



HAL
open science

Étude de la prise de décision chez les pilotes d'aviation commerciale : relation entre le contrôle cognitif et la charge mentale

Amine Laouar-Zouyed

► **To cite this version:**

Amine Laouar-Zouyed. Étude de la prise de décision chez les pilotes d'aviation commerciale : relation entre le contrôle cognitif et la charge mentale. Sciences cognitives. Université de Bretagne Sud, 2021. Français. NNT : 2021LORIS590 . tel-03519605

HAL Id: tel-03519605

<https://theses.hal.science/tel-03519605v1>

Submitted on 10 Jan 2022

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.

THESE DE DOCTORAT DE

L'UNIVERSITE BRETAGNE SUD

ECOLE DOCTORALE N° 603
Education, Langages, Interaction, Cognition, Clinique
Spécialité : Ergonomie

Par

Amine LAOUAR-ZOUYED

Etude de la prise de décision chez les pilotes d'aviation commerciale : Relations entre le contrôle cognitif et la charge mentale

Thèse présentée et soutenue à Lorient, le 29 mars 2021
Unité de recherche : Lab-STICC UMR CNRS 6285
Thèse N° : 590

Rapporteurs avant soutenance :

Frederic Vanderhaegen
Julien Cegarra

Professeur, Université Polytechnique des Hauts-de-France
Professeur, Institut National Universitaire Champollion

Composition du Jury :

Président : Prénom Nom
Examineurs : Françoise Darses
Pascal Berruet

Fonction et établissement d'exercice
Professeur, Institut de Recherche Biomédicale des Armées
Professeur, Université de Bretagne Sud

Dir. de thèse : Christine Chauvin
Enc. de thèse : Philippe Rauffet
Enc. de thèse : Marie-Christine Bressolle

Professeur, Université de Bretagne Sud
Maître de Conférences, Université de Bretagne Sud
Facteurs Humains Dr en Ergonomie, Airbus Opérations S.A.S.

Titre : Étude de la prise de décision chez les pilotes d'aviation commerciale : Relations entre le contrôle cognitif et la charge mentale

Mots clés : Prise de décision, contrainte, astreinte, contrôle cognitif, charge mentale, cockpit

Cette thèse vise à étudier les facteurs de dégradation dans la prise de décision des pilotes d'avion dans des situations dynamiques, en vue de définir les principes d'une assistance à la prise de décision dans les futurs cockpits d'avion.

L'analyse des processus de prise de décision dans le domaine aéronautique a permis de centrer la problématique sur la question du contrôle cognitif. Nous avons considéré le Modèle de Contrôle Contextuel (Hollnagel, 1993), qui présente quatre modes de contrôle cognitif - stratégique, tactique, opportuniste et brouillé, du plus au moins proactif - et nous avons exploré les liens entre ces modes, la contrainte de la situation, et l'astreinte des opérateurs. Cela a abouti à l'hypothèse que l'on pouvait déterminer le mode de contrôle cognitif instancié à partir de la connaissance de la contrainte et de la mesure de l'astreinte, via des mesures physiologiques (rythme cardiaque) ou neurophysiologiques (oxygénation du cortex préfrontal).

A l'aide d'une Analyse Cognitive du Travail réalisée sur l'activité de pilotage, nous avons

construit et mené deux expérimentations afin d'explorer les liens évoqués ci-dessus : l'une en laboratoire avec des étudiants confrontés au logiciel MATB-II, l'autre en simulateur de vol avec des pilotes experts confrontés à des scénarios extrêmement dégradés. Les résultats expérimentaux ont confirmé les liens entre les modes de contrôle et la contrainte, montrant une adoption préférentielle du mode tactique lorsque la contrainte est faible. Nous avons également observé un lien entre modes de contrôle et astreinte. En effet, le taux d'oxygénation sanguine du cortex préfrontal est plus bas pour le mode tactique que pour les autres modes. Enfin, ces deux expérimentations ont montré que le mode tactique est le plus efficace, puisqu'il est associé au plus faible niveau d'astreinte et à des performances correctes.

Les apports de cette étude sont discutés au regard des perspectives concernant le développement d'assistances adaptatives.

Title: Study of commercial pilots' decision-making: Links between cognitive control and mental workload

Keywords: Decision-making, mental stress, mental strain, cognitive control, mental workload, cockpit

This thesis aims to study the degradation factors of pilots' decision-making in dynamic situations, with the purpose of defining the principles for a decision-making assistance in future cockpits.

The analysis of aviation decision-making processes allowed to focus the problematic on the question of cognitive control. We considered the Contextual Control Model (Hollnagel, 1993), which have four cognitive control modes – strategic, tactical, opportunistic and scrambled, from the more proactive to the less – and we explored the links between these modes, the situation's mental stress (as defined by DIN EN ISO 10075-1:2017) and the operators' mental strain. This led to the hypothesis that we could determine the cognitive control mode instantiated by assessing the mental stress and measuring the strain via physiological (cardiac pace) or neurophysiological measures (prefrontal cortex oxygenation).

With the help of a Cognitive Work Analysis carried on piloting activity, we built and conducted two experimentations in order to explore the aforementioned links: one in laboratory with university students confronted to the MATB-II software, the other in a flight simulator with expert pilots who faced extremely degraded scenarios. The experimental results confirmed the links between control modes and mental stress showing a preferential adoption of the tactical mode when the mental stress is low. We also observed a link between control modes and mental strain. Indeed, the prefrontal cortex blood oxygenation rate is lower for the tactical mode than for the other modes. Finally, these two experimentations showed that the tactical mode was the most efficient, associated with lower mental strain and adequate performances.

The results of this study are discussed with regards to the perspectives about the development of adaptive assistances.

REMERCIEMENTS

Force est de constater qu'au cours de ces quatre années de thèse, j'ai bénéficié de conditions de travail exceptionnelles. Des conditions qui m'ont amené à travailler dans des lieux qui, passionné d'aviation comme je suis, me font rêver depuis l'enfance. Qui m'ont amené à faire de belles découvertes (notamment la Bretagne pour laquelle j'ai eu un coup de cœur), et à réaliser de belles choses en travaillant sur un thème passionnant. Tout ceci grâce à de nombreuses personnes qui ont tout fait pour que cette thèse se passe au mieux et aboutisse et que j'aimerais sincèrement remercier.

- Marie-Christine Bressolle, mon encadrante au sein d'Airbus, qui est à l'origine de ce projet. Merci d'avoir fait en sorte que ce projet voit le jour. Merci pour ta bienveillance dès le premier entretien téléphonique de juin 2016. Merci d'avoir fait en sorte que mon intégration au sein d'Airbus se passe le mieux possible, de m'avoir introduit auprès de nombreuses personnes, d'avoir été là à chaque souci ou incertitude et de m'avoir aidé à chaque fois que j'en ai eu besoin. Merci, surtout, d'avoir veillé au grain en supervisant l'avancement de mes travaux, et pour ton encadrement ferme qui a permis bien des fois de garder cette thèse sur la bonne voie.
- Christine Chauvin, ma directrice de thèse. Je te remercie d'avoir accepté de diriger ces travaux, ce fut un honneur de travailler avec toi. Je te remercie pour ton accueil à Lorient ; la première fois que je suis venu, tu m'as même emmené voir la mer. Je te remercie pour ton extrême rigueur à tous les niveaux, depuis les concepts théoriques jusqu'aux accents circonflexes manquants. Merci pour la transmission de ton savoir, tes précieux conseils, tes propositions de correction, tes suggestions de lectures... Tu en as énormément fait, et je t'en suis reconnaissant.
- Philippe Rauffet, mon encadrant de thèse. Sans toi je serais peut-être encore en train d'analyser mes résultats expérimentaux. Je te remercie pour ton aide précieuse de tous les instants, pour nos discussions sur les modèles théoriques, pour m'avoir activement aidé dans la mise au point de mes expérimentations, dans le traitement de mes données expérimentales, et bien d'autres choses, sans lesquelles ces travaux seraient non seulement loin d'être ce qu'ils sont, mais également loin d'être terminés.

Merci encore à vous trois qui n'avez pas compté votre temps pour m'aider dans ma progression. Ma gestion du temps n'a pas été évidente, mais vous avez toujours répondu présents lorsqu'il s'agissait de relire mes écrits et de proposer des corrections. Un énorme merci pour m'avoir permis d'amener cette thèse à son terme !

- Je remercie chaleureusement Pascal Berruet d'avoir accepté de présider mon jury de soutenance ainsi que Françoise Darses, Julien Cegarra et Frédéric Vanderhaegen d'avoir accepté de faire partie de mon jury et de relire mes travaux. Vos retours me sont très précieux. Une mention particulière pour Françoise Darses, qui a participé à mes Comités de Suivi de Thèse au cours de ces quatre années, et dont les compliments, critiques et remarques pertinentes m'ont aidé à me poser les bonnes questions et à faire avancer les travaux dans le bon sens.

- Je souhaite adresser de sincères remerciements à l'équipe Human Factors & Ergonomics in Design d'Airbus. Merci tout d'abord pour votre superbe accueil, je me suis vraiment senti des vôtres. Je remercie bien sûr Christine Bézard de m'avoir ouvert les portes de cette fabuleuse équipe et d'avoir permis l'acquisition de matériel d'expérimentation conséquent, j'ai littéralement été gâté. Merci à Nathalie Papin d'avoir brillamment pris le relais, et d'avoir pris le temps chaque mois de discuter avec moi pour s'assurer que tout allait bien. Un remerciement en particulier à Sonja Biede et Kevin Le Goff pour avoir accepté avec bienveillance de relire ma thèse, et ce malgré leur forte charge de travail. Merci ensuite aux nombreuses personnes qui m'ont, à un moment ou à un autre, aidé dans mes travaux, de la simple discussion aux réunions régulières ; je pense notamment à Marielle Plat-Robain, Luigi Macchi, Romain Chaumillon, Thomas Barre, Jérôme Barbé, Florence Beaujard, Caroline Alamini Rodrigues, Estelle Delpech, Laurent Spaggiari, Laura Fersing, Caroline Ducrocq, Emmanuelle Cannesson, Marina Giuseppin, Florence Burratto, Benoît Papaïx, Laetitia Thenault, Charlotte Heulin... pour ne citer qu'eux.

- J'aimerais remercier en particulier Farida Saïd du Laboratoire de Mathématiques de Bretagne Atlantique (UBS) pour m'avoir aidé à démystifier les analyses statistiques. Merci pour nos réunions pendant lesquelles tu prenais du temps pour m'expliquer avec simplicité des choses qui me paraissaient hors de portée, et pour avoir participé aux

analyses statistiques de mes données. Grâce à toi, ces analyses ont atteint une nouvelle dimension ! J'aimerais également remercier Ferial Boulfani, doctorante de l'Institut de Mathématiques de Toulouse en thèse CIFRE au sein d'Airbus, qui a également pris beaucoup de temps pour m'aider à initier mes analyses statistiques et à les orienter dans la bonne direction.

- ➔ Je souhaite remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de mes expérimentations. Concernant l'expérimentation en laboratoire, je remercie vivement les responsables du département Hygiène, Sécurité, Environnement de l'IUT de l'Université de Bretagne Sud à Lorient d'avoir accepté que je réalise mon expérimentation au sein de leurs locaux, et que je recrute leurs étudiants pour mes sessions, et ce même pendant leurs heures de cours, ce qui me fut très précieux. Je remercie chaleureusement les étudiants surnommés d'avoir participé avec enthousiasme à mes expérimentations (et pas seulement pour échapper à une heure de cours), vous êtes à l'origine de beaux résultats. Concernant l'expérimentation en simulateur de vol, je souhaite sincèrement remercier les pilotes Valérie Dautry-Emery, Shaun Wildey, Claude Holveck et Thierry Bourges d'avoir pris le temps de longuement discuter afin de m'aider à concevoir des scénarios optimisés et de les avoir testés. Merci à Florian Le Borgne d'avoir longuement échangé avec moi et mis en place ces scénarios dans le simulateur ; tu as su parfaitement retranscrire ce que je voulais réaliser. Un immense merci à l'ingénieur navigant Philippe Baulleret et aux pilotes Thierry Bourges et Philippe Castaings de m'avoir permis de voler sur A350 afin de mieux appréhender les opérations à bord de ce type de cockpit. C'était un rêve, il est devenu réalité. Je remercie sincèrement le pilote Thomas Wilhelm de m'avoir « prêté » ses pilotes pour mes expérimentations, à une période qui était pourtant la plus chargée pour eux. J'étais assuré d'avoir un pilote à chacune de mes sessions, et c'est quelque chose d'incalculable. Enfin, je remercie les pilotes ayant participé à mes expérimentations d'avoir accepté d'endurer les scénarios adverses en simulateur. Je ne les citerai pas, par souci d'anonymat, mais je leur en suis extrêmement reconnaissant.

- ➔ Une mention spéciale à mes collègues de HDG (ex-Bertin Ergonomie) qui m'ont accueilli pendant quelques semaines avant le début officiel de ma thèse, qui ont tout de suite su m'intégrer à leur équipe et à leurs projets, et qui ont su répondre à mes premiers questionnements de jeune doctorant. Merci en particulier à Kevin Mandrick et Daniel

Lewkowicz pour les discussions neuroscientifiques que nous avons pu avoir, notamment concernant la spectroscopie proche infrarouge.

- ➔ Je souhaite remercier mes compagnons de thèse, qu'ils soient à Toulouse ou à Lorient. Nataly, Edouard, Fanny, Soraya, Alexandre, Rani, Sophie, Amandine. Merci pour les discussions, les pauses café et les déjeuners qui m'ont permis de garder ma motivation et de lever des doutes quand j'en avais besoin. Je n'oublie bien évidemment pas mes collègues non-thésards, Franck Lainé, Frank Chalvet, Thomas Jausset... Pardon à ceux que j'aurais oublié, l'erreur est humaine.

- ➔ Enfin, sur un plan plus personnel, je souhaite remercier mes proches, auprès de qui j'ai pu me ressourcer, qu'ils soient à Lyon ou à Toulouse. Merci tout d'abord à mes amies et compagnons de licence et de master, Audrey, Chloé, Estelle, Manon, Marielle. Chacune de nos rares réunions a été une bouffée d'oxygène pour moi et m'a permis de repartir à Toulouse remotivé. Promis, j'aurai bien plus de temps libre pour qu'on se réunisse ! Ensuite à mes amis d'enfance, Amir et Mohamed. Bien que l'on n'ait pas pu se voir souvent, chacun à un coin du pays, chacune de nos rencontres m'a permis de m'évader un peu, de me déconnecter de ma thèse le temps de quelques heures, pour mieux m'y replonger ensuite. Je vous remercie pour ça. Et enfin, je ne pourrai jamais assez remercier les trois femmes de ma vie. Ma maman Malika, ma sœur Ines, et ma compagne Dounya, qui ont dû patiemment supporter mes longues absences d'un côté ou de l'autre de la France ; et quand j'étais présent, j'étais plongé dans mes travaux dans un coin. Merci de votre soutien de tous les instants, de vos rappels à la raison lorsque je travaillais encore à 23 h et que je n'avais pas encore dîné, de m'avoir chouchouté quand j'en avais besoin, de vos allers-retours incessants à la gare ou à l'aéroport pour venir me chercher, de vos relectures malgré le fait que le sujet soit loin de vos domaines respectifs, et tant d'autres choses que je ne pourrais citer. Cette thèse est un peu la nôtre, j'espère que vous en serez fières (oui, Ines, c'est toi qui as tout fait !).

*En hommage à feu mon papa, à qui un jour j'ai fait un avion en papier, et qui m'a dit
« Tu sais, c'est très compliqué de fabriquer un avion, il faut être très intelligent ».*

Je pourrais fièrement lui répondre aujourd'hui que j'ai apporté ma pierre à l'édifice.

LEXIQUE

ATC :	<i>Air Traffic Control</i>
ATIS :	<i>Automatic Terminal Information Service</i>
CDM :	<i>Critical Decision Method for Eliciting Knowledge</i>
CFIT :	<i>Controlled Flight Into Terrain</i>
COCOM :	<i>COntextual COntrol Model</i>
COFOR :	<i>COmmon Frame Of Reference</i>
ConTA :	<i>Analyse des Tâches de Contrôle</i>
CPF :	<i>Cortex Préfrontal</i>
CRM :	<i>Crew Ressources Management</i>
CWA :	<i>Cognitive Work Analysis</i>
CWS :	<i>Common Work Space</i>
DLPFC :	<i>Dorsolateral Prefrontal Cortex</i>
DME :	<i>Distance Measuring Equipment</i>
DSM :	<i>Dynamic Situation Management</i>
ECG :	<i>Electrocardiographie</i>
EEG :	<i>Electroencéphalographie</i>
EFB :	<i>Electronic Flight Bag</i>
ELAC :	<i>Elevator Aileron Computer</i>
FAC :	<i>Flight Augmentation Computer</i>
FCOM :	<i>Flight Crew Operating Manual</i>
FMA :	<i>Flight Mode Annunciator</i>
FMGC :	<i>Flight Management and Guidance Computer</i>
fNIRS :	<i>functional Near Infrared Spectroscopy</i>
FRAM :	<i>Functional Resonance Analysis Method</i>
GA :	<i>Go Around</i>
GPWS :	<i>Ground Proximity Warning System</i>
HbO ₂ :	<i>Hémoglobine oxygénée</i>
HFACS :	<i>Human Factors Analysis and Classification System</i>
HHb :	<i>Hémoglobine déoxygénée</i>
ILS :	<i>Instrument Landing System</i>
IRMf :	<i>Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle</i>

LOC :	<i>Localizer</i>
MABA-MABA :	<i>Men Are Better At – Machines Are Better At</i>
MATB :	<i>Multi-Attribute Task Battery</i>
MCC :	<i>Modes de Contrôle Cognitif</i>
MCT :	<i>Maximum Continu</i>
ND :	<i>Navigation Display</i>
NDM :	<i>Naturalistic Decision-Making</i>
NTSB :	<i>National Transportation Safety Board</i>
OACI :	<i>Organisation Internationale de l'Aviation Civile</i>
OPS :	<i>Opérations d'une compagnie aérienne</i>
PAX :	<i>Passagers</i>
PF :	<i>Pilot Flying</i>
PFD :	<i>Primary Flight Display</i>
PM :	<i>Pilot Monitoring</i>
PNC :	<i>Personnel Navigant Commercial</i>
RPD :	<i>Recognition-Primed Decision</i>
RVSM :	<i>Reduced Vertical Separation Minima</i>
SA :	<i>Situation Awareness</i>
SEC :	<i>Spoiler Elevator Computer</i>
SOCA :	<i>Social Organization and Cooperation Analysis</i>
SOP :	<i>Standard Operating Procedures</i>
SPO :	<i>Single Pilot Operation</i>
SRK :	<i>Skill-Rule-Knowledge</i>
TCAS :	<i>Traffic alert and Collision Avoidance System</i>
VLPFC :	<i>Ventrolateral Prefrontal Cortex</i>
VOR :	<i>VHF Omnidirectionnal Range</i>
VRC :	<i>Variabilité du Rythme Cardiaque</i>
WDA :	<i>Work Domain Analysis</i>

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	16
---------------------------	-----------

PARTIE THEORIQUE.....	20
------------------------------	-----------

CHAPITRE 1. LA SITUATION DE TRAVAIL DES PILOTES.....	23
---	-----------

1.1 UNE SITUATION DE TRAVAIL COMPOSEE DE DIFFERENTS « SYSTEMES ».....	24
1.2 LE PILOTAGE D'AVION : UNE ACTIVITE DE CONTROLE EN SITUATION DYNAMIQUE	28
1.3 UN SYSTEME SOCIOTECHNIQUE COMPLEXE	30
1.3.1 DEFINITION DE L'AUTOMATISATION	31
1.3.2 AVANTAGES LIES A L'AUTOMATISATION	31
1.3.3 PROBLEMATIQUES INDUITES PAR L'AUTOMATISATION.....	34
1.3.4 LES EVOLUTIONS DE LA PHILOSOPHIE DE CONCEPTION DES AUTOMATISMES.....	37
1.4 DES CARACTERISTIQUES DES SITUATIONS DE TRAVAIL AUX EXIGENCES COGNITIVES	40

CHAPITRE 2. ETAT DE L'ART DES MODELES DE PRISE DE DECISION.....	42
--	-----------

2.1 MODELES DE LA PRISE DE DECISION	43
2.2 MODELES DE COMPREHENSION DE LA SITUATION	51
2.2.1 COMPREHENSION D'UNE SITUATION COURANTE	51
2.2.2 COMPREHENSION D'UNE SITUATION INHABITUELLE	54
2.2.3 CONCLUSION	57
2.3 MODELES DU CONTROLE COGNITIF	57
2.4 CONCLUSION.....	64

