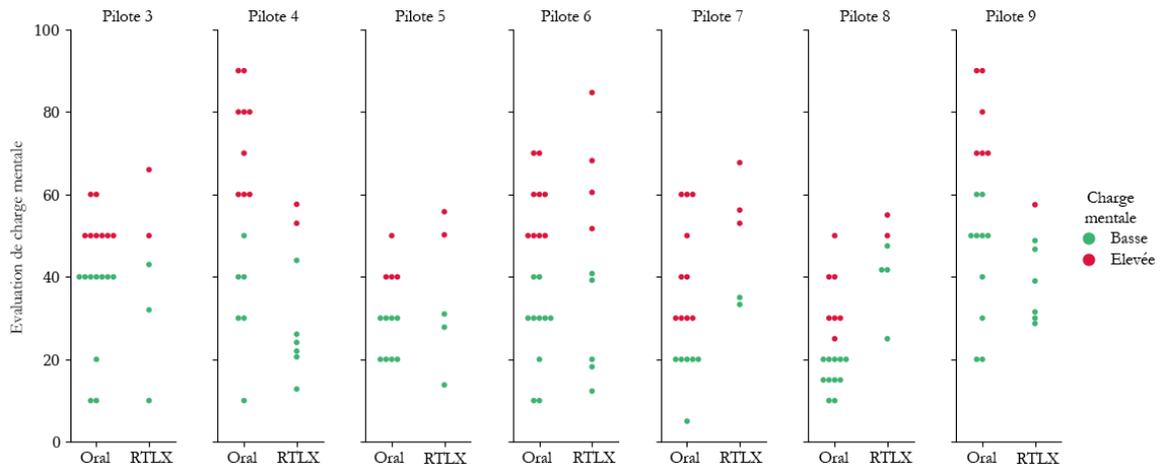


Figure 37 : Diagramme représentant l'auto-évaluation de la charge mentale pour chaque pilote – dans le scénario 2 – avec deux méthodes : à l'oral et RTLX. Les points verts représentent la charge mentale basse et les points rouges la charge mentale élevée, d'après le processus de binarisation des réponses de chaque pilote (voir ci-dessus).

L'algorithme de HBagging a été entraîné en utilisant un schéma de validation croisée personnalisé. Environ 80% de l'ensemble des données a été utilisé pour l'entraînement, de telle façon à ce qu'au moment de la validation du modèle, toutes les évaluations ultérieures étaient dans l'ensemble de test. Ce schéma évite d'utiliser, lors de l'entraînement du modèle, des évaluations de charge mentale pour prédire des valeurs temporellement antérieures.

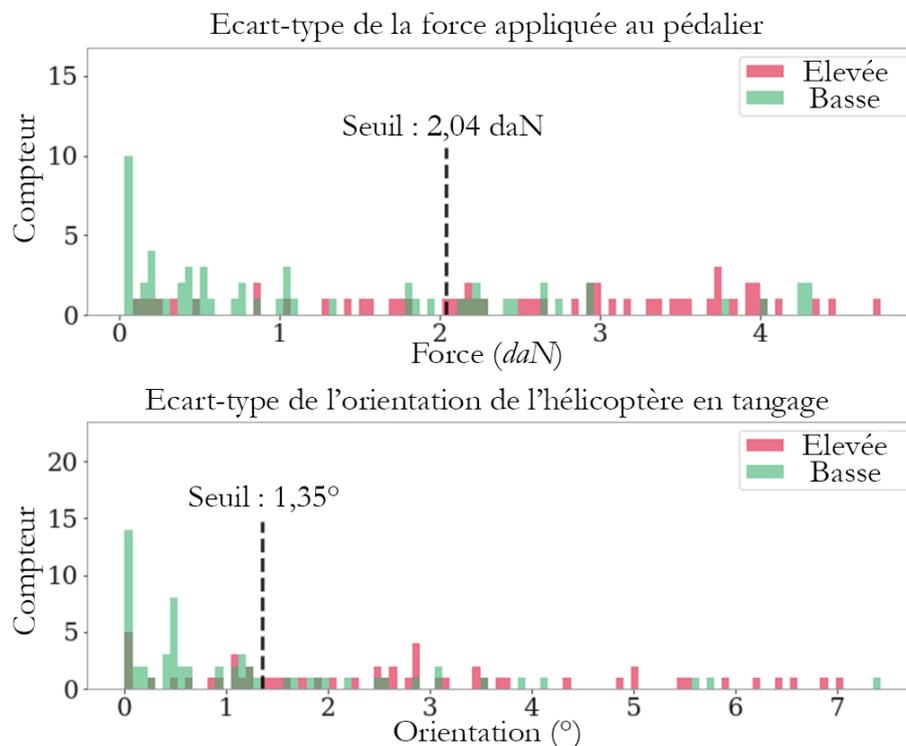


Figure 38 : Exemples des règles de décision apprises par l'algorithme HBagging sur l'intégralité des données. Les histogrammes représentent la distribution des valeurs de deux paramètres (écart-type de

la force appliquée au pédalier au-dessus, et écart-type de l'orientation de l'hélicoptère dans le plan sagittal en-dessous) lors des fenêtres temporelles utilisées pour l'apprentissage du modèle. La couleur de chaque bar indique l'état associé de charge mentale (« basse » en vert ou « élevée » en rouge), connu grâce à la vérité terrain. Dans les deux exemples, les paramètres ont été supposés (a priori) augmenter avec la charge mentale ; ainsi, un seuil a été entraîné pour classer les valeurs faibles de charge mentale sous le seuil, et les valeurs élevées de charge mentale au-dessus du seuil. Ensuite, lorsque l'algorithme HBagging est utilisé pour classer de nouvelles fenêtres temporelles non labellisées « basses » ou « hautes », il classe les fenêtres dont les paramètres sont supérieurs (respectivement inférieurs) au seuil comme étant « charge mentale élevée » (respectivement « charge mentale basse »). Il convient de noter que la règle de décision produit d'importantes erreurs, même sur les données d'entraînement. C'est la combinaison multimodale de plusieurs paramètres qui permet d'améliorer considérablement la performance du modèle.

### 3. Résultats

Pour toutes les expériences décrites ci-dessous, deux paramètres ont été fixés et n'ont jamais changés : 1) le nombre d'itérations a été fixé à 1000 ; 2) la répartition des données entre l'entraînement et la validation a été de 80%-20%. De plus, nous n'avons utilisé que notre schéma de validation croisée personnalisé décrit précédemment (voir M. HBagging).

#### a. Evaluation subjective de la charge mentale

**Intégralité des paramètres.** Lors d'une première expérience, le modèle a été entraîné et testé avec l'intégralité du jeu de données (c'est-à-dire que le modèle pouvait utiliser n'importe laquelle des 76 caractéristiques), et la vérité terrain utilisée était l'auto-déclaration à l'oral des pilotes. En moyenne, l'aire sous la courbe (AUC, de l'anglais Area Under the Curve) des ensembles de test était de  $0,805 \pm 0,085$ . La TABLE 11 présente le premier, deuxième et troisième quartile des valeurs d'AUC, ainsi que la moyenne et l'écart-type pour chaque pilote. Pour calculer des AUC individuelles, nous avons procédé comme suit : à chaque itération, si un ou plusieurs échantillons du pilote  $n$  étaient utilisés dans l'ensemble de test, nous avons calculé une AUC en restreignant l'ensemble de test au pilote  $n$ . Après 1000 itérations, nous avons calculé la médiane et la moyenne pour chaque pilote.

N° Pilote	AUC médiane [premier quartile, troisième quartile]	AUC moyenne $\pm$ écart-type
3	0,700 [0,625, 0,763]	0,626 $\pm$ 0,243
4	0,926 [0,762, 1,000]	0,862 $\pm$ 0,200
5	0,836 [0,750, 1,000]	0,831 $\pm$ 0,164
6	0,929 [0,792, 1,000]	0,867 $\pm$ 0,176
7	0,833 [0,719, 1,000]	0,816 $\pm$ 0,191
8	0,818 [0,688, 1,000]	0,792 $\pm$ 0,210
9	0,812 [0,708, 1,000]	0,796 $\pm$ 0,208

Table 11 : Médiane, premier quartile, troisième quartile, moyenne et écart-type de l'AUC individuelle pour chaque pilote.

La TABLE 12 ci-dessous montre les paramètres les plus fréquemment utilisés par le modèle par ordre décroissant. Afin d'éviter de présenter une liste de 76 paramètres, nous n'avons sélectionné que les paramètres utilisés dans plus de 45% des itérations. Les moyennes et écarts-types des forces appliquées s'expriment en daN (décanewton), tandis que les moyennes et écarts-types de déplacement des commandes (quelle que soit la commande considéré) s'exprime en pourcentage de déplacement, 0% étant la commande en position de repos et 100% à son amplitude maximale.

Paramètres	Fréquence d'utilisation
Ecart-type de la force appliquée au pédalier	100
Ecart-type du déplacement du cyclique en tangage	98,8
Ecart-type de la force appliquée au cyclique en tangage	97,5
Ecart-type du déplacement du pédalier	97,2
Ecart-type du déplacement de l'hélicoptère en tangage	94,3
Ecart-type du déplacement du cyclique en roulis	91,6
Ecart-type du déplacement de l'hélicoptère en lacet	91,5
Proportion de temps passé à regarder l'AoI « extérieur »	91,4
Traversées de la moyenne du déplacement du pédalier	88,4
Ecart-type du déplacement de l'hélicoptère en roulis	83,6
Ecart-type du déplacement du collectif	79,5
Proportion de temps passé avec un PA vertical allumé (SAS)	75,4
Ecart-type de la force appliquée au collectif	75,4
Proportion de temps passé avec un PA horizontal allumé (SAS)	68,2
Ecart-type de l'altitude de l'hélicoptère	60,6
Moyenne du rythme cardiaque	54,4
Moyenne de l'intervalle inter-battements	49,9
Aire de l'ellipse du regard	48,9

*Table 12 : Les paramètres utilisés plus de 45% du temps par le modèle, par ordre décroissant. SAS = Stability Augmentation System ; ces modes de pilote automatique servent à stabiliser l'appareil face aux contraintes extérieures.*

**Sous-ensemble de paramètres.** Afin d'étudier les contributions relatives de chaque paramètres, lors d'une seconde expérience, nous avons entraîné notre modèle avec seulement un sous-ensemble des données. L'idée derrière cette expérience est de voir à quel point les résultats seront (ou non) fortement dégradés lorsque le modèle est privé de différentes parties des données. Afin de s'assurer que les sous-ensembles utilisés par le modèle soient cohérents, nous avons partitionnés les données en trois catégories principales : 1) les données physiologiques ; 2) les données issues de l'hélicoptère ; 3) les données de l'interface homme-machine. A chaque itération, les données non-utilisées par le modèle n'étaient pas retirées, mais plutôt mélangées de

façon aléatoire. En d'autres termes, pour chaque point de mesure (c'est-à-dire chaque auto-évaluation orale), la distribution des valeurs des paramètres non-utilisés était aléatoire ; par exemple, la valeur moyenne du rythme cardiaque était associée à l'écart-type de l'altitude de l'hélicoptère. En résumé, nous avons ici répété la première expérience à trois reprises, avec environ deux tiers des données mélangés à chaque reprise. Les résultats peuvent être trouvés dans la [TABLE 13](#).

Données	AUC globale
Intégralité (première expérience)	0,805 ± 0,085
Données physiologiques	0,675 ± 0,096
Données de la machine	0,766 ± 0,084
Données de l'interface	0,757 ± 0,086

*Table 13: AUC globale pour chaque sous-ensemble de données testé. Sur chaque ligne, seul le sous-ensemble non randomisé est reporté.*

## **b. Auto-évaluation subjective vs. NASA-TLX**

Nous avons, dans une troisième expérience, cherché à évaluer l'impact du choix de la vérité terrain sur la performance du modèle. Nous avons entraîné le modèle avec le score global RTLX en tant que vérité terrain, ainsi qu'avec certains sous-scores du NASA-TLX : exigence mentale, exigence temporelle, frustration et effort. Tous ces entraînements ont été effectués sur l'ensemble des données. Les sous-scores « exigence physique » et « performance » n'ont pas été utilisés en tant que vérité terrain car leurs valeurs étaient systématiquement trop basses (pour l'exigence physique) ou trop hautes (pour la performance). En d'autres termes, les pilotes n'ont jamais répondu de valeur supérieure à 50 pour l'exigence physique, et jamais inférieure à 50 pour la performance : les valeurs prises n'appartiennent donc qu'à une seule des deux classes et le modèle n'est pas en mesure de discriminer les états « charge mentale basse » et « charge mentale élevée ». Nous avons réitéré ce processus avec le NASA-TLX théorique des experts (RTLX, exigence mentale, exigence temporelle et effort). Les experts ont également donné un score d'exigence physique, mais avec des valeurs toujours inférieures à 50 (rendant l'entraînement impossible) ; ils n'ont cependant pas répondu pour la performance et la frustration, étant donné le caractère intrinsèquement subjectif de ces sous-scores.

En bref, nous avons répété la première expérience plusieurs fois avec une vérité terrain différente à chaque fois. Les résultats peuvent être trouvés dans la [TABLE 14](#) pour le NASA-TLX subjectif et dans la [TABLE 15](#) pour le NASA-TLX théorique des experts.

NASA-TLX	AUC
RTLX (moyenne non pondérée)	0,733 ± 0,158
Exigence mentale	0,756 ± 0,203
Exigence temporelle	0,617 ± 0,167
Frustration	0,372 ± 0,147
Effort	0,804 ± 0,172

*Table 14: Moyenne et écart-type de l'AUC pour le NASA-TLX et ses sous-scores en tant que vérité terrain, avec l'intégralité des données en entrée.*

NASA-TLX théorique	AUC
RTLX (moyenne non pondérée)	0,622 ± 0,122
Exigence mentale	0,599 ± 0,083
Exigence temporelle	0,512 ± 0,108
Effort	0,615 ± 0,110

Table 15: Moyenne et écart-type de l'AUC pour le NASA-TLX théorique et ses sous-scores en tant que vérité terrain, avec l'intégralité des données en entrée.

### c. Visualisation

Dans cette section, nous proposons une représentation visuelle de la prédiction continue de la charge mentale par notre algorithme (FIGURE 39). En considérant que les résultats présentés dans la section « Intégralité des paramètres » sont robustes pour l'auto-évaluation orale en tant que vérité terrain (AUC > 0,8, malgré une validation croisée personnalisée), nous avons entraîné notre modèle sur l'intégralité des paramètres (100%-0%, pas de validation croisée) et avons prédit la charge mentale sur l'intégralité du scénario (c'est-à-dire pendant les « trous » entre chaque évaluation orale). Pour chaque pilote, avec cette « forme finale » du modèle, nous avons donc accès à une estimation continue de sa charge mentale, ainsi que la contribution de chaque classificateur faible à chaque instant. La FIGURE 39 représente la précision du modèle dans deux situations : une où la charge mentale en continue est bien en accord avec l'auto-évaluation à l'oral et avec une évaluation objective de la difficulté des tâches à effectuer, et une où ce n'est pas le cas.

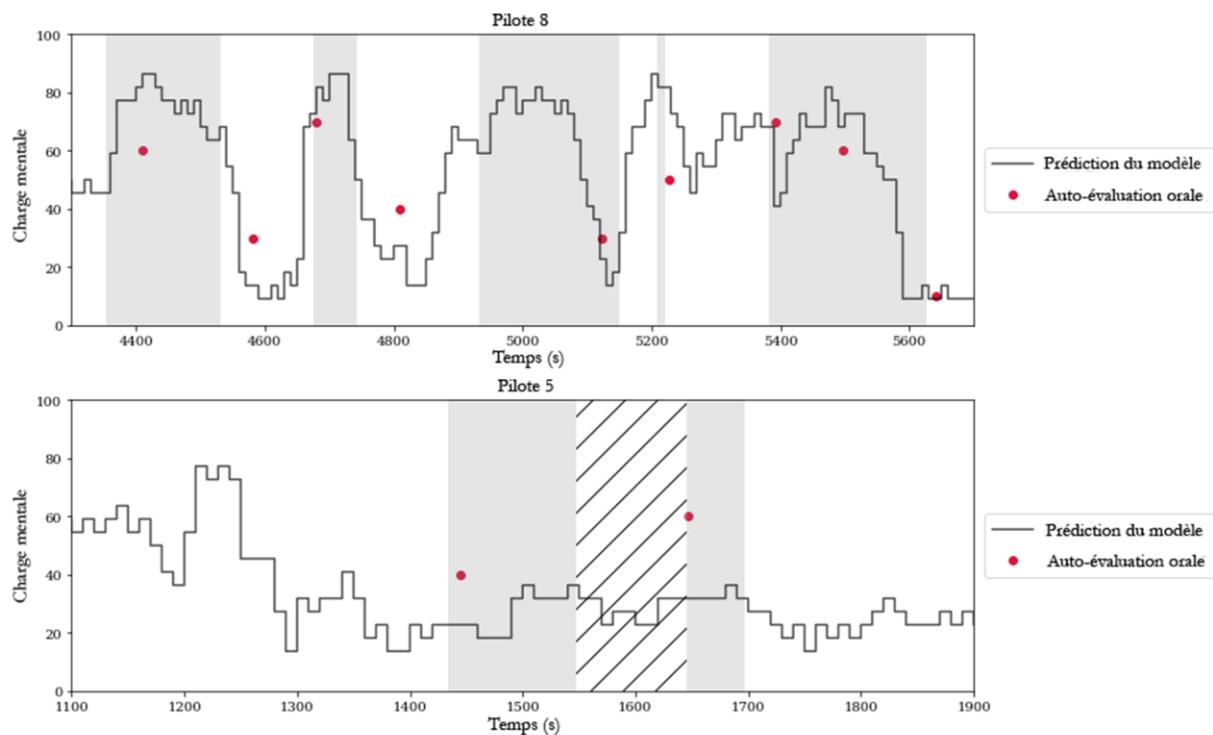


Figure 39: Extraits de la prédiction continue de la charge mentale pour le huitième pilote (en haut) et le cinquième (en bas) dans le deuxième scénario. Les points rouges correspondent aux auto-évaluations à l'oral de la charge mentale (vérité terrain utilisée pour entraîner le modèle). Les portions du scénario grisées sont des phases où la charge mentale devrait - objectivement - être élevée (décollages, atterrissages, tâches cognitives, etc.). La région hachurée correspond à une tâche de communication radio.

## 4. Discussion

Dans cette étude, nous proposons un modèle d'apprentissage automatique basée sur les données qui produit un score (entre 0 et 100) qui quantifie la probabilité qu'un pilote d'hélicoptère professionnel soit en charge mentale élevée durant un vol en simulateur Full-Flight. Ce modèle est basé sur l'algorithme HBagging, une approche précédemment publiée (Nicolai & Audiffren, 2018), qui offre de bonnes performances et des résultats intégralement interprétables pour les experts opérationnels. La charge mentale a été prédite en utilisant une combinaison de paramètres de suivi du regard, opérationnels, contextuels ainsi que physiologiques, ce qui montre l'importance des mesures multimodales pour de telles évaluations, et ce bien que la prédiction reste très précise lorsque les paramètres sont confinés aux données opérationnelles et d'interface.

### a. Pertinence de la méthode

Les méthodes utilisées dans ce chapitre sont dans la lignée de l'état de l'art de la recherche effectuée dans le domaine de la prédiction de la charge mentale par algorithmes d'apprentissage automatique. L'algorithme HBagging présente plusieurs avantages : il est robuste face au bruit, aux données aberrantes et au sur-apprentissage. Il est également totalement interprétable, ce qui est essentiel car les résultats du modèle pourraient être utilisés par des instructeurs de vol pour affiner leurs conseils. De plus, des variantes de notre schéma de validation croisée ont été utilisées auparavant par d'autres équipes de recherche. Par exemple, (G. Singh et al., 2021) ont utilisé un schéma quelque peu similaire pour prédire la charge mentale d'opérateurs naïfs (*i.e.* non pilotes) à partir de données physiologiques et ont obtenu un score de 74,8% au mieux. (Liu et al., 2020) ont évalué la charge mentale de pilotes s'entraînant dans un simulateur de Boeing 737-800 avec un questionnaire de NASA-TLX. En utilisant une analyse chronologique, ils ont obtenu un taux de prédiction correcte de 56%. Ces deux scores sont significativement inférieurs à ceux présentés ici.