CHAPITRE 3. ACTIVITE DE DECISION ET ERREURS DE DECISION DANS L'AVIATION	
--	--

COMMERCIALE	67
--------------------------	-----------

3.1 COMPRENDRE LES ERREURS HUMAINES EN AVIATION.....	68
3.1.1 QUELS MODELES POUR DECRIRE L'ERREUR HUMAINE EN AVIATION ?	68
3.1.2 ANALYSE DES ACCIDENTS D'AVION A L'AIDE DE L'OUTIL HFACS.....	74

3.2	MECANISMES MENANT AUX ERREURS DE DECISION	78
3.2.1	QUELLES DEFAILLANCES MENENT AUX ERREURS DE DECISION ?	78
3.2.2	QUELS SONT MECANISMES, CONTEXTUELS OU COGNITIFS, DE GENERATION DES ERREURS DE DECISION ? 80	
3.3	CONCLUSION.....	83

CHAPITRE 4. REGULATIONS ET CHARGE MENTALE **84**

4.1	CONTROLE COGNITIF ET MECANISMES DE REGULATION.....	85
4.2	REGULATIONS ET VARIATIONS DE LA CHARGE MENTALE	87
4.3	MOYENS DE MESURE DE LA CHARGE MENTALE	94
4.3.1	MESURE DE L'ACTIVITE CEREBRALE A L'AIDE DE LA SPECTROSCOPIE INFRAROUGE	95
4.3.2	MESURE DE LA VARIABILITE DU RYTHME CARDIAQUE	101
4.3.3	AUTRES MESURES PHYSIOLOGIQUES	104
4.3.4	MESURES SUBJECTIVES.....	106
4.3.5	CONCLUSION	107

CHAPITRE 5. PROBLEMATIQUE **108**

PARTIE EMPIRIQUE **112**

CHAPITRE 6. ANALYSE COGNITIVE DU TRAVAIL DES PILOTES..... **115**

6.1	ENVIRONNEMENT DE TRAVAIL : LE COCKPIT	117
6.2	APPLICATION DE LA CWA.....	120
6.2.1	ANALYSE DU DOMAINE DE TRAVAIL	120
6.2.2	ANALYSE DES TACHES DE CONTROLE.....	122
6.2.3	ANALYSE DES STRATEGIES	125
6.2.4	ANALYSE DE L'ORGANISATION DU SYSTEME ET DE LA COOPERATION.....	126
6.3	CONCLUSION.....	128

CHAPITRE 7. MODES DE CONTROLE COGNITIF ET CHARGE MENTALE : UNE APPROCHE EXPERIMENTALE UTILISANT UN MICRO-MONDE **129**

7.1	METHODE	130
7.1.1	PARTICIPANTS	131
7.1.2	DISPOSITIF EXPERIMENTAL	131
7.1.3	PROTOCOLE EXPERIMENTAL	135
7.1.4	MESURES ET CODAGES	136
7.1.5	METHODE D'ANALYSE DES DONNEES	138
7.2	RESULTATS	139
7.2.1	EFFET DE LA CONTRAINTE SUR LES MODES DE CONTROLE	139
7.2.2	RELATIONS ENTRE LA CONTRAINTE ET L'ASTREINTE	141
7.2.3	RELATIONS ENTRE LES MODES DE CONTROLE ET L'ASTREINTE	143
7.3	DISCUSSION	143
7.4	CONCLUSION	145

CHAPITRE 8. MODES DE CONTROLE COGNITIF ET CHARGE MENTALE : EXPERIMENTATION EN SIMULATEUR DE VOL AVEC DES EXPERTS147

8.1	METHODE	149
8.1.1	PARTICIPANTS	149
8.1.2	DISPOSITIF EXPERIMENTAL	149
8.1.3	SCENARIOS	149
8.1.4	PROTOCOLE EXPERIMENTAL	153
8.1.5	DECISIONS ET CODAGE DES MODES DE CONTROLE COGNITIF	155
8.1.6	DONNEES PHYSIOLOGIQUES	166
8.1.7	METHODES D'ANALYSE DES DONNEES	166
8.2	RESULTATS	167
8.2.1	INDICATEURS COMPORTEMENTAUX, INSTANCIATION DES MODES DE CONTROLE COGNITIF	167
8.2.2	ANALYSE DES INDICATEURS PHYSIOLOGIQUES, RECHERCHE D'UN PATTERN D'ACTIVATION PHYSIOLOGIQUE EN FONCTION DES MODES DE CONTROLE COGNITIF	170
8.3	DISCUSSION	174
8.3.1	LIENS ENTRE LA CONTRAINTE ET L'ASTREINTE	174
8.3.2	LIENS ENTRE LA CONTRAINTE ET LES MODES DE CONTROLE COGNITIF	174
8.3.3	LIENS ENTRE L'ASTREINTE ET LES MODES DE CONTROLE COGNITIFS	175

8.4 CONCLUSION.....	178
<u>CONCLUSION GENERALE DE LA PARTIE EMPIRIQUE</u>	<u>179</u>
<u>CONCLUSION GENERALE</u>	<u>183</u>
APPORTS DE LA THESE	186
LIMITES ET PERSPECTIVES	189
<u>RÉFÉRENCES</u>	<u>191</u>

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 - ECHELLE DOUBLE DE PRISE DE DECISION (RASMUSSEN, 1974)	44
FIGURE 2 - ÉVOLUTION DE L'ECHELLE DOUBLE DE PRISE DE DECISION. TIRE DE JENKINS ET AL. (2010).....	45
FIGURE 3 - EXEMPLE D'UTILISATION DE L'ECHELLE DOUBLE AU SEIN D'UNE CWA. TIRE DE LINTERN & NAIKAR, 1998.....	46
FIGURE 4 - MODELE DE DIAGNOSTIC ET DE PRISE DE DECISION EN SITUATION DYNAMIQUE (HOC & AMALBERTI, 1994).	47
FIGURE 5 - LES TROIS CAS DE FIGURE DU MODELE RPD (KLEIN, 1998).	49
FIGURE 6 - LE MODELE DE SITUATION AWARENESS ET SON LIEN AVEC LA PRISE DE DECISION EN SITUATION DYNAMIQUE (ENDSLEY, 1995).....	52
FIGURE 7 - LE CYCLE PERCEPTUEL DE NEISSER (1976) (TIRE DE HOLLNAGEL, 1998).....	52
FIGURE 8 - ILLUSTRATION DES TROIS NIVEAUX DE FONCTIONNEMENT CHEZ LES OPERATEURS HUMAINS (RASMUSSEN, 1983).	58
FIGURE 9 - RELATIONS ENTRE LES PARAMETRES ET LES FONCTIONS DU MODELE COCOM (HOLLNAGEL, 1998).....	60
FIGURE 10 - MODES DE CONTROLE EN FONCTION DE LA COMPREHENSION DE LA SITUATION (HOLLNAGEL, 1998).....	61
FIGURE 11 - EFFETS DE L'EXPERTISE SUR LE CONTROLE COGNITIF (HOC & AMALBERTI, 2007).....	63
FIGURE 12 - LE MODELE « SWISS CHEESE » DE CAUSE DES ACCIDENTS. TIRE DE SHAPPELL & WIEGMANN (2000).	70
FIGURE 13 - VUE DE SYNTHESE DU SYSTEME D'ANALYSE ET DE CLASSIFICATION DES FACTEURS HUMAINS. TIRE DE WIEGMANN & SHAPPELL, 2003.	72
FIGURE 14 - MODELE DE CONTROLE COMPENSATOIRE. TIRE DE HOCKEY, 2003.	86
FIGURE 15 - MODELE COGNITIF-ENERGETIQUE A NIVEAUX LINEAIRES DU TRAITEMENT DE L'INFORMATION CHEZ L'HUMAIN (SANDERS, 1983), MONTRANT LES TROIS NIVEAUX D'ACTIVATION, D'EVEIL ET D'EFFORT.....	91
FIGURE 16 - FACTEURS INFLUENÇANT L'EVALUATION SUBJECTIVE DE LA CHARGE MENTALE (CEGARRA, 2012).	92
FIGURE 17 - EXEMPLE DE SYSTEME FNIRS (ICI DE TYPE ARTINIS OCTAMON, SYSTEME UTILISE DANS NOTRE ETUDE), ICI SOUS FORME DE BANDEAU FRONTAL AFIN DE MESURER LES VARIATIONS D'OXYGENATION AU NIVEAU DU CORTEX PREFRONTAL.	97
FIGURE 18 - PLACEMENT DES OPTODES AU NIVEAU DU CPF. 8 EMETTEURS DE LUMIERE SONT PRESENTS (1 A 4 POUR L'HEMISPHERE DROIT, 5 A 8 POUR L'HEMISPHERE GAUCHE) AINSI QUE DEUX RECEPTEURS (R1 POUR LA LUMIERE EMANANT DES EMETTEURS 1 A 4, R2 POUR LES EMETTEURS 5 A 8).	98
FIGURE 19 - EXEMPLE DE RESULTAT OBTENU A L'AIDE D'UNE FNIRS PLACEE AU NIVEAU DU CPF. LES TRACES ROUGES REPRESENTENT LES VARIATIONS EN [HbO ₂], LES BLEUS EN [HHb], LE TOUT AU COURS DU TEMPS. LORSQUE L'ACTIVITE S'ACCROIT AU NIVEAU DU CPF, L'AFFLUX SANGUIN APPORTE UNE QUANTITE D'HbO ₂ SUPERIEURE A LA CONSOMMATION DES NEURONES, CE QUI EXPLIQUE LA DIMINUTION D'[HHb].	98
FIGURE 20 - DETECTION DES BATTEMENTS CARDIAQUES ET MESURE DE L'INTERVALLE R-R ENTRE DEUX BATTEMENTS CONSECUTIFS (D'APRES VIOLA, 2004).....	101
FIGURE 21 - DE LA THEORIE A LA DEMONSTRATION.....	111
FIGURE 22 - VUE GENERALE D'UN COCKPIT D'AIRBUS A350-1000. TIREE DE : HTTPS://WWW.AIRLINERS.NET	118
FIGURE 23 - INSTRUMENTS NECESSAIRES A LA CONDUITE DE L'AVION, PFD A GAUCHE ET ND A DROITE. TIREE DE : HTTPS://IO.WP.COM/BLOGRH-THOMASVILCOT.COM/WP-CONTENT/UPLOADS/2017/06/PLAN-DE-VOL.JPG?SSL=1	119
FIGURE 24 - ANALYSE DU DOMAINE DE TRAVAIL.	121

FIGURE 25 - ÉCHELLE DOUBLE REPRESENTANT L'ANALYSE DES TACHES DE CONTROLE. ADAPTEE DE JENKINS ET AL. (2010).	123
FIGURE 26 - AUTRE REPRESENTATION DE L'ANALYSE DES TACHES DE CONTROLE (INFORMATION FLOW MAP).....	125
FIGURE 27 - ANALYSE DES STRATEGIES.	126
FIGURE 28 - ANALYSE DE L'ORGANISATION DU SYSTEME ET DE LA COOPERATION ENTRE AGENTS (PF = PILOTE EN FONCTION, C'EST-A-DIRE LE PILOTE AUX COMMANDES ; PM = PILOTE MONITORING).	127
FIGURE 29 - CAPTURE D'ECRAN DE LA FENETRE DE LA MATB.	132
FIGURE 30 - APERÇU DE LA TACHE DE GESTION DES RESSOURCES.	133
FIGURE 31 - APERÇU DE LA TACHE DE MAINTIEN DE CIBLE. LE CERCLE BLEU EST A MAINTENIR DANS LE CARRE CENTRAL.	133
FIGURE 32 - APERÇU DE LA TACHE DE SURVEILLANCE DU SYSTEME.	134
FIGURE 33 - APERÇU DE LA TACHE DE MAINTIEN DE CIBLE EN MODE AUTOMATIQUE. NOTER LE MESSAGE « AUTO ON » SUR FOND BLEU EN BAS A DROITE.	135
FIGURE 34 - TROIS SEQUENCES EXPERIMENTALES CROISEES AVEC DEUX NIVEAUX DE COMPLEXITE DE LA TACHE PRINCIPALE.	136
FIGURE 35 - TRANSITIONS ENTRE MODES ENTRE LES PERIODES DE FAIBLE COMPLEXITE DE LA TACHE PRINCIPALE (S1.1, S2.1, S3.1) ET LES PERIODES DE PLUS FORTE COMPLEXITE (S1.2, S2.2, S3.2).	140
FIGURE 36 - INTERACTION DE LA SEQUENCE ET DE LA COMPLEXITE SUR LA VRC.	141
FIGURE 37 - VERS UN EFFET MODERATEUR DU MODE DE CONTROLE SUR LE LIEN ENTRE LA CONTRAINTE ET L'ASTREINTE. A NOTER ICI QUE LA CONTRAINTE EST TRADUITE PAR « MENTAL STRESS » CONFORMEMENT A LA NORME ISO 10075-1:2017.	146
FIGURE 38 - SCHEMA DECRIVANT LE SCENARIO CONTROLE.	152
FIGURE 39 - SCHEMA DECRIVANT LE SCENARIO DE TEST.	153
FIGURE 40 - DETAIL DES TACHES A REALISER ET DES PARAMETRES A PRENDRE EN COMPTE POUR CHAQUE DECISION.	155
FIGURE 41 - DETAIL DES PARAMETRES PERMETTANT LA DETERMINATION DU MODE DE CONTROLE COGNITIF POUR LA DECISION DU SCENARIO CONTROLE.	158
FIGURE 42 - DETAIL DES PARAMETRES PERMETTANT LA DETERMINATION DU MODE DE CONTROLE COGNITIF POUR LA PREMIERE DECISION DU SCENARIO DE TEST.	159
FIGURE 43 - DETAIL DES PARAMETRES PERMETTANT LA DETERMINATION DU MODE DE CONTROLE COGNITIF POUR LA SECONDE DECISION DU SCENARIO DE TEST.	160
FIGURE 44 - DETAIL DES PARAMETRES PERMETTANT LA DETERMINATION DU MODE DE CONTROLE COGNITIF POUR LA TROISIEME DECISION DU SCENARIO DE TEST.	161
FIGURE 45 - SCORES MOYES AU NASA-TLX EN FONCTION DU MODE DE CONTROLE COGNITIF CONCERNANT LA PRESSION TEMPORELLE. * : $p < 0.05$	170
FIGURE 46 - CONCENTRATIONS SANGUINES MOYENNES EN HEMOGLOBINE OXYGENEE AU NIVEAU DE L'OPTODE 1 (A GAUCHE) ET 5 (A DROITE) EN FONCTION DES MODES DE CONTROLE COGNITIF. * : $p < 0,025$; ** : $p < 0,01$	171
FIGURE 47 - VALEURS MOYENNES DES RATIOS LF/HF EN FONCTION DU MODE DE CONTROLE COGNITIF INSTANCIE. ** : $p < 0.01$	172
FIGURE 48 - CONCENTRATIONS SANGUINES MOYENNES EN HEMOGLOBINE OXYGENEE AU NIVEAU DE L'OPTODE 5 (A GAUCHE) ET 7 (A DROITE) EN FONCTION DES DECISIONS. * : $p < 0,025$; ** : $p < 0,01$	173
FIGURE 49 - VALEURS MOYENNES DE SDNN ET DES RATIOS LF/HF EN FONCTION DU MODE DE CONTROLE COGNITIF INSTANCIE. ** : $p < 0.01$	173

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 - CARACTERISTIQUES DES MODES DE CONTROLE (HOLLNAGEL, 1998).....	62
TABLEAU 2 - DESCRIPTION DES CATEGORIES ACTES NON-SURS ET PRECONDITIONS AUX ACTES NON-SURS DU HFACS (WIEGMANN & SHAPPELL, 2003).....	73
TABLEAU 3 - IMPLICATION DES DIFFERENTS TYPES D'ACTES NON SURS DANS LES ACCIDENTS D'AVION	74
TABLEAU 4 - IMPLICATION DE DIFFERENTES CATEGORIES DE PRECONDITIONS DANS LA SURVENUE DES ACCIDENTS	77
TABLEAU 5 - PHASES DE LA CWA ET OUTILS DE FORMATION ASSOCIES.....	117
TABLEAU 6 - CARACTERISATION DES MODES DE CONTROLE.	137
TABLEAU 7 - LIENS ENTRE INDICATEURS CARDIAQUES ET NEUROPHYSIOLOGIQUES, ET COUT COGNITIF.	138
TABLEAU 8 - ADOPTION DES MODES DE CONTROLE COGNITIF EN FONCTION DU NIVEAU DE COMPLEXITE.	139
TABLEAU 9 - MATRICE DES TRANSITIONS ENTRE LE MODE ADOPTE LORSQUE LA COMPLEXITE EST FAIBLE ET LE MODE ADOPTE LORSQUE LA COMPLEXITE EST FORTE	140
TABLEAU 10 - ESTIMATIONS DES EFFETS FIXES DU MODELE LINEAIRE MULTI-EFFETS POUR HbO ₂ SUR LES 8 OPTODES DE LA FNIRS ET POUR LA VRC (LES FACTEURS FIXES RESULTANT DE LA SELECTION DU MODELE PAS A PAS PAR AIC SONT INDIQUES SOUS LES VARIABLES DE REPONSE ; LA CONDITION REFERENCE EST INDIQUEE ENTRE PARENTHESES POUR CHAQUE FACTEUR EXPLICATOIRE, ***p < 0.001, **p < 0.01, *p < 0.05).	142
TABLEAU 11 - DETAIL DES COMPORTEMENTS DES PILOTES EN FONCTION DES MODES DE CONTROLE COGNITIFS, POUR CHAQUE GRANDE FONCTION DE L'ACTIVITE DE PILOTAGE.	151
TABLEAU 12 - DETAIL DES DIFFERENTES ETAPES D'UNE EXPERIMENTATION POUR UN PARTICIPANT, ET DUREES ASSOCIEES A CHAQUE ETAPE.....	154
TABLEAU 13 - QUESTIONS POSEES AU PILOTE DE L'UNE DES SESSIONS D'EXPERIMENTATION, LORS DU DEBRIEFING. LES QUESTIONS POSEES SONT SEPARÉES EN FONCTION DES CATEGORIES DE LA TRAME DU CDM (CASES BLEUES ET QUESTIONS ASSOCIEES)...	164
TABLEAU 14 - EXEMPLES DE CLASSIFICATION DES REPONSES D'UN PILOTE AUX QUESTIONS DE DEBRIEFING.	165
TABLEAU 15 - MODE DE CONTROLE COGNITIF INSTANCIE (MCC) PAR CHAQUE PILOTE EN FONCTION DE LA DECISION (« DC » = DECISION DU SCENARIO CONTROLE. « D1 », « D2 » ET « D3 » = DECISIONS 1, 2 ET 3 DU SCENARIO DE TEST.). LE TABLEAU PRESENTE EGALEMENT LES PARAMETRES PRIS EN COMPTE POUR LA DETERMINATION DU MCC A CHAQUE DECISION.	169



INTRODUCTION

Même si les progrès en matière de sécurité concernent l'ensemble de l'industrie du transport (automobile, ferroviaire, maritime, et aérien), l'avion reste à ce jour le moyen de transport le plus sûr (Allianz & Embry-Riddle Aeronautical University, 2020). Comme le souligne Amalberti (2017, 2018), l'aviation civile fait en effet partie des systèmes ultra-sûrs, caractérisés par un risque d'accident grave estimé à moins d'un par million de mouvements (DGAC, 2018).

Ce haut niveau de sécurité a été atteint grâce notamment à l'automatisation de certaines fonctions de l'avion. L'automatisation a fait son apparition dans les cockpits dès les débuts de l'aviation commerciale (Valdés, Comendador, Sanz & Castán, 2018). Les avions évoluaient alors en vol à vue, et des instruments rudimentaires constituèrent la première étape vers une « virtualisation de l'environnement » (une représentation de l'environnement à l'aide d'instruments). Ensuite, l'aviation a vu le remplacement des systèmes mécaniques par des

systèmes électriques (Valdés *et al.*, Ibid) ; ce sont deux questions principales qui ont orienté les innovations de cette époque : comment voler par mauvais temps, et comment gérer un nombre d'avions en augmentation constante dans un espace aérien donné. À bord, de nouveaux systèmes ont fait leur apparition, tels que le pilote automatique électrique et l'automanette. Ils ont permis une amélioration de la sécurité des vols. L'aviation a ensuite été marquée par l'entrée de l'informatique dans le cockpit. Elle a permis de réduire le nombre d'instruments analogiques en réunissant les informations sur des écrans couleurs. Cette évolution s'est accompagnée d'un renforcement du rôle de supervision du pilote. Le développement de l'automatisation s'est également traduit par une réduction du nombre de pilotes dans les cockpits (de cinq personnes dans les années 1950, à deux dans les années 1980) ; ceci grâce à l'arrivée d'équipements de navigation modernes (par exemple les centrales inertielle de navigation) ou au développement d'équipements tels que les systèmes de surveillance de l'environnement de vol (Bilimoria, Johnson & Schutte, 2014 ; Boy, 2014 ; Vu, Lachter, Battiste & Strybel, 2018).