### b. Vérité terrain

Afin d'évaluer quelle est la vérité terrain la plus pertinente, nous en avons utilisé trois différentes pour entraîner notre modèle : l'auto-évaluation orale faite pendant l'expérience, le questionnaire NASA-TLX auquel les pilotes ont répondu après l'expérience et le questionnaire NASA-TLX dit théorique, renseigné par les experts aéronautiques. Le modèle s'en est le mieux sorti avec l'auto-évaluation orale. Lorsque nous avons utilisé le NASA-TLX, les résultats étaient plus précis que l'aléatoire mais variables d'un pilote à l'autre (écart-type élevé). Avec le NASA-TLX théorique, les résultats n'ont pas été meilleurs qu'une estimation qui aurait été faite au hasard. Ces résultats sont cohérents avec de précédents travaux, qui suggèrent que les méthodes d'estimation unidimensionnelle (comme l'auto-évaluation orale) sont mieux adaptées que les méthodes multidimensionnelles lorsque le sujet effectue une tâche, car cela est moins distrayant et plus facile à répondre (S. Miller, 2001). Néanmoins, certains sous-scores du NASA-TLX ont donné de bons résultats lorsqu'utilisés en tant que vérité terrain. Par exemple, le sous-score « effort » a eu les meilleurs résultats. Cependant, « effort » - décrit comme la réponse à la question « quelle a été l'intensité de votre effort de travail pour atteindre votre niveau de performance ? » - est sans doute le sous-score qui reflète le mieux les auto-évaluations orales des pilotes, ce qui expliquerait les bonnes performances du modèle avec celui-ci.

Mais nous pouvons nous demander pourquoi les évaluations théoriques données par les experts – le NASA-TLX théorique – n’ont donné que des prédictions peu concluantes de charge mentale ? Une hypothèse simple pourrait être que les experts n’ont pas pu anticiper les variations potentielles de style sensori-moteur entre les pilotes, *i.e.* les différences idiosyncratiques stables qui amène à effectuer la même tâche de manières distinctes (voir (Vidal & Lacquaniti, 2021) pour une revue à ce sujet). En outre, les experts ont établi ces scores théoriques sans effectuer eux-mêmes le deuxième scénario, ils n’étaient alors pas émotionnellement impliqués dans les tâches à accomplir et ne pouvaient que difficilement prévoir la fatigue de l’utilisation continue d’un hélicoptère, même s’il est simulé. L’écart entre l’opinion des experts et le ressenti des pilotes rappelle la non-concordance entre l’évaluation de la douleur par le personnel médical et la perception réelle des patients : (Ruben et al., 2015) ont montré que les praticiens ont tendance à sous-estimer le ressenti des patients, spécifiquement quand la douleur augmente.

A la lumière de ces résultats, les paragraphes qui suivent vont implicitement considérer que le modèle a été entraîné avec l’auto-évaluation orale comme vérité terrain.

### ***c. Paramètres physiologiques***

**Suivi oculaire – Mouvement des yeux.** Parmi les huit paramètres utilisés dans plus de 90% des itérations, seulement un seul est dérivé des données de mouvement des yeux : la proportion de temps passé à regarder à l’extérieur du cockpit. Un deuxième paramètre est à la dix-huitième place : l’aire de l’ellipse du regard. Pourtant, les travaux de recherche antérieurs ont montré l’importance des paramètres de suivi oculaire dans l’étude de la charge mentale (Ikehara & Crosby, 2005). En particulier, plusieurs études ont passé en revue les paramètres pouvant être utilisés pour prédire la charge mentale, parmi les données de suivi oculaire (Kramer, 2020; Marquart et al., 2015) : nombre de fixations, durée des fixations, nombre de saccades, durée des saccades, amplitude des saccades, clignement des yeux, diamètre de la pupille, et distribution de la position du regard. Parmi ceux-ci, la durée des fixations et la distribution spatiale du regard sont parmi les plus pertinents pour estimer la charge mentale (Marquart et al., 2015). Seule cette dernière a été utilisée par notre modèle.

Un certain nombre d’études ont souligné l’importance du comportement oculaire lors du pilotage, qui se définit comme une succession ordonnée de fixations du regard durant la résolution d’une tâche donnée. Bien que les pilotes utilisent différentes stratégies visuelles pour répondre aux spécificités des situations rencontrées (Dubois, 2017) – chaque situations étant différente d’un pilote à l’autre et d’un vol à l’autre – la littérature scientifique à ce sujet s’accorde à dire qu’il existe des caractéristiques communes dans le comportement oculaire des pilotes qui reflètent, par exemple, leur niveau d’expertise (Bellenkes et al., 1997; Kasarskis et al., 2001; Kramer et al., 1994). En outre, il a été montré que l’activité oculaire est modulée par les changements de charge mentale (Maggi & Di Nocera, 2021). L’importance du paramètre « proportion de temps passée à regarder l’extérieur », qui reflète le temps passé à regarder hors du cockpit, est cohérente avec ces travaux antérieurs. Des travaux récents menés en laboratoire soutiennent également ces résultats (G. Singh et al., 2021). Les auteurs rapportent qu’une augmentation de la charge mentale durant une tâche de pilotage conduit à une augmentation de la durée des fixations sur l’environnement extérieur. En substance, les stratégies de recherche d’informations – souvent étroitement liées aux stratégies de balayage visuel – apparaissent altérées

durant les situations à charge mentale élevée : les pilotes se concentrent de façon excessive sur l'environnement extérieur plutôt que leurs instruments de vol. Cette dépendance visuelle rappelle également les patients qui ont un faible contrôle moteur et postural et qui en deviennent excessivement dépendants de leur vision ; ils ont souvent besoin d'une rééducation pour modifier ce comportement (de Haart et al., 2004).

**Paramètres cardiorespiratoires.** A l'inverse de travaux antérieurs (Gabaude et al., 2012; Li et al., 2022; Nickel & Nachreiner, 2003; G. Singh et al., 2021), un seul paramètre issu des paramètres cardiorespiratoires s'est avéré pertinent pour notre modèle (la moyenne du rythme cardiaque/de l'intervalle inter-battements). Ce résultat est quelque peu surprenant, étant donné que la charge mentale a une influence sur le système nerveux périphérique qui, en retour, influence le système cardiovasculaire (Heine et al., 2017). Des tendances similaires ont été observées pour la fréquence respiratoire (Hidalgo-Muñoz et al., 2019; Roscoe, 1992).

Comment expliquer ce manque de « pouvoir prédictif » des paramètres cardiorespiratoires étudiés ? L'hypothèse d'une qualité insuffisante des données peut être écartée : la fréquence d'échantillonnage était suffisamment élevée et les données étaient plutôt propres. L'explication doit être trouvée ailleurs. Comme mentionné par d'autres équipes de recherche (Lorenzini et al., 2023), la plupart – si ce n'est toutes – des études de charge mentale qui mesurent des paramètres physiologiques utilisent des expériences courtes et faites dans un environnement contrôlé (en laboratoire). Notre expérience, quant à elle, s'est déroulée sous de fortes contraintes écologiques : les pilotes professionnels ont suivi des protocoles de vol réel sans aucune contrainte expérimentale dans un simulateur très réaliste. En résumé, notre environnement était beaucoup moins contrôlé, plus bruyant et globalement plus réaliste que la plupart des études antérieures. Nous émettons l'hypothèse que ce contexte à forte variabilité pourrait expliquer le plus faible impact des paramètres cardiorespiratoires dans notre modèle.

#### *d. Paramètres opérationnels*

Les paramètres les plus importants, en termes de capacités prédictives, étaient ceux dérivés de l'interaction avec l'interface (la force appliquée et les déplacements aux commandes de vol). Par exemple, parmi les paramètres utilisés plus de 90% du temps, cinq sur huit sont liés à l'interface. A notre connaissance – et d'après une revue récente sur le sujet (Lorenzini et al., 2023) – les paramètres d'interface n'ont jamais été mesurés directement dans de telles études. Souvent, la force appliquée par l'opérateur sur les appareils sont déduits d'enregistrements vidéo du corps et non directement de la machine (Chao et al., 2007; Damsgaard et al., 2006; Delp et al., 2007). Notre approche présente deux avantages principaux : i) elle est plus pratique d'un point de vue opérationnelle (elle ne requiert pas de caméra supplémentaire) ; ii) elle ne se repose pas sur des modélisations tridimensionnelles complexes pour reconstruire le squelette humain et sa structure (Chao et al., 2007; Damsgaard et al., 2006; Delp et al., 2007).

Le paramètre le plus important utilisé par notre modèle est l'écart-type de la force appliquée au pédalier. Les aéronefs à voilure tournante (comme les hélicoptères) sont notoirement plus compliqués à piloter que les aéronefs à voilure fixe (comme les avions) à cause du couple généré par le rotor principal, que le pilote doit – en permanence – compenser avec le pédalier (qui contrôle la puissance du rotor de queue). Ce n'est donc pas étonnant de voir ce paramètre au sommet de la liste. Sur une échelle plus globale, le fait que les paramètres dérivés de

l'interface soient pertinents pour estimer et prédire la charge mentale est cohérent avec l'augmentation de la charge mentale généralement inhérente à une augmentation de la difficulté des manœuvres.

L'importance des paramètres opérationnels pour évaluer l'état interne des pilotes fait écho à une autre étude récente (Naegelin et al., 2023). Dans cette étude, les participants étaient assis à leurs stations de travail et devaient régulièrement auto-évaluer leur stress pendant que leur rythme cardiaque, les mouvements de leur souris et les entrées tapées sur leur clavier étaient enregistrés. Les auteurs ont trouvé que les participants stressés bougeaient leur souris différemment (plus souvent et moins précisément) et faisaient plus d'erreurs de frappe au clavier. Il est intéressant de noter que les auteurs en ont conclu que les données de la souris et du clavier (*i.e.* l'interface) pourraient être plus pertinentes que le rythme cardiaque pour détecter le stress.

Puisque les paramètres des commandes de vol (force appliquée et déplacements) et les mouvements de l'hélicoptère sont intrinsèquement liés, le modèle a également utilisé un certain nombre de paramètres dérivés du déplacement de l'hélicoptère pour prédire la charge mentale, à savoir l'écart-type de l'orientation de l'appareil dans les trois plans de l'espace. Dans une étude ultérieure (Roques *et al.*, en préparation), nous montrons que les pilotes ont tendance à favoriser les mouvements de l'hélicoptère dans un seul plan de l'espace ; *i.e.* ils semblent vouloir éviter les mouvements multidimensionnels. À cet égard, la trajectoire de l'appareil pourrait être un puissant indicateur de la charge mentale des pilotes, puisque les déplacements multidimensionnels tendraient à induire une charge mentale élevée.

## ***e. L'engagement***

Le concept d'engagement est né dans les années quatre-vingts dans les sciences de l'éducation (O. Lee & Anderson, 1993). Dans ce domaine, cette notion se définit comme la qualité et le degré d'effort mental dépensé par un élève lors de l'accomplissement d'une tâche d'apprentissage (Corno & Mandinach, 1983). Elle est donc complémentaire de la notion de charge mentale, et il aurait été intéressant de s'y pencher dans le cadre de cette étude. Complémentaire car là où la charge mentale paraît être une notion très utile pour évaluer les situations à fortes demandes (multiples tâches simultanées, tâches complexes, accidents, imprévus, etc.), l'engagement paraît une notion très utile pour évaluer les situations de l'autre côté du spectre (faible intensité, tâches routinières, etc.). En effet, il est possible qu'un manque d'engagement des pilotes dans l'exécution de leurs tâches puisse induire des problèmes similaires à ceux induits par une charge mentale trop élevée. L'engagement cognitif est mesurable par divers moyens, comme l'électroencéphalographie, la spectroscopie proche infrarouge ou le suivi oculaire. À la lumière de ces éclairages, il paraît fondamental que d'éventuelles études ultérieures sur le sujet traité dans ce manuscrit prennent impérativement en compte la notion d'engagement cognitif, afin d'apporter des explications complémentaires à celles fournies par l'évaluation de la charge mentale.

## ***f. Limitations***

Cette étude présente plusieurs limitations pratiques. Comme pour beaucoup d'études en conditions naturelles, les enregistrements du comportement humain étaient bruités, ce qui a nui à la qualité des paramètres calculés. En outre, du fait de contraintes liées à l'équipement, les

données oculaires ont été enregistrées à 60 Hz, une fréquence d'échantillonnage sous-optimale pour quantifier les mouvements de saccades (une valeur supérieure à 200 Hz est à privilégier). De plus, le nombre de sujets inclus dans l'étude est plutôt faible du point de vue des techniques d'apprentissage automatique et la population étudiée est très homogène (seulement des hommes, tous des pilotes professionnels). Par ailleurs, le modèle a été entraîné sur des tâches très spécifiques : il est probable que le modèle ne puisse pas être généralisé à des tâches plus complexes ou inhabituelles.

Le nombre d'auto-évaluations de charge mentale pendant les scénarios est malheureusement plutôt faible. En effet, entre dix et vingt intervalles de cinquante secondes par pilote ont été utilisés pour l'entraînement du modèle (correspondant aux 10-20 réponses orales de chaque pilote). En d'autres termes, nous n'avons pas utilisé plus de 10% de notre jeu de données. Bien qu'il soit certain qu'augmenter le nombre d'échantillons pour l'apprentissage automatique améliorerait la performance du modèle, l'auto-évaluation orale reste néanmoins perturbante et pourrait, si trop fréquente, être préjudiciable aux tâches de pilotage. Des travaux récents sur la labellisation des données pourraient fournir un début de solution. (J. Zhang et al., 2020) ont utilisé des techniques d'apprentissage automatique pour exploiter ces larges portions de données non labellisées pour améliorer leur prédiction de charge mentale instantanée. Une telle approche semble être la candidate parfaite pour notre contexte.

L'éventail de capteurs potentiellement utilisables a été limité à cause de contraintes liées à l'équipement des pilotes. Ainsi, plusieurs capteurs généralement trouvés dans la littérature de la charge mentale – comme l'électroencéphalogramme, l'activité électrodermale ou l'électromyogramme (Tao et al., 2019) – n'ont pas été utilisés ici. En outre, l'ensemble des paramètres calculés à partir des données des capteurs n'était évidemment pas exhaustif. Par exemple, les caractéristiques prometteuses basées sur la fréquence de l'électrocardiogramme (Tao et al., 2019) n'ont pas été utilisées en faveur de caractéristiques plus simples et plus courantes.

Enfin, l'algorithme HBagging présente plusieurs limitations. C'est un modèle simple où tous les paramètres sont considérés individuellement. Ce choix a été fait pour faire face à la faible quantité de données et à leur hétérogénéité, ce qui nous empêchait d'utiliser des modèles plus complexes sous peine de perdre en robustesse et en performance. Avec un jeu de données plus grand (plus de pilotes, plus de scénarios ou plus d'auto-évaluations ; voire une combinaison des trois), une structure en arborescence pourrait potentiellement mieux rendre compte de la complexité de la charge mentale et tirer avantage de la nature multimodale des données. Par ailleurs, le modèle calcule pour chaque paramètre un seuil binaire extrêmement contraignant, ce qui n'est adapté que pour des paramètres qui sont corrélés avec une forte variation de charge mentale, et qui ne tient pas compte de relations statistiques plus complexes. Les heuristiques utilisées dans le modèle sont également très limitées et un moyen d'améliorer ce point serait d'intégrer davantage d'heuristiques fournies par les experts tout en augmentant la complexité du modèle.

## 5. Conclusion

Cette étude suggère que la charge mentale de pilotes professionnels est mieux prédite par des paramètres opérationnels, ce qui rend l'enregistrement des données physiologiques – par ailleurs problématique d'un point de vue pratique, éthique et théorique – moins crucial ; bien que

cela ait contribué à améliorer légèrement les performances de notre modèle. Si l'on regarde la chaîne de commande pour piloter un hélicoptère, le pilote est en amont (il prend les décisions et agit en conséquence) tandis que la machine est en aval (elle se déplace selon les instructions du pilote). Le fait que notre modèle prédictif de charge mentale se repose presque uniquement sur des paramètres *aval* suggère que la chaîne de commande agit comme un filtre. En d'autres termes, les paramètres *amont*, tels que ceux dérivés des mesures physiologiques, ne permettent pas de rendre compte avec précision de la charge mentale en contexte écologique car ils sont le produit d'un assortiment complexe de facteurs insolubles associés à une forte variabilité interpersonnelle. En revanche, les paramètres *aval* semblent plus fiables pour prédire la charge mentale, comme si le « bruit » susmentionné avait été éliminé au fur et à mesure que l'on descend le long de la chaîne de commande.

En gardant cette idée à l'esprit, il semble essentiel de réviser la notion même de ce qui est prédit par le modèle : comment peut-on distinguer la charge mentale de la charge de travail ? *i.e.* à quel point la charge mentale prédite est-elle « mentale » ? Intuitivement, s'il est effectivement possible de prévoir la charge mentale subie par les pilotes en se basant uniquement sur leur interaction avec l'interface, alors la quantité prédite serait similaire à la charge de travail. Il a été explicitement demandé aux pilotes de répondre leur niveau de charge mentale lors des auto-évaluations orales, qui ont été ensuite utilisées pour entraîner le modèle. Une hypothèse simple est que tous les pilotes étudiés étaient des professionnels bien entraînés, familiers avec l'hélicoptère et que, par conséquent, leur charge mentale perçue était directement proportionnelle à la difficulté de la tâche en cours de réalisation. Cette hypothèse est séduisante car, si elle s'avère correcte, elle légitimerait l'utilisation de signaux dérivés de la machine – seulement ceux-ci – pour accéder à l'état de charge mentale des opérateurs expérimentés d'interfaces homme-machine (tels que les pilotes) ; un exploit qui serait autrement difficile, voire impossible, dans des conditions naturelles.

# Chapitre 4 : Discussion générale

---

« Oui, on en a chié pour trouver  
cette idée, on était charrette. »

*La Classe Américaine* (Michel  
Hazanavicius, 1993)

<b>I. Le système sensorimoteur et la charge mentale, deux facettes d'une même pièce</b> .....	<b>147</b>
1. Le cerveau, un metteur en scène ?.....	147
a. Convergence des entrées sensorielles .....	147
b. Hétérogénéité des transformations sensorimotrices en fonction du contexte et du style perceptivo-moteur.....	148
c. En conclusion .....	151
2. Style perceptivo-moteur et fond commun .....	152
3. Mesurer l'un à travers l'autre, et vice-versa.....	154
a. Jumeau numérique et représentation interne .....	154
b. Mesure du style perceptivo-moteur .....	155
<b>II. Le suivi longitudinal individuel (SLI), une nécessité à l'heure de la complexité</b> .....	<b>157</b>
1. Sélection des paramètres dont la mesure semble pertinente .....	157
a. Au niveau du système vestibulaire.....	157
b. Au niveau de la charge mentale .....	158
2. Modalités de mise en œuvre d'un suivi longitudinal individuel (SLI) .....	160
a. Les deux modalités .....	160
b. La mise en œuvre .....	161
<b>III. L'assistant personnel de l'opérateur, outil de demain ?</b> .....	<b>162</b>
1. Le pilote automatique, pionnier des assistants intelligents .....	162
2. Contours et cahier des charges de l'assistant personnel.....	164
a. Cahier des charges.....	164
b. Contours .....	165
3. L'engagement, véritable défi à l'heure de l'IA .....	166
<b>IV. Perspectives</b> .....	<b>168</b>
1. Amélioration du modèle proposé.....	168
2. Réduction de la complexité par l'utilisation des mathématiques symboliques .....	169
3. Quelles évolutions pour le cockpit du futur ?.....	169



Les discussions détaillées des résultats scientifiques ayant été effectuées au sein des chapitres idoines, nous proposons, pour la discussion générale, une vue d'ensemble des hypothèses du laboratoire sur l'IIHM, ainsi que sur la façon dont l'expérience IKKY nous a amené à réfléchir sur ce concept.

## I. Le système sensorimoteur et la charge mentale, deux facettes d'une même pièce

« Le monde dans lequel chacun vit dépend de la façon de le concevoir. »

*Aphorismen zur Lebensweisheit*  
(Arthur Schopenhauer, 1851)

### 1. Le cerveau, un metteur en scène ?

#### a. Convergence des entrées sensorielles

Il existe dans le cerveau de nombreuses structures au sein desquelles convergent les différentes modalités sensorielles : plusieurs aires corticales, le thalamus (Jones, 2012), les noyaux réticulés (Pinault, 2004) ou encore les noyaux vestibulaires, pour n'en citer que quelques-unes.

Cette convergence des entrées sensorielles pose la question de la hiérarchisation de ces signaux entre eux. Existe-t-il une entrée sensorielle « favorite » (par exemple le système visuel), qui soit la source principale d'interprétation pour le cerveau ? Si c'est le cas, quels sont le ou les rôle(s) des autres entrées ? Servent-elles à valider la source principale, par un mécanisme de vérification ? Ou bien sont-elles des modulateurs, qui ajustent ce qui est perçu par le canal principal ? Au contraire, les différentes entrées sensorielles sont-elles agrégées, pour constituer un « tout » ? Avec quels poids associés à chaque entrée ? Le même poids pour chaque entrée (le système visuel est autant considéré que le système vestibulaire, qui sont autant considérés que le système proprioceptif, etc.) ? Ou bien des poids différents selon les sujets et selon les situations ? On aurait alors des sujets plus ou moins sensibles à certaines entrées, avec une variation interindividuelle.

Les expériences présentées dans ce manuscrit ne peuvent pas répondre à ces questions ; toutefois nous proposons – en forme de préambule à la discussion générale – de faire une rapide revue de quelques articles de recherche qui pourraient donner des pistes de réflexion ou des réponses partielles aux questions soulevées.

Comprendre – ou tout du moins essayer de comprendre – ces mécanismes est crucial pour le domaine des facteurs humains en aéronautique. En effet, comme nous avons pu le voir précédemment, les pilotes forment une population particulièrement exposée aux illusions sensorielles, en particulier celles liées à une dissonance entre le système visuel et le système vestibulaire. Ainsi, être capable d'appréhender ou d'anticiper la façon dont interagissent les différents systèmes sensoriels revêt une importance primordiale pour améliorer la sécurité aérienne.

Nous proposons d'examiner deux cas spécifiques qui permettent de jeter partiellement la lumière sur les interactions existantes entre les systèmes sensoriels :

- Tout d'abord nous décrirons brièvement l'examen clinique des patients vestibulaires et hémiplésiques. En effet, le comportement de ces patients permet d'étudier comment le contexte et le style perceptivo-moteur influencent les transformations sensorimotrices.
- Puis nous examinerons le cas des stimulations artificielles. Ces stimulations (dont nous avons déjà partiellement parlé, comme la vection) permettent de faire ressentir aux sujets un panel de sensations plus grand que les situations écologiques. Cela permet notamment d'induire ou de provoquer des situations peu voire jamais expérimentées par les sujets.

## ***b. Hétérogénéité des transformations sensorimotrices en fonction du contexte et du style perceptivo-moteur***

Nous allons illustrer l'hétérogénéité des transformations sensorimotrices en fonction du contexte et du style perceptivo-moteur à l'aide de trois types d'études.

### **L'examen clinique des patients vestibulaires.**

Le cas des patients atteints de troubles vestibulaires est intéressant, dans le sens où il met en lumière la notion et l'importance du contexte et du style perceptivo-moteur lorsque l'on observe les transformations sensorimotrices. En effet, il existe plusieurs tests cliniques qui permettent de détecter les troubles vestibulaires. Les deux plus communs sont :

- Le signe de Romberg (Lanska & Goetz, 2000). Dans ce test, la posture debout et au repos du patient est comparée par le clinicien entre deux situations : avec les yeux ouverts ou les yeux fermés. Si le patient est stable les yeux ouverts et instable les yeux fermés, alors il est possible qu'il soit atteint de troubles vestibulaires (Lin et al., 2021).
- Le test de marche de Fukuda (Fukuda, 1959). Dans ce test, les patients sont invités à piétiner sur place, avec les bras tendus droits devant eux. De même que pour le signe de Romberg, ils effectuent ce test les yeux ouverts puis les yeux fermés. Le test dure généralement une cinquantaine de pas. Si le patient tourne sur lui-même (alors que la consigne est de rester sur place), alors il est possible qu'il soit atteint de troubles vestibulaires (Bonanni & Newton, 1998; Honaker et al., 2009).

### Signe de Romberg

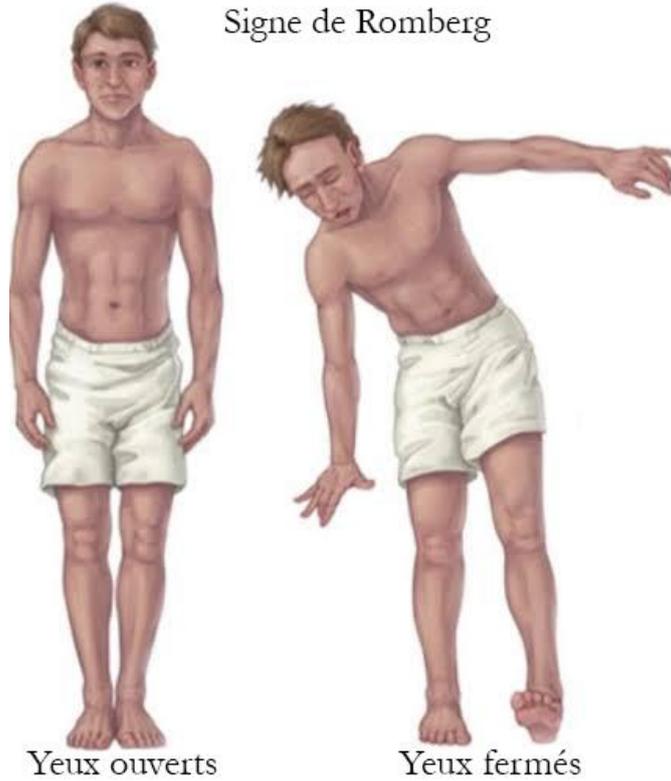


Figure 40 : Représentation schématique du signe de Romberg. Lorsque le patient (généralement atteint d'un trouble vestibulaire) ferme les yeux, il n'est plus en mesure de maintenir son équilibre statique.

### Test de marche de Fukuda

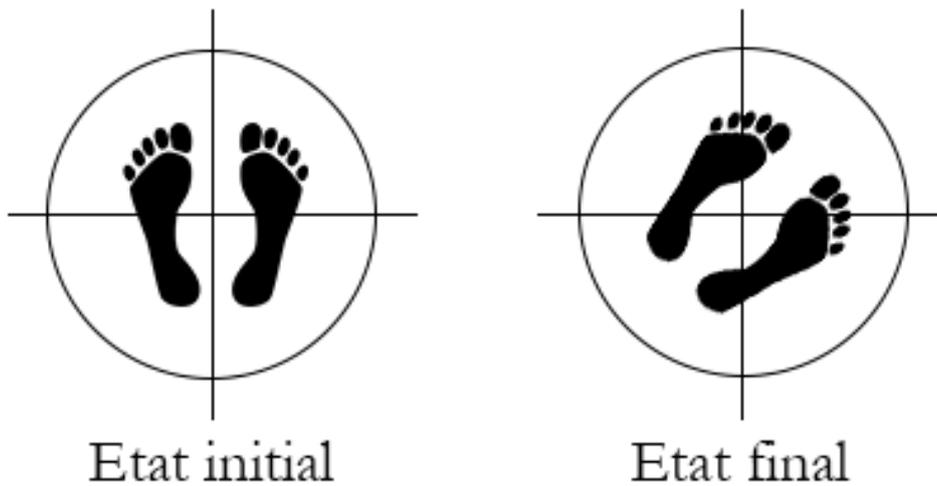


Figure 41 : Représentation schématique du test de marche de Fukuda. On demande au patient de fermer les yeux, tendre les bras en avant et de piétiner sur place. S'il est atteint de trouble vestibulaire, il tournera sur place (dans le plan horizontal).

Ce qui est important ici, et jamais mis en exergue dans la littérature clinique, c'est que ces deux tests montrent que la même lésion vestibulaire produit des effets différents sur le contrôle moteur des patients en fonction du contexte, de la tâche imposée à ces derniers :

- Lorsque les yeux sont fermés et qu'il s'agit de se tenir debout immobile, la lésion vestibulaire se traduit par une inclinaison du corps du côté lésé dans le plan frontal.
- Lorsque les yeux sont fermés et qu'il s'agit de marcher sur place, la même lésion vestibulaire se traduit par une rotation du corps du côté lésé dans le plan horizontal et non par une inclinaison dans le plan frontal.

En résumé, la tâche et le contexte sont donc déterminants quant aux choix des données sensorielles pertinentes pour gérer les transformations sensorimotrices. Un second paradigme permet d'illustrer ce propos.

### **L'influence de la vection sur les effets de la stimulation galvanique vestibulaire**

La stimulation galvanique vestibulaire combinée à la vection met aussi en lumière l'influence du contexte dans l'interprétation des entrées sensorielles. La stimulation galvanique vestibulaire (Dlugaiczkyk et al., 2019) est une technique de stimulation artificielle du système vestibulaire, qui consiste à faire passer un courant de faible intensité entre deux électrodes, posées respectivement sur les mastoïdes gauche et droite du sujet. Le passage de ce faible courant va stimuler le système vestibulaire ; le signal envoyé peut être un créneau (ce qui conduira généralement le sujet à se pencher dans le plan frontal) ou un signal périodique (ce qui amène le sujet à osciller dans le plan frontal) (Dlugaiczkyk et al., 2019). Il est important de noter que cette stimulation est non-spécifique, c'est-à-dire qu'elle stimule l'intégralité des canaux semi-circulaires et des organes otolithiques de la même façon ; ainsi la sensation résultante n'est pas censée être très réaliste, puisqu'une rotation simultanée dans les trois plans de l'espace accompagnée de deux translations (dans les axes vertical et longitudinal) n'a aucune réalité physique (mise à part, peut-être, la sensation ressentie lors d'une chute en pente raide). Ainsi, on remarque d'ores-et-déjà que si une stimulation galvanique périodique – qui stimule les trois canaux et les deux otolithes indifféremment – provoque uniquement une oscillation du sujet dans le plan frontal, c'est que le cerveau sélectionne les signaux qui lui semblent plausible pour la tâche qui lui est assignée : se tenir debout, immobile, les yeux fermés. On remarque la similitude avec les tests de Romberg chez les patients vestibulaires décrits plus haut.

L'influence du contexte est aussi mis en exergue par une étude de Lepecq et al. (2006). Dans cette étude, les auteurs ont successivement soumis des sujets sains assis à deux stimulations : une stimulation visuelle linéaire d'avant en arrière qui provoquait une sensation de vection, c'est-à-dire une sensation illusoire de mouvement d'arrière en avant. Puis une fois que la vection était effective chez les sujets, ils étaient soumis à une stimulation galvanique vestibulaire. Le résultat principal de cette étude est que la stimulation galvanique a modulé la stimulation de vection ; malgré la non-spécificité de la première, la plupart des sujets ont « inconsciemment » conservé la partie de la stimulation galvanique qui permettait d'intégrer cette dernière en un scénario réaliste :

- La vection a provoqué une sensation de « droit devant », les sujets avaient l'impression de se déplacer vers l'avant.

- La stimulation galvanique vestibulaire a modulé cette sensation en provoquant une impression d'aller de gauche à droite (tout en continuant à avancer vers l'avant), dans un plan strictement horizontal. En clair, la stimulation des saccules et des canaux semi-circulaires verticaux étaient négligées.

### La modulation des transformations sensorimotrices par le style perceptivo-moteur

Chez des sujets sains et chez des patients hémiplésiques, les mêmes stimulations sensorielles peuvent induire des réponses motrices très différentes d'un sujet à l'autre, c'est-à-dire en fonction de leur style perceptivo-moteur. Par exemple, l'instabilité posturale chez un sujet debout sain ou hémiplésique, mesurée comme la variance du centre de pression, provoquée par des stimulations dans trois modalités sensorielles (vection pour le système visuel, stimulation galvanique pour le système vestibulaire et vibrations des tendons pour le système proprioceptif), varie énormément d'un sujet à l'autre (I V Bonan et al., 2013; Isabelle V Bonan, Colle, et al., 2004; Isabelle V Bonan, Yelnik, et al., 2004). Toutefois les sujets hémiplésiques sont souvent plus sensibles aux stimulations sensorielles que les sujets sains (cf. la FIGURE 42, tirée de l'étude de Bonan *et al.* de 2013). Il existe donc une variabilité interindividuelle très forte dans le poids donné à chaque système sensoriel pour l'équilibre statique.

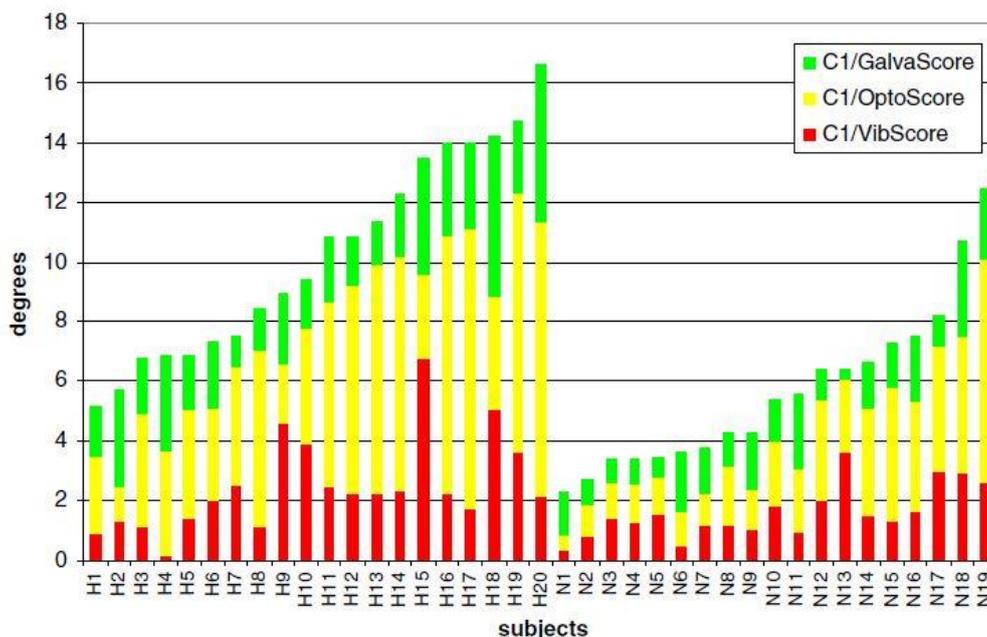


Figure 42: Représentation des scores d'instabilité posturale (mesure comme l'aire de déplacement du centre de pression) cumulée pour trois modalités. En rouge l'instabilité due à une stimulation proprioceptive par des vibreurs attachés aux tendons des chevilles; en jaune l'instabilité due à une stimulation optocinétique obtenue grâce à un dispositif lumineux adéquat; en vert l'instabilité due à une stimulation vestibulaire obtenue grâce à de la stimulation galvanique vestibulaire. Figure reproduite avec autorisation.

### c. En conclusion

Les études citées précédemment permettent donc d'émettre l'hypothèse que le système nerveux central trie les informations sensorielles en fonction du contexte, de la tâche et du style perceptivo-moteur de chacun. Il se comporterait donc comme un metteur en scène. Il a à sa disposition des décors et des acteurs et il doit composer une pièce cohérente et compréhensible à

partir des éléments à sa disposition, en clair un scénario à partir duquel il choisira les entrées sensorielles adéquates pour élaborer une conduite motrice appropriée. Et naturellement, ceci implique que le scénario puisse être conforme à la réalité et dans ce cas, par exemple, la chute sera rattrapée ; ou qu'il soit basé sur des interprétations hasardeuses et la chute se soldera par plusieurs fractures.

Ce qui vient d'être illustré à propos du contrôle postural reste valide dans le cadre beaucoup plus complexe de l'interface homme-machine et notamment dans le cas du pilote. Il se doit d'élaborer des scénarios plausibles pour sélectionner les entrées sensorielles adéquates qui lui permettront *in fine* de contrôler les mouvements de son aéronef. Et bien entendu, son pilotage (basé sur son aptitude à élaborer des scénarios plausibles) devrait donc dépendre de son style perceptivo-moteur comme nous venons de le voir.

Ceci étant posé, même si chacun se tient debout et marche différemment, il n'en demeure pas moins qu'un certain nombre de principes de base doivent être respectés chez tous les bipèdes permanents que nous sommes. Et ceci pose une nouvelle question : le scénario est-il toujours à peu près le même chez tout sujet ? En d'autres termes, existe-t-il un « commun » qui constitue une base similaire quelle que soit la situation rencontrée, le contexte et les stimuli mis en jeu ? Et si ce commun existe, puisque nous avons vu qu'il existe une variabilité interindividuelle, comment cette dernière s'exprime-t-elle ? C'est ce que nous allons essayer d'examiner dans la suite de ce sous-chapitre.

## 2. Style perceptivo-moteur et fond commun

Toute interprétation d'un stimulus sensoriel donné, et plus largement toute transformation sensorimotrice, par un être humain pourrait ainsi se décomposer en deux parties :

- Une partie commune à toute personne, qui ne variera pas d'un sujet à l'autre, que l'on peut appeler « fond commun interpersonnel ».
- Une partie propre à chaque individu, qui constitue son style perceptivo-moteur, le style sensorimoteur ou encore le style intra-personnel. Cette notion est développée dans la revue de (Vidal & Lacquaniti, 2021). Le style serait donc un marqueur des différences interindividuelles.

Nous allons voir pourquoi ces notions de « fond commun » et de « style » sont fondamentales pour établir certains aspects développés plus loin dans la discussion des résultats de la thèse (comme les assistants personnels intelligents). Si nous notons  $M$  la réponse motrice typique de n'importe quel sujet à un ensemble de stimulation, alors on peut noter :

$$M = F + S$$

Avec  $F$  le fond commun et  $S$  le style propre à chaque individu. Ainsi, la réponse motrice optimale d'un individu donné puise sa source dans une réponse moyenne donnée par chaque sujet, qui est ajustée par le style individuel de l'opérateur.

Ainsi, on peut définir une enveloppe nominale moyenne pour chaque opérateur, qui sera dépendante de son style personnel. Cette enveloppe est constituée de valeurs « seuils » ou « limites » pour l'ensemble des capteurs et des *manipulandum*. Lorsque la valeur prise par un capteur dépasse ce seuil, c'est-à-dire sort de l'enveloppe nominale, alors la situation devient

critique pour l'opérateur : il sort de son « domaine de confiance ». Toutefois ce dépassement peut parfois s'expliquer à cause du contexte dans lequel s'effectue la tâche (par exemple lors d'un atterrissage par météo exceptionnelle, comme un fort vent latéral).

En revenant à la notation précédente, on voit que l'on a également :

$$\Delta M = \Delta F + \Delta S$$

On peut aisément supposer que :

$$\Delta S \ll \Delta F$$

En effet, si ce n'était pas le cas, nous pourrions observer des façons radicalement différentes d'effectuer une même tâche, ce qui est contredit par l'existence même – en aéronautique – de procédures très précises pour chaque situation que peut rencontrer un pilote.

Ce point est corroboré par les résultats obtenus dans le CHAPITRE 2. On voit sur la FIGURE 29 que les pilotes ont eu tendance à avoir une précision similaire les uns aux autres (tant en roulis qu'en tangage), mais qu'il existe une légère différence interindividuelle, potentiellement inhérente au style personnel de chacun.