L'introduction et le développement des automatismes ont entraîné, ainsi, une simplification de certaines tâches du pilote et une augmentation significative de la sécurité des vols liée à une diminution du risque d'erreur (Gawron, 2019). L'automatisation a permis notamment d'améliorer la conscience de la situation des pilotes, tout en réduisant leur charge de travail (Brown, 2016).

Les automatismes ont donc un impact positif sur la performance et la sécurité globale de l'avion lorsqu'ils assistent le pilote ou simplifient ses tâches ; cependant, lorsque sa conception ne prend pas en compte le fonctionnement cognitif de l'opérateur humain, une forte automatisation peut, paradoxalement, s'accompagner d'une dégradation de la performance globale du système homme-machine (Sarter, Mumaw & Wickens, 2007). Sans entrer dans le détail des problématiques liées à l'automatisation, on peut citer le phénomène de complaisance (consistant à accorder une confiance excessive en l'automatisme, Brown, Ibid), l'inattention et la baisse de vigilance induits par une faible charge de travail (Young, Stanton & Harris, 2007), les difficultés à comprendre le fonctionnement des automatismes (Sarter, Woods, & Billings, 1997 ; Wickens, Li, Santamaria, Sebok & Sarter, 2010) ou encore le phénomène de « sortie de boucle » (Endsley & Kiris, 1995 ; Wickens & Kessel, 1979, 1981).

Ces observations ont incité depuis plusieurs décennies à mener une réflexion sur la conception des futurs cockpits, et ce, dans le contexte d'une plus grande automatisation des systèmes. Il est question, ainsi, de nouvelles assistances au pilote visant à simplifier certaines tâches (telles que

la navigation sur la plateforme aéroportuaire, la surveillance de l'environnement et du trafic, etc.), de renforcer son rôle dans la gestion de la mission et la prise de décision et de lui apporter des interfaces plus intuitives. Ces questions s'inscrivent dans un contexte mondial d'augmentation de la performance opérationnelle (optimisation des rotations, diminution de la consommation, etc.) qui passe entre autres par la réduction du nombre de pilotes dans le cockpit, tout en intégrant les questions de charge de travail du pilote et d'incapacitation potentielle. De nombreuses études portent, en effet, sur le *Single Pilot Operation*, ou SPO (Deutsch & Pew, 2005 ; Stanton, Harris & Starr, 2014 ; Bailey, Kramar, Kennedy, Stephens & Etherington, 2017 ; Neis, Klingauf & Schiefele, 2018 ; Schmid & Stanton, 2020). Ces travaux mettent l'accent sur la nécessaire optimisation de la coopération homme-machine et explorent notamment la possibilité d'une automatisation adaptative (Neis *et al.*, Ibid) permettant d'aller plus loin que les approches classiques de l'automatisation. Ainsi, nous pouvons imaginer que les futurs systèmes automatisés auront un champ d'action plus large qu'aujourd'hui, et collaboreront plus largement avec l'opérateur humain.

Dans la conception de nouveaux cockpits, la question du rôle du pilote et de la place des automatismes est cruciale. On reconnaît aujourd'hui la place centrale de l'humain et l'intérêt de renforcer le rôle du pilote dans la prise de décision, en particulier dans les situations qui mettent en jeu la capacité à faire face à des imprévus et à imaginer les options possibles dans un temps contraint ; c'est le cas dans des situations non-nominales (Bilimoria *et al.*, Ibid) ou dégradées, telles que l'amerrissage réalisé sur l'Hudson en 2009 (NTSB, 2010). Il est donc nécessaire de comprendre ce qu'implique la prise de décision et les difficultés que peuvent rencontrer les pilotes pour prendre des décisions dans des situations complexes et dynamiques, de façon à pouvoir les assister efficacement. Pour soutenir cette réflexion, il est impératif de bien comprendre et de modéliser l'activité du pilote, notamment lorsqu'il doit faire face à l'imprévu et prendre des décisions dans un environnement incertain (Hoc, 1993, 1996 ; Zambok, 1997 ; Dismukes, Goldsmith & Kochan, 2015). Parmi les activités de l'équipage pouvant amener à prendre de telles décisions, nous pouvons considérer le diagnostic des causes d'une panne hydraulique, la reconnaissance des symptômes d'un court-circuit, la hiérarchisation des tâches pendant une urgence, l'évaluation des terrains de déroutement, de l'importance d'un orage, etc. (Dismukes *et al.*, 2015). De nombreuses études ont fait état de la dégradation de la performance observée dans de telles circonstances. Ces situations engendrent en particulier une charge de travail qui, lorsqu'elle est élevée, peut interférer négativement avec le processus de prise de décision, notamment avec le processus d'évaluation de la situation

(Endsley, 1987 ; Orasanu, Dismukes & Fisher, 1993 ; Wickens, Helleberg & Xu, 2000 ; Wickens, 2002 ; Dehais, Fabre & Roy, 2016).

Nous chercherons dans cette thèse à comprendre les relations existantes entre charge de travail et prise de décision. Son originalité réside dans le fait d'aborder cette question en mobilisant le concept de contrôle cognitif d'une part, et en s'appuyant sur l'utilisation de différents indicateurs neurophysiologiques pour évaluer l'état cognitif des pilotes d'autre part (Borghini, Astolfi, Vecchiato, Mattia & Babiloni, 2014 ; Dehais, Duprès, Blum, Drougard, Scannella, Roy & Lotte, 2019 ; Lassalle, Rauffet, Leroy, Guérin, Chauvin, Coppin & Saïd, 2017 ; Kostenko, Rauffet, Moga & Coppin, 2019). Nous utiliserons notamment la spectroscopie fonctionnelle proche infrarouge (fNIRS), une méthode d'imagerie cérébrale non invasive permettant d'observer l'activité cérébrale d'individus en situation naturelle (dans le cas qui nous intéresse, lors du pilotage d'un avion). Cette mesure relativement récente a été largement utilisée afin de mesurer la charge mentale des opérateurs en temps réel (Obrig *et al.*, 1996 ; Izzetoglu *et al.* 2003 ; Girouard *et al.* 2009, 2010 ; Ayaz *et al.* 2012 ; Causse *et al.*, 2017, 2019). Nous ne nous limiterons cependant pas à cette mesure, et prendrons également en compte des marqueurs cardio-vasculaires et subjectifs.

L'objectif de cette thèse est donc *i)* de mieux de comprendre les mécanismes de prise de décision des pilotes, *ii)* les facteurs qui sont susceptibles de la dégrader et, tout particulièrement, le rôle joué par la charge de travail et *iii)* d'identifier les moyens (*i.e.* les variables à prendre en compte et les moyens de mesure) d'évaluer la capacité du pilote à prendre une décision satisfaisante. Ces différents éléments pourront, par la suite, être utilisés dans le cadre des recommandations portant sur la conception de futurs cockpits, et/ou la définition d'assistances à la prise de décision.

Cette thématique est traitée dans le cadre de deux parties : une partie théorique comprenant quatre chapitres et une partie empirique composée de trois chapitres.



PARTIE THEORIQUE

Le contrôle cognitif : un concept clé pour comprendre les mécanismes d'adaptation de la prise de décision, et pour prédire les variations de performance chez les pilotes ?

Dans le cadre de l'amélioration constante de la sécurité aérienne, et du développement des nouveaux cockpits, il est nécessaire d'accompagner l'introduction de nouveaux automatismes et/ou fonctions d'assistance par une réflexion sur l'intégration homme-système. Il s'agit en effet de concevoir les futurs cockpits d'avion comme des systèmes cognitifs conjoints (Hollnagel & Woods, 2005 ; Bilimoria *et al.*, 2014), les systèmes automatisés assistant ainsi le pilote dans le traitement de l'information et la prise de décision.

Cette intégration homme-système doit être « adaptée » et « adaptable » à l'opérateur. Adaptée au fonctionnement des pilotes : il faut pour cela tenir compte de l'activité cognitive réelle des pilotes (cela impose donc un effort de compréhension fine et de modélisation des processus de prise de décision mais également de mécanismes d'adaptation). Adaptable aux différents états mentaux des pilotes : il faut pouvoir évaluer et détecter les variations d'aptitude fonctionnelle chez le pilote (Hockey, 2003) pour pouvoir ajuster l'aide que le système pourra lui apporter (Neis *et al.*, 2018).

Cette nécessité d'adaptation vient de la nature même de l'activité de pilotage, qui fait partie des activités de supervision et contrôle de processus dans des situations dynamiques (Hoc, 1996). Les pilotes sont en effet soumis à de nombreuses perturbations, à la fois exogènes (avec les variations dynamiques de la contrainte, définie comme « l'ensemble des facteurs identifiables issus de sources externes exercés sur un être humain et l'affectant mentalement », DIN FR ISO 10075-1:2017) et endogènes (avec les variations dynamiques de l'astreinte, définie comme « l'effet immédiat de la contrainte mentale chez l'individu selon son état présent » (DIN FR ISO 10075-1:2017), qui peuvent affecter leurs performances. Ces perturbations rendent parfois complexe la compréhension de la situation et la prise de décision, et sont également à l'origine de la mise en œuvre de mécanismes de régulation du comportement des pilotes, pouvant agir en mode automatique ou en mode contrôlé, et de manière réactive ou plus proactive. Ces régulations sont gérées par le *contrôle cognitif*.

Selon Hoc et Amalberti (2007, p. 28), ce concept de contrôle cognitif peut être défini comme un processus métacognitif, c'est-à-dire un mécanisme d'adaptation et de supervision du processus de prise de décision. Il permet de mettre en jeu, dans l'ordre adéquat et avec la mobilisation des ressources appropriées, les représentations et les opérations cognitives nécessaires pour faire face aux exigences internes et externes de la situation. Van Gaal, De Lange et Cohen (2012) précisent en outre que le contrôle cognitif intègre différentes fonctions

relatives à la détection et à la correction d'erreurs, à la résolution de conflit, à l'inhibition, ou au changement de tâche, et qu'il est fortement associé à l'activation du cortex préfrontal. Ce concept de contrôle cognitif est donc une unité d'analyse intéressante, à la fois pour comprendre le fonctionnement cognitif des pilotes et les variations de l'état mental chez les opérateurs.

La partie théorique a donc pour objectif d'étudier comment le concept de contrôle cognitif pourrait être modélisé et opérationnalisé pour mieux comprendre les mécanismes d'adaptation des pilotes et détecter une éventuelle dégradation dans les processus de décision. Pour cela, cette première partie décrit la situation de travail des pilotes (chapitre 1) avant de présenter les modèles de la prise de décision ainsi que les modèles qui rendent compte de la compréhension de la situation (qui est un prérequis de la décision), et les modèles du contrôle cognitif qui permettent de distinguer des modes de décision plus ou moins proactifs ou au contraire réactifs (chapitre 2). Elle expose ensuite les facteurs de dégradation de la prise de décision dans le domaine aéronautique (chapitre 3). Nous nous arrêterons, dans le cadre d'un quatrième chapitre, sur les moyens d'évaluer la capacité de prise de décision du pilote, via l'évaluation de son état mental et, plus particulièrement de sa charge mentale. Cette étude a pour objectif ultime de définir les principes d'une assistance au pilote. De plus, ces travaux pourraient ultérieurement contribuer à l'étude d'une automatisation adaptative impliquant la nécessité de monitorer l'état mental et physiologique des pilotes (Boy, Ibid ; Bilimoria *et al.*, Ibid). De nombreuses études ont par ailleurs été menées afin de valider différents moyens de mesure de l'état mental des pilotes (voir par exemple Borghini, Astolfi, Vecchiato, Mattia & Babiloni, 2014 ; Gateau, Ayaz & Dehais, 2018 ; Dehais, Duprès, Blum, Drougard, Scannella, Roy & Lotte, 2019). Le laboratoire Lab-STICC, au sein duquel est réalisée cette thèse, a également contribué et contribue à cette thématique de recherche notamment au sein des projets ANR ASTRID TAPAS (Lassalle, Rauffet, Leroy, Guillet, Chauvin & Coppin, 2014 ; Lassalle, Rauffet, Leroy, Guérin, Chauvin, Coppin & Saïd, 2017 ; Kostenko, Rauffet, Moga & Coppin, 2019) et MMT (*Man-Machine Teaming*).

Les quatre premiers chapitres nous conduiront à proposer une problématique de recherche relative aux liens existant entre prise de décision, modes de contrôle cognitif et charge mentale et à définir plusieurs hypothèses de travail portant sur ces liens.



CHAPITRE 1.

LA SITUATION DE TRAVAIL DES PILOTES

Ce travail de thèse porte sur l'activité de prise de décision des pilotes de l'aviation commerciale. Cette activité ne peut pas être étudiée en dehors de son contexte, puisque toute activité est le résultat d'un couplage entre les caractéristiques de la tâche et celles d'un opérateur (Leplat, 1997). Comme le souligne Leplat (2003), l'analyse de l'activité doit nécessairement s'inscrire dans une analyse plus générale de la situation de travail ; la notion de situation incluant toutes les variables qui forment un système avec lequel l'opérateur va agir dans le cadre de son activité (Cuny & Chauvin, 2009).

L'activité des pilotes s'inscrit, qui plus est, dans des situations dynamiques dans lesquelles la contrainte temporelle est forte. Elle est réalisée également au sein de systèmes sociotechniques complexes où le niveau d'automatisation est élevé. De telles situations sont caractérisées

notamment par l'imprévisibilité des événements qui peuvent survenir mais aussi par le caractère incomplet et incertain des informations disponibles.

Ce premier chapitre a pour objectif de décrire la situation de travail des pilotes. Nous nous appuyerons tout d'abord sur les travaux de Pinet (2011) pour présenter les différents systèmes avec lesquels le pilote interagit. Nous reprendrons ensuite la proposition de Hoc (1993) pour décrire les différentes dimensions de la situation dynamique dans laquelle s'inscrit son activité. Nous nous arrêterons, enfin, sur la question du couplage humain-automatismes et de son impact sur la performance et la fiabilité du système.

1.1 UNE SITUATION DE TRAVAIL COMPOSEE DE DIFFERENTS « SYSTEMES »

Dans sa thèse, Pinet (Ibid.) décrit l'avion et son environnement en termes de « systèmes ». Il identifie six systèmes différents avec lesquels le pilote doit interagir. Il souligne qu'ils sont interconnectés mais que chacun d'entre eux a une logique qui lui est propre. Cette décomposition permet d'identifier les informations et les possibilités d'actions dont disposent les pilotes ainsi que les contraintes dont ils doivent tenir compte.

1^{er} système : l'avion en tant que mobile dans l'air

Il s'agit de l'avion au sein de la masse d'air. Sa gestion passe par des ordres sur les commandes de vol, ce qui modifie immédiatement la trajectoire de l'avion par modification de sa configuration aérodynamique. La conséquence de ce fait est qu'un avion ne peut voler qu'en se déplaçant au sein d'une masse d'air, sans possibilité de s'arrêter en vol.

La gestion de ce système passe par la connaissance et la maîtrise de différents paramètres :

- La vitesse conventionnelle de l'avion, qui est dérivée de la vitesse aérodynamique (vitesse de l'avion par rapport à l'air). La vitesse conventionnelle donne une valeur de vitesse fictive, qui n'est fonction que de l'aérodynamique de l'avion, sans prendre en compte les variations atmosphériques de pression et de température. Il est possible d'agir sur la vitesse de l'avion, mais elle peut également être affectée par différents facteurs, tels que la météo ou les changements d'altitude.
- L'altitude pression de l'avion, qui est mesurée par la pression atmosphérique environnante. Elle est basée sur des affichages conventionnels de pression de référence au niveau de la mer. Il en résulte une valeur proche de l'altitude réelle, mais avec une

légère différence. Il est possible d'agir sur ce paramètre au travers la montée/descente de l'avion, et également en ajustant la pression atmosphérique prise en compte par l'altimètre.

- La vitesse verticale, qui est la dérivée de l'altitude pression en fonction du temps. Il est possible d'agir dessus en faisant varier la vitesse de montée/descente de l'avion.
- L'attitude, qui est la position des axes de l'avion par rapport au référentiel terrestre (roulis, tangage, cap). Il est possible d'agir sur ce paramètre à l'aide des commandes de vol.
- Les limitations aérodynamiques, dues à la résistance limitée de la structure de l'avion. Il en résulte deux limitations structurelles : celle liée à une vitesse conventionnelle maximale pour chaque configuration aérodynamique de l'avion (la vitesse maximale diminue lorsque le train d'atterrissage et/ou les volets hypersustentateurs sont déployés, en raison de leur résistance aérodynamique et de la traînée induite), et celle liée à une accélération maximale (poids + force centrifuge), en virage ou en ressource. Il existe également une limitation liée au coefficient aérodynamique de portance maximum. A forte incidence (angle de l'aile par rapport au sens de l'écoulement de l'air) se produit le phénomène de décrochage aérodynamique (l'écoulement de l'air autour de l'aile n'est plus laminaire et ne permet plus à l'avion de voler). Cette limitation impose des vitesses conventionnelles minimales pour chaque configuration aérodynamique de l'avion.

2^{ème} système : la propulsion de l'avion

Ce système se compose du groupe motopropulseur de l'avion (ses moteurs) lui permettant de se déplacer. La poussée des moteurs permet de créer un équilibre entre l'avancement de l'avion et la résistance à l'avancement, et permet également de compenser les variations d'énergie cinétique (dues aux accélérations) et potentielle (dues aux variations d'altitude).

Il est difficile de déterminer la poussée nécessaire lorsque ces trois paramètres varient simultanément (Pinet donne l'exemple de l'interception d'une altitude en cours de montée), d'autant plus que la poussée elle-même varie avec la densité de l'air, et donc l'altitude. Sa gestion est simplifiée en figeant un paramètre et en y adaptant les autres. De nos jours, le pilote automatique permet de gérer la poussée automatiquement, via le système Automanette.

Il existe également des limitations de poussée, liées à la résistance des moteurs. Par exemple, le régime moteur sélectionné au décollage n'est utilisable que quelques minutes afin de délivrer la poussée maximale des moteurs. Il existe un autre régime moteur (MCT, Maximum Continú) délivrant une poussée inférieure à celle de décollage mais utilisable sans limite de temps.

3^{ème} système : l'espace mobile environnant

Ce système est constitué de l'espace atmosphérique, avec toutes ses caractéristiques (pression, température, précipitations, turbulences, etc.). L'eau et les poussières en suspension conditionnent la visibilité extérieure. L'état de surface des pistes est fonction de l'état de l'eau, sous forme liquide ou solide. L'espace atmosphérique est en mouvement par rapport à la terre, ce qui génère les vents.

4^{ème} système : l'espace fixe géographique

Ce système est constitué de la Terre et son relief. Il est fixe par rapport à l'atmosphère, ce qui implique de recalibrer les trajectoires afin qu'elles soient correctes et libres de tout obstacle dû au relief. La vitesse de l'avion par rapport au sol est la somme de la vitesse par rapport à l'air et de la vitesse du vent. Ce système introduit des éléments essentiels, tels que le jour et la nuit, la concrétisation des trajectoires par rapport au sol, les systèmes d'évitement d'obstacles, et les relations avec le contrôle aérien. Certaines limitations dépendent également de ce système, telles que la limitation de vent de travers dont le pilote doit tenir compte à l'atterrissage.

5^{ème} système : les autres mobiles et leur régulation

Un avion partage l'espace aérien avec d'autres aéronefs, plus ou moins éloignés. Il est nécessaire de coordonner les trajectoires en fonction de l'espace et du temps, et d'avoir conscience de sa position par rapport aux autres. Les pilotes doivent interagir avec le contrôle aérien à chaque phase du vol et pour chaque action qu'ils réalisent (montée, descente, approche, raccourci, etc.). De plus, ils doivent entrer en communication avec plusieurs centres de contrôle successifs, parfois dans un même lieu géographique (c'est par exemple le cas des aéroports, avec un contrôle au sol différent du contrôle tour gérant les décollages et atterrissages). Ainsi, le contrôle aérien gère la coordination des trajectoires, oralement ou via des messages s'affichant dans le cockpit. Il assure la gestion du trafic aérien (*Air Traffic Management*) impliquant la séparation des avions entre eux ainsi que le guidage du trafic de manière efficiente, ce qui permet aux avions de respecter leurs horaires ainsi que de limiter leur consommation de carburant. Le contrôle aérien assure également l'anticollision, secondé par des systèmes anticollision internes à l'avion. La réglementation prévoit notamment qu'en cas d'ordres contraires du contrôleur aérien et du système anticollision de l'appareil, les pilotes doivent suivre les ordres du système. Cette réglementation fait suite à l'accident d'Überlingen, au cours duquel deux avions en vol sont entrés en collision, à la suite d'ordres contradictoires

donnés par le contrôleur aérien d'une part et le système anticollision d'un des avions d'autre part : un pilote a suivi les ordres du système alors que l'autre se conformait à l'ordre émis par le contrôleur (BFU, 2004).