En ce qui concerne la charge mentale, la notion de style est plus complexe à établir, puisqu'elle dépend de facteurs qui se situent hors du simple champ sensorimoteur : psychologie, estime de soi, fatigue, attention, etc. Nous pouvons toutefois établir quelques généralités :

- Le fond commun interpersonnel de la charge mentale est constitué par ce que l'on a vu dans le CHAPITRE 3 : cette dernière a une courbe moyenne en U. En d'autres termes, si elle est trop basse, l'opérateur ressent de l'ennui et du désintéressement qui peuvent conduire à des situations de somnolence dangereuse ; au contraire si elle est trop haute, l'opérateur ressent de la fatigue et de l'anxiété qui, à long terme, entraînent une baisse de la performance opérationnelle et/ou des situations périlleuses dues au stress.
- Le style personnel de chacun serait plutôt à chercher du côté de la résilience face au stress. Les personnes sujettes au stress ont un système sympathique qui s'active facilement et un système parasympathique qui s'active difficilement ; à l'inverse les personnes peu sujettes voire résistantes au stress ont un système sympathique qui s'active difficilement, alors qu'elles ont un système parasympathique qui s'active facilement (LeBlanc et al., 2004).

Nous pouvons alors imaginer que les variations de charge mentale face à une situation donnée dépendent de la nature des tâches à effectuer ainsi que de la personnalité de l'opérateur. Une tâche « calme » et de précision recrute le système parasympathique (Mendes, 2009) et est donc aisément effectuée par une personne peu sujette au stress ; à l'inverse une tâche de « force brute » et agitée (c'est-à-dire à variabilité plus forte) recrute le système sympathique (Mendes, 2009) et est donc aisément effectuée par une personne plutôt sujette au stress.

Enfin, en termes de manipulation d'aéronef, les notions de fond commun et de style soulèvent des questions : les mouvements de l'aéronef se font-ils selon tous les plans de l'espace ? Ou bien les pilotes, à l'instar des déplacements sur la terre ferme, privilégient-ils les déplacements dans un plan donné ? Les résultats présentés dans ce manuscrit ne permettent pas de répondre à

ces questions, mais il est intéressant de noter que la notion de style permet de se pencher sur des éléments basiques de pilotage, comme la façon dont un opérateur se déplace d'un point A à un point B. Il est donc fondamental d'en comprendre les tenants et les aboutissants, ainsi que de développer un cadre théorique de mesure du style.

### 3. Mesurer l'un à travers l'autre, et vice-versa

#### *a. Jumeau numérique et représentation interne*

Un jumeau numérique est un modèle virtuel et numérique d'un objet (M. Singh et al., 2021), le plus souvent industriel (comme le moteur d'un avion, une éolienne, une plateforme pétrolière, etc.). Grâce à des outils d'intelligence artificielle (comme l'apprentissage automatique) et d'analyse de données, ce modèle permet de simuler et de suivre la vie de l'objet qu'il représente. Cela permet par exemple d'anticiper la durée de vie et les maintenances importantes à effectuer (Errandonea et al., 2020).

Les jumeaux numériques reposent sur trois piliers :

- Les données des capteurs de la machine qui sont transmises en permanence et qui renseignent sur le fonctionnement de cette dernière.
- Les données des « experts », comme les ingénieurs, les concepteurs ou encore les utilisateurs, qui ont une connaissance approfondie du fonctionnement de la machine dans son domaine d'application.
- L'historique intégral de l'utilisation passée de la machine.

Ces trois corpus de données permettent au jumeau numérique de simuler virtuellement à tout instant, et le plus fidèlement à la réalité possible, le fonctionnement réel de la machine, en parallèle. Cette simulation permet – en se projetant dans le temps futur grâce aux outils numériques – d'anticiper les problèmes à venir pour réagir au plus vite en cas de besoin (de maintenance, de réparations, d'arrêt des opérations, etc.).

D'une façon similaire, on peut imaginer qu'un opérateur de machine complexe (comme un pilote d'aéronef) possède une représentation, un modèle interne de son appareil (avion, hélicoptère, etc.). Cette représentation interne permet à l'opérateur d'anticiper les actions à venir et de minimiser les risques. En effet, plus la tâche à accomplir est complexe, plus les conséquences d'une erreur sont graves, et donc plus les incertitudes concernant le résultat final doivent être minimisées. Pour minimiser les incertitudes, il faut que les pilotes aient une connaissance fine de leur tâche, de la façon de la résoudre et donc un modèle sensorimoteur interne précis du schéma d'action pour accomplir la tâche en toute sécurité.

Toutefois, plus la difficulté de la tâche augmente, plus il est légitime de penser que la modélisation interne qui permet sa résolution est complexe à obtenir. Ce modèle fonctionne sur le même principe que les jumeaux numériques : l'opérateur a en permanence une représentation mentale de sa machine et de son fonctionnement. Cela lui permet de modéliser le comportement de cette dernière selon les actions qu'il va effectuer. Ainsi, en comparant le comportement prédit (par le modèle interne) et le comportement réel de la machine, l'opérateur est censé pouvoir ajuster ses actions pour corriger le tir. Le modèle est toutefois perturbé et non-adapté en cas de

situation extrême (météo défavorable, panne inattendue, etc.). C'est là une limite de cette approche.

## ***b. Mesure du style perceptivo-moteur***

Le style perceptivo-moteur est intrinsèquement lié à la notion de modèle interne. En effet, le fond commun à tous les opérateurs constitue la base du modèle, là où le style en constitue les ajustements propres à chacun. Par exemple, pour effectuer telle ou telle opération, les pilotes doivent vérifier un ensemble d'instruments dans le cockpit ; le chemin oculaire de « base » est alors constitué de l'ensemble des instruments à vérifier, là où le style influence l'ordre précis dans lequel les instruments sont regardés (typiquement, ils peuvent être vérifiés de gauche à droite ou de droite à gauche).

Si l'on considère l'étude du système {machine + opérateur}, nous avons donc d'un côté le fond commun (qui est similaire chez tous les opérateurs) et de l'autre le style perceptivo-moteur (propre à chaque opérateur). L'exemple précédemment pris peut être généralisé en aéronautique : le fond commun a trait aux procédures de vol ; à l'inverse le style, qui est intrinsèquement idiosyncratique, a trait à la mise en œuvre des procédures de vol. Il existe un bon équilibre à trouver entre le fond commun et le style ; à savoir, dans l'exemple précédent, il ne paraît pas nécessaire d'imposer l'ordre dans lequel les instruments doivent être vérifiés, en connaître la liste suffit.

En terme de variabilité interindividuelle, on peut représenter le spectre des comportements des opérateurs de la façon suivante :

- D'un côté du spectre, un pilote très proche du fond commun, dont le style est peu apparent. Ce type de pilote connaît bien les procédures. Toutefois, ce type de comportement peut se retrouver en difficulté face à une situation imprévue par les procédures, il manque d'une capacité d'improvisation.
- De l'autre côté du spectre, un pilote plutôt éloigné du fond commun, qui a un style personnel très marqué. Ce type de pilote a tendance à faire fi des procédures et à se fier à ses propres capacités de pilotage. Ce type de comportement est généralement compatible avec des conditions nominales de pilotage ; toutefois, lorsque les conditions ne sont plus nominales, les capacités d'improvisation ne suffisent pas à compenser le manque de recours aux procédures standards.

La question du bon équilibre à trouver entre les deux comportements extrêmes doit être posée pendant la formation des pilotes. Un bon pilote saura établir un juste milieu. Toutefois, il n'est pas aisé pour un instructeur d'établir précisément où se situe son élève sur ledit spectre des comportements ; il serait intéressant d'être en mesure, mathématiquement et analytiquement, de ségréger le fond commun du style personnel lors de la mesure de l'ensemble {machine + opérateur}.

De précédentes études (Roy et al., 2022) proposent de faire la distinction entre trois types de données pour évaluer l'état mental d'un opérateur. Ces trois types de données peuvent chacun se prêter à l'exercice de « délimitation » entre le fond commun et le style personnel. Ils sont :

- Les mesures comportementales. Cela concerne le comportement de l'opérateur, c'est-à-dire les mouvements et les actions effectués sur l'interface humain-machine (sur les actionneurs, les pédales, le manche, les instruments de vol, etc.). Il s'agit ici de mesures intriquées : on a une combinaison {style + fond commun}. Le fond commun s'exerce par les procédures de vol (pour effectuer un décollage, il faut plus ou moins nécessairement utiliser les commandes de vol d'une certaine façon), le style par la façon dont elles sont effectuées (toutefois chaque pilote peut exercer une variation, même infime, dans sa façon d'utiliser les commandes de vol à tâche donnée).
- Les mesures physiologiques. Cela concerne les données physiologiques et neurovégétatives de l'opérateur (EEG, ECG, conductance cutanée, respiration, etc.). Le style devrait être bien retranscrit par ces données. En effet, à tâche donnée d'une complexité donnée qui produisent chez tous les opérateurs des entrées sensorielles données, le rythme cardiaque (ou variabilité cardiaque) ou la conductance cutanée ne seront pas forcément les mêmes, ce qui constituerait un premier pas vers la mesure du style. Cela rejoint par exemple la notion de résilience au stress abordée précédemment.
- Les mesures co-variables indépendantes de l'opérateur : situation météorologique, turbulences, tâche diurne ou nocturne, etc. Ces mesures sont un angle mort de l'expérience présentée au CHAPITRE 3. Il paraît difficile d'anticiper si ces données mesureront le fond commun, le style ou un mélange des deux. Si c'est une situation couverte par la formation ou l'entraînement, il est possible que cela reflète plutôt le fond commun ; alors que si c'est une situation fortement inattendue (comme l'atterrissage dans l'Hudson), il est possible que ces données reflètent plutôt le style personnel.

## II. Le suivi longitudinal individuel (SLI), une nécessité à l'heure de la complexité

“I sense injuries. The data could be called “pain”.”

*Terminator 2: Judgment Day* (James Cameron, 1991)

### 1. Sélection des paramètres dont la mesure semble pertinente

#### *a. Au niveau du système vestibulaire*

Comme nous venons de le voir, la mesure du style perceptivo-moteur passe par l'étude de plusieurs types de mesures (physiologiques, comportementales et co-variables). La mesure du style perceptivo-moteur est une étape-clé dans l'établissement d'un suivi longitudinal individuel. En effet, ce suivi – individuel par nature – repose sur les spécificités propres à chaque opérateur, et il convient donc d'être en mesure de les mesurer (c'est-à-dire de mesurer le style).

L'expérience présentée dans le CHAPITRE 2 constitue une proposition de première étape à la constitution d'un suivi longitudinal individuel. Cette expérience n'est pas à proprement parler de la psychophysique vestibulaire classique, mais c'est un outil issu de l'interface humain-machine pour évaluer la sensibilité vestibulaire, qui est inspiré de la psychophysique. Toutefois, l'expérience telle que présentée dans ce manuscrit reflète en réalité le résultat d'un mélange inextricable de stimulation vestibulaire et de stimulation proprioceptive : lors des rotations du simulateur, le système vestibulaire est activé, mais le système proprioceptif l'est également aux points de contact entre le corps du pilote et le siège. Ces sensations ne sont d'ailleurs pas étrangères aux pilotes, puisqu'il est courant de parler de « pilotage aux fesses » lorsque le pilote se fie aux stimulations proprioceptives ressenties au niveau du siège. Néanmoins, effectuer le test présenté au CHAPITRE 2, ou un test similaire, régulièrement peut constituer une approche originale pour effectuer un contrôle du bon fonctionnement du système vestibulaire (et dans une moindre mesure, du système proprioceptif). Les situations qui pourraient être détectées grâce à ce test sont multiples :

- Un accident non déclaré par l'opérateur. Il existe plusieurs types d'accidents pouvant provoquer des lésions et/ou des pathologies au niveau vestibulaire : les accidents de plongée (Goplen et al., 2010; Kennedy, 1974), les traumatismes du rocher (Cooksey, 1946; F. Johnson et al., 2008), etc.
- Une prise de médicament non déclarée. Il existe plusieurs types de médicament susceptibles de provoquer des troubles vestibulaires (Chiao et al., 2023).
- Un vieillissement du système vestibulaire. Aussi appelé « presby-vestibulie » ou déficit vestibulaire bilatéral, la cause de ce vieillissement est mal connue. Ce serait dans la moitié des cas d'origine ototoxique, traumatique, génétique, infectieuse ou auto-immune ; tandis que dans l'autre moitié des cas l'origine est inconnue (Allen et al., 2016; Zalewski, 2015).

Le bon fonctionnement du système vestibulaire est fondamental pour les pilotes d'hélicoptère, qui constituent une population particulièrement exposée aux mouvements dans les trois dimensions de l'espace au quotidien (contrairement à la population générale, qui ne se déplace en généralement que dans deux dimensions).

## ***b. Au niveau de la charge mentale***

Le problème de la charge mentale est un problème ancien en ergonomie. Toutefois, nous proposons ici un cadre théorique différent. En effet, notre approche du « metteur en scène » peut se décliner selon une autre métaphore, celle du montage au cinéma. Le monteur a à sa disposition de nombreux rushes et doit décider lesquels utiliser pour produire un film cohérent ; en d'autres termes, un opérateur a une multitude d'entrées à sa disposition pour effectuer une tâche, et il faut choisir ceux qui sont pertinents. Si l'exécution de la tâche se solde par un échec, c'est que l'opérateur s'est trompé dans le montage et a utilisé les mauvais rushes. Cette vision est différente de celle classiquement admise en ergonomie, la théorie du canal unique, selon laquelle l'information passe par un goulet d'étranglement et est donc traitée séquentiellement selon l'ordre d'arrivée ou sa pertinence (Bater & Jordan, 2019; Broadbent, 2013).

La charge mentale est par essence multimodale car elle dépend *a minima* de l'état de l'opérateur d'une part (sa fatigue, son état d'esprit, son attention, etc.) et de la complexité de la tâche à effectuer d'autre part. La réponse que nous proposons à cette multi-modalité est de réduire l'espace de mesure via l'algorithme proposé au [CHAPITRE 3](#). Grâce à l'approche basée sur la donnée (nous n'avons fait que très peu d'hypothèses *a priori* sur l'importance relative des différentes mesures) l'algorithme nous permet de décanter cette importance relative et nous permet d'établir une liste de paramètres pertinents pour évaluer la charge mentale de l'opérateur.

De façon surprenante, l'algorithme n'utilise peu voire pas du tout de paramètres d'origine physiologique, mais essentiellement des paramètres dits « d'interface ». C'est surprenant au regard de la littérature scientifique, qui se repose essentiellement sur la physiologie de l'opérateur pour évaluer la charge mentale.

Toutefois, l'utilisation principale de paramètres d'interface est intéressante à double titre. Premièrement, le problème de la charge mentale peut en réalité être résumé par la phrase suivante : « il est important de détecter et/ou de savoir quand un opérateur agit hors de son état nominal » ; en d'autres termes, lorsque sa charge mentale est trop élevée et qu'il n'a plus les

ressources mentales nécessaires pour accomplir ses tâches. Or, la machine elle-même peut fonctionner hors de son état nominal (lors de la survenue d'une panne, par exemple). Mesurer l'interface spécifiquement permet de prendre en compte directement l'état de l'opérateur et l'état de la machine, soit l'état de l'ensemble défini précédemment, l'ensemble {machine + opérateur}.

Deuxièmement, en faisant l'hypothèse – raisonnable – que l'anthropomorphisme est la solution la moins coûteuse pour les pilotes en terme de charge mentale (en effet, cela leur permet d'utiliser des représentations et des modèles internes préexistants, ce qui facilite le contrôle de la machine), il est finalement presque logique que les paramètres les plus pertinents pour estimer la charge mentale des opérateurs soient ceux de l'interface homme-machine.

En résumé, la charge mentale peut être mise en évidence par les mécanismes suivants :

- L'auto-évaluation du sujet. Même si cette technique est imparfaite, utilise une partie des ressources attentionnelles du sujet et est sujette à la subjectivité intrinsèque de celui ou celle qui l'énonce, c'est une mesure qui, en première intention, peut s'avérer utile par sa facilité d'acquisition.
- La modification du style perceptivo-moteur. C'est ce qui ressort de notre expérience ; en effet cette modification se traduit par une modification de la façon dont l'opérateur utilise ses commandes de vol (par exemple). D'où le fait que notre modèle ait principalement utilisé des données issues de l'interface.
- L'analyse du comportement de la machine. Cette mesure indirecte découle du point précédent ; en effet, si l'analyse des actions menées par l'opérateur sur les commandes de vol peut permettre d'estimer la charge mentale, il serait logique de pouvoir l'estimer en n'observant que la machine, puisque les actions sur les commandes de vol ont une incidence directe sur le comportement de la machine. Cela pourrait constituer une mesure indirecte de laquelle est absente toute forme d'instrumentation de l'opérateur.
- Les variables physiologiques et neurovégétatives. C'est la voie classique de mesure de la charge mentale. Toutefois cette technique requiert l'instrumentation de l'opérateur, ce qui peut être trop contraignant (voire rédhibitoire) dans un cadre opérationnel.
- La réalisation d'une double tâche adaptée. Hors d'un cadre opérationnel (c'est-à-dire dans un cadre expérimental par exemple), la réalisation d'une double tâche adaptée permet de quantifier la charge mentale. Un exemple simple est de faire réaliser à l'opérateur une tâche de comptage en parallèle de sa tâche opérationnelle (comme compter de façon décroissante de 50 à 30, de deux en deux). Le temps mis à prononcer chaque nombre et les éventuelles erreurs commises sont autant de marqueurs de la charge mentale.

## 2. Modalités de mise en œuvre d'un suivi longitudinal individuel (SLI)

### a. Les deux modalités

Maintenant que vous nous avons établi un certain nombre de paramètres qui semblent pertinents à mesurer dans le cadre du suivi longitudinal individuel, nous pouvons étudier quelles sont les modalités de la mise en œuvre de ce dernier.

Avant toute chose, il convient de distinguer deux modalités : le suivi « en ligne », qui s'effectue pendant les vols réels et utilisent donc des données réelles (et dont le but principal est de s'assurer que le vol s'effectue dans des conditions suffisantes de sécurité) ; et le suivi en dehors de l'avion ou de l'hélicoptère, qui se décline en plusieurs champs :

- Le débriefing des vols réels. C'est notamment pertinent lorsqu'une panne (ou tout événement inattendu) s'est produite. Ce débriefing existe déjà et il est même systématique dans certains milieux (dans l'armée notamment).
- L'utilisation de simulateurs de vol. Cet outil (surtout lorsqu'il est extrêmement réaliste) permet de soumettre les pilotes : soit à des situations non-nominales que l'on peut prévoir (en d'autres termes, cela permet de voir comment le pilote réagit face à une panne, sans pour autant mettre en danger l'intégrité d'un aéronef réel) ; soit à des expériences telles que celle présentée dans le [CHAPITRE 2](#) (ce qui permet de tester les fonctions sensorielles des pilotes, par exemple).

Le premier point (les débriefings) peut permettre de faire une évaluation longitudinale de la charge mentale des pilotes. En effet, malgré l'utilisation de l'auto-évaluation pendant notre expérience, le standard de l'industrie aéronautique reste le NASA-TLX, qui doit être effectué *a posteriori*. Cette évaluation longitudinale de la charge mentale peut permettre de détecter des points d'amélioration du pilote ; en détectant quels sont les événements lors desquels la charge mentale est la plus élevée, on peut décider d'exercices à effectuer en simulateur pour diminuer la charge mentale si ces événements venaient à se reproduire.

Le second point soulève la question de la pertinence de l'utilisation d'un simulateur, à deux titres. Le premier titre est la différence qui peut exister entre un sujet naïf dans un environnement non-écologique (en laboratoire par exemple) et un pilote professionnel dans un environnement écologique (un simulateur de vol réaliste). Il est probable que ces deux populations réagissent différemment à un même type de stimulation ou d'interface (principalement car les pilotes développent des aptitudes spécifiques liées à leur métier) ; il faudrait donc établir des bases de données (expérimentales et opérationnelles) et des bases de références propres aux pilotes, puisque la comparaison avec un groupe contrôle serait biaisée (dans le cas d'un suivi longitudinal individuel, la comparaison avec un groupe contrôle reste pertinente pour évaluer les différences entre les deux populations). De plus, les pilotes eux-mêmes pourraient avoir des comportements différents entre l'aéronef réel et le simulateur de vol. En effet, l'engagement est un problème inhérent à l'utilisation de simulateur et il est difficilement résoluble.