6^{ème} système : l'avion interne et ses sous-systèmes

Ce système se compose de l'intérieur de l'avion, de ses équipements, de ses sous-systèmes, de leur procédure d'utilisation. Les systèmes de l'avion (ou « sous-systèmes ») sont nombreux, variés, et interagissent entre eux. Nous pouvons citer par exemple les systèmes relatifs au fonctionnement de l'avion, tels que les circuits et pompes à carburant, les circuits et pompes hydrauliques, les systèmes électriques, la pressurisation, les systèmes de navigation à inertie, etc.

Nous pouvons également citer des sous-systèmes relatifs à la sécurité de l'avion, tels que les extincteurs d'incendie, les systèmes antigivrage, les ordinateurs contrôlant les surfaces de contrôle (deux *Elevator Aileron Computer* ELAC, trois *Spoiler Elevator Computer* SEC, et deux *Flight Augmentation Computer* FAC dans le cas d'un Airbus A320), qui fonctionnent en permanence, prenant en compte les ordres au manche du pilote et ordonnant en sortie des actions sur les surfaces de contrôle en intégrant les limitations de l'avion, afin d'effectuer une trajectoire sûre, à l'intérieur de ces limites (A320 FCOM, Airbus). Ces ordinateurs disposent de plusieurs modes de fonctionnement appelés « lois de pilotage » (anticipant d'éventuels dysfonctionnements de sondes) donnant lieu à plusieurs types de réponse au manche et différents niveaux de protection des limites aérodynamiques. Les pilotes doivent connaître les différentes lois de pilotage, leurs limitations et leurs conséquences.

Citons également les systèmes de pilotage automatique. Dans le cas d'un A320, il existe deux systèmes de pilotage automatique, plus un système d'automanette. Ces deux systèmes prennent en compte les informations entrées par les pilotes dans l'ordinateur de bord (*Flight Management and Guidance Computer* FMGC) ; informations concernant le vol (route à suivre, l'altitude et la vitesse de croisière), le poids de l'avion, la quantité de carburant, les vitesses de sécurité au décollage, etc. Ces systèmes pilotent l'avion une fois celui-ci en l'air, en envoyant leurs ordres aux ELACs, SECs et FACs (FCOM A320, Airbus). Ces pilotes automatiques disposent de plusieurs modes de fonctionnement, que les pilotes doivent parfaitement connaître afin d'anticiper leurs actions.

Enfin, citons également les systèmes utilisés par les pilotes pour construire et maintenir leur conscience de la situation, tels que les radars météo et trafic, les radios, etc.

Les pilotes doivent piloter l'avion selon des procédures strictes, imposées par la réglementation en vigueur et les règles de leur compagnie aérienne. L'utilisation de l'avion en lui-même est soumise au respect des différents points de contrôle, les *checklists*, que les pilotes doivent mettre en œuvre ensemble tout en se contrôlant mutuellement. Les points non traités par les checklists font l'objet de *Standard Operating Procedures* (SOP), décrivant les procédures que les pilotes doivent respecter à chaque phase du vol, et qu'ils doivent connaître par cœur.

Le sous-système « humain » est composé des pilotes (avec la répartition des tâches et leur travail d'équipe), du personnel commercial, et des passagers. La répartition des tâches entre les pilotes est régie par des règles précises, le *Crew Resources Management* (CRM), dont l'entraînement est codifié au niveau international par l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI, Annexe 6 Part 1 Chapitre 9 Para 9.3.1), et adapté par chaque compagnie aérienne.

Cette approche par systèmes révèle l'existence de nombreuses variables à contrôler, qui interagissent entre elles et qui connaissent des évolutions qui peuvent être non prévisibles dans le temps, ce qui est la définition de la complexité selon Funker (2001). L'énoncé de ces caractéristiques permet de rappeler, après de nombreux auteurs (notamment Hoc en 1996) que le pilotage d'avion est une activité caractéristique de la supervision et du contrôle de processus en situation dynamique.

1.2 LE PILOTAGE D'AVION : UNE ACTIVITE DE CONTROLE EN SITUATION DYNAMIQUE

Pour assister efficacement l'opérateur humain, il est nécessaire de comprendre la nature de la situation dans laquelle s'inscrit son activité ainsi que les processus cognitifs qu'il met en œuvre, tels que la planification, le diagnostic, et la prise de décision.

Plusieurs auteurs ont proposé, à la fin des années 80, le terme de « situation dynamique » (Mancini, Woods, & Hollnagel, 1988 ; Cellier & Hoc, 2001) pour qualifier une situation qui est susceptible d'évoluer alors que l'opérateur est inactif (Hoc *et al.*, 2004, p. 17) ; situation que l'opérateur ne contrôle donc que partiellement. Les situations dynamiques concernent le domaine des transports (aviation ou conduite de navire) mais également les industries dans lesquelles les processus ont une dynamique propre (industrie chimique ou nucléaire). Plusieurs dimensions les caractérisent. Elles ont été listées par Hoc (1993) et sont reprises ci-dessous.

Étendue du champ de supervision. Le champ de supervision peut être défini comme « l'étendue de l'ensemble des variables que l'opérateur peut superviser (tant du point de vue des informations disponibles que des possibilités d'intervention) et qui ont des effets sur les variables cruciales du processus » (Hoc, 1993, p. 1449). Dans une situation dynamique, toutes les informations utiles ne sont pas à la portée de l'opérateur. Par exemple, un pilote a un champ de supervision limité en ce qui concerne les paramètres des moteurs. Bien que les vibrations des moteurs soient en permanence affichées afin d'en tenir les pilotes informés, il est en effet impossible d'agir spécifiquement sur ce paramètre, si ce n'est en ajustant la puissance des moteurs.

Proximité du contrôle. La proximité du contrôle se réfère à « l'étendue des possibilités offertes à l'opérateur de contrôler plus ou moins directement les variables cruciales du processus » (Hoc, 1993, p. 1450). Lorsqu'une variable peut être contrôlée, les actions de l'opérateur sur celle-ci peuvent en effet être plus ou moins directes. Elles peuvent se combiner au système afin de créer un effet résultant. Dans l'exemple de l'aviation, les avions de ligne modernes disposent de commandes dites « *fly-by-wire* » : les actions du pilote sur le manche sont transmises à des calculateurs, qui vont combiner l'ordre du pilote à plusieurs autres paramètres (vitesse, accélération, vent, etc.) afin d'obtenir la trajectoire la plus juste possible et de garder l'avion à l'intérieur de ses limites aérodynamiques, dans ce qu'on appelle son enveloppe de vol.

Accessibilité des informations du processus. Les informations sur les variables cruciales du processus n'ont pas toutes le même degré d'accessibilité (Hoc, 1993, p. 1451). Si un problème est observé, l'opérateur doit parfois générer des hypothèses quant à son origine, puis les tester. Dans l'exemple de l'aviation, lorsqu'une fuite de carburant est suspectée pendant un vol, le pilote ne peut pas visualiser la fuite, car les réservoirs de carburant sont hors du champ de vision. Il doit ainsi isoler le réservoir suspecté et transférer le carburant restant dans les réservoirs présumés en bon état. Ce n'est que lorsque ce transfert est terminé et que le pilote constate qu'il n'y a plus de perte anormale de carburant, qu'il peut affirmer qu'il existait bien une fuite au niveau du réservoir concerné.

Continuité du processus. Il existe une distinction entre les processus discontinus, qui peuvent être représentés par des états discrets, et les processus continus, dans lesquels les opérateurs doivent gérer des évolutions (Hoc, 1993, p. 1451). L'aviation est un exemple de processus continu : les phases de vol se succèdent au cours du temps, la vitesse et l'altitude de l'avion

ainsi que sa position géographique évoluent de façon continue. De même, l'environnement dans lequel se trouve l'avion (atmosphère, trafic...) évolue de la même manière.

Contrainte temporelle. Les processus supervisés présentent des contraintes et des constantes de temps. Les contraintes de temps dépendent de la vitesse des processus (Hoc *et al.*, 2004). Dans un processus lent, les opérateurs peuvent effectuer une planification quasiment en temps réel pour agir sur le système. Dans un processus rapide, la planification d'évènements doit se faire avant que le processus ne soit lancé. Ensuite, il n'y a plus de planification possible, et il n'y a pas suffisamment de temps pour récupérer les erreurs. Il est seulement possible de s'adapter à l'erreur pendant le processus (Hoc, 1993, p. 1452). Amalberti et Deblon (1992) ont montré, ainsi, que la vitesse du processus oblige les pilotes de chasse à planifier minutieusement leurs missions au sol. Ils doivent faire une analyse anticipée de la situation, afin de prévoir tous les incidents possibles car ils ne pourront pas les traiter en temps réel. C'est dans cet esprit que les pilotes d'avions de ligne effectuent des *briefings*, par exemple avant le vol ou avant l'approche, ce qui leur permet d'anticiper les actions à réaliser en conditions nominales et dégradées.

Parmi les dimensions que nous avons listées, l'étendue du champ de supervision, la proximité du contrôle, la continuité et l'accessibilité des informations dépendent fortement du niveau d'automatisation du système. On sait, en effet, que des systèmes fortement automatisés peuvent être « opaques » ou bien caractérisés par des chaînes d'action-réactions qui peuvent être difficiles à appréhender. La troisième section de ce premier chapitre est donc consacrée à l'automatisation des cockpits.

1.3 UN SYSTEME SOCIOTECHNIQUE COMPLEXE

L'aviation civile a toujours été un domaine précurseur en matière d'automatisation. Jusque dans les années 80, les erreurs humaines ont été considérées comme causes de plus de la moitié des accidents d'avion (Wiener & Curry, 1980 ; Helmreich & Foushee, 1993 ; Amalberti, 2013). L'industrie aéronautique, alors convaincue que les automatismes étaient plus fiables que les opérateurs humains, a conçu de nouveaux appareils en faisant appel à des niveaux d'automatisation toujours plus élevés (Wiener, 1988 ; Billings, 1996). Cet essor de l'automatisation au sein des cockpits s'est effectivement accompagné d'une forte diminution du taux d'accident, et ce malgré une constante augmentation du trafic aérien (Norman, 1990).

Ce constat nous pousse à nous attarder sur cette notion d'automatisation, centrale en aviation, et à passer en revue ses apports mais également les nouvelles problématiques qu'elle a introduites.

1.3.1 Définition de l'automatisation

Parasuraman et Riley (1997) définissent l'automatisation comme « l'exécution partielle ou totale, par une machine (généralement un ordinateur) d'une fonction qui était initialement réalisée par un homme ». Cette définition précise que le degré d'automatisation d'un système n'est pas de type tout-ou-rien, mais qu'il existe différents niveaux d'automatisation entre ces deux limites. Ainsi, les différentes fonctions d'un système peuvent être plus ou moins automatisées, indépendamment les unes des autres. Ces différents niveaux d'automatisation ont été décrits sous forme de taxonomies (Sheridan & Verplank, 1978 ; Endsley, 1999 ; Parasuraman, Sheridan, & Wickens, 2000).

1.3.2 Avantages liés à l'automatisation

Comme nous l'avons mentionné plus haut, les automatismes ont apporté un gain de sécurité considérable dans le domaine de l'aviation civile. Dans ses travaux, Le Goff (2016) fait mention de trois systèmes en particulier, qui ont fait leur apparition dans les cockpits et ont amélioré la sécurité des vols.

Le système d'avertissement de proximité du sol (*Ground Proximity Warning System*, GPWS) est un bon exemple de système automatisé ayant significativement accru la sécurité. Il prend la forme d'un affichage de couleur sur l'écran de navigation de l'avion. Les couleurs diffèrent en fonction de la hauteur du relief par rapport à l'altitude de l'avion (bleu = eau, vert = hauteur suffisante entre l'avion et le sol, ambre = hauteur insuffisante en termes de sécurité du vol entre l'avion et le sol, rouge = hauteur du relief égale ou supérieure à l'altitude de l'avion). Lorsque l'avion se rapproche du sol de manière dangereuse (*i.e.* en dehors du cadre de l'approche publiée sur un aéroport de la base de données de l'avion), un avertissement visuel est affiché face au pilote, et un avertissement sonore retentit sous forme d'une alarme et d'une voix synthétique signalant l'approche du terrain et ordonnant au pilote de tirer sur le manche afin de reprendre

de l'altitude. Avant l'introduction de ce système, le nombre de collisions avec le sol (*Controlled Flight Into Terrain*, CFIT) était élevé. Wiener & Curry (1980) observent que ce fait était principalement dû à la surcharge de travail des pilotes. L'introduction de ce système en 1975 a permis de réduire drastiquement ce genre d'évènements (Billings, 1991).

Un autre système ayant apporté un gain important en termes de sécurité est le système d'évitement de collision et d'alerte de trafic (*Traffic alert and Collision Avoidance System*, TCAS). Cet instrument permet de prévenir et d'éviter les collisions entre avions en vol, apportant un filet de sauvegarde aux contrôleurs aériens. Ce système, installé sur chaque avion, fait apparaître les avions environnants sur un écran à destination des pilotes. Lorsqu'un conflit avec la trajectoire d'un autre avion est détecté, le TCAS affiche un message de type « *TRAFFIC* » à l'intention des pilotes, et une voix synthétique génère le même message dans le cockpit. Lorsque le risque de conflit augmente, les TCAS des deux avions impliqués communiquent entre eux afin de générer des trajectoires d'évitement divergentes. Le TCAS d'un avion ordonne à son pilote de monter et celui de l'autre avion ordonne à son pilote de descendre. Cet ordre est affiché sous forme d'une information de couleur indiquant au pilote l'assiette et la vitesse verticale à maintenir afin d'éviter la collision ; une voix synthétique indique également au pilote de monter ou de descendre.

L'un des systèmes automatisés ayant le plus contribué à l'allègement de la charge de travail dans les cockpits est le système informatisé de gestion de vol (FMGC). Ce système permet aux pilotes d'indiquer au pilote automatique la trajectoire à suivre pour l'intégrité du vol, ainsi que les valeurs de poids, centrage, carburant, altitude cible et index de coût. Le système détermine ensuite de manière automatisée la trajectoire de vol, la consommation estimée de carburant ainsi que les pentes de montée et de descente afin de voler de la manière la plus efficace possible. Le contrôle de trajectoire en vol par les pilotes s'en trouve également grandement facilité, ainsi que les éventuelles modifications de trajectoire en vol. Ce système a libéré les pilotes de tâches fastidieuses, telles que l'entrée des points de navigation à l'aide de coordonnées géographiques, le recoupement entre ces points de navigation, les cartes papier et les balises de radionavigation, ainsi que les déterminations des différentes vitesses à l'aide d'imposantes abaques à multiples entrées. Ce système fait, par ailleurs, partie intégrante des systèmes de pilotage automatique des avions modernes. Les informations déterminées par le FMGC sont directement transmises au pilote automatique, qui conduit le vol selon les paramètres calculés, en agissant de manière autonome sur les surfaces de contrôle de l'avion et sur la poussée des moteurs, depuis la montée initiale jusqu'à l'approche finale. Les pilotes ne sont plus contraints de rentrer et modifier ces

valeurs une par une dans un pilote automatique de type analogique (maintien de valeurs cibles), voire de piloter l'avion en manuel sur de longues périodes, ce qui est générateur de fatigue, sans pour autant voir leur rôle réduit à de la pure supervision (Pritchett, 2009).

L'allègement de la charge de travail dans les cockpits a eu pour effet concomitant de diminuer le nombre d'opérateurs nécessaires dans un cockpit. Le nombre d'opérateurs est passé de cinq (pilote, copilote, mécanicien navigant, navigateur, opérateur radio) à trois (pilote, copilote et mécanicien navigant) dans les années 70, puis à deux (pilote et copilote) dans les années 90 (Norman, 1990 ; Billings, 1991 ; Galan, 2012). L'automatisation a par exemple permis de réduire l'imposant poste de travail du mécanicien navigant à de simples écrans synthétisant l'état de tous les systèmes de l'avion, détectant les avaries et indiquant aux pilotes la marche à suivre le cas échéant. De ce fait, l'automatisation a non seulement amélioré la sécurité des vols mais aussi permis au secteur aérien de réaliser des économies considérables.

La conception de nouveaux automatismes a également permis de répondre à la demande d'augmentation du trafic. En effet, la précision de conduite du pilotage automatique et la présence de systèmes de sécurité tels que le TCAS ont autorisé la réduction des normes d'espacement vertical entre avions à seulement 1000 pieds en croisière (espaces à minimum de séparation verticale réduit, *Reduced Vertical Separation Minima*, RVSM), ainsi que la réduction des distances séparant les avions lors des phases d'approche. La réduction des espacements en croisière a eu pour effet de libérer de l'espace pour faire voler plus d'avions à haute altitude, ce qui représente une économie de carburant pour les compagnies.

L'introduction de l'automatisation a affecté la conception des avions jusque dans leur structure, dans le but de réaliser des économies de carburant. En effet, pour des raisons de stabilité, la conception des avions classiques imposait que l'empennage (ensemble constitué de la dérive et des gouvernes de profondeur à l'arrière d'un avion) soit légèrement déporteur (tendance à attirer l'avion vers le sol) afin de compenser la forte portance générée par les ailes (force attirant l'avion dans les airs), ce qui permettait à l'avion de voler de manière stable même sans action du pilote. Cette configuration conférait à l'avion une stabilité dite passive. Cependant, un empennage déporteur est générateur d'une certaine résistance à l'écoulement de l'air (nommée traînée), ce qui augmente la consommation de carburant. L'introduction de l'automatisation dans l'aviation a permis de concevoir des avions à commandes de vol électriques. Le manche du pilote ne commande plus directement les surfaces de contrôle de l'avion (à l'aide de câbles et de poulies) mais envoie des ordres à des ordinateurs, qui analysent la position de l'avion ainsi que tous ses paramètres et modulent l'ordre du pilote en fonction de ces analyses afin de réaliser

le mouvement et la trajectoire les plus stables et les plus sûrs possibles. Les commandes de vol électriques ont permis aux ingénieurs de modifier l'empennage des avions, de manière à ce qu'il ne soit plus déporteur mais porteur. La stabilité de l'avion est alors assurée par l'informatique, qui agit directement sur les surfaces de contrôle afin de garder un avion stable, en totale autonomie par rapport au pilote. Cette configuration d'avion, dite à stabilité active, a drastiquement réduit la trainée induite par l'empennage, et a ainsi réduit la consommation de carburant. De plus, les commandes de vol électriques sécurisent les actions du pilote, en gardant l'avion loin de ses limites aérodynamiques.

Il est aisé, après cette courte revue, de constater les effets bénéfiques de l'automatisation, tant en termes de sécurité que de maîtrise des coûts. Cependant l'automatisation a également introduit de nouvelles problématiques, liées à l'évolution du métier de pilote, qui est caractérisé désormais par moins de contrôle direct et plus de supervision, ainsi que des difficultés spécifiques liées aux « surprises de l'automatisation » (Sarter & Woods, 2000).

1.3.3 Problématiques induites par l'automatisation

Comme nous venons de le préciser, les pilotes de ligne ont vu leur métier changer avec l'arrivée de l'automatisation. Sheridan et Parasuraman (2005) notent que les tâches du pilote d'un avion automatisé consistent à planifier des actions avant le vol, implémenter ces actions dans le système, surveiller la réalisation des actions par le système, et reprendre en main l'avion si nécessaire.

Selon Christoffersen et Woods (2002), la mise en place de systèmes automatisés s'est d'abord faite de manière à délester l'humain d'une partie de sa charge de travail. L'idée de l'époque était que la nature du travail de l'humain n'était pas modifiée, et que seule sa quantité de travail l'était. On considérait alors que les automatismes se substituaient au travail humain (Christoffersen & Woods, Ibid ; Dekker & Woods, 2002). Pourtant, l'intégration de l'automatisation dans les cockpits peut être considérée comme l'ajout d'un nouvel agent dans les équipages et toute modification de la composition d'une équipe devrait s'accompagner d'une nouvelle manière de travailler et d'interagir (Sarter *et al.*, 1997). Cette sous-estimation du changement de la nature du travail des pilotes a provoqué certaines difficultés, notamment des problèmes de compréhension des automatismes, de confiance en ces systèmes et de baisse

de vigilance ; autant de problèmes pouvant mener au phénomène de sortie de boucle des opérateurs (Parasuraman, Molloy & Hilburn, 1993 ; Endsley & Kiris, 1995 ; Kaber & Endsley, 1997 ; Woods & Dekker, 2000 ; Parasuraman & Wickens, 2008). Une sortie de boucle est caractérisée par des difficultés à détecter des erreurs ou des pannes (Ephrath & Young, 1981 ; Kessel & Wickens, 1982) quand elles surviennent, à comprendre l'état courant d'un système (Sarter & Woods, 1995 ; Sarter, Woods, & Billings, 1997 ; Christoffersen & Woods, 2002) et à déterminer les actions appropriées (Endsley, 1999). Ce phénomène survient lorsque le pilote se désengage de la surveillance de l'évolution des systèmes, pour les raisons évoquées plus haut. Lorsqu'un problème survient, le pilote éprouve alors des difficultés à le comprendre car il n'a pas suivi l'évolution des systèmes ayant conduit à ce problème.

Nous mentionnions plus haut les problèmes de compréhension des automatismes comme participant au phénomène de sortie de boucle. En effet, afin d'être efficace, l'opérateur humain doit être au fait des actions des automatismes. Il doit comprendre leur fonctionnement et anticiper leurs actions. Or, Norman (1990) note que les automatismes couvrent de nombreuses et diverses fonctions au sein d'un cockpit, et n'adoptent pas toujours le bon niveau de transparence. En effet, ceux-ci doivent transmettre aux pilotes le bon niveau d'informations, les informations pertinentes pour eux. Il arrive de ce fait qu'un niveau de transparence inadéquat accentue l'incompréhension de l'automatisation de la part des humains (Norman, 1990). De nombreuses études reconnaissent que ce comportement parfois qualifié d'« opaque » des automatismes entraîne des problèmes de supervision (Norman, Ibid ; Christoffersen & Woods, 2002 ; Dekker & Woods, 2002 ; Klein, Woods, Bradshaw, Hoffman, & Feltovich, 2004). Ceci peut provoquer par exemple une augmentation du temps nécessaire à l'humain pour comprendre l'état du système et pouvoir en reprendre le contrôle.

Différentes études menées dans le domaine de l'aviation civile mettent également en évidence le fait que les pilotes peuvent avoir une mauvaise représentation du mode dans lequel le système se trouve (Sarter, Mumaw & Wickens, 2007). Un système moderne de pilotage automatique peut proposer des centaines de modes de commande, certains d'entre eux ne présentant que des différences subtiles. Les automatismes fournissent aux pilotes des informations sur le mode actif, via le FMA (*Flight Mode Annunciator*). Sarter, Mumaw et Wickens (2007) ont mené une étude en simulateur avec 20 pilotes de ligne, montrant qu'ils surveillaient beaucoup plus les paramètres de vol que les indications concernant le mode dans lequel se trouvait le système. Il arrivait fréquemment qu'ils ne remarquent pas les changements automatiques de mode et qu'ils omettent de vérifier qu'ils se trouvaient bien dans le mode attendu. Dans d'autres cas, ils

trahissaient de façon superficielle les annonces de mode et ne comprenaient pas leur incidence sur le comportement de l'avion ; c'est ce que Sarter, Woods et Bilings (1997) ont appelé une « surprise de l'automatisation ». Ces auteurs ont conclu que le problème de « *mode awareness* » provenait à la fois d'une observation insuffisante des indications délivrées par le système et d'une compréhension insuffisante de modes d'automatisation complexes.

Le problème de sur-confiance en l'automatisme peut également être un facteur accidentogène (Endsley, 1996 ; Mosier *et al.*, 1998). En effet, afin qu'un automatisme soit utilisé de manière efficace, il est nécessaire de lui accorder un niveau de confiance adapté (Verberne, Ham, & Midden, 2015). Or, plus un système automatisé est fiable, plus les opérateurs humains auront tendance à lui faire confiance (Sheridan & Parasuraman, 2005). Cette sur-confiance amène les opérateurs humains à ne pas remettre en question les actions et décisions de l'automatisme, et à négliger quelque peu sa surveillance (Metzger & Parasuraman, 2005 ; Bahner, Hüper, & Manzey, 2008 ; Wickens, Clegg, Vieane, & Sebok, 2015).

Il est à noter que les problèmes de confiance en l'automatisme peuvent aller dans les deux sens. En effet, il arrive que la fiabilité douteuse de certains systèmes automatisés pousse les opérateurs à ne pas les prendre en compte, voire à les désactiver. En témoigne l'accident du vol 255 de la Northwest Airlines, qui s'est écrasé au décollage car l'avion n'était pas correctement configuré (les volets n'étaient pas sortis). Parmi les facteurs ayant contribué à l'accident, le NTSB (1985, p. 67) note que l'alarme générée normalement lorsqu'un décollage est tenté alors que l'avion n'est pas correctement configuré, n'a pas retenti lors de ce vol. Dans son rapport, le NTSB (Ibid, p. 53) émet, entre autres hypothèses, l'hypothèse que le fusible correspondant à cette alarme pourrait avoir été volontairement ouvert dans le but de désactiver les alarmes générées lors du roulage qui étaient considérées comme des « nuisances » par les équipages (effet *cry-wolf*, Wickens *et al.*, 2015).

En plus de ces problèmes de compréhension et de confiance, les systèmes fortement automatisés peuvent également engendrer des problèmes de vigilance. Des études ont montré que ce phénomène était causé par la mauvaise capacité humaine à discerner un signal imprévisible et rare noyé dans un fort bruit environnant (Mackworth, 1948 ; Teichner, 1974 ; Parasuraman, 1979), phénomène qui se retrouve dans les cockpits automatisés, avec de longues périodes sans interaction avec le système, et une faible probabilité de dysfonctionnement (Parasuraman & Davies, 1977 ; Wiener & Curry, 1980 ; See, Howe, Warm, & Dember, 1995).

1.3.4 Les évolutions de la philosophie de conception des automatismes

Les problèmes que nous venons de lister ont, dès le départ, été largement documentés et étudiés, et la philosophie de conception des systèmes automatisés n'a eu de cesse de s'améliorer pour y pallier. Il est désormais question de trouver un équilibre dans la répartition des tâches entre la machine et l'homme, afin d'éviter le phénomène de sortie de boucle. C'est ce qu'on appelle l'automatisation centrée sur l'utilisateur (« *human-centered automation* », Billings, 1997).

Dans un premier temps, les concepteurs se sont basés sur différentes taxonomies d'allocation des tâches. L'une des plus utilisées a été la liste MABA-MABA (*Men Are Better At – Machines Are Better At*) (Fitts, 1951). Cette taxonomie permet théoriquement de répartir les tâches entre l'homme et la machine, en fonction des atouts et faiblesses de chacun (par exemple, la machine est meilleure en calcul, alors que l'homme est meilleur lorsqu'il faut improviser des solutions). Cette approche a permis de moduler le niveau d'automatisation, tout en gardant l'opérateur au centre de la responsabilité de toutes les actions effectuées, y compris par la machine (Parasuraman, Molloy, & Hilburn, 1993 ; Parasuraman *et al.*, 2000 ; Lee & Seppelt, 2009). Cependant cette approche a fait l'objet de critiques. Jordan (1963) note tout d'abord qu'afin de créer une telle liste, il aurait fallu que l'homme et la machine soient des systèmes comparables. Il suggère de remplacer la notion de comparabilité par celle de complémentarité, et introduit de fait l'idée que l'homme et la machine doivent coopérer de manière intégrative (Hoc & Chauvin, 2011). Par la suite, Bainbridge (1987) et Reason (1988) remarquèrent que la conception des automatismes selon ce principe posait deux problèmes (appelés « ironies de l'automatisation »). Le premier était que les concepteurs de ces systèmes avaient eux-mêmes créé les conditions du manque de fiabilité humaine, en demandant aux opérateurs de réaliser des actions dans des conditions qui ne permettaient justement pas leur réalisation correcte. Le second est que les humains doivent superviser des machines qui sont plus performantes qu'eux (Hoc & Chauvin, Ibid). Ceci pose des problèmes notamment lorsqu'un système automatisé est défaillant et que l'humain doit soudainement prendre en charge les tâches que la machine réalisait jusque-là avec un niveau de performance supérieur. Dekker & Woods (2002) notent également que cette taxonomie, en tant que liste quantitative, ne permet pas de saisir les progrès qualitatifs qu'apporte l'automatisation, et ne permet donc pas à la coopération homme-machine de progresser.

Ces observations ont entraîné une réflexion sur les moyens d'améliorer ces systèmes afin de résoudre ces problèmes. L'idée principale était d'améliorer la communication entre l'humain

et la machine en informant l'utilisateur des modes enclenchés par l'automatisme, de l'état du système, et des futures actions que le système allait réaliser. Il fallait cependant que ces informations ne requièrent que peu ou pas d'effort cognitif de la part de l'humain, afin de ne pas contrebalancer les bénéfices apportés par une charge de travail accrue liée à la compréhension de ces informations. Les interfaces répondant à ces exigences sont regroupées sous le terme d'« interfaces écologiques » (Vicente & Rasmussen, 1992 ; Vicente, 2002, Sheridan & Parasuraman, 2005). Leur but est de mettre en évidence, de rendre immédiatement visibles, les contraintes du système ainsi que les possibilités d'action.

Une autre approche consiste à penser la coopération entre l'humain et la machine et à définir les conditions de cette coopération. Elle repose sur la notion de représentation partagée (*Common Frame Of Reference*, COFOR) que les deux agents (humain et machine) doivent élaborer et maintenir. Ils doivent disposer, pour cela d'un espace de travail partagé ou « *Common Work Space* » (Debernard, Guiost, Poulain, Crevits, Annebicque & Millot, 2009 ; Debernard, Riera & Poulain, 2013) ; le CWS constituant une représentation physique du COFOR.

Le CWS, conçu pour le contrôle aérien par l'équipe du LAMIH (Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique Industrielles et Humaines, Valenciennes), fait apparaître des informations, des problèmes (résultant des activités de diagnostic), des stratégies et des solutions (résultant des activités de prise de décision) ainsi que des commandes (résultant d'activités d'implémentation de la solution). Les agents lui transmettent ces différentes données (informations, problèmes, stratégies et commandes), de façon à construire un COFOR virtuel. Pacaux-Lemoine et Debernard (2007) se sont également intéressés à la possibilité de créer un CWS dans le domaine de l'aviation de combat. Il ne s'agit pas, dans ce cas, de faciliter la coopération entre un humain et une machine mais de faciliter la coopération entre un pilote et l'officier responsable du système d'armes lors d'une mission air-sol. Un ensemble d'outils a été conçu, pour faciliter la coopération à long terme et à court terme. L'outil d'assistance à long-terme se présente sous la forme d'une représentation spatiale de la mission. Il comprend différentes informations renseignées par l'équipage durant la phase de briefing et mises à jour durant le vol lors de périodes de sous-charge : présence d'ennemis (recueil d'informations), configuration de l'avion et progression de la mission (diagnostic), décision de rentrer (prise de décision). L'outil d'assistance à court terme (journal de tâche) montre ce que sera l'activité de chacun durant les trois prochaines minutes. Il est également construit durant le briefing et est mis à jour automatiquement. Un autre type d'assistance consiste à montrer la configuration du

poste de travail du co-équipier. Un agent peut voir ce que l'autre voit et/ou fait ; chaque opérateur peut donc actualiser son modèle de la disponibilité technique du partenaire. Dans le même ordre d'idée, une image vidéo montre le visage du partenaire ; ceci pour aider les opérateurs à identifier l'état de leur partenaire. Enfin, chaque opérateur peut adresser de courts messages à son co-équipier.

Une expérimentation réalisée sur simulateur, auprès de 12 pilotes, a montré que les outils d'assistance à court et à long termes étaient les plus utilisés. Les auteurs proposent d'intégrer dans un même dispositif les informations provenant de ces deux outils.

Une nouvelle approche a émergé avec l'allocation dynamique et l'automatisation adaptative (Kaber & Endsley, 2003) dans les systèmes homme-machine. Cette approche cherche à définir ce qui doit être automatisé, quand il faut automatiser et comment. Kaber, Wright et Sheik-Nainar (2006, p. 528) parlent de « l'allocation dynamique des fonctions à un opérateur humain et/ou à un automatisme basé sur les états de l'opérateur et des informations contextuelles dans le but d'optimiser la performance du système ». Cette approche prône une allocation dynamique des fonctions dépendant notamment de l'occurrence d'un événement critique, de la mesure de la performance (l'allocation est déclenchée par la dégradation de la performance de l'homme), de l'évaluation de la charge de travail. Elle vise à limiter la charge de travail de l'opérateur et à l'aider à construire une représentation satisfaisante du système et de la situation en assurant une correspondance optimale entre les exigences de la tâche et les ressources cognitives de l'opérateur. Elle est souvent considérée comme un moyen de contrôler la charge cognitive. Lorsqu'elle celle-ci augmente, les automatismes prennent en charge certaines fonctions. Quand elle diminue, il peut être souhaitable de réattribuer des fonctions à l'opérateur.

Encore peu étudiée, cette approche pose un certain nombre de questions listées par Kaber, Riley, Tan et Endsley (2001) et par Kaber et Endsley (2004) :

- Quel est l'impact du temps de cycle sur la performance ?
- Qui doit décider de changer de mode : l'homme (allocation explicite) ou la machine (allocation implicite) ? Dans le domaine du contrôle aérien, Hoc et Debernard (2002) ont montré que les opérateurs avaient tendance à rester en mode manuel lorsqu'ils pouvaient décider de l'allocation et que leur performance était moins bonne dans ce cas (allocation explicite) que dans le cas d'une allocation implicite.
- Comment les deux approches (définition des niveaux d'automatisation et allocation dynamique des fonctions) agissent-elles sur la performance ou sur la représentation mentale des opérateurs ?

Comment concevoir une interface qui facilite les transitions entre les différents modes ? S'ils passent en mode manuel, les opérateurs ont besoin de bien comprendre les états dans lesquels se trouvent les systèmes qui ont été contrôlés par les automatismes. Inversement, s'ils basculent en mode automatique, ils ont besoin de savoir si le système a bien intégré ses nouvelles responsabilités.

Pour aller plus loin, certaines équipes de recherche proposent d'améliorer ces principes d'allocation en prenant en compte la manière dont les opérateurs et les automatismes interagissent ensemble. En effet, l'objectif des concepteurs de systèmes automatisés n'est plus simplement de proposer une automatisation fiable et efficace, mais également d'améliorer la coopération entre l'homme et la machine, en réalisant les interfaces les mieux adaptées (Lee & Seppelt, 2009). De nombreuses études vont dans le sens d'une transformation de l'automatisation en agent collaboratif (Hoc, 2000, 2001 ; Christoffersen & Woods, 2002 ; Klein *et al.*, 2004 ; Dragan, Lee, & Srinivasa, 2013 ; Zimmermann, Bauer, Lutteken, Rothkirch, & Bengler, 2014 ; Weyer, 2015 ; Hoffman & Johnson, 2019 ; Jiao, Zhou, Gebraeel & Duffy, 2020).

1.4 DES CARACTERISTIQUES DES SITUATIONS DE TRAVAIL AUX EXIGENCES COGNITIVES

Nous avons présenté, dans ce chapitre, les caractéristiques de la situation de travail des pilotes. Parmi ces caractéristiques, certaines ont une forte incidence sur l'activité des pilotes. Il s'agit de :

- la pression temporelle ;
- l'étendue du champ de supervision (et notamment du nombre important d'informations à prendre en compte et des interactions dont il faut tenir compte) qui est susceptible d'engendrer une surcharge informationnelle ;
- le caractère distant du contrôle, qui nécessite de comprendre une chaîne d'actions-réactions pour prendre une décision pertinente ;
- les degrés d'accessibilité et de certitude qui caractérisent les informations pertinentes ;
- la nécessité d'élaborer et de maintenir une représentation mentale qui porte sur l'environnement extérieur, sur l'état du système mais également sur les modes dans lesquels se trouvent les automatismes (« *mode awareness* »).

Ces éléments contribuent à la difficulté de la tâche du pilote lorsqu'il doit faire face à un événement inattendu qui l'oblige à prendre une décision.



CHAPITRE 2.

ETAT DE L'ART DES MODELES DE PRISE DE DECISION

Il est nécessaire de comprendre les processus cognitifs mis en œuvre lors de situations dynamiques, et plus particulièrement lorsque des événements imprévus surviennent, afin d'être en mesure de concevoir des systèmes homme-machine performants et sûrs.

Dans ce chapitre, nous passons en revue les modèles les plus pertinents au regard de notre étude. En gardant à l'esprit l'objectif industriel de cette thèse, qui est de mieux comprendre les processus de prise de décision des pilotes en vol, nous aborderons les modèles en lien avec cette notion. La présentation de ces modèles nous amènera, dans un second temps, à prendre en compte les processus de compréhension de la situation, préalable indispensable au processus de prise de décision. La revue de ces différentes études nous mènera enfin à nous questionner

sur les mécanismes de contrôle de ces différents processus. Nous passerons alors en revue les études portant sur ces mécanismes, rassemblés sous la notion de contrôle cognitif.

2.1 MODELES DE LA PRISE DE DECISION

Avec le développement de l'informatique, les psychologues furent tentés de faire une analogie entre le fonctionnement d'un ordinateur et le fonctionnement cognitif. L'idée générale de l'époque était que l'on pouvait assimiler le cerveau humain à un processeur, analysant toutes les données entrantes afin de déterminer les actions à réaliser (Dekker & Hollnagel, 1999). Les observations de Rasmussen (1974, 1976) tranchent avec ce courant. En effet, il observe que les experts n'utilisent que rarement des stratégies analytiques dans la prise de décision lorsqu'ils effectuent des tâches familières, contrairement aux études qui jusque-là considéraient le cerveau humain comme un processeur qui analysait les situations et prenait des décisions de manière séquentielle. Rasmussen en 1974, puis Rasmussen et Lind en 1982 décrivent la prise de décision à l'aide du modèle dit de « l'échelle double » (*Double Ladder*) (Figure 1). Ce modèle décrit, dans sa partie montante à gauche, toutes les étapes du diagnostic qui sera réalisé par les agents à la suite d'un aléa. Dans sa partie haute est décrite l'évaluation des conséquences et la définition du but. Dans sa partie descendante à droite, il décrit toutes les étapes de la planification de l'action (Hoc & Amalberti, 1994). Suite aux observations de Rasmussen énoncées en début de paragraphe, on notera la présence de plusieurs courts-circuits, qui permettent de prendre en compte l'activité des opérateurs experts. Ceux-ci, en fonction de leur expérience, pourront effectuer un diagnostic de manière plus rapide, que ce soit un diagnostic « automatique », se basant sur la reconnaissance de signaux orientant directement vers l'action appropriée, ou un diagnostic « symbolique », se basant sur la reconnaissance de signes orientant vers une règle connue qui décrit l'action à appliquer. La totalité de l'échelle correspond au diagnostic reposant sur des connaissances, elle est parcourue quand les opérateurs sont confrontés à une situation inhabituelle voire totalement nouvelle (Hoc & Amalberti, Ibid).