## b. La mise en œuvre

Cependant, les résultats présentés dans ce manuscrit montrent qu'il est possible de systématiser une approche basée sur la mesure de l'interface et de la machine, plutôt que sur la mesure du pilote. Cela présente deux avantages majeurs. D'une part cela évite d'instrumenter et d'équiper les pilotes lorsque l'on souhaite mesurer tel ou tel phénomène (comme la charge mentale) ; ce qui constitue un véritable atout car les pilotes d'aéronef sont particulièrement rétifs à l'idée d'instrumentation de leurs paramètres physiologiques et les contraintes du milieu aéronautique rendent l'utilisation de capteurs dans les cockpits des aéronefs trop complexe. D'autre part, cela permet d'effectuer des mesures sur des vols réels et pas seulement sur des vols simulés. En effet, les paramètres dont semble avoir besoin notre modèle pour estimer la charge mentale ne nécessite pas d'ajout de capteur sur l'aéronef, il pourrait fonctionner avec les données de l'avion ou de l'hélicoptère telles qu'elles sont déjà mesurées (le retour d'effort ou le déplacement des commandes de vol par exemple).

Être en mesure de récolter les données des vols réels pourrait permettre d'établir de grandes bases de données, bien plus importantes que toutes celles que nous pourrions essayer de constituer sur simulateur (les pilotes utilisent leur aéronef tous les jours alors qu'ils n'utilisent des simulateurs que quelque fois par an). Ce serait donc idéal pour évaluer le style perceptivo-moteur de chaque pilote. Par exemple en comparant les trajectoires d'approche de N pilotes différents sur la même piste du même aéroport (trajectoire effectuée T fois par chaque pilote).

Il sera ainsi possible de voir si le style perceptivo-moteur a une influence sur le pilotage. Par exemple en réalisant la même tâche mais sous des conditions météorologiques différentes, le pilote exécute-t-il la tâche de la même façon ? En d'autres termes, à quel point le pilote est-il dépendant de ses entrées sensorielles ? Arrive-t-il à en faire abstraction ? Rappelons qu'une des qualifications requises pour obtenir une licence de pilotage est d'être capable de voler aux instruments, c'est-à-dire en faisant abstraction des informations sensorielles à disposition.

Toutefois, comme nous l'avons vu avec le crash du vol AF447 entre Rio de Janeiro et Paris, il arrive que les informations des instruments de vol soient erronées ou indisponibles. Il arrive alors que les pilotes soient contraints d'utiliser leurs systèmes sensoriels pour comprendre la situation dans laquelle ils se trouvent. Il faut donc, quoi qu'il arrive, faire un suivi longitudinal du système sensorimoteur des pilotes. D'une part via des tests cliniques classiques et réguliers (exposition du sujet à des stimulations visuelles, vestibulaires et/ou proprioceptives) ; d'autre part via des tests psychophysiques adaptés à leur profession (retour à l'équilibre après une déviation passive, sensibilités aux illusions visuelles et vestibulaires, etc.).

Une piste de réflexion qui permettrait de faciliter la compréhension et la mesure du style perceptivo-moteur des pilotes est celle des *frequency tuned channels*. Les mouvements humains du regard et de la posture ont une gamme de fréquence large, qui varie de 0 à 20 Hz avec une majorité des signaux situés sous le seuil des 10 Hz (Antonsson & Mann, 1985; Khusainov et al., 2013). Cette large gamme de fréquence n'est pas gérée uniformément au niveau neuronal. Il existe plusieurs récepteurs sensoriels, plusieurs réseaux de neurones, plusieurs motoneurones différents, plusieurs fibres musculaires différentes, etc. Ce sont les « frequency tuned channels » (Julesz & Miller, 1975; Straka et al., 2009). Il serait donc intéressant d'observer les comportements des pilotes dans des scénarios où le spectre fréquentiel des tâches sensorimotrices à effectuer et/ou des perturbations de l'assiette de l'aéronef varient.

### III. L'assistant personnel de l'opérateur, outil de demain ?

« Une intelligence Avenante logée comme une araignée au fond d'une base de données pense à eux, amoureuxment, à chaque instant. Elle accueille sans se lasser, le plus infime, le plus intime, le plus insignifiant de leur comportement, l'interprète comme un désir secret, pour un jour pouvoir y répondre, au bon endroit et au bon moment. Les experts ricains appellent ça l'Ad libitum. Quelqu'un connaît leurs goûts, devine leurs désirs, quelqu'un anticipe leurs besoins. Bonheur ! Vive le MOA ! My Own Assistant ! »

*Les Furtifs* (Alain Damasio, 2019)

#### 1. Le pilote automatique, pionnier des assistants intelligents

Un autre angle d'approche pour analyser et valoriser les résultats présentés dans ce manuscrit est celui des assistants personnels dits « intelligents ». Comme cela a été évoqué dans l'introduction générale, ces assistants sont des outils basés sur l'intelligence artificielle, dans le sens où ils fournissent à l'opérateur une assistance basée sur des techniques d'intelligence artificielle. Un exemple concret déjà implémenté dans certains véhicules automobiles sur le marché est celui de la « prévention de la déviation ». Grâce à des caméras présentes sur la carrosserie et à de la reconnaissance d'image, le véhicule équipé d'une telle fonctionnalité peut émettre un son (ou une alarme) lorsqu'il dévie de sa trajectoire (et franchit une ligne de séparation de route par exemple). Ce dispositif est notamment utile pour lutter contre les accidents dus à la somnolence du conducteur.

Il est également possible d'envisager des assistants personnels intelligents capables d'effectuer certaines tâches (répétitives, par exemple) à la place de l'opérateur. Néanmoins, ce genre d'assistants existe déjà depuis longtemps en aéronautique et il n'est pas forcément

« intelligent » : ce sont les dispositifs de pilotage automatique. Ces dispositifs permettent plusieurs types de maintien automatique de l'aéronef : maintien du cap, maintien de l'altitude, etc. Les plus poussés d'entre eux peuvent même opérer intégralement l'aéronef (vitesse et trajectoire). Ce sont en quelque sorte les pionniers des assistants personnels intelligents tels que nous les voyons apparaître dans le monde aujourd'hui.

Les pilotes automatiques sont devenus une part intégrante du pilotage, tant sur les aéronefs les plus compliqués (il existe sur certains modèles une dizaine de modes différents tous utiles au pilote selon les situations) que sur les plus « simples » (sur un Paris – New-York en avion de ligne conventionnel, le pilote automatique est complètement désactivé pendant seulement six minutes en moyenne).

Les premiers prototypes de ce qui deviendront les systèmes de pilote automatique sont nés dans les années dix, et ont été inventés par la Sperry Corporation (Nayler, 1974). Ces dispositifs permettaient de maintenir un cap et une altitude sans intervention du pilote. En parallèle, des dispositifs similaires ont été développés par la compagnie aérienne allemande, la Deutsche Lufthansa, dans les années vingt (Oppelt, 1976). Le rationnel derrière l'implémentation de ces systèmes était de pouvoir voler en toutes circonstances, notamment de nuit ou par mauvais temps, c'est-à-dire dans les situations où les pilotes éprouvaient des difficultés à opérer leur appareil.

Le premier exemple d'utilisation d'un pilote automatique date de 1914, lorsque Lawrence Sperry fit démonstration des capacités du dispositif de la Sperry Corporation à Paris. Au début des années vingt, un pétrolier de la société Standard Oil fut le premier navire à utiliser un pilote automatique. Enfin, plus de vingt ans plus tard, en 1949, a débuté la production du Piasecki HUP-2 Retriever, le premier hélicoptère à intégrer un module de pilotage automatique.

De nos jours, les hélicoptères modernes peuvent avoir jusqu'à une dizaine de modes de pilote automatique différents. Ces modes permettent de maintenir le cap, l'altitude, d'amortir les mouvements en lacet, ou encore de stabiliser l'appareil vis-à-vis des turbulences extérieures. La grande étendue des modes disponibles et l'aspect « confort de vol » de certains d'entre eux (notamment ceux d'amortissement et de stabilisation) rendent possible l'existence d'une variabilité interindividuelle importante dans l'utilisation du pilote automatique (certains pilotes utilisent la stabilisation en permanence alors que d'autres ne l'activent jamais).

Les résultats présentés dans ce manuscrit montrent que la proportion de temps passée avec certains modes de pilote automatique activés était un paramètre qui pouvait s'avérer pertinent pour estimer la charge mentale. C'est notamment le cas de la stabilisation (face aux contraintes extérieures) horizontale et verticale. C'est cohérent avec le fait que les moments où ces modes sont les plus utiles (et donc activés) sont généralement des moments où les contraintes extérieures (notamment le vent) sont suffisamment fortes pour que le pilote ait besoin d'une assistance pour diminuer ses ressources attentionnelles dédiées à la prise en compte desdites contraintes sur son appareil et sa conduite.

On peut également se demander si l'utilisation du pilotage automatique ne pourrait pas être un marqueur du style perceptivo-moteur des pilotes. En effet, il est possible – selon le niveau d'expérience ou d'expertise par exemple – que deux pilotes différents aient deux utilisations tout à fait différentes des modes de pilotage automatique.

## 2. Contours et cahier des charges de l'assistant personnel

### a. Cahier des charges

La notion d'assistant personnel intelligent est, en aéronautique, une prolongation du pilotage automatique. Il s'agit d'étendre les capacités d'automatisation des tâches à de nouveaux champs (comme la résolution des alarmes, le changement de cap en cas de météo défavorable sur le plan de vol initial, la correction de trajectoires de vol trop dangereuses, etc.).

Néanmoins, si l'on déploie un assistant personnel intelligent dans les aéronefs, il faut que ce dernier soit capable de fournir des informations pertinentes pour l'opérateur. Dans le cas contraire, la situation pourrait en réalité être aggravée : on sature potentiellement d'autant plus l'opérateur qu'il va devoir prendre en compte des informations non-pertinentes et utiliser une partie de ses ressources attentionnelles et cognitives pour les ignorer. Cette nécessité absolue de pertinence pose la question de la reconnaissance par l'assistant intelligent de la tâche en cours, afin de délivrer un conseil ou des informations pertinentes pour la résoudre. Cela suppose de colliger un ensemble de données très hétérogènes : état de l'appareil, état de l'opérateur, état de l'environnement, ensemble des procédures applicables à situation donnée, etc.

Il est donc nécessaire pour l'assistant personnel de décrire différents états :

- L'état de la machine. C'est sans doute le plus simple, il s'agit d'avoir des capteurs de vitesse, d'altitude, de cap, etc.
- L'état de l'interface. Là encore, la complexité n'est *a priori* pas au rendez-vous, il s'agit de connaître l'état (déplacement et retour de force) des commandes de vol et des différents systèmes de vol.
- L'état de l'opérateur. C'est sans aucun doute l'aspect le plus compliqué à mettre en œuvre. Une première approche consisterait à mesurer l'état physiologique de l'opérateur (conductance cutanée, rythme cardiaque, etc.). Toutefois, comme nous l'avons vu à plusieurs reprises précédemment, ce n'est pas tenable d'un point de vue opérationnel. C'est pourquoi un modèle tel que nous l'avons proposé dans le présent manuscrit pourrait s'avérer utile. S'il est confirmé que l'on peut inférer l'état mental (ou tout du moins le niveau de charge mentale) de l'opérateur en mesurant « simplement » l'interface homme-machine, alors cette étape serait grandement facilitée. Connaître l'état mental de l'opérateur est fondamental pour un assistant personnel car c'est cela qui va déterminer à quel moment il doit – ou non – fournir des informations, des conseils ou une assistance à son opérateur.

Une solution – du point de vue de l'assistant personnel – possible pour estimer l'état mental de l'opérateur est de créer un jumeau numérique de ce dernier. En effet, des études récentes (Löcklin et al., 2021; M. E. Miller & Spatz, 2022; Wang et al., 2024) proposent des cadres pour créer des jumeaux numériques d'opérateurs (essentiellement dans le milieu de l'industrie manufacturière). Toutefois, ces jumeaux se reposent essentiellement sur des données physiologiques pour reproduire l'état de l'opérateur ; il y aurait donc une première étape à effectuer, pour établir un jumeau numérique performant en s'affranchissant des données physiologiques.

## b. Contours

Les différents états des différentes parties prenantes (opérateur, machine et interface) ont des lignes de base, ou lignes de référence :

- La référence opérateur : ce sont les valeurs prises par ces états lorsqu'un opérateur en particulier est mesuré lors de la résolution d'une tâche en particulier. Cela constitue une sorte d'enveloppe personnelle ; en d'autres termes, l'assistant personnel saura que pour telle tâche effectuée par tel opérateur, les capteurs doivent – en moyenne – prendre une certaine fourchette de valeurs. Si les capteurs prennent des valeurs en dehors de l'enveloppe personnelle de l'opérateur, alors il peut y avoir un problème, notamment une charge mentale trop élevée (dans le meilleur des cas) ou un accident plus grave (perte de conscience du pilote).
- La référence « base de données » : c'est exactement la même chose que précédemment, mais moyennée sur un ensemble d'opérateurs (à l'échelle d'une compagnie aérienne par exemple). Cette seconde enveloppe traduit la colligation des différentes individualités de la première référence. Elle est notamment utile pour éviter de déclencher une alarme « faux positif ». En effet, si l'opérateur sort de son enveloppe personnelle mais reste dans des standards acceptables vis-à-vis de la référence « base de données », alors c'est qu'il n'y a peut-être aucun problème à signaler et nulle alarme à déclencher.
- La référence « théorique » : cette dernière découle des manuels théoriques et des procédures de vol établies par les constructeurs et les compagnies aériennes. Elle définit ce qui est acceptable en terme « d'enveloppe maximale ». Une autre solution pour obtenir différemment cette référence pourrait être d'utiliser des programmes d'intelligence artificielle qui utilisent de l'apprentissage automatique par renforcement. Cette technique a permis – sans connaissance humaine préalable implémentée dans les algorithmes – à des programmes informatiques d'apprendre à jouer aux échecs ou au go en dépassant les performances humaines (McGrath et al., 2022; Hongming Zhang & Yu, 2020), ou encore d'apprendre à des robots à marcher (Haarnoja et al., 2018; Lele et al., 2020). Il semble donc possible de créer un programme capable d'apprendre à piloter un avion ou un hélicoptère – de façon simulée – *ex nihilo*, ce qui pourrait constituer une référence théorique acceptable et donner des enveloppes maximalistes du champ des possibles. C'est en réalité déjà expérimenté sur des drones quadrimoteur (Mohamed et al., 2021; Xu et al., 2019).

On peut également envisager de fournir à l'assistant personnel l'impact qu'ont certains facteurs neurophysiologiques (charge mentale, attention, fatigue) sur la façon dont l'opérateur utilise sa machine. Ainsi, l'assistant personnel sera en mesure d'anticiper ou non certains aspects de la gestion des équipages (par exemple le roulement des pilotes dans les vols très longs courriers où le nombre de pilotes est supérieur à trois).

Une des limitations possibles du principe des enveloppes susmentionné est celle induite par le style perceptivo-moteur propre à chaque opérateur. En effet, on peut imaginer que certains opérateurs, au style très marqué, ait des enveloppes personnelles totalement disjointes des deux autres enveloppes (ou, à tout le moins, fortement disjointes). Dans ce cas, la tâche de l'assistant

personnel serait complexifiée car un des critères principaux défini précédemment repose sur la comparaison permanente des enveloppes entre elles. L'assistant serait alors dans une situation où il ne peut que comparer l'enveloppe personnelle avec elle-même, ce qui limite intrinsèquement ses capacités de détection d'anomalies.

### 3. L'engagement, véritable défi à l'heure de l'IA

Une autre limitation à l'implémentation toujours plus importante d'automatismes en tout genre (pilote automatique, assistant personnel, etc.) dans le cockpit est le défi que représente l'engagement des opérateurs dans leur tâche. On entend ici par engagement le fait pour un opérateur d'être engagé, investi dans sa tâche pour la résoudre.

En effet, des études menées sur le niveau d'automatisation montre un impact positif du niveau d'automatisation sur les tâches de routine qui se déroule sans accroc, mais un impact négatif lorsqu'un certain niveau de criticité est dépassé (Onnasch et al., 2014). Les auteurs montrent qu'en cas de défaillance du système, un degré d'automatisation plus élevé implique une situation d'autant plus mal gérée. C'est en quelque sorte l'effet du bûcheron : « plus ils grimpent, plus ils tombent de haut ».

Cela pose donc la question de la pertinence des assistants personnels intelligents. Il faut que ces derniers soient très bien conçus, sinon leur impact sera presque nécessairement négatif. En effet, ils sont théoriquement prévus pour pallier les manquements de l'opérateur en situations extrêmes, précisément les situations pour lesquelles un degré d'automatisation plus élevé a un impact négatif.

Cette notion d'engagement pose également la question de l'engagement en environnement simulé. En effet, nous ne pouvons pas affirmer avec certitude que les expériences présentées dans ce manuscrit auraient eu exactement les mêmes résultats si elles avaient menées sur des avions réels ; il existe toujours un certain degré de différence entre la réalité et la simulation. La littérature existante à ce sujet tend à montrer que les performances obtenues en environnements simulés sont directement liées au sentiment de présence ressenti par le sujet ; en d'autres termes, à la fidélité avec laquelle sont reproduits les stimuli en simulateur par rapport à la réalité (Jerome & Witmer, 2004). Une autre étude (Kaber et al., 2012) a montré que la performance décroît avec la difficulté des tâches mises en jeu. Le simulateur utilisé dans les expériences présentées ici est le plus fidèle possible ; toutefois la difficulté des tâches demandées était très variable et parfois très élevée, nous ne pouvons donc pas conclure que les pilotes ont agi et réagi exactement comme ils l'auraient fait en situation réelle.

Enfin, se pose la question de l'intrication entre le pilote automatique et l'enménagement. Est-ce que l'utilisation du pilote automatique brise la relation entre l'humain et la machine ou est-ce qu'au contraire la relation perdure pendant et au-delà de son utilisation ? Nous envisageons deux hypothèses contradictoires qu'il faudra vérifier par une expérience appropriée :

- L'utilisation du pilote automatique sort le pilote de la boucle de contrôle de l'appareil, et donc entrave sa capacité à intégrer le comportement de ce dernier dans son modèle interne.

- Au contraire, l'utilisation du pilote automatique est un moyen pour le pilote de ramener le comportement de son appareil dans un espace plus contraint au sein duquel il est plus aisé pour lui d'anthropomorphiser la situation.

On voit donc que la question de l'engagement n'est pas triviale à l'heure de l'intelligence artificielle. Il s'agit de trouver le juste milieu, la juste balance entre de nouveaux systèmes capables de soulager (en partie) certains besoins des opérateurs (pour limiter leur charge mentale, leur fatigue, etc.) mais qui ne soient pas délétères vis-à-vis de leur efficacité, en leur faisant perdre le niveau d'engagement suffisant pour accomplir leurs tâches avec succès et en toute sécurité.

## IV. Perspectives

“I believe we’ve reached the end of our journey. All that remains is to collapse the innumerable possibilities before us. Are you ready to learn what comes next?”

*Outer Wilds* (Mobius Digital, 2019)

### 1. Amélioration du modèle proposé

Les suggestions faites précédemment concernant les enveloppes et les assistants personnels suggèrent que nous devrions apporter plusieurs modifications substantielles au modèle d’apprentissage automatique proposé au [CHAPITRE 3](#). Il paraît fondamental de personnaliser les modèles d’estimation de charge mentale. En d’autres termes, plutôt que d’avoir un modèle entraîné sur un ou deux vols effectués par N pilotes, il serait pertinent d’avoir N vols effectués par un même pilote, qui sera sa base de données personnelle. Cette base de données servira de référence à son assistant personnel pour évaluer la bonne tenue du vol dans l’enveloppe « référence opérateur ».