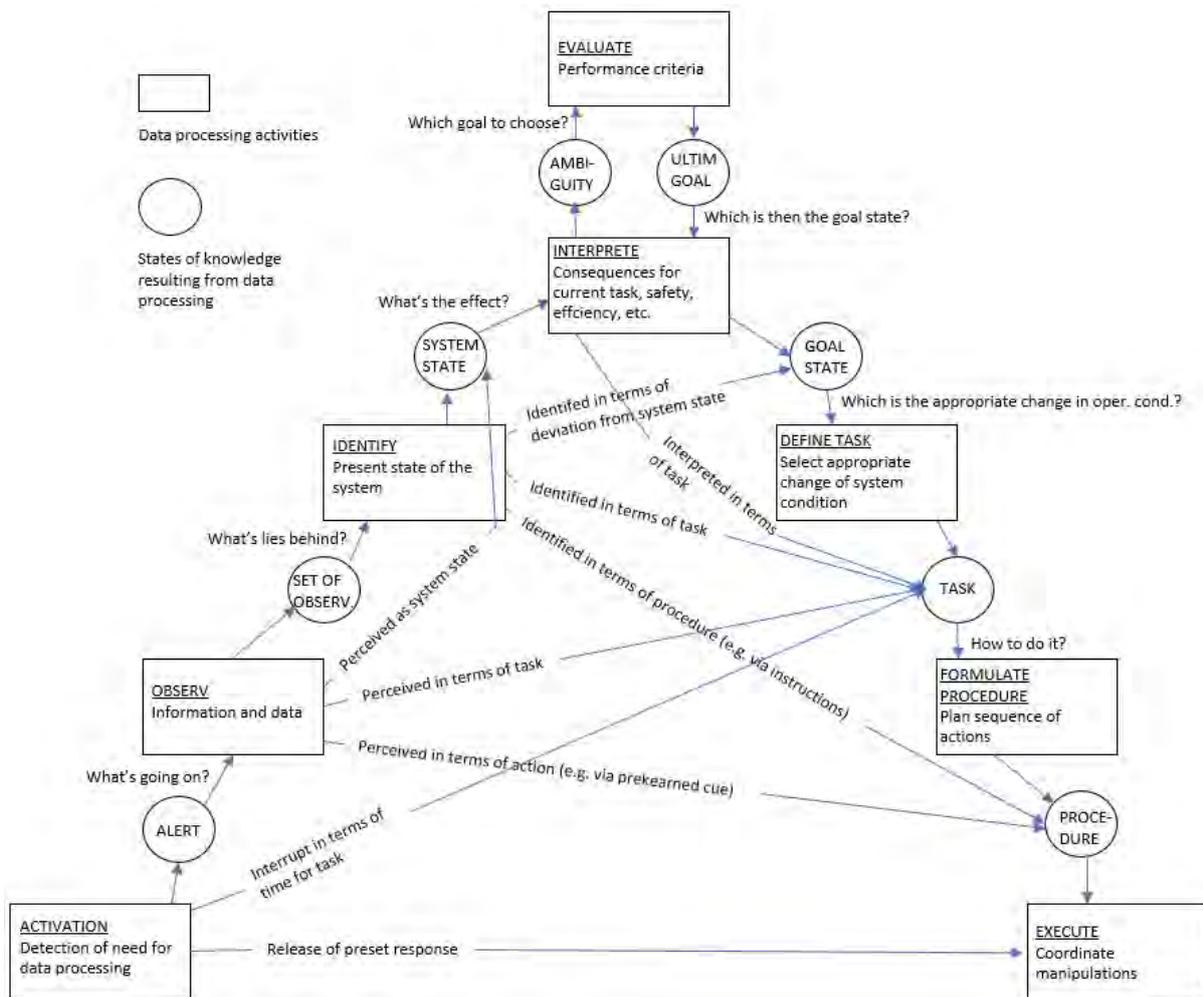


Figure 1 - Echelle double de prise de décision (Rasmussen, 1974)

Ce modèle a connu des évolutions, telles que celles rapportées par Jenkins, Stanton, Salmon, Walker et Rafferty (2010). Celui-ci voit notamment la partie haute évoluer, avec une évaluation guidée maintenant par les buts recherchés, et une boucle comparant les différentes options en regard des buts, de la performance et des conséquences (Figure 2).

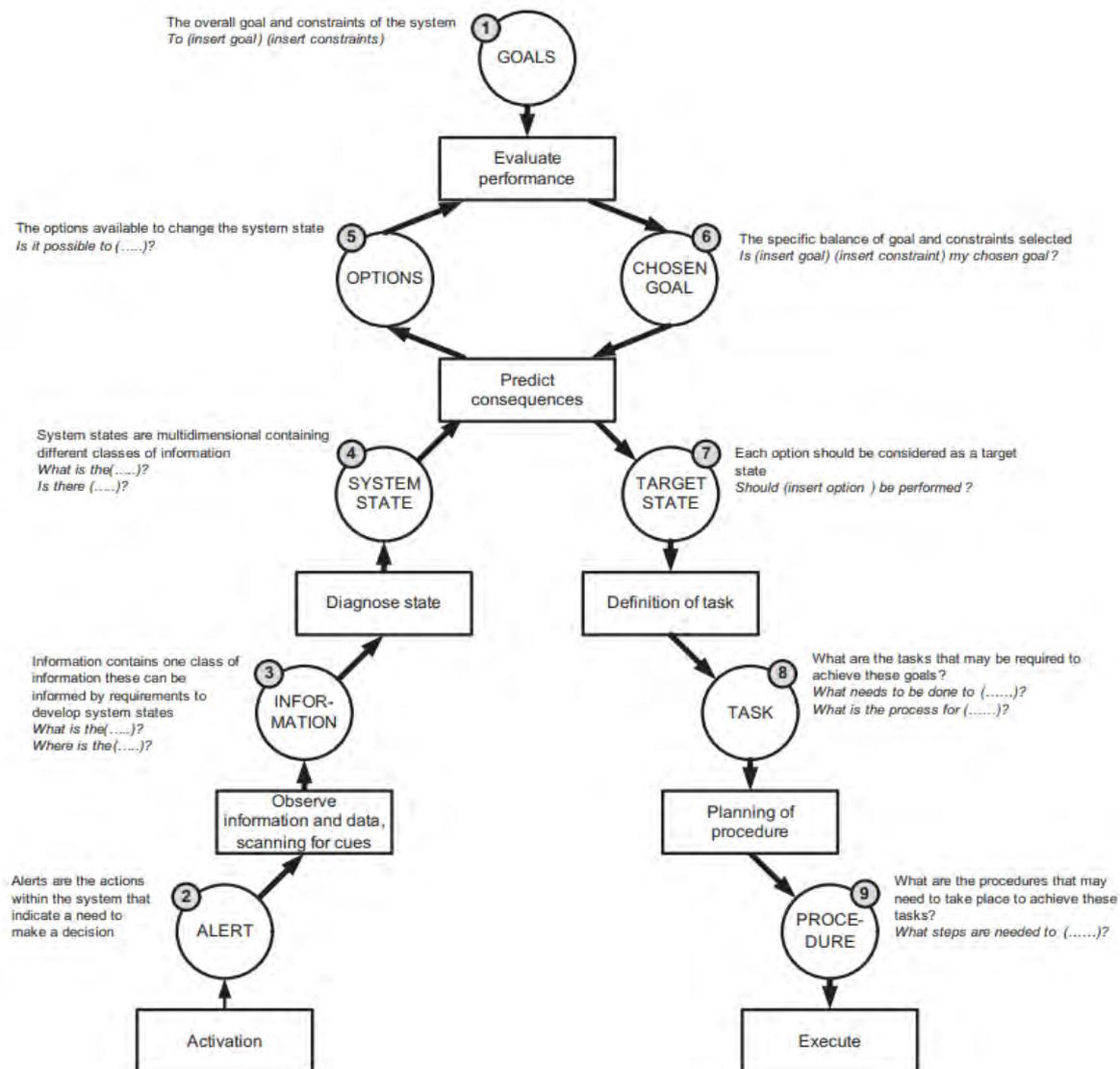


Figure 2 - Évolution de l'échelle double de prise de décision. Tiré de Jenkins et al. (2010).

Ce modèle trouve notamment son utilité dans le cadre de l'Analyse Cognitive du Travail (*Cognitive Work Analysis, CWA*, Rasmussen et al., 1994 ; Vicente, 1999), où il permet de déterminer les tâches que doivent accomplir des opérateurs dans une situation donnée. L'utilisation de ce modèle constitue l'une des premières phases de la CWA. Un exemple de son utilisation est montré sur la Figure 3 ci-dessous. Celle-ci présente deux cas de figure en aviation, concernant tous les deux la phase d'atterrissage. Le premier, à gauche, décrit le cheminement suivi par les pilotes afin d'effectuer les vérifications pour l'atterrissage (*Pre-landing Checks*). Les cases grisées sont celles utilisées. En l'occurrence, lorsque les pilotes observent la nécessité de configurer l'avion pour l'atterrissage, un raccourci est emprunté pour directement effectuer la procédure adéquate. Le second cas à droite décrit le cheminement nécessaire au maintien

d'un certain profil de descente, afin d'arriver au sol au niveau de la piste d'atterrissage. Les pilotes observent les paramètres relatifs au profil de descente, tels que le taux de descente, la vitesse et l'altitude. Un raccourci est ensuite emprunté qui conduit à l'état désiré du système, ici le maintien d'un profil de descente approprié. L'échelle est ensuite parcourue jusqu'à la fin, avec le choix des tâches pour arriver à l'état désiré du système, la planification de ces tâches, et leur exécution.

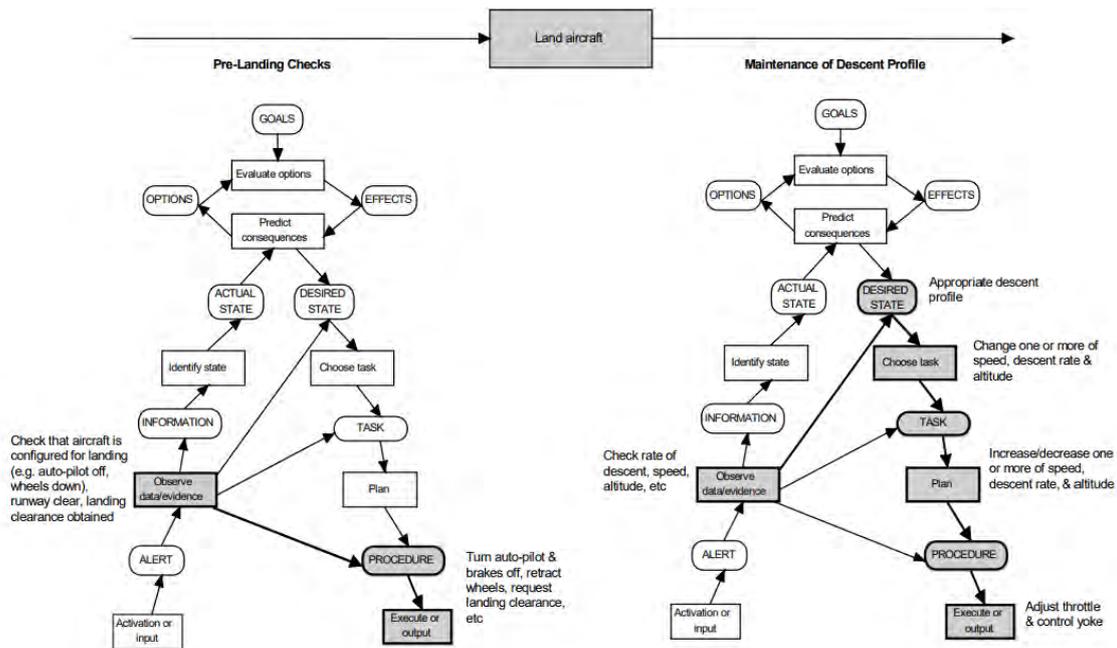


Figure 3 - Exemple d'utilisation de l'échelle double au sein d'une CWA. Tiré de Lintern & Naikar, 1998.

Ce modèle fait cependant l'objet de certaines critiques. Hoc et Amalberti (1994) pointent notamment son caractère trop séquentiel. De même, selon les auteurs, la notion de temps est absente alors que cet élément est fondamental dans les situations dynamiques, comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent.

Hoc et Amalberti ont proposé un nouveau modèle (Figure 4), basé sur l'échelle double de Rasmussen (1986), qui intègre des modifications visant à répondre à ces critiques. Le nouveau modèle, dit de gestion des situations dynamiques (*Dynamic Situation Management*, DSM), perd le caractère « réactif, procédural et séquentiel » de l'échelle double (Hoc & Amalberti, 1994). Les auteurs placent la « représentation occurrente » au centre du modèle. Cette représentation occurrente est « un modèle intériorisé de la réalité, élaboré en mémoire à court terme ». Pour

Hoc et Amalberti (1995), elle porte non seulement sur l'environnement et le système à contrôler mais aussi sur les actions possibles et les ressources de l'opérateur. L'activité va directement en dépendre, et les processus automatiques (supervisables) ainsi que les connaissances générales vont « l'alimenter ».

De plus, la notion de temps est introduite. Le temps est présent en tant que contrainte, car certaines situations dynamiques présentent une contrainte temporelle ; il est également présent lorsque les opérateurs sont dans l'attente de certaines informations nécessaires pour faire évoluer leur diagnostic.

Ce modèle présente trois boucles de régulation :

- En bas, la boucle de régulation à court terme, qui requiert le minimum de compréhension. Cette boucle est très influencée par le temps du processus. Elle fournit des informations aux autres boucles.
- Au centre, la boucle de régulation à moyen terme. Son action est dépendante de la représentation occurrente, nécessaire à l'action mais pas toujours suffisante, et sujette à des ajustements en provenance de la boucle à court terme.

En haut, la boucle de régulation à long terme. Elle se base sur les connaissances générales de l'opérateur. Cette boucle permet de réviser profondément la représentation occurrente.

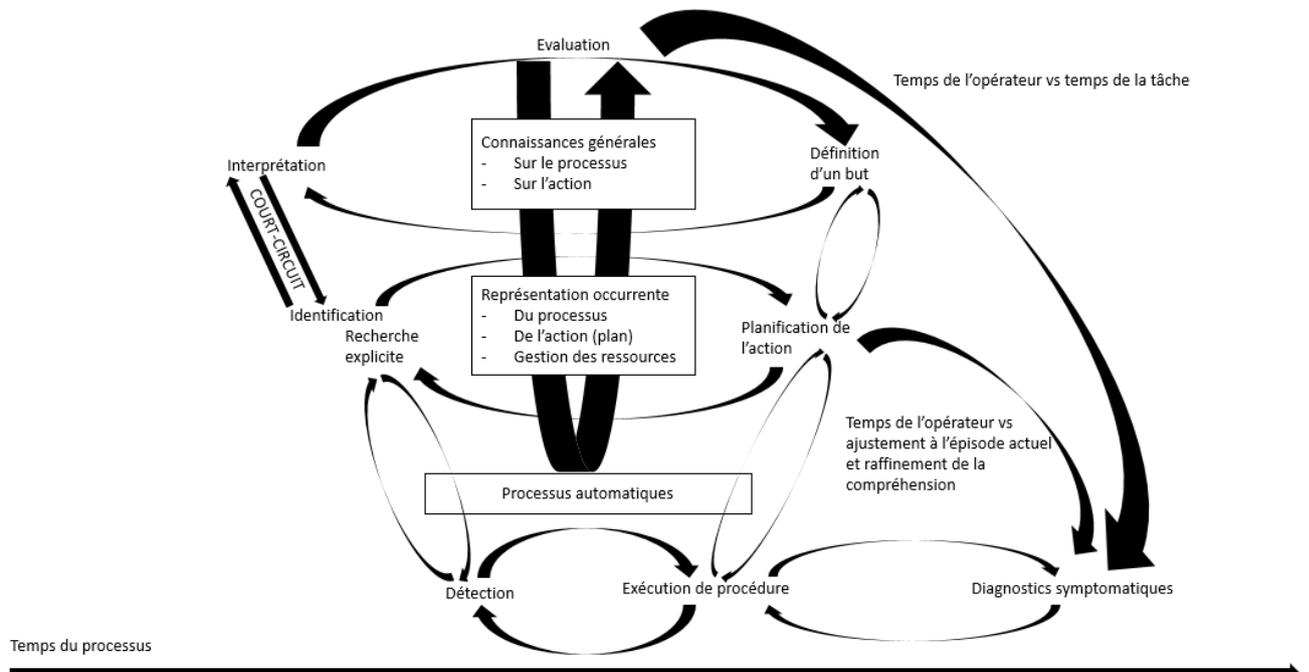


Figure 4 - Modèle de diagnostic et de prise de décision en situation dynamique (Hoc & Amalberti, 1994).

Ce modèle décrit ainsi le fait que les décisions prises ne reposent pas nécessairement sur une compréhension totale de la situation. Il suffit d'une compréhension « juste nécessaire » pour que la prise de décision puisse intervenir. Les connaissances générales peuvent servir à améliorer la réponse à un événement *a posteriori*, lorsqu'il se présentera à nouveau (Hoc & Amalberti, 1994).

Dans les années 1980, et dans la lignée des observations de Rasmussen (1974, 1976), plusieurs chercheurs montrent que les modèles analytiques de la prise de décision ne rendent pas compte de la complexité des situations naturelles (Kobus, Proctor & Hoste, 2001). C'est ainsi qu'est qu'apparu le courant de la « *Naturalistic Decision-Making* » (NDM). Le terme est employé pour la première fois en 1989 au cours d'une conférence où Klein, Orasanu, Calderwood et Zsombok (1993) ont présenté les résultats de leurs recherches menées sur la prise de décision chez des personnes expérimentées dans leur environnement naturel (Zsombok, 1997). Cet environnement naturel présente les caractéristiques suivantes :

- Les problèmes sont peu structurés ;
- Les environnements sont incertains et dynamiques ;
- Les buts sont changeants, mal définis et en compétition ;
- Les actions réalisées ont des effets en retour ;
- La pression temporelle et les enjeux sont forts ;
- Les acteurs sont multiples ;
- Il existe des buts et des normes fixés par une organisation.

Les chercheurs ont donc défini l'objet de la NDM comme suit :

« L'étude de la NDM porte sur la manière dont les personnes expérimentées, travaillant individuellement ou en groupe dans un environnement dynamique, incertain et à rythme rapide, identifient et évaluent leur situation, prennent des décisions et effectuent des actions dont les conséquences ont un impact sur eux-mêmes et sur l'organisation au sein de laquelle ils opèrent » (Zsombok, 1997).

L'un des pères fondateurs de la NDM, Gary Klein, propose un modèle de prise de décision qui s'inscrit dans ce courant de pensée. Ce modèle est nommé « *Recognition-Primed Decision* ». Il définit « ce que les individus font vraiment dans les situations où la contrainte temporelle est

forte, où les informations sont ambiguës, les buts mal définis et les conditions changeantes » (Klein, 1993). Klein démontre que les experts, en situation réelle, dynamique, incertaine et sous forte contrainte temporelle, prennent des décisions sans comparer plusieurs options. C'est un mécanisme de « reconnaissance », qui permet à un opérateur humain expert de prendre des décisions en se basant sur son expérience. S'il a déjà rencontré la situation, il sait immédiatement quelle solution appliquer. La décision est alors prise beaucoup plus rapidement qu'avec un modèle analytique de prise de décision. Il n'y a que très rarement de comparaison entre plusieurs options. Généralement, une seule option est rapidement choisie. C'est une option plausible, qui n'est pas la plus optimale mais qui fonctionne.

Le modèle RPD est présenté Figure 5 ci-dessous.

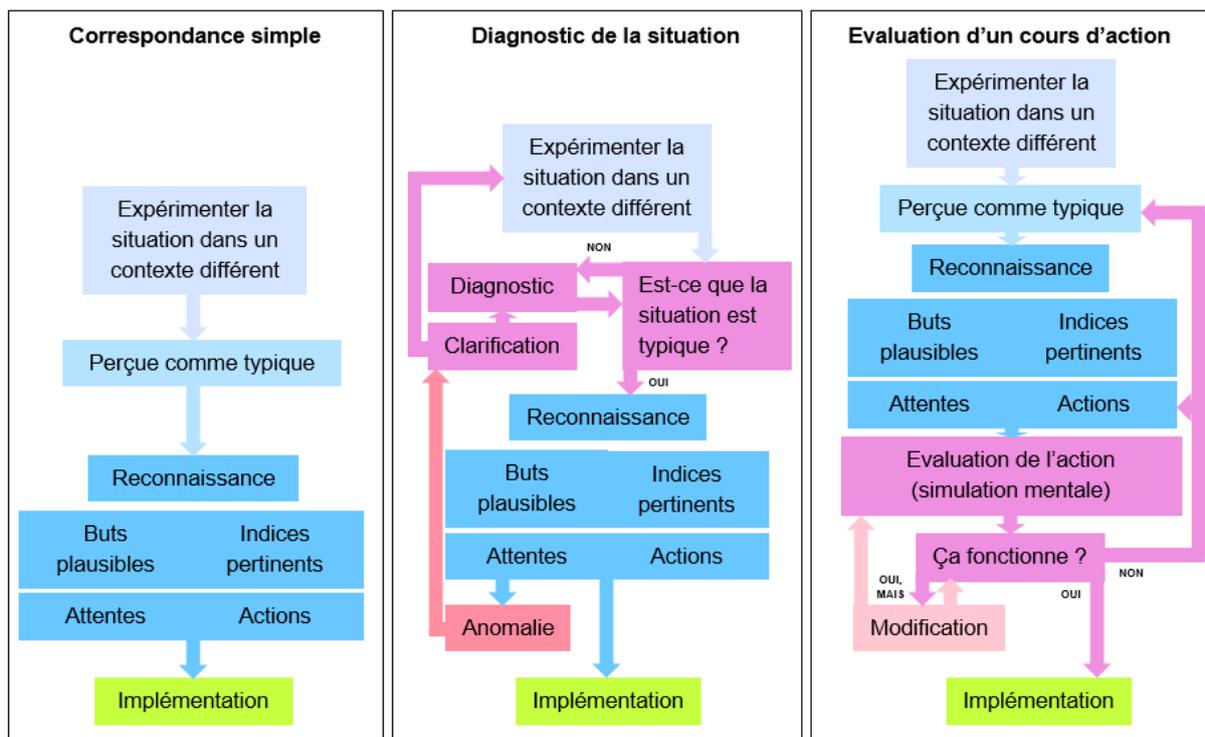


Figure 5 - Les trois cas de figure du modèle RPD (Klein, 1998).

La RPD présente trois variantes. Le cas le plus simple est celui où une situation est immédiatement reconnue, et où la réaction appropriée est de suite appliquée. Le second cas s'applique lorsque l'opérateur humain rencontre une situation un peu plus complexe. Il effectue préalablement une simulation mentale des actions qu'il souhaite mettre en œuvre afin d'en évaluer les conséquences. Si celles-ci s'avèrent satisfaisantes, les actions sélectionnées sont

appliquées. Sinon, elles sont modifiées, puis une nouvelle simulation mentale est réalisée, jusqu'à ce qu'elles soient jugées satisfaisantes. Dans le dernier cas de figure, la situation peut ne pas être immédiatement reconnue. Les opérateurs iront alors à la recherche d'informations supplémentaires jusqu'à ce que la situation leur rappelle un cas familier. Ils pourront alors réfléchir à la réponse qui leur semble appropriée, l'évaluer mentalement, l'ajuster si nécessaire, et enfin la mettre en œuvre.

Klein explique que ce modèle s'applique aussi bien aux décisions prises à l'issue d'un processus long (plusieurs jours) qu'à celles prises en moins d'une minute, aux décisions prises individuellement ou en équipe de plusieurs personnes, aux décideurs expérimentés ou aux novices (Klein, 1993). Toujours selon lui, il serait bénéfique d'entraîner les novices à reconnaître des situations, à communiquer sur leur évaluation de situation et à acquérir de l'expérience en simulation mentale.

En conclusion, ces trois modèles abordent la prise de décision de manières différentes. Le modèle de la Double Echelle permet de détailler toutes les étapes de la prise de décision aussi bien chez les opérateurs novices que chez les experts, qu'ils rencontrent une situation connue ou bien nouvelle. Il s'agit cependant un modèle linéaire, séquentiel, qui ne fait pas mention de la représentation mentale qu'à l'opérateur de la situation, ainsi que du temps.

Le DSM dépasse les limites de la Double Echelle, en plaçant la représentation mentale de l'opérateur en tant que Représentation Occurrente au centre du modèle, et en faisant graviter tous les autres processus autour. Les effets des actions de l'opérateur sont pris en compte dans la représentation occurrente, la linéarité disparaît et la notion de temps apparaît. Cependant, malgré son exhaustivité, c'est un modèle conceptuel qui est difficile à opérationnaliser.

Le RPD rend compte de la manière dont les experts prennent des décisions dans des situations naturelles. Il précise le fait que les experts ne comparent pas de multiples options avant de prendre une décision, mais essaient de faire correspondre la situation rencontrée avec une situation qu'ils ont déjà vécue et pour laquelle ils disposent d'un modèle mental. Si besoin est, une simulation mentale du cours d'action envisagé est réalisée afin de s'assurer qu'il permettra bien d'atteindre le but recherché, puis il sera exécuté.

Ces trois modèles se complètent par les différents éléments qu'ils apportent. Pour donner un exemple de cette complémentarité, Naikar (2010) a comparé les modèles de Double Echelle et RPD. Ce travail de synthèse montre que les stratégies de prise de décision mises en jeu dans le

modèle RPD peuvent tout à fait être décrites à l'aide du modèle de Double Echelle, moyennant quelques ajustements, de type boucles de rétroaction, qui n'existent pas dans le modèle de base de Double Echelle.

Ainsi, on peut avoir une très bonne approche des processus de prise de décision grâce à la complémentarité de ces modèles. Le point commun aux trois modèles est de faire apparaître le besoin d'identifier la situation rencontrée afin de pouvoir agir en connaissance de cause. C'est tout l'enjeu des branches « montantes » des modèles de l'échelle double et du DSM. C'est par ailleurs la raison d'être du modèle RPD. Il existe des modèles qui se concentrent sur le détail des processus de compréhension de la situation. Comme il est de première importance de comprendre toutes les facettes de la prise de décision afin de l'assister au mieux, nous passons en revue deux modèles phares de compréhension de la situation dans la partie suivante.

2.2 MODELES DE COMPREHENSION DE LA SITUATION

Les deux modèles phares que nous présentons ici nous semblent chacun décrire au mieux les processus de compréhension de la situation dans deux cas distincts : la compréhension d'une situation courante et la compréhension d'une situation inhabituelle.

2.2.1 Compréhension d'une situation courante

En 1995, les travaux d'Endsley mettent l'accent sur le fait qu'il est nécessaire d'avoir une représentation mentale de la situation pour pouvoir prendre une décision. Endsley définit la « *Situation Awareness* » (SA, conscience de la situation) comme étant « la perception des éléments dans l'environnement au sein d'un volume temporel et spatial, la compréhension de leur signification et la projection de leur état dans le futur proche » (Endsley, 1995). Cette définition explicite les trois niveaux hiérarchiques présents au sein de ce modèle (Figure 6). Endsley définit également le processus d'évaluation de la situation (« *situation assessment* »), qui permet d'acquérir et de maintenir la SA. Endsley (2000) explique que l'évaluation de la situation est affectée par les buts, les attentes, le modèle mental de l'opérateur (c'est-à-dire des données internes) et les données externes (caractéristiques de la situation en cours) ; elle détermine la SA résultante. Cette SA va ensuite elle-même guider l'évaluation de la situation

et notamment la recherche de nouvelles données, ce qui va aboutir à son ajustement dans le cadre d'un processus itératif. La SA et l'évaluation de la situation s'affectent donc l'une l'autre, dans un cycle rappelant le cycle perceptuel de Neisser (1976) (Figure 7).

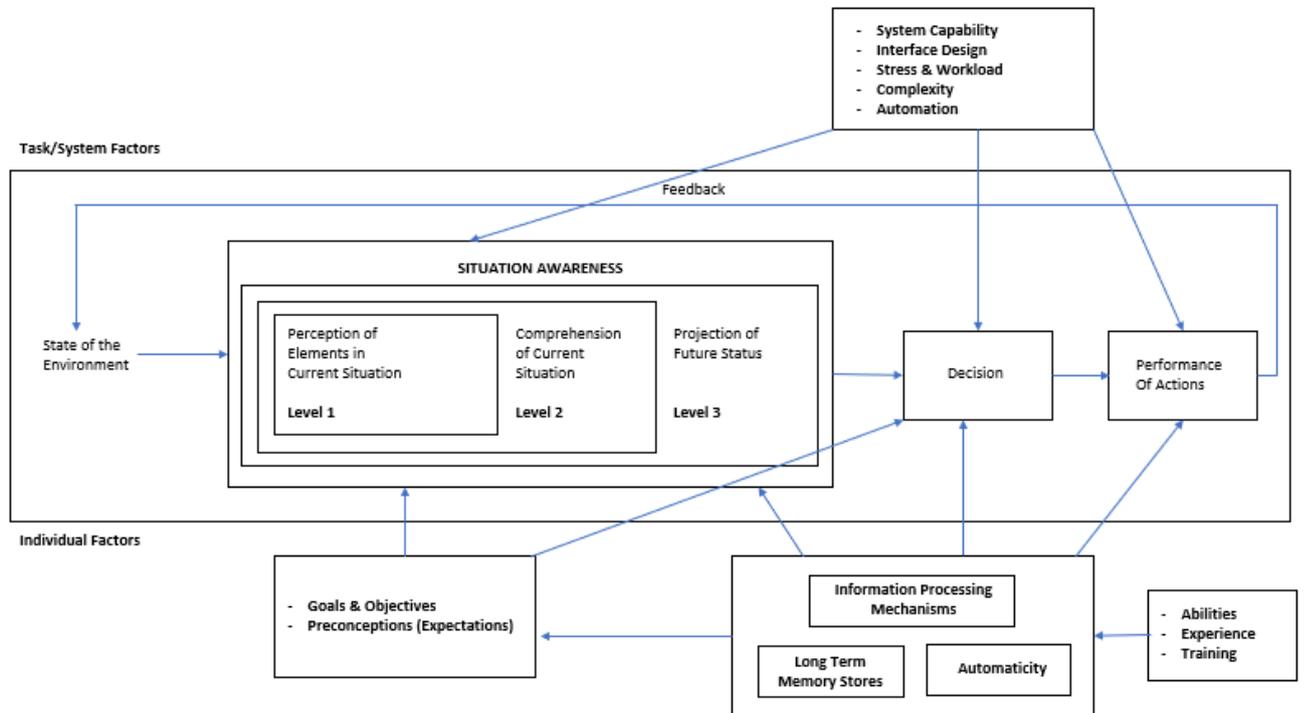


Figure 6 - Le modèle de Situation Awareness et son lien avec la prise de décision en situation dynamique (Endsley, 1995).

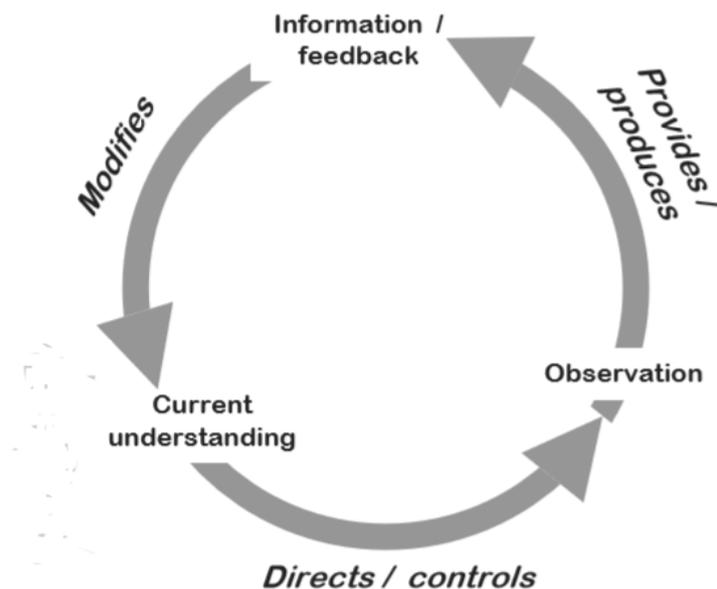


Figure 7 - Le cycle perceptuel de Neisser (1976) (tiré de Hollnagel, 1998).

Le premier niveau est la « perception des éléments dans l'environnement ». Il s'agit de percevoir les caractéristiques de ces éléments. Endsley prend l'exemple d'un pilote qui devrait donc percevoir son « avion, les montagnes, ou les alarmes lumineuses avec leurs caractéristiques pertinentes (couleur, taille, vitesse, localisation) ».

Le second niveau est la « compréhension de la situation courante ». L'opérateur va faire une synthèse des éléments qu'il aura perçus auparavant. Il va leur donner une signification, influencée par ses buts. A ce niveau, l'expérience est une plus-value pour comprendre correctement la situation à partir des divers éléments. Par exemple, si un pilote militaire remarque trois avions ennemis proches les uns des autres en un lieu géographique donné, il peut en déduire certains de leurs buts.

Le troisième et dernier niveau de la SA est la « projection dans un état futur ». L'opérateur, ayant une compréhension de la situation et connaissant la dynamique des éléments de l'environnement, peut prédire l'évolution de la situation dans un futur proche. Par exemple, un pilote militaire qui perçoit un avion ennemi en mode offensif et dans une certaine position géographique peut en déduire la manière dont il est susceptible d'attaquer.

Endsley établit un lien entre la SA et la prise de décision d'un individu. En effet, une SA incorrecte conduira généralement à un risque accru d'erreur de prise de décision, à moins que l'individu ne se rende compte d'une incohérence entre sa SA et certains éléments de l'environnement (voir *Sensemaking* partie 2.2.2) et adapte son comportement en conséquence. Inversement, une bonne SA accroît généralement la qualité de la prise de décision, sans pour autant la garantir (Jones & Endsley, 1996 ; Wickens, 2002 ; Wickens, McCarley, Alexander, Thomas, Ambinder & Zheng, 2008 ; Sorensen, Stanton & Banks, 2011 ; Blash, Paces & Leuchter, 2014).

Endsley détaille également les facteurs pouvant conduire à des erreurs dans la SA. Au premier niveau, les erreurs peuvent provenir de la non-détection de certains éléments pertinents, ou alors de leur mauvaise perception. Au second niveau, les erreurs sont souvent dues à la mauvaise compréhension des données par l'opérateur, ou à une négligence de ces données par sous-estimation de leur importance. Le niveau 3 quant à lui peut tout simplement être absent ou incorrect. Ceci dépend de facteurs individuels ; certaines personnes sont meilleures en simulation mentale que d'autres (Endsley, 1995).

D'autres facteurs plus généraux peuvent également mener à des erreurs de SA aux trois niveaux. Il s'agit par exemple de personnes ayant des troubles de l'attention distribuée, ou de personnes qui, en présence de certains éléments de l'environnement, déclenchent des schémas habituels (au niveau des habiletés).

Ce modèle fait cependant l'objet de beaucoup de critiques. Son caractère linéaire est critiqué, mais aussi la nécessité que la SA soit complète pour que le processus de prise de décision puisse avoir lieu. On sait, en effet, que l'action est nécessaire à la compréhension (Amalberti, 2001). Ce modèle sous-estime donc le fait que la compréhension d'une situation nécessite des actions exploratoires (Bedny, Karwowsky & Jeng, 2004). Endsley (2015) apporta des réponses à ces critiques, en précisant notamment que les trois niveaux de la SA n'étaient pas linéaires mais ascendants, ce qui permet par exemple de faire des hypothèses quant aux données manquantes au niveau 1 en utilisant les niveaux 2 et 3. Ainsi les niveaux 2 et 3 peuvent être complets sans que le niveau 1 ne le soit.

2.2.2 Compréhension d'une situation inhabituelle

En 2006, Klein *et al.* définissent un modèle qui décrit le processus permettant d'arriver à un état de compréhension lors d'une situation inhabituelle, contrairement au processus de « *situation assessment* » (évaluation de la situation) décrit par Endsley (1995) et permettant d'arriver à un état de compréhension d'une situation courante. Ce processus, nommé « *Sensemaking* », a été défini par Weick en 1995 comme étant « initié lorsqu'une personne (ou une organisation) réalise l'inadéquation de la compréhension courante des événements ». Klein *et al.* (2006) le définissent comme « un effort délibéré de comprendre les événements », qui est « déclenché par des changements inattendus ou d'autres surprises qui nous font douter de notre compréhension première » (Klein *et al.*, Ibid).

Les éléments de l'environnement, pour être expliqués et rendre une situation cohérente aux yeux de l'opérateur, ont besoin d'être liés les uns aux autres par une structure. Cette structure est nommée « cadre » (« *frame* »). Ce cadre peut être de différents types : il peut s'agir d'une histoire, liant les événements chronologiquement les uns aux autres. Il peut s'agir d'une carte, représentant les villes, routes et paysages les uns par rapports aux autres. Ce peut être un script, décrivant les tâches des uns et des autres. Ce peut également être un plan décrivant une séquence d'actions.

Les opérateurs ne prennent pas en compte toutes les données. En fonction du cadre, seules certaines données pertinentes sont sélectionnées. Ce sont également les données qui permettent de sélectionner un cadre adéquat. Le *sensemaking* commence donc quand une personne remarque une incohérence entre des données qui lui semblaient a priori pertinentes, et le cadre qu'elle a sélectionné. La personne recherche donc à la fois d'autres éléments pertinents, et un cadre plus adapté ; c'est un processus actif.

Les auteurs mentionnent neuf caractéristiques définissant le *sensemaking* (Klein *et al.*, 2006) :

- « Le *sensemaking* est le processus qui fait correspondre des données à un cadre et qui fait correspondre un cadre adéquat aux données existantes ».
- « Les données sont inférées en utilisant le cadre plutôt qu'en tant que primitives perceptives ». Les personnes vont percevoir les données différemment, et leur donner une importance plus ou moins élevée, en fonction de leurs buts et de leurs attentes.
- « Le cadre est inféré à partir de quelques points d'ancrage ». Lorsque l'opérateur rencontre une nouvelle situation ou une situation différente de celle qu'il attendait, il se sert d'un ou deux éléments de son environnement pour établir l'ébauche d'un nouveau cadre. C'est ce nouveau cadre qui va servir à rechercher de nouvelles données pertinentes. Les auteurs affirment par ailleurs que pour établir un cadre, les personnes se basent sur au plus trois ou quatre points d'ancrage.
- « Les inférences utilisées dans le *sensemaking* reposent aussi bien sur le raisonnement abductif que sur la déduction logique ».
- « Le *sensemaking* cesse habituellement lorsque les données et le cadre sont congruents ». Il peut cependant continuer s'il y a un bénéfice à en tirer, comme des informations supplémentaires.
- « Les experts raisonnent de la même manière que les novices, mais ont un répertoire de cadres plus riche ».
- « Le *sensemaking* est utilisé afin d'arriver à une compréhension fonctionnelle », en plus d'une compréhension abstraite.
- « Les humains utilisent principalement des modèles mentaux « juste à temps » ». Ces modèles permettent de comprendre les relations de cause à effet qui sont directement pertinentes au regard des problèmes qu'ils rencontrent.
- « Le *sensemaking* peut revêtir différentes formes, chacune possédant sa propre dynamique ».

Les différentes activités du *sensemaking* sont au nombre de 7 : connecter un cadre et des données, élaborer le cadre, questionner le cadre, préserver le cadre, comparer des cadres, recadrer, et rechercher un cadre (Klein *et al.*, 2006).

- « Connecter un cadre et des données » : les données perçues initialement vont déterminer le cadre qui va être utilisé pendant toute la durée d'un incident.
- « Elaborer le cadre » : le cadre est élaboré, amélioré par des détails au fur et à mesure que les gens apprennent de leur environnement. Il ne sera pas remplacé tant qu'aucune incohérence ou surprise ne surviendra.
- « Questionner le cadre » : le questionnement survient lorsqu'une incohérence est détectée entre les données et le cadre, donc lorsqu'une surprise survient.
- « Préserver le cadre » : lorsque des données ne concordent pas avec le cadre, les opérateurs tentent de leur donner une explication logique sans remettre le cadre en cause. C'est généralement une source d'erreur, car les données contradictoires peuvent être le signe d'un cadre non-adapté à la situation.
- « Comparer plusieurs cadres » : il est parfois utile de comparer plusieurs cadres pour comprendre une situation.
- « Recadrer » : lorsque beaucoup de données apparaissent incohérentes, un nouveau cadre est recherché afin d'identifier les nouvelles données pertinentes, et les données sont utilisées afin d'identifier le nouveau cadre.
- « Rechercher un cadre » : lorsque les données sont incohérentes et que le recadrage ne fonctionne pas. Les opérateurs procèdent alors par simulation mentale, en essayant de trouver des analogies et en recherchant des points d'ancrage.

Les auteurs suggèrent que le *sensemaking* peut aider les concepteurs de systèmes d'aide à la décision, en les guidant sur quelques points. Ils conseillent ainsi aux concepteurs de ne pas essayer d'apporter trop d'informations aux opérateurs car ceci pourrait avoir pour effet de diminuer les performances liées à leurs habiletés ; ils conseillent également que les systèmes ne reposent pas uniquement sur le raisonnement logique mais aussi sur le raisonnement abductif, et qu'ils apportent une aide à l'identification des points d'ancrage pertinents (Klein *et al.*, 2006).

Les auteurs suggèrent également que le modèle du *sensemaking* soit utilisé dans le cadre des programmes d'entraînement (Klein *et al.*, 2006). Par exemple, il est habituellement conseillé aux opérateurs de garder l'esprit ouvert et d'éviter de se fixer trop tôt sur une hypothèse, de

manière à réduire les erreurs de fixation. D'autres auteurs suggèrent au contraire qu'avoir un esprit ouvert peut être contre-productif. Ils préconisent donc de choisir un cadre et de s'y tenir afin de pouvoir le tester de manière efficace. Une seconde piste consiste en l'amélioration des retours d'expérience. Le *sensemaking* est utile à la compréhension des retours d'expérience, et ceux-ci permettent d'améliorer le *sensemaking*. L'entraînement peut également aider les pilotes à se repérer géographiquement lorsqu'ils sont perdus, ou encore à améliorer la richesse des cadres chez les individus. Il est également utile d'entraîner les personnes à gérer leurs ressources attentionnelles et à devenir moins sensibles aux distractions.