De plus, notre approche repose sur de l’apprentissage supervisé. En d’autres termes, les « seules » données utilisées sur l’ensemble du jeu de données sont celles situées autour (temporellement parlant) des moments où les pilotes ont exprimé à l’oral l’estimation de leur charge mentale. De façon grossièrement calculée, cela ne représente que 10% des données récoltées au total. De nouvelles approches existent depuis quelques années pour pallier ce « problème ».

La première approche consiste à labéliser grossièrement le reste des données (Ishida et al., 2017). C’est-à-dire, plutôt que de labéliser précisément (entre 0 et 100) la charge mentale à tout instant, cette approche permettrait de tirer parti du reste de jeu de données en apposant des mentions plus grossières, telles que « charge mentale élevée » ou « charge mentale basse » lorsque c’est pertinent. Par exemple, lorsque les pilotes sont en situation d’attente (dans nos scénarios, c’est le cas lorsque le personnel médical embarque et débarque à l’hôpital), il est raisonnable de penser qu’ils sont en charge mentale basse à ces instants.

La deuxième approche utilise des algorithmes supplémentaires pour améliorer les performances de modèles d’apprentissage automatique supervisé, en utilisant les données non labellisées (Goldman & Zhou, 2000; Lu et al., 2021).

Enfin, demeure la question de la mesure du style perceptivo-moteur d'un individu. Il est possible que cette question se résolve naturellement en individualisant les modèles d'estimation de charge mentale. En effet, qui dit modèle individuel, dit paramètres pertinents à mesurer par individu ; les paramètres pertinents à mesurer pour tel ou tel pilote pourraient être le reflet de son style personnel.

## 2. Réduction de la complexité par l'utilisation des mathématiques symboliques

Il est tout à fait envisageable que les outils que nous avons proposé de développer dans le présent manuscrit soient également utiles aux instructeurs, lors de la phase de formation initiale des élèves-pilotes. Le défi est alors de taille : comment rendre intelligible – facilement et rapidement – à un instructeur (qui n'est pas forcément familier ni de ces outils ni de ces notions) l'éventail des solutions proposées précédemment ?

La réponse pourrait se trouver dans les mathématiques symboliques. En première approximation, on peut envisager ce domaine comme une façon de représenter des données. Par exemple, plutôt que d'afficher une série temporelle qui donne le niveau de charge mentale estimée (entre 0 et 100) à tout instant de l'élève-pilote, on peut imaginer une frise qui alterne entre le vert (quand la charge mentale est acceptable) et rouge (lorsqu'elle est trop élevée) ; ainsi, d'un simple coup d'œil, l'instructeur est en mesure de voir si son élève est dans un état mental acceptable. La facilité de consultation d'une telle donnée (rouge *vs.* vert) donne la possibilité de multiplier les affichages, et de donner une représentation de tous les états mentaux pertinents : fatigue, attention, etc.

Ce champ de la topologie s'appelle les codes-barres (Ghrist, 2008). Ce nom peut sembler d'autant plus pertinent lorsque seulement deux couleurs sont en jeu (comme les véritables codes-barres en noir et blanc), mais on peut en réalité imaginer avoir un nombre plus important de couleurs à notre disposition, afin de pouvoir signifier un gradient (par exemple : charge mentale basse, charge mentale moyenne et acceptable, charge mentale élevée et charge mentale intolérable). Ainsi, les codes-barres (et les mathématiques symboliques en général) permettent de réduire la dimension et la complexité des séries temporelles.

Par ailleurs, les mathématiques symboliques permettent également d'avoir sous forme de données (symboliques) certains paramètres qui sont difficiles à intégrer dans nos modèles à présent. Par exemple, ce pourrait être une bonne méthode pour intégrer l'environnement à nos jeux de données. Les conditions météorologiques seraient ainsi représentées sous forme d'une série temporelle symbolique, qui prend certaines valeurs (ou couleurs) selon la situation : bleu s'il pleut, blanc s'il neige, gris s'il y a du brouillard, etc.

## 3. Quelles évolutions pour le cockpit du futur ?

L'embodiment (ou cognition incarnée) est-il possible avec une machine aussi complexe qu'un aéronef ?

Plus la machine opérée est complexe, plus le nombre de degrés de liberté pour l'opérer est grand, plus la modélisation interne (c'est-à-dire sa représentation dans notre cognition) est difficile à réaliser. Pour réussir à incarner une machine très complexe, le pilote va donc opérer à

une restriction du nombre de degrés de liberté à sa disposition. Notamment, il va pour cela utiliser des modèles existants inhérents à d'autres situations, plus simples. Par exemple le pilote peut utiliser les lois naturelles du mouvement humain pour « anthropomorphiser » son aéronef. Nous avons rapidement vu ce concept en introduction, nous avons proposé de l'appeler « enmachinement » : la conjugaison de l'embodiment (d'une machine trop complexe pour l'être réellement) avec l'anthropomorphisation (qui permet la réalisation de cet embodiment).

Si le pilote réalise en effet cet enmachinement, nous pourrions alors retrouver des similitudes dans la façon dont il agit au sol (« dans son corps ») et en l'air (« dans sa machine »). Les pistes sont nombreuses pour étayer cette hypothèse, tant les lois régissant les mouvements humains naturels sont elles aussi très nombreuses : la loi de l'exposant 2/3 (Lacquaniti et al., 1983), la minimum jerk theory (Kyriakopoulos & Saridis, 1988), la main sequence (Bahill et al., 1975), les mouvements naturels de la tête, etc.

Nous proposons ainsi de modifier la façon dont sont conçues les machines complexes, et il faut que cette conception prenne en compte cette anthropomorphisation – si elle existe – afin d'en simplifier l'opérabilité. L'aboutissement ultime (mais très certainement utopique) serait d'avoir des cockpits et des interfaces qui s'adaptent au pilote. En effet, nous avons vu qu'il existe une variabilité interindividuelle, source de différences dans l'approche fine face à certaines tâches. Il serait ainsi possible d'avoir des interfaces qui s'adaptent à leur opérateur, afin de leur faciliter l'exécution des tâches. Cette adaptabilité pourrait être une partie intégrante des assistants personnels intelligents.

Enfin, la dernière étape serait de mettre en place un compagnonnage adaptatif et une surveillance de l'opérateur par une « super-machine » (par exemple son assistant personnel). Nous avons vu quelle forme pourrait prendre ce point, notamment en passant par des jumeaux numériques des pilotes (ou des opérateurs en général). Toutefois, on risquerait de se retrouver avec une situation de cercle vicieux : on aurait une machine (l'hélicoptère) qui est surveillée par un humain (le pilote) qui est surveillé par une machine (l'assistant personnel intelligent). A ce compte, il est aisé d'imaginer l'étape suivante : à savoir, avoir un humain – dans la tour de contrôle par exemple – qui surveille l'assistant personnel pour vérifier qu'il ne donne pas d'indications aberrantes.

# Conclusion générale

---

“Piece of cake. I’m an escape artist.”

*Final Fantasy IX* (Hironobu Sakaguchi, 2000)

Les résultats présentés dans ce manuscrit s’inscrivent dans le contexte général des facteurs humains aéronautiques. Ces derniers sont l’ensemble des contributions humaines à la réalisation d’une tâche à bord d’un aéronef. C’est un modèle d’étude pour un problème beaucoup plus général : l’étude des interfaces homme-machine complexes (ici, un simulateur d’hélicoptère). De fait, les facteurs humains sont devenus un problème primordial en ce qui concerne ces interfaces et notamment dans le domaine de l’aéronautique. Si les avions et les hélicoptères sont maintenant très sûrs d’un point de vue technique, leur complexité structurelle qui croît très rapidement pose le problème de la maîtrise de leur processus de pilotage, ce qu’atteste le fait que 80% des accidents sont maintenant dus à des erreurs humaines. De plus, le contexte dans lequel se sont effectués ces travaux est particulier. Nous sommes au cœur d’une quatrième révolution industrielle, portée par les progrès réalisés ces dernières années par l’intelligence artificielle. Cette révolution va très certainement bouleverser le rapport entre l’être humain et la machine, et notamment les interfaces qui permettent de les mettre en relation.

Nous avons présentés les résultats de deux expériences, toutes deux conduites dans un simulateur d’hélicoptère extrêmement réaliste et qui possède le plus haut de niveau de qualification possible. La première expérience est inspirée de la psychophysique vestibulaire et a permis de mettre en évidence une asymétrie entre la perception des rotations dans les plans frontal et sagittal : les pilotes sont en moyenne plus précis pour se situer dans le premier que dans le second. Cette expérience est surtout l’occasion d’une preuve de concept du point de vue de la sécurité aérienne : le protocole mis en place – qui devra être amélioré le cas échéant – permet de mesurer indirectement la « santé sensorielle » des pilotes. Une telle mesure est essentielle au regard du vieillissement de la population, auquel les pilotes n’échappent pas. Cette étude montre aussi combien les limites de notre cerveau contraignent l’utilisation des machines que ce même cerveau produit, en croyant à tort à sa capacité infinie à les contrôler.

La seconde expérience est une proposition de modèle d'apprentissage automatique d'estimation de charge mentale des pilotes d'hélicoptère. Nous avons choisi une approche basée sur la donnée, c'est-à-dire que nous avons utilisé tous les capteurs à notre disposition : des capteurs physiologiques (rythme cardiaque, suivi du regard, etc.), des capteurs de la simulation (paramètres de vol de l'hélicoptère comme sa vitesse ou son altitude) et des capteurs du simulateur en lui-même (qui nous ont permis de mesurer les actions effectués sur les commandes de vol, notamment). Loin de ce qui était attendu au regard de la littérature existante à ce sujet, les paramètres les plus pertinents pour estimer la charge mentale d'après notre modèle sont ceux situés sur l'interface homme-machine. Ce résultat est encourageant au regard des bouleversements qui vont avoir lieu au niveau de l'interface entre l'humain et la machine. Il convient de tirer pleinement parti de ces résultats, et de profiter des grandes modifications qui vont avoir lieu dans les prochaines années pour que les opérateurs et les machines (augmentées d'assistants personnels ou non) se tirent mutuellement vers le haut.

Enfin, ces résultats doivent avant tout servir à imaginer les contours que peut prendre le suivi longitudinal individuel, dont nous avons montré l'importance en introduction et dans la discussion. Que ce soit en terme de « santé sensorielle » ou de charge mentale, le suivi longitudinal individuel (s'il est correctement effectué) devrait permettre de renforcer la sécurité aérienne. La modalité principale de mise en œuvre proposée dans ce manuscrit est la création d'assistants personnels intelligents, capables de « connaître » leur pilote et de leur soumettre conseils et avertissements en cas de besoin. Cet assistant personnel intelligent est, en quelque sorte, une prolongation logique des systèmes de pilotage automatique déjà existants sur les aéronefs. Il n'est donc pas étonnant que la population des pilotes offre un modèle privilégié pour étudier les opérateurs d'interface homme-machine complexe.

# Références

---

- Aasman, J., Mulder, G., & Mulder, L. J. M. (1987). Operator effort and the measurement of heart-rate variability. *Human Factors*, 29(2), 161–170.
- Agrawal, Y., Carey, J. P., Della Santina, C. C., Schubert, M. C., & Minor, L. B. (2009). Disorders of balance and vestibular function in US adults: data from the National Health and Nutrition Examination Survey, 2001-2004. *Archives of Internal Medicine*, 169(10), 938–944.
- Aldrich, T B, Craddock, W., & McCracken, J. H. (1984). A computer analysis to predict crew workload during LHX scout-attack missions. *US Army Research Institute Field Unit, Fort Rucker, Alabama*.
- Aldrich, Theodore B, Szabo, S. M., & Bierbaum, C. R. (1989). The development and application of models to predict operator workload during system design. In *Applications of human performance models to system design* (pp. 65–80). Springer.
- Allen, D., Ribeiro, L., Arshad, Q., & Seemungal, B. M. (2016). Age-related vestibular loss: current understanding and future research directions. *Frontiers in Neurology*, 7, 231.
- Antonsson, E. K., & Mann, R. W. (1985). The frequency content of gait. *Journal of Biomechanics*, 18(1), 39–47.
- Bahill, A. T., Clark, M. R., & Stark, L. (1975). The main sequence, a tool for studying human eye movements. *Mathematical Biosciences*, 24(3–4), 191–204.
- Bargiotas, I., Nicolai, A., Vidal, P.-P., Labourdette, C., Vayatis, N., & Buffat, S. (2018). The complementary role of activity context in the mental workload evaluation of helicopter pilots: a multi-tasking learning approach. *International Symposium on Human Mental Workload: Models and Applications*, 222–238.
- Barua, S., Ahmed, M. U., & Begum, S. (2020). Towards intelligent data analytics: A case study in driver cognitive load classification. *Brain Sciences*, 10(8), 526.
- Bater, L. R., & Jordan, S. S. (2019). Selective attention. *Encyclopedia of Personality and Individual Differences*, 1.
- Bellenkes, A. H., Wickens, C. D., & Kramer, A. F. (1997). Visual scanning and pilot expertise: the role of attentional flexibility and mental model development. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*.
- Benson, A. J. (1990). Sensory functions and limitations of the vestibular system. *Perception and Control of Self-Motion*, 145–170.
- Benson, A. J., Spencer, M. B., & Stott, J. R. (1986). Thresholds for the detection of the direction of whole-body, linear movement in the horizontal plane. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*.
- Bergmann, J., Bardins, S., Prawitz, C., Keywan, A., MacNeilage, P., & Jahn, K. (2020). Perception of postural verticality in roll and pitch while sitting and standing in healthy subjects. *Neuroscience Letters*, 730, 135055.
- Bermúdez Rey, M. C., Clark, T. K., Wang, W., Leeder, T., Bian, Y., & Merfeld, D. M. (2016).

- Vestibular perceptual thresholds increase above the age of 40. *Frontiers in Neurology*, 7, 162.
- Besson, P., Bourdin, C., Bringoux, L., Dousset, E., Maïano, C., Marqueste, T., Mestre, D. R., Gaetan, S., Baudry, J.-P., & Vercher, J.-L. (2013). Effectiveness of physiological and psychological features to estimate helicopter pilots' workload: A Bayesian network approach. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 14(4), 1872–1881.
- Beylergil, S. B., Karmali, F., Wang, W., Rey, M. C. B., & Merfeld, D. M. (2019). Vestibular roll tilt thresholds partially mediate age-related effects on balance. *Progress in Brain Research*, 248, 249–267.
- Boisgontier, M. P., Olivier, I., Chenu, O., & Nougier, V. (2012). Presbypropria: the effects of physiological ageing on proprioceptive control. *Age*, 34(5), 1179–1194.
- Bonan, I V, Marquer, A., Eskiüzmirli, S., Yelnik, A. P., & Vidal, P.-P. (2013). Sensory reweighting in controls and stroke patients. *Clinical Neurophysiology*, 124(4), 713–722.
- Bonan, Isabelle V, Colle, F. M., Guichard, J. P., Vicaut, E., Eisenfisz, M., Huy, P. T. B., & Yelnik, A. P. (2004). Reliance on visual information after stroke. Part I: Balance on dynamic posturography. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 85(2), 268–273.
- Bonan, Isabelle V, Yelnik, A. P., Colle, F. M., Michaud, C., Normand, E., Panigot, B., Roth, P., Guichard, J. P., & Vicaut, E. (2004). Reliance on visual information after stroke. Part II: Effectiveness of a balance rehabilitation program with visual cue deprivation after stroke: a randomized controlled trial. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 85(2), 274–278.
- Bonanni, M., & Newton, R. A. (1998). Test–retest reliability of the Fukuda Stepping Test. *Physiotherapy Research International*, 3(1), 58–68.
- Breiman, L. (1996). Bagging predictors. *Machine Learning*, 24, 123–140.
- Bringoux, L., Nougier, V., Marin, L., Barraud, P.-A., & Raphel, C. (2003). Contribution of somesthetic information to the perception of body orientation in the pitch dimension. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 56(5), 909–923.
- Broadbent, D. E. (2013). *Perception and communication*. Elsevier.
- Bronstein, A. M. (1999). The interaction of otolith and proprioceptive information in the perception of verticality: the effects of labyrinthine and CNS disease. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 871(1), 324–333.
- Brosel, S., Laub, C., Averdam, A., Bender, A., & Elstner, M. (2016). Molecular aging of the mammalian vestibular system. *Ageing Research Reviews*, 26, 72–80.
- Brouwer, A.-M., Neerincx, M. A., Kallen, V., van der Leer, L., & ten Brinke, M. (2011). EEG alpha asymmetry, heart rate variability and cortisol in response to virtual reality induced stress. *J. Cyberther. Rehabil*, 4(1), 21–34.
- Burian, B. K., Pruchnicki, S., Rogers, J., Christopher, B., Williams, K., Silverman, E., Drechsler, G., Mead, A., Hackworth, C., & Runnels, B. (2013). *Single-pilot workload management in entry-level jets*. NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION MOFFETT FIELD CA AMES RESEARCH CENTER.
- Cain, B. (2007). *A review of the mental workload literature*.
- Cardullo, F., & Zaychik, K. (2013). Vection: What Is It and Can a Simulator Visual System

Induce the Phenomenon? *IMAGE Conference*.

- Carriot, J., Jamali, M., Chacron, M. J., & Cullen, K. E. (2014). Statistics of the vestibular input experienced during natural self-motion: implications for neural processing. *Journal of Neuroscience*, *34*(24), 8347–8357.
- Carriot, J., Jamali, M., Cullen, K. E., & Chacron, M. J. (2017). Envelope statistics of self-motion signals experienced by human subjects during everyday activities: Implications for vestibular processing. *PLoS One*, *12*(6), e0178664.
- Casper, P. A., Shively, R. J., & Hart, S. G. (1987). Decision support for workload assessment: Introducing WC FIELDE. *Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting*, *31*(1), 72–76.
- Castaldo, R., Montesinos, L., Wan, T. S., Serban, A., Massaro, S., & Pecchia, L. (2018). Heart rate variability analysis and performance during a repeated mental workload task. *EMBEC & NBC 2017: Joint Conference of the European Medical and Biological Engineering Conference (EMBEC) and the Nordic-Baltic Conference on Biomedical Engineering and Medical Physics (NBC)*, Tampere, Finland, June 2017, 69–72.
- Castor, M., Hanson, E., Svensson, E., Nählinder, S., Le Blaye, P., MacLeod, I., Wright, N., Ågren, L., Berggren, P., Juppet, V., Hilburn, B., & Ohlsson, K. (2003). *GARTEUR Handbook of Mental Workload Measurement*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3383.4727>
- Chanquoy, L., Tricot, A., & Sweller, J. (2007). *La charge cognitive: Théorie et applications*. Armand Colin.
- Chao, E. Y. S., Armiger, R. S., Yoshida, H., Lim, J., & Haraguchi, N. (2007). Virtual Interactive Musculoskeletal System (VIMS) in orthopaedic research, education and clinical patient care. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, *2*, 1–19.
- Charles, R. L., & Nixon, J. (2019). Measuring mental workload using physiological measures: A systematic review. *Applied Ergonomics*, *74*, 221–232.
- Chiao, A., Hughes, M. L., Premkumar, P. K., & Zoucha, K. (2023). The Effects of Substance Misuse on Auditory and Vestibular Function: A Systematic Review. *Ear and Hearing*, 10–1097.
- Cooksey, F. S. (1946). *Rehabilitation in vestibular injuries*. SAGE Publications.
- Cooper, G. E., & Harper, R. P. (1969). *The use of pilot rating in the evaluation of aircraft handling qualities*. National Aeronautics and Space Administration.
- Corno, L., & Mandinach, E. B. (1983). The role of cognitive engagement in classroom learning and motivation. *Educational Psychologist*, *18*(2), 88–108.
- Cross, M., Qiu, L., Zhong, M., Wang, Y., & Shi, Y. (2022). One-Dimensional Eye-Gaze Typing Interface for People with Locked-in Syndrome. *Adjunct Proceedings of the 35th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 1–3.
- Cullen, K. E. (2014). The neural encoding of self-generated and externally applied movement: implications for the perception of self-motion and spatial memory. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, *7*, 108.
- Curry, R., Jex, H., Levison, W., & Stassen, H. (1979). Final report of control engineering group.

*Mental Workload: Its Theory and Measurement*, 235–252.

- Damsgaard, M., Rasmussen, J., Christensen, S. T., Surma, E., & De Zee, M. (2006). Analysis of musculoskeletal systems in the AnyBody Modeling System. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 14(8), 1100–1111.
- de Greef, T., Lafeber, H., van Oostendorp, H., & Lindenberg, J. (2009). Eye movement as indicators of mental workload to trigger adaptive automation. *Foundations of Augmented Cognition. Neuroergonomics and Operational Neuroscience: 5th International Conference, FAC 2009 Held as Part of HCI International 2009 San Diego, CA, USA, July 19-24, 2009 Proceedings 5*, 219–228.
- de Haart, M., Geurts, A. C., Huidekoper, S. C., Fasotti, L., & van Limbeek, J. (2004). Recovery of standing balance in postacute stroke patients: a rehabilitation cohort study. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 85(6), 886–895.
- De Waard, D., & Brookhuis, K. A. (1996). *The measurement of drivers' mental workload*.
- De Waele, C., Graf, W., Josset, P., & Vidal, P. P. (1989). A radiological analysis of the postural syndromes following hemilabyrinthectomy and selective canal and otolith lesions in the guinea pig. *Experimental Brain Research*, 77(1), 166–182.
- Delp, S. L., Anderson, F. C., Arnold, A. S., Loan, P., Habib, A., John, C. T., Guendelman, E., & Thelen, D. G. (2007). OpenSim: open-source software to create and analyze dynamic simulations of movement. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 54(11), 1940–1950.
- Díaz, H., Cid, F. M., Otárola, J., Rojas, R., Alarcón, O., & Cañete, L. (2019). EEG Beta band frequency domain evaluation for assessing stress and anxiety in resting, eyes closed, basal conditions. *Procedia Computer Science*, 162, 974–981.
- Ding, Y., Cao, Y., Duffy, V. G., Wang, Y., & Zhang, X. (2020). Measurement and identification of mental workload during simulated computer tasks with multimodal methods and machine learning. *Ergonomics*, 63(7), 896–908.
- Długańczyk, J., Gensberger, K. D., & Straka, H. (2019). Galvanic vestibular stimulation: from basic concepts to clinical applications. *Journal of Neurophysiology*, 121(6), 2237–2255.
- Dubois, E. (2017). *Optimisation de la formation des pilotes par l'éducation du comportement oculaire*. Toulouse, ISAE.
- Durantín, G., Gagnon, J.-F., Tremblay, S., & Dehais, F. (2014). Using near infrared spectroscopy and heart rate variability to detect mental overload. *Behavioural Brain Research*, 259, 16–23.
- Eggemeier, F. T., & Wilson, G. F. (1991). *Workload assessment in multi-task environments. Multiple task performance*. DL Damos. London, GB. Taylor & Francis, Ltd.
- Errandonea, I., Beltrán, S., & Arrizabalaga, S. (2020). Digital Twin for maintenance: A literature review. *Computers in Industry*, 123, 103316.
- Ertl, M., Klaus, M., Mast, F. W., Brandt, T., & Dieterich, M. (2020). Spectral fingerprints of correct vestibular discrimination of the intensity of body accelerations. *NeuroImage*, 219, 117015.
- Fairclough, S. H., & Venables, L. (2006). Prediction of subjective states from psychophysiology: A multivariate approach. *Biological Psychology*, 71(1), 100–110.

- Faisal, A. A., Selen, L. P. J., & Wolpert, D. M. (2008). Noise in the nervous system. *Nature Reviews Neuroscience*, *9*(4), 292–303.
- Fallahi, M., Motamedzade, M., Heidarimoghadam, R., Soltanian, A. R., & Miyake, S. (2016). Effects of mental workload on physiological and subjective responses during traffic density monitoring: A field study. *Applied Ergonomics*, *52*, 95–103.
- Falzon, P., & Sauvagnac, C. (2004). Charge de travail et stress. *Ergonomie*, 175–190.
- Farmer, E. W., Belyavin, A. J., Jordan, C. S., Bunting, A. J., Tattersall, A. J., & Jones, D. M. (1995). Predictive workload assessment: Final report. *Farnborough, Hampshire, Defence Research Agency*.
- Farr, E., Altonji, K., & Harvey, R. L. (2021). Locked-In Syndrome: Practical Rehabilitation Management. *PM&R*, *13*(12), 1418–1428.
- Fernandez, C., & Goldberg, J. M. (1976). Physiology of peripheral neurons innervating otolith organs of the squirrel monkey. III. Response dynamics. *Journal of Neurophysiology*, *39*(5), 996–1008.
- Fitze, D. C., Mast, F. W., & Ertl, M. (2023). Human vestibular perceptual thresholds—A systematic review of passive motion perception. *Gait & Posture*.
- Foy, H. J., & Chapman, P. (2018). Mental workload is reflected in driver behaviour, physiology, eye movements and prefrontal cortex activation. *Applied Ergonomics*, *73*, 90–99.
- Freund, Y., & Schapire, R. E. (1997). A decision-theoretic generalization of on-line learning and an application to boosting. *Journal of Computer and System Sciences*, *55*(1), 119–139.
- Frost, R. O., Burish, T. G., & Holmes, D. S. (1978). Stress and EEG-Alpha. *Psychophysiology*, *15*(5), 394–397.
- Fukuda, T. (1959). The stepping test: two phases of the labyrinthine reflex. *Acta Oto-Laryngologica*, *50*(1–2), 95–108.
- Gabaude, C., Baracat, B., Jallais, C., Bonniaud, M., & Fort, A. (2012). *Cognitive load measurement while driving. In: Human Factors: a view from an integrative perspective*. Human Factors and Ergonomics Society.
- Ghrist, R. (2008). Barcodes: the persistent topology of data. *Bulletin of the American Mathematical Society*, *45*(1), 61–75.
- Gianna, C., Heimbrand, S., & Gresty, M. (1996). Thresholds for detection of motion direction during passive lateral whole-body acceleration in normal subjects and patients with bilateral loss of labyrinthine function. *Brain Research Bulletin*, *40*(5–6), 443–447.
- Goldman, S., & Zhou, Y. (2000). Enhancing supervised learning with unlabeled data. *ICML*, 327–334.
- Gopher, D., & Donchin, E. (1986). *Workload: An examination of the concept*.
- Goplen, F. K., Grønning, M., Aasen, T., & Nordahl, S. H. G. (2010). Vestibular effects of diving—a 6-year prospective study. *Occupational Medicine*, *60*(1), 43–48.
- Grabherr, L., Nicoucar, K., Mast, F. W., & Merfeld, D. M. (2008). Vestibular thresholds for yaw rotation about an earth-vertical axis as a function of frequency. *Experimental Brain Research*,

186(4), 677–681.

- Gray, R., Gaska, J., & Winterbottom, M. (2016). Relationship between sustained, orientated, divided, and selective attention and simulated aviation performance: Training & pressure effects. *Journal of Applied Research in Memory and Cognition*, 5(1), 34–42.
- Grier, R. A. (2015). How high is high? A meta-analysis of NASA-TLX global workload scores. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 59(1), 1727–1731.
- Haarnoja, T., Ha, S., Zhou, A., Tan, J., Tucker, G., & Levine, S. (2018). Learning to walk via deep reinforcement learning. *ArXiv Preprint ArXiv:1812.11103*.
- Haburcakova, C., Lewis, R. F., & Merfeld, D. M. (2012). Frequency dependence of vestibuloocular reflex thresholds. *Journal of Neurophysiology*, 107(3), 973–983.
- Hamann, A., & Carstengerdes, N. (2022). Investigating mental workload-induced changes in cortical oxygenation and frontal theta activity during simulated flights. *Scientific Reports*, 12(1), 1–12.
- Harrivel, A. R., Stephens, C. L., Milletich, R. J., Heinich, C. M., Last, M. C., Napoli, N. J., Abraham, N., Prinzel, L. J., Motter, M. A., & Pope, A. T. (2017). Prediction of cognitive states during flight simulation using multimodal psychophysiological sensing. In *ALAA Information Systems-ALAA Infotech@ Aerospace* (p. 1135).
- Hart, S. G. (2006). NASA-task load index (NASA-TLX); 20 years later. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 50(9), 904–908.
- Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. In *Advances in psychology* (Vol. 52, pp. 139–183). Elsevier.
- Hartmann, M., Haller, K., Moser, I., Hossner, E.-J., & Mast, F. W. (2014). Direction detection thresholds of passive self-motion in artistic gymnasts. *Experimental Brain Research*, 232(4), 1249–1258.
- Heerspink, H., Berkouwer, W., Stroosma, O., van Paassen, R., Mulder, M., & Mulder, B. (2005). Evaluation of vestibular thresholds for motion detection in the Simona research simulator. *ALAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit*, 6502.
- Heine, T., Lenis, G., Reichensperger, P., Beran, T., Doessel, O., & Deml, B. (2017). Electrocardiographic features for the measurement of drivers' mental workload. *Applied Ergonomics*, 61, 31–43.
- Hidalgo-Muñoz, A. R., Béquet, A. J., Astier-Juvenon, M., Pépin, G., Fort, A., Jallais, C., Tattegrain, H., & Gabaude, C. (2019). Respiration and heart rate modulation due to competing cognitive tasks while driving. *Frontiers in Human Neuroscience*, 12, 525.
- Hidalgo-Muñoz, A. R., Mouratille, D., Causse, M., Matton, N., & Rouillard, Y. (2018). Cognitive Workload and Personality Style in PilotsHeart Rate Study. *DDI 2018, 6th International Conference on Driver Distraction and Inattention*.
- Higashiyama, A., & Koga, K. (1998). Apparent body tilt and postural aftereffect. *Perception & Psychophysics*, 60(2), 331–347.
- Hogervorst, M. A., Brouwer, A.-M., & Van Erp, J. B. F. (2014). Combining and comparing EEG,

- peripheral physiology and eye-related measures for the assessment of mental workload. *Frontiers in Neuroscience*, 8, 322.
- Honaker, J. A., Boismier, T. E., Shepard, N. P., & Shepard, N. T. (2009). Fukuda stepping test: sensitivity and specificity. *Journal of the American Academy of Audiology*, 20(05), 311–314.
- Hosman, R., & Van der Vaart, J. C. (1978). Vestibular models and thresholds of motion perception. Results of tests in a flight simulator. *Delft University of Technology, Department of Aerospace Engineering, Report LR-265*.
- Houck, J. A., Telban, R. J., & Cardullo, F. M. (2005). *Motion cueing algorithm development: Human-centered linear and nonlinear approaches*.
- Howard, I. P., & Howard, A. (1994). Vection: the contributions of absolute and relative visual motion. *Perception*, 23(7), 745–751.
- Ikehara, C. S., & Crosby, M. E. (2005). Assessing cognitive load with physiological sensors. *Proceedings of the 38th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, 295a-295a.
- Ishida, T., Niu, G., Hu, W., & Sugiyama, M. (2017). Learning from complementary labels. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 30.
- Israel, I., & Berthoz, A. (1989). Contribution of the otoliths to the calculation of linear displacement. *Journal of Neurophysiology*, 62(1), 247–263.
- Israël, I., & Giannopulu, I. (2012). Subjective posture in tridimensional space. *Journal of Vestibular Research*, 22(4), 173–180.
- Jamali, M., Sadeghi, S. G., & Cullen, K. E. (2009). Response of vestibular nerve afferents innervating utricle and saccule during passive and active translations. *Journal of Neurophysiology*, 101(1), 141–149.
- Jaquess, K. J., Lo, L.-C., Oh, H., Lu, C., Ginsberg, A., Tan, Y. Y., Lohse, K. R., Miller, M. W., Hatfield, B. D., & Gentili, R. J. (2018). Changes in mental workload and motor performance throughout multiple practice sessions under various levels of task difficulty. *Neuroscience*, 393, 305–318.
- Jeong, M., & Ko, B. C. (2018). Driver's facial expression recognition in real-time for safe driving. *Sensors*, 18(12), 4270.
- Jerome, C. J., & Witmer, B. G. (2004). Human performance in virtual environments: Effects of presence, immersive tendency, and simulator sickness. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 48(23), 2613–2617.
- Ji, Q., Zhu, Z., & Lan, P. (2004). Real-time nonintrusive monitoring and prediction of driver fatigue. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 53(4), 1052–1068.
- Johnson, F., Semaan, M. T., & Megerian, C. A. (2008). Temporal bone fracture: evaluation and management in the modern era. *Otolaryngologic Clinics of North America*, 41(3), 597–618.
- Johnson, M. K., Blanco, J. A., Gentili, R. J., Jacquess, K. J., Oh, H., & Hatfield, B. D. (2015). Probe-independent EEG assessment of mental workload in pilots. *2015 7th International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering (NER)*, 581–584.
- Jones, E. G. (2012). *The thalamus*. Springer Science & Business Media.

- Jordan, C. S., & Brennen, S. D. (1992). Instantaneous self-assessment of workload technique (ISA). *Defence Research Agency, Portsmouth*.
- Jordan, C. S., Farmer, E. W., & Belyavin, A. J. (1995). The DRA workload scales(DRAWS)- A validated workload assessment technique. *International Symposium on Aviation Psychology, 8 Th, Columbus, OH*, 1013–1018.
- Julesz, B., & Miller, J. E. (1975). Independent spatial-frequency-tuned channels in binocular fusion and rivalry. *Perception, 4*(2), 125–143.
- Kaber, D. B., Li, Y., Clamann, M., & Lee, Y.-S. (2012). Investigating human performance in a virtual reality haptic simulator as influenced by fidelity and system latency. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, 42*(6), 1562–1566.
- Kajiwara, S. (2014). Evaluation of driver's mental workload by facial temperature and electrodermal activity under simulated driving conditions. *International Journal of Automotive Technology, 15*, 65–70.
- Kamada, T., Miyake, S., Kumashiro, M., Monou, H., & Inoue, K. (1992). Power spectral analysis of heart rate variability in Type As and Type Bs during mental workload. *Psychosomatic Medicine, 54*(4), 462–470.
- Karmali, F., Bermúdez Rey, M. C., Clark, T. K., Wang, W., & Merfeld, D. M. (2017). Multivariate analyses of balance test performance, vestibular thresholds, and age. *Frontiers in Neurology, 8*, 578.
- Karmali, F., Goodworth, A. D., Valko, Y., Leeder, T., Peterka, R. J., & Merfeld, D. M. (2021). The role of vestibular cues in postural sway. *Journal of Neurophysiology, 125*(2), 672–686.
- Kasarskis, P., Stehwien, J., Hickox, J., Aretz, A., & Wickens, C. (2001). Comparison of expert and novice scan behaviors during VFR flight. *Proceedings of the 11th International Symposium on Aviation Psychology, 6*.
- Kavounoudias, A., Gilhodes, J.-C., Roll, R., & Roll, J.-P. (1999). From balance regulation to body orientation: two goals for muscle proprioceptive information processing? *Experimental Brain Research, 124*(1), 80–88.
- Kennedy, R. S. (1974). General history of vestibular disorders in diving. *Undersea Biomed Res, 1*(1), 73–81.
- Keriven Serpollet, D., Hartnagel, D., James, Y., Buffat, S., Vayatis, N., Bargiotas, I., & Vidal, P. (2023). Tilt perception is different in the pitch and roll planes in human. *Physiological Reports, 11*(3), e15374.
- Khusainov, R., Azzi, D., Achumba, I. E., & Bersch, S. D. (2013). Real-time human ambulation, activity, and physiological monitoring: Taxonomy of issues, techniques, applications, challenges and limitations. *Sensors, 13*(10), 12852–12902.
- King, S., Priesol, A. J., Davidi, S. E., Merfeld, D. M., Ehtemam, F., & Lewis, R. F. (2019). Self-motion perception is sensitized in vestibular migraine: pathophysiologic and clinical implications. *Scientific Reports, 9*(1), 1–12.
- Klimesch, W. (1999). EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: a review and analysis. *Brain Research Reviews, 29*(2–3), 169–195.

- Kobel, M. J., Wagner, A. R., Merfeld, D. M., & Mattingly, J. K. (2021). Vestibular Thresholds: A Review of Advances and Challenges in Clinical Applications. *Frontiers in Neurology*, *12*, 203.
- Kosti, M. V., Georgiadis, K., Adamos, D. A., Laskaris, N., Spinellis, D., & Angelis, L. (2018). Towards an affordable brain computer interface for the assessment of programmers' mental workload. *International Journal of Human-Computer Studies*, *115*, 52–66.
- Kramer, A. F. (2020). Physiological metrics of mental workload: A review of recent progress. *Multiple-Task Performance*, 279–328.
- Kramer, A. F., Sirevaag, E. J., & Braune, R. (1987). A psychophysiological assessment of operator workload during simulated flight missions. *Human Factors*, *29*(2), 145–160.
- Kramer, A. F., Tham, M., Konrad, C., Wickens, C., Lintern, G., Marsh, R., Fox, J., & Merwin, D. (1994). Instrument scan and pilot expertise. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society*, *1*, 36–40.
- Kyriakopoulos, K. J., & Saridis, G. N. (1988). Minimum jerk path generation. *Proceedings. 1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 364–369.
- Lackner, J. R., & DiZio, P. (1993). Multisensory, cognitive, and motor influences on human spatial orientation in weightlessness. *Journal of Vestibular Research*, *3*(3), 361–372.
- Lackner, J. R., & DiZio, P. (2000). Human orientation and movement control in weightless and artificial gravity environments. *Experimental Brain Research*, *130*(1), 2–26.
- Lacquiniti, F., Terzuolo, C., & Viviani, P. (1983). The law relating the kinematic and figural aspects of drawing movements. *Acta Psychologica*, *54*(1–3), 115–130.
- Lanska, D. J., & Goetz, C. G. (2000). Romberg's sign: development, adoption, and adaptation in the 19th century. *Neurology*, *55*(8), 1201–1206.
- LeBlanc, J., Ducharme, M. B., & Thompson, M. (2004). Study on the correlation of the autonomic nervous system responses to a stressor of high discomfort with personality traits. *Physiology & Behavior*, *82*(4), 647–652.
- Lee, O., & Anderson, C. W. (1993). Task engagement and conceptual change in middle school science classrooms. *American Educational Research Journal*, *30*(3), 585–610.
- Lee, T. L., Shayman, C. S., Oh, Y., Peterka, R. J., & Hullar, T. E. (2020). Reliability of Vestibular Perceptual Threshold Testing About the Yaw Axis. *Ear and Hearing*, *41*(6), 1772–1774.
- Lee, Y.-H., & Liu, B.-S. (2003). Inflight workload assessment: Comparison of subjective and physiological measurements. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, *74*(10), 1078–1084.
- Lele, A. S., Fang, Y., Ting, J., & Raychowdhury, A. (2020). Learning to walk: Spike based reinforcement learning for hexapod robot central pattern generation. *2020 2nd IEEE International Conference on Artificial Intelligence Circuits and Systems (AICAS)*, 208–212.
- Lepecq, J.-C., De Waele, C., Mertz-Josse, S., Teyssedre, C., Huy, P. T. B., Baudonniere, P.-M., & Vidal, P.-P. (2006). Galvanic vestibular stimulation modifies vection paths in healthy subjects. *Journal of Neurophysiology*, *95*(5), 3199–3207.
- Leplat, J. (2002). Éléments pour une histoire de la notion de charge mentale. *Charge Mentale: Notion Floue et Vrai Problème. Toulouse: Octarès.*

- Lew, R. (2014). *Assessing cognitive workload from multiple physiological measures using wavelets and machine learning*. University of Idaho.
- Li, W., Li, R., Xie, X., & Chang, Y. (2022). Evaluating mental workload during multitasking in simulated flight. *Brain and Behavior*, 12(4), e2489.
- Liang, Y., & Lee, J. D. (2014). A hybrid Bayesian Network approach to detect driver cognitive distraction. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 38, 146–155.
- Lim, K., Karmali, F., Nicoucar, K., & Merfeld, D. M. (2017). Perceptual precision of passive body tilt is consistent with statistically optimal cue integration. *Journal of Neurophysiology*, 117(5), 2037–2052.
- Lin, Y.-C., Chan, C.-T., Ting, K.-C., Liu, K.-C., & Hsieh, C.-Y. (2021). Instrumented Romberg test of postural stability in patients with vestibular disorders using inertial measurement units. *2021 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC)*, 1258–1261.
- Liste d'accidents aériens en 2022. (n.d.). Wikipédia.  
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste\\_d%27accidents\\_aériens\\_en\\_2022](https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_d%27accidents_aériens_en_2022)
- Liu, C., Wanyan, X., Xiao, X., Zhao, J., & Duan, Y. (2020). Pilots' mental workload prediction based on timeline analysis. *Technology and Health Care*, 28(S1), 207–216.
- Löcklin, A., Jung, T., Jazdi, N., Ruppert, T., & Weyrich, M. (2021). Architecture of a human-digital twin as common interface for operator 4.0 applications. *Procedia CIRP*, 104, 458–463.
- Loft, S., Sanderson, P., Neal, A., & Mooij, M. (2007). Modeling and predicting mental workload in en route air traffic control: Critical review and broader implications. *Human Factors*, 49(3), 376–399.
- Lorenzini, M., Lagomarsino, M., Fortini, L., Gholami, S., & Ajoudani, A. (2023). Ergonomic Human-Robot Collaboration in Industry: A Review. *Frontiers in Robotics and AI*, 9, 262.
- Lu, N., Lei, S., Niu, G., Sato, I., & Sugiyama, M. (2021). Binary classification from multiple unlabeled datasets via surrogate set classification. *International Conference on Machine Learning*, 7134–7144.
- Lysaght, R. J., Hill, S. G., Dick, A. O., Plamondon, B. D., Linton, P. M., Wierwille, W. W., Zaklad, A. L., Bittner, A. C., & Wherry, R. J. (1989). *Operator workload: Comprehensive review and evaluation of operator workload methodologies*. NTIS (Reprod.).
- Maggi, P., & Di Nocera, F. (2021). Sensitivity of the spatial distribution of fixations to variations in the type of task demand and its relation to visual entropy. *Frontiers in Human Neuroscience*, 15, 642535.
- Majumdar, A., Mak, K., Lettington, C., & Nalder, P. (2009). A causal factors analysis of helicopter accidents in New Zealand 1996-2005 and the United Kingdom 1986-2005. *The Aeronautical Journal*, 113(1148), 647–660.
- Majumdar, S., Al-Habaibeh, A., Omurtag, A., Shakmak, B., & Asrar, M. (2023). A Novel Approach for Communicating with Patients Suffering from Completely Locked-in-Syndrome (CLIS) via Thoughts: Brain Computer Interface System using EEG Signals and Artificial Intelligence. *Neuroscience Informatics*, 100126.

- Marquart, G., Cabrall, C., & de Winter, J. (2015). Review of eye-related measures of drivers' mental workload. *Procedia Manufacturing*, 3, 2854–2861.
- Massion, J., Fabre, J.-C., Mouchnino, L., & Obadia, A. (1995). Body orientation and regulation of the center of gravity during movement under water. *J Vestib Res*, 5(3), 211–221.
- Mbongo, F., Patko, T., Vibert, N., Vidal, P., Huy, P. T. B., & De Waele, C. (2004). Patients with Unilateral Vestibular Lesion Are More Unstable in the Frontal than in the Sagittal Plane: A Dynamic Posturography Study. *JOURNAL OF VESTIBULAR RESEARCH*, 14(2/3), P100–P100.
- McCracken, J. H., & Aldrich, T. B. (1984). Analyses of selected LHX mission functions: Implications for operator workload and system automation goals. *Technical Note ASI*, 24–479.
- McGrath, T., Kapishnikov, A., Tomašev, N., Pearce, A., Wattenberg, M., Hassabis, D., Kim, B., Paquet, U., & Kramnik, V. (2022). Acquisition of chess knowledge in alphazero. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(47), e2206625119.
- Mendes, W. B. (2009). Assessing autonomic nervous system activity. *Methods in Social Neuroscience*, 118(147), 21.
- Milekovic, T., Sarma, A. A., Bacher, D., Simeral, J. D., Saab, J., Pandarinath, C., Sorice, B. L., Blabe, C., Oakley, E. M., & Tringale, K. R. (2018). Stable long-term BCI-enabled communication in ALS and locked-in syndrome using LFP signals. *Journal of Neurophysiology*, 120(7), 343–360.
- Miller, M. E., & Spatz, E. (2022). A unified view of a human digital twin. *Human-Intelligent Systems Integration*, 4(1–2), 23–33.
- Miller, S. (2001). Workload measures. *National Advanced Driving Simulator. Iowa City, United States*.
- Mittelstaedt, H. (1992). Somatic versus vestibular gravity reception in man. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 656(1), 124–139.
- Mohamed, F. A. A., Mohamed, S. W. A., & Mohamed, A. M. O. (2021). Learning to Fly with Deep Reinforcement Learning. *2020 International Conference on Computer, Control, Electrical, and Electronics Engineering (ICCCEEE)*, 1–7.
- Moustafa, K., Luz, S., & Longo, L. (2017). Assessment of mental workload: a comparison of machine learning methods and subjective assessment techniques. *International Symposium on Human Mental Workload: Models and Applications*, 30–50.
- Mozos, O. M., Sandulescu, V., Andrews, S., Ellis, D., Bellotto, N., Dobrescu, R., & Ferrandez, J. M. (2017). Stress detection using wearable physiological and sociometric sensors. *International Journal of Neural Systems*, 27(02), 1650041.
- Muckler, F. A., & Seven, S. A. (1992). Selecting performance measures: "Objective" versus "subjective" measurement. *Human Factors*, 34(4), 441–455.
- Mulder, G., & Mulder—Hajonides van der Meulen, W. (1973). Mental load and the measurement of heart rate variability. *Ergonomics*, 16(1), 69–83.
- Murai, K., Hayashi, Y., Nagata, N., & Inokuchi, S. (2004). The mental workload of a ship's navigator using heart rate variability. *Interactive Technology and Smart Education*, 1(2), 127–133.

- Muthukrishnan, N., Maleki, F., Ovens, K., Reinhold, C., Forghani, B., & Forghani, R. (2020). Brief history of artificial intelligence. *Neuroimaging Clinics*, 30(4), 393–399.
- Naegelin, M., Weibel, R. P., Kerr, J. I., Schinazi, V. R., La Marca, R., von Wangenheim, F., Hoelscher, C., & Ferrario, A. (2023). An interpretable machine learning approach to multimodal stress detection in a simulated office environment. *Journal of Biomedical Informatics*, 139, 104299.
- Nashmi, R., Mendonça, A. J., & MacKay, W. A. (1994). EEG rhythms of the sensorimotor region during hand movements. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 91(6), 456–467.
- Nashner, L. M. (1971). A model describing vestibular detection of body sway motion. *Acta Otolaryngologica*, 72(1–6), 429–436.
- Nayler, J. L. (1974). A Dictionary of Aviation David W. Wragg Osprey Reading, 1973. 206pp. Illustrated. £ 4.45 (in UK only). *The Aeronautical Journal*, 78(758–759), 98.
- Neuper, C., & Pfurtscheller, G. (2001). Evidence for distinct beta resonance frequencies in human EEG related to specific sensorimotor cortical areas. *Clinical Neurophysiology*, 112(11), 2084–2097.
- Nickel, P., & Nachreiner, F. (2003). Sensitivity and diagnosticity of the 0.1-Hz component of heart rate variability as an indicator of mental workload. *Human Factors*, 45(4), 575–590.
- Nicolai, A., & Audiffren, J. (2018). Model-space regularization and fully interpretable algorithms for postural control quantification. *2018 IEEE 42nd Annual Computer Software and Applications Conference (COMPSAC)*, 2, 177–182.
- Nordhoff, S., De Winter, J., Kyriakidis, M., Van Arem, B., & Happee, R. (2018). Acceptance of driverless vehicles: Results from a large cross-national questionnaire study. *Journal of Advanced Transportation*, 2018.
- Nouri, S., & Karmali, F. (2018). Variability in the vestibulo-ocular reflex and vestibular perception. *Neuroscience*, 393, 350–365.
- Onnasch, L., Wickens, C. D., Li, H., & Manzey, D. (2014). Human performance consequences of stages and levels of automation: An integrated meta-analysis. *Human Factors*, 56(3), 476–488.
- Oppelt, W. (1976). *A historical review of autopilot development, research, and theory in Germany*.
- Ormsby, C. C., & Young, L. R. (1977). Integration of semicircular canal and otolith information for multisensory orientation stimuli. *Mathematical Biosciences*, 34(1–2), 1–21.
- Paas, F. G. W. C., Van Merriënboer, J. J. G., & Adam, J. J. (1994). Measurement of cognitive load in instructional research. *Perceptual and Motor Skills*, 79(1), 419–430.
- Pauzié, A., & Pachiardi, G. (1997). Traffic and Transport Psychology: Theory and Application. Chapter 18. Subjective Evaluation of the Mental Workload in The Driving Context. *Traffic and Transport Psychology: Theory and Application*.
- Pavlovic, D. (2019). Acute isolated utricular lesion. *Hearing, Balance and Communication*, 17(2), 189–190.
- Pinault, D. (2004). The thalamic reticular nucleus: structure, function and concept. *Brain Research Reviews*, 46(1), 1–31.

- Priot, A.-E. (2012). *Illusions sensorielles en conditions visuelles dégradées*. Institut de recherche biomédicale des armées (IRBA).
- Rainieri, G., Fraboni, F., Russo, G., Tul, M., Pingitore, A., Tessari, A., & Pietrantoni, L. (2021). Visual Scanning Techniques and Mental Workload of Helicopter Pilots During Simulated Flight. *Aerospace Medicine and Human Performance*, *92*(1), 11–19.
- Reid, G. B., Eggemeier, F. T., & Shingledecker, C. A. (1982). Subjective workload assessment technique. *Proceedings of the 1982 ALAA Workshop on Flight Testing to Identify Pilot Workload and Pilot Dynamics*, 281–288.
- Reid, G. B., & Nygren, T. E. (1988). The subjective workload assessment technique: A scaling procedure for measuring mental workload. In *Advances in psychology* (Vol. 52, pp. 185–218). Elsevier.
- Reid, G. B., Shingledecker, C. A., & Eggemeier, F. T. (1981). Application of conjoint measurement to workload scale development. *Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting*, *25*(1), 522–526.
- Reid, G. B., Shingledecker, C. A., Nygren, T. E., & Eggemeier, F. T. (1981). Development of multidimensional subjective measures of workload. *Proceedings of the 1981 IEEE International Conference on Cybernetics and Society*, *403*, 406.
- Roll, R., Kavounoudias, A., & Roll, J.-P. (2002). Cutaneous afferents from human plantar sole contribute to body posture awareness. *Neuroreport*, *13*(15), 1957–1961.
- Roques, A., James, Y., Bargiotas, I., Keriven Serpollet, D., Vayatis, N., & Vidal, P.-P. (2023). Comparison of vestibular input statistics during natural activities and while piloting an aircraft. *Journal of Neurophysiology*.
- Roques, A., & Vidal, P.-P. (2023). Human-machine coupling: sensorimotor integration of the machine and anthropomorphization as a control scheme. *NCM*, *2023*.
- Roscoe, A. H. (1992). Assessing pilot workload. Why measure heart rate, HRV and respiration? *Biological Psychology*, *34*(2–3), 259–287.
- Rosenberg, M. J., Galvan-Garza, R. C., Clark, T. K., Sherwood, D. P., Young, L. R., & Karmali, F. (2018). Human manual control precision depends on vestibular sensory precision and gravitational magnitude. *Journal of Neurophysiology*, *120*(6), 3187–3197.
- Rosenblatt, F. (1958). The perceptron: a probabilistic model for information storage and organization in the brain. *Psychological Review*, *65*(6), 386.
- Ross, H. E., Dickinson, D. J., & Jupp, B. P. (1970). Geographical orientation under water. *Human Factors*, *12*(1), 13–23.
- Roy, R. N., Hinss, M. F., Darmet, L., Ladouce, S., Jahanpour, E. S., Somon, B., Xu, X., Drougard, N., Dehais, F., & Lotte, F. (2022). Retrospective on the first passive brain-computer interface competition on cross-session workload estimation. *Frontiers in Neuroergonomics*, *3*, 838342.
- Ruben, M. A., van Osch, M., & Blanch-Hartigan, D. (2015). Healthcare providers' accuracy in assessing patients' pain: A systematic review. *Patient Education and Counseling*, *98*(10), 1197–1206.

- Rubio, S., Díaz, E., Martín, J., & Puente, J. M. (2004). Evaluation of subjective mental workload: A comparison of SWAT, NASA-TLX, and workload profile methods. *Applied Psychology*, *53*(1), 61–86.
- Rupert, A. H. (2000). Tactile situation awareness system: proprioceptive prostheses for sensory deficiencies. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, *71*(9 Suppl), A92-9.
- Sadeghi, S. G., Chacron, M. J., Taylor, M. C., & Cullen, K. E. (2007). Neural variability, detection thresholds, and information transmission in the vestibular system. *Journal of Neuroscience*, *27*(4), 771–781.
- Salvucci, D. D., & Goldberg, J. H. (2000). Identifying fixations and saccades in eye-tracking protocols. *Proceedings of the 2000 Symposium on Eye Tracking Research & Applications*, 71–78.
- Sauseng, P., Griesmayr, B., Freunberger, R., & Klimesch, W. (2010). Control mechanisms in working memory: a possible function of EEG theta oscillations. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *34*(7), 1015–1022.
- Scarpari, J. R. S., Ribeiro, M. W., Deolindo, C. S., Aratanha, M. A. A., de Andrade, D., Forster, C. H. Q., Figueira, J. M. P., Corrêa, F. L. S., Lacerda, S. S., & Machado, B. S. (2021). Quantitative assessment of pilot-endured workloads during helicopter flying emergencies: an analysis of physiological parameters during an autorotation. *Scientific Reports*, *11*(1), 1–17.
- Schnakers\*, C., Majerus, S., Goldman, S., Boly\*, M., Van Eeckhout, P., Gay, S., Pellas, F., Bartsch, V., Peigneux, P., & Moonen, G. (2008). Cognitive function in the locked-in syndrome. *Journal of Neurology*, *255*, 323–330.
- Schubert, P., & Kirchner, M. (2014). Ellipse area calculations and their applicability in posturography. *Gait & Posture*, *39*(1), 518–522.
- Seemungal, B. M. (2014). The cognitive neurology of the vestibular system. *Current Opinion in Neurology*, *27*(1), 125–132.
- Sheridan, T. B., & Simpson, R. W. (1979). *Toward the definition and measurement of the mental workload of transport pilots*. Cambridge, Mass.: Massachusetts Institute of Technology, Dept. of ....
- Singh, G., Chanel, C. P. C., & Roy, R. N. (2021). Mental workload estimation based on physiological features for pilot-UAV teaming applications. *Frontiers in Human Neuroscience*, *15*, 692878.
- Singh, M., Fuenmayor, E., Hinchy, E. P., Qiao, Y., Murray, N., & Devine, D. (2021). Digital twin: Origin to future. *Applied System Innovation*, *4*(2), 36.
- Sloane, P. D., Baloh, R. W., & Honrubia, V. (1989). The vestibular system in the elderly: clinical implications. *American Journal of Otolaryngology*, *10*(6), 422–429.
- Smith, E., & Delargy, M. (2005). Locked-in syndrome. *Bmj*, *330*(7488), 406–409.
- Solovey, E. T., Zec, M., Garcia Perez, E. A., Reimer, B., & Mehler, B. (2014). Classifying driver workload using physiological and driving performance data: two field studies. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 4057–4066.
- Stanton, N. A. (2006). Hierarchical task analysis: Developments, applications, and extensions. *Applied Ergonomics*, *37*(1), 55–79.

- Stott, J. R. R. (2013). Orientation and disorientation in aviation. *Extreme Physiology & Medicine*, 2(1), 1–11.
- Straka, H., Lambert, F. M., Pfanzelt, S., & Beraneck, M. (2009). Vestibulo-ocular signal transformation in frequency-tuned channels. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1164(1), 37–44.
- Suri, K., & Clark, T. K. (2020). Human vestibular perceptual thresholds for pitch tilt are slightly worse than for roll tilt across a range of frequencies. *Experimental Brain Research*.
- Tao, D., Tan, H., Wang, H., Zhang, X., Qu, X., & Zhang, T. (2019). A systematic review of physiological measures of mental workload. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(15), 2716.
- Tokuda, S., Obinata, G., Palmer, E., & Chaparro, A. (2011). Estimation of mental workload using saccadic eye movements in a free-viewing task. *2011 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 4523–4529.
- Tribukait, A., Bergsten, E., & Eiken, O. (2016). Pitch-plane angular displacement perception during helicopter flight and gondola centrifugation. *Aerospace Medicine and Human Performance*, 87(10), 852–861.
- Tribukait, A., Ström, A., Bergsten, E., & Eiken, O. (2016). Vestibular stimulus and perceived roll tilt during coordinated turns in aircraft and gondola centrifuge. *Aerospace Medicine and Human Performance*, 87(5), 454–463.
- Valko, Y., Lewis, R. F., Priesol, A. J., & Merfeld, D. M. (2012). Vestibular labyrinth contributions to human whole-body motion discrimination. *Journal of Neuroscience*, 32(39), 13537–13542.
- Van Roon, A. M., Mulder, L. J. M., Althaus, M., & Mulder, G. (2004). Introducing a baroreflex model for studying cardiovascular effects of mental workload. *Psychophysiology*, 41(6), 961–981.
- Vidal, P.-P., & Lacquaniti, F. (2021). Perceptual-motor styles. *Experimental Brain Research*, 1–22.
- Walsh, E. G. (1961). Role of the vestibular apparatus in the perception of motion on a parallel swing. *The Journal of Physiology*, 155(3), 506–513.
- Wang, B., Zhou, H., Li, X., Yang, G., Zheng, P., Song, C., Yuan, Y., Wuest, T., Yang, H., & Wang, L. (2024). Human Digital Twin in the context of Industry 5.0. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 85, 102626.
- Wilson, G. F. (2002). An analysis of mental workload in pilots during flight using multiple psychophysiological measures. *The International Journal of Aviation Psychology*, 12(1), 3–18.
- Xu, J., Du, T., Foshey, M., Li, B., Zhu, B., Schulz, A., & Matusik, W. (2019). Learning to fly: computational controller design for hybrid uavs with reinforcement learning. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 38(4), 1–12.
- Yan, S., Tran, C. C., Wei, Y., & Habiyaremye, J. L. (2017). Driver's mental workload prediction model based on physiological indices. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*.
- You, S. D. (2021). Classification of relaxation and concentration mental states with eeg. *Information*, 12(5), 187.

- Young, M. S., Brookhuis, K. A., Wickens, C. D., & Hancock, P. A. (2015). State of science: mental workload in ergonomics. *Ergonomics*, *58*(1), 1–17.
- Zaichik, L., Rodchenko, V., Rufov, I., Yashin, Y., & White, A. (1999). Acceleration perception. *Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit*, 4334.
- Zalewski, C. K. (2015). Aging of the human vestibular system. *Seminars in Hearing*, *36*(03), 175–196.
- Zhang, Haihong, Zhu, Y., Maniyeri, J., & Guan, C. (2014). Detection of variations in cognitive workload using multi-modality physiological sensors and a large margin unbiased regression machine. *2014 36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 2985–2988.
- Zhang, Hongming, & Yu, T. (2020). AlphaZero. *Deep Reinforcement Learning: Fundamentals, Research and Applications*, 391–415.
- Zhang, J., Li, J., & Wang, R. (2020). Instantaneous mental workload assessment using time–frequency analysis and semi-supervised learning. *Cognitive Neurodynamics*, *14*, 619–642.