2.2.3 Conclusion

La revue des modèles de prise de décision ainsi que de compréhension de la situation nous permet d'apporter un éclairage sur la manière dont les opérateurs humains perçoivent une situation et y agissent. De nombreuses notions ont été introduites, et plusieurs processus ont été décrits. Ceci amène cependant à nous questionner sur la manière dont les opérateurs humains adaptent leur comportement vis-à-vis de la situation et de sa dynamique, ainsi que sur les mécanismes qui sous-tendent ces adaptations. Plusieurs études abordent ces mécanismes en termes de « contrôle cognitif ». La partie suivante s'attarde sur ces études.

2.3 MODELES DU CONTROLE COGNITIF

Le contrôle cognitif permet aux opérateurs d'ajuster de manière dynamique leur comportement aux changements pouvant survenir dans la situation rencontrée (Hoc & Amalberti, 2007). Amalberti (2001, p. 107) le définit comme « toute activité de supervision, interne à la cognition, dont l'objectif est d'assurer et de vérifier le bon usage des capacités cognitives, aussi bien en termes d'intensité que d'ordonnancement dans le temps, afin d'atteindre le ou les objectifs visés par le sujet ».

Afin de maintenir un niveau de performance satisfaisant en regard de la situation, le contrôle cognitif régule l'activité d'un point de vue externe et interne. La gestion au point de vue externe permet de s'assurer de l'atteinte des objectifs fixés, tandis que le point de vue interne maintient l'opérateur dans un état cognitif lui garantissant la possibilité d'agir.

Ces deux points de vue sont cependant opposés, dans le sens où la gestion externe demande des ressources afin d'être en capacité de comprendre la situation et d'atteindre les objectifs, et où la gestion interne cherche à économiser ces mêmes ressources afin d'éviter l'épuisement et de garder des ressources nécessaires en cas d'imprévu. L'opérateur est alors amené à effectuer des compromis, et régule son activité afin de concilier ces deux versants (Hoc & Amalberti, 1995 ; Amalberti, 2001).

Nous abordons ici trois modèles de contrôle cognitif, dans l'ordre chronologique de leur publication.

La taxonomie « *skill-rule-knowledge* » (SRK) (Figure 8) proposée par Rasmussen (1983) détaille les différents niveaux de contrôle auxquels un opérateur peut interagir avec son environnement. Il existe trois niveaux de contrôle : les niveaux basés sur les habiletés (*skill*), les règles (*rule*), et les connaissances (*knowledge*).

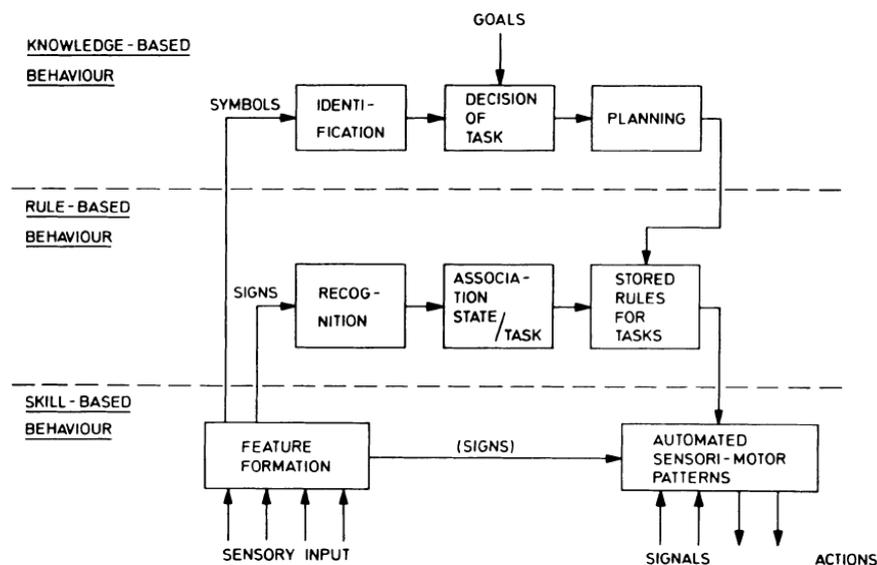


Figure 8 - Illustration des trois niveaux de fonctionnement chez les opérateurs humains (Rasmussen, 1983).

Le niveau *skill*, ou comportement basé sur les habiletés, représente le niveau de fonctionnement des opérateurs lorsqu'ils effectuent des actions basées sur des automatismes. Lorsqu'un opérateur détecte un écart entre l'état actuel d'un système et l'état dans lequel il devrait se trouver, il agit selon un comportement bien établi, bien connu, qui a été répété de nombreuses fois, et qu'il peut accomplir de manière réflexe, sans contrôle conscient et sans y porter attention

(Rasmussen, 1983). A ce niveau, les informations pertinentes sont perçues comme des « signaux ».

Au niveau *rule*, ou comportement basé sur les règles, l'opérateur dispose d'un ensemble de règles qu'il a établies empiriquement, qui lui ont été communiquées, ou encore qu'il a pu mettre au point lors d'une résolution de problème (Rasmussen, 1983). Le choix de la règle à appliquer est fonction du but à atteindre, et de l'état dans lequel se trouve le système. L'opérateur se base sur des règles d'association de type « si... alors... ». La sélection de règles dépend des expériences précédentes, ainsi seules les règles ayant le mieux fonctionné sont conservées (« *survival of the fittest rule* », Rasmussen, 1983). Contrairement au niveau *skill*, l'opérateur effectue des actions consciemment. A ce niveau, les informations pertinentes sont perçues comme des « signes ».

Lorsque l'opérateur rencontre une situation qui ne lui est pas familière, le contrôle de la performance est réalisé au niveau *knowledge*. A ce niveau, l'opérateur analyse son environnement et formule un but. Plusieurs plans sont alors mis en place et testés afin d'atteindre ce but, soit par essais-erreurs, soit par compréhension de l'environnement et prédiction des effets du plan (Rasmussen, 1983). Ce niveau de contrôle nécessite une représentation de la structure du système sur lequel on cherche à agir, sous la forme d'un modèle mental. A ce niveau, les informations pertinentes sont perçues comme des « symboles ».

En 1998, Hollnagel propose un autre point de vue dans l'étude de la prise de décision en situation dynamique. Il considère les compétences des opérateurs de façon générique et ne prend donc pas en compte les différences interindividuelles. Le modèle qu'il propose, nommé « *Contextual Control Model* » (COCOM), explique que les compétences sont mises en œuvre différemment, en fonction de la situation que rencontre l'opérateur.

COCOM ne présente que deux paramètres (le nombre de buts et le temps subjectif disponible) et deux fonctions (le choix de l'action suivante et l'évaluation des conséquences) (Hollnagel, 1998) (Figure 9). Différents modes de contrôle sont définis par le nombre de buts que l'opérateur peut considérer dans le même temps, le temps subjectif disponible, le nombre d'actions envisageables et la détermination des conséquences. Le modèle présente cinq modes de contrôle : stratégique, tactique supervisé et non supervisé, opportuniste et aléatoire.

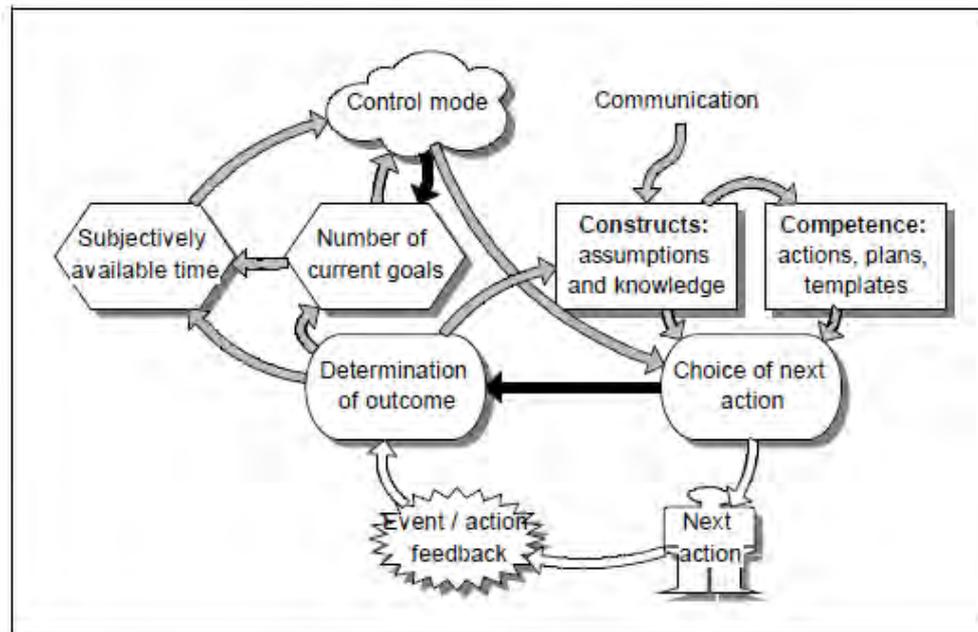


Figure 9 - Relations entre les paramètres et les fonctions du modèle COCOM (Hollnagel, 1998).

L’auteur explique que lorsque la compréhension de la situation est bonne, le temps requis pour évaluer les développements du processus sera faible. Si le temps disponible est suffisant, l’opérateur pourra facilement contrôler le système et il aura du temps à consacrer à d’autres tâches, telles que la planification, etc. Si au contraire il n’y a pas de correspondance entre les événements attendus et les événements actuels, l’opérateur aura besoin de plus de temps pour évaluer la situation. Il aura donc moins de temps à consacrer aux autres tâches. Hollnagel décrit également une limite au-delà de laquelle le temps requis pour l’évaluation devient supérieur au temps disponible, ce qui détériore fortement le contrôle du système par l’opérateur. (Figure 10) (Hollnagel, 1998). Cette différence entre temps nécessaire pour évaluer la situation et temps réellement disponible constitue le **temps subjectif disponible**.

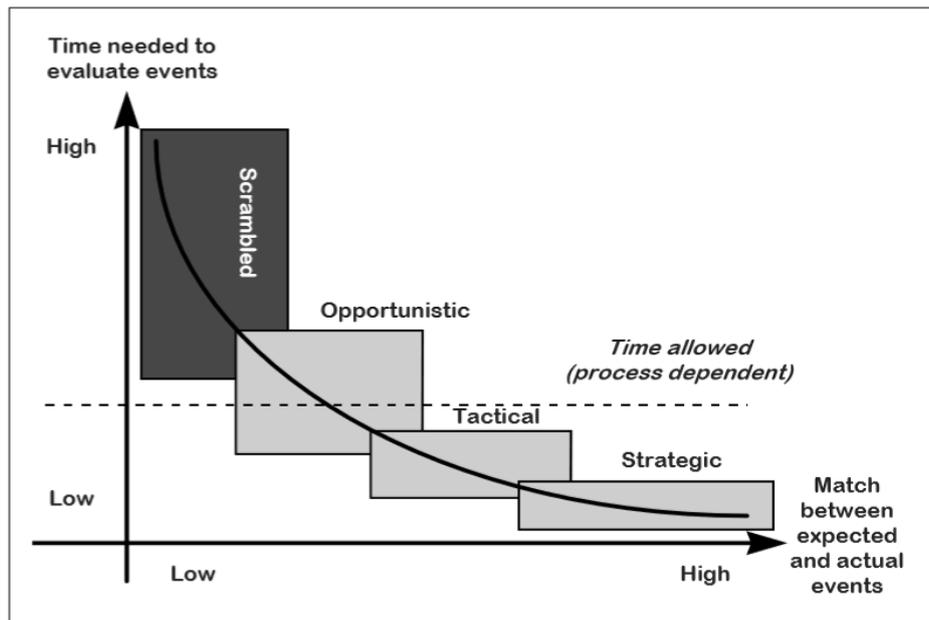


Figure 10 - Modes de contrôle en fonction de la compréhension de la situation (Hollnagel, 1998).

La Figure 10 montre également le lien entre les modes de contrôle et le temps subjectif disponible. Plus le temps subjectif disponible est faible, moins le contrôle est bon. Lorsque le mode de contrôle est « brouillé » (*Scrambled*), l'opérateur ne dispose pas d'un temps suffisant pour pouvoir comprendre la situation, et elle devient irrécupérable, à moins d'un changement d'état du système. Le choix de l'action semble hasardeux. En mode « opportuniste », le temps disponible est à la limite du temps requis par l'opérateur pour comprendre la situation. Il effectue seulement les actions nécessaires, il n'y a pas de planification d'action à plus long terme faute de temps disponible. Dans les modes de contrôle tactique et stratégique, l'opérateur dispose de plus de temps pour anticiper l'évolution du système, et ainsi prévoir des actions à plus long terme (Hollnagel, 1998). Ces observations ne sont pas sans rappeler les propos de Keinan, (1988) pour qui les contraintes induisent les opérateurs à percevoir une certaine pression temporelle, même si ça n'est pas le cas. Un résumé des caractéristiques des modes de contrôle est présenté dans le Tableau 1.

	Nombre de buts	Temps subjectif disponible	Choix de l'action suivante	Evaluation du résultat
Stratégique	Nombreux	Abondant	Basé sur des prédictions	Elaborée
Tactique (supervise)	Nombreux (limités)	Limité, mais adéquat	Basé sur un plan	Normale
Tactique (non supervisé)	Nombreux (limités)	Plus qu'adéquat	Basé sur un plan, mais non réfléchi	Normale, mais imprécise
Opportuniste	Un, ou deux (en compétition)	Court ou inadéquat	Basé sur des associations	Superficielle
Brouillé	Un	Très limité	Hasardeux	Rudimentaire

Tableau 1 - Caractéristiques des modes de contrôle (Hollnagel, 1998).

En 2007, Hoc et Amalberti proposent un nouveau modèle du contrôle cognitif. Celui-ci constitue une synthèse des modèles de Hollnagel (1998) et de Rasmussen (1983). En effet, il reprend les modes de contrôle symbolique et subsymbolique présentés par Rasmussen, ainsi que le recours aux données internes à l'individu (schémas mentaux) et aux données externes de l'environnement décrits par Hollnagel. Il ressort, du croisement de ces paramètres, quatre modes de contrôle cognitif (Figure 11) :

- Le contrôle symbolique des données externes,
- Le contrôle symbolique de données internes (ou traitement de représentations internes),
- Le contrôle subsymbolique de données externes,
- Le contrôle subsymbolique de données internes (par exemple la coordination interne d'actions).

Il existe enfin un contrôle métacognitif afin d'assurer constamment le bon niveau de contrôle au regard de la situation.

Hoc et Amalberti (Ibid.) expliquent que le développement d'automatismes permet aux experts de réaliser un éventail toujours plus large d'activités au niveau subsymbolique. Dans le même temps se développent des représentations internes qui rendent possible la réalisation d'activités cognitives même lorsque peu de données externes sont disponibles. Ces auteurs soulignent

cependant également que le contrôle symbolique peut précéder ou remplacer le contrôle subsymbolique lorsque l'expert fait face à une situation difficile.

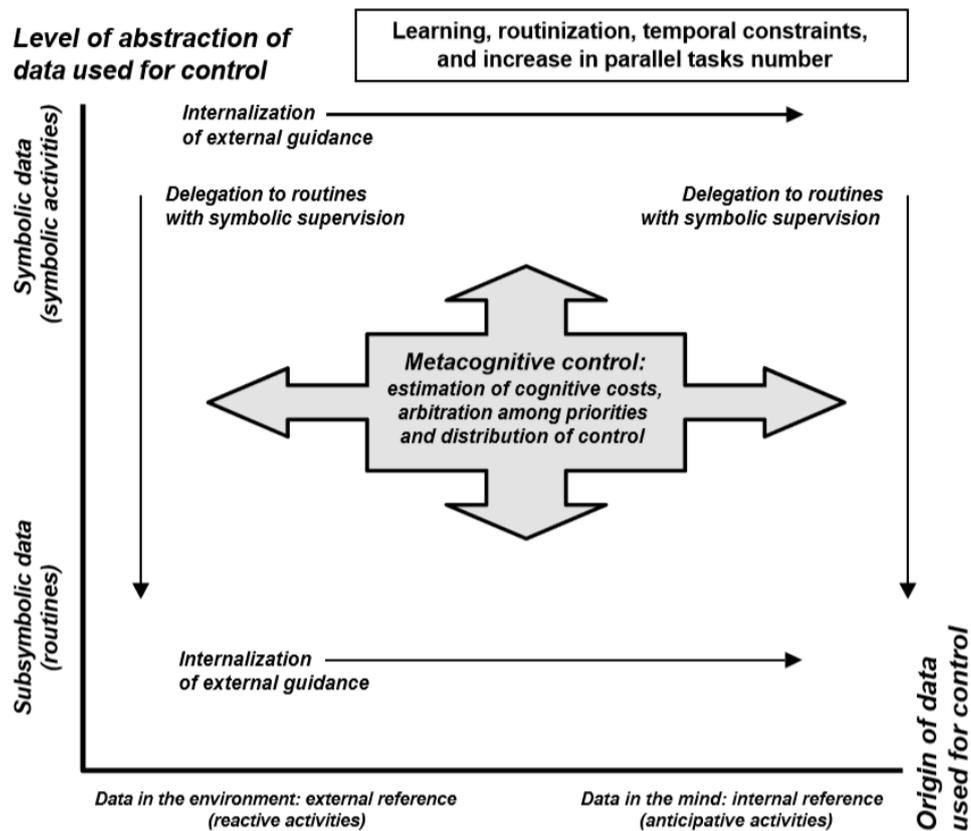


Figure 11 - Effets de l'expertise sur le contrôle cognitif (Hoc & Amalberti, 2007).

Ce modèle reprend donc les aspects internes à l'individu en incluant la manière dont les données sont traitées, faisant référence au modèle SRK de Rasmussen (1983). Il intègre également les facteurs externes, notamment l'aspect temporel, comme ayant un effet sur l'origine des données utilisées par l'individu. Les modes de contrôle sont donc déterminés à la fois par l'expertise de l'opérateur, et par la caractéristique de la situation (sa complexité, sa contrainte temporelle). Ce modèle a notamment été utilisé pour étudier l'activité de coaching d'équipes de handball lors de compétitions de haut niveau (Debanne & Chauvin, 2014). Les auteurs ont observé que les entraîneurs utilisent aussi bien le mode de contrôle anticipatif que réactif, et que dans chacun des modes, ils pouvaient indifféremment utiliser des données subsymboliques ou symboliques. En effet, lorsque la situation ne présentait pas de difficulté, ils restaient en mode réactif même si le temps disponible permettait un mode anticipatif. Ils passaient au mode anticipatif si la

situation se complexifiait et que les plans mis en place ne semblaient pas fonctionner. Ils pouvaient également, en cas de situation complexe, remplacer le contrôle subsymbolique par le contrôle symbolique.

La limite de ce modèle concerne la description précise de l'influence des facteurs externes à l'individu sur la dynamique des modes de contrôle. En effet, Hollnagel (1998) décrit plusieurs facteurs externes pouvant déterminer le mode de contrôle utilisé par l'individu, tels que la contrainte temporelle et le nombre de buts. Ceux-ci, bien que mentionnés dans le modèle de Hoc et Amalberti, ne sont pas clairement intégrés, et leur effet sur le choix de l'utilisation de données symboliques ou subsymboliques, et sur l'origine externe ou interne des données utilisées n'est pas défini.

2.4 CONCLUSION

Cette revue des modèles de prise de décision, de compréhension de la situation et de contrôle cognitif conduit à mettre en exergue des notions qui sont communes à plusieurs d'entre eux.

La notion de **schéma mental** est une notion fondamentale que l'on retrouve dans tous les modèles. Elle est abordée de deux manières différentes selon les modèles. Endsley (1995), dans son modèle de *Situation Awareness*, fait référence à la notion de *schéma*, telle que décrite par Bartlett en 1932, c'est-à-dire un « cadre de travail cohérent pour comprendre l'information et englober les composants, états et fonctionnements de systèmes très complexes » (Endsley, 1995). Ces schémas sont stockés en mémoire à long terme et l'opérateur y fait appel pour comprendre et intégrer ou non les données qu'il perçoit, et avoir une représentation mentale du fonctionnement d'un système. C'est cette même représentation mentale qui permet le niveau 3 de la SA, c'est-à-dire la projection de l'état du système dans le futur.

Les modèles de Hoc et Amalberti utilisent la notion de *schème* telle que définie par Piaget en 1960, en référence au schème d'action défini comme « la structure générale de cette action se conservant au cours de ses répétitions, se consolidant par l'exercice et s'appliquant à des situations qui varient en fonction des modifications du milieu ». La différence avec la notion de schéma de Bartlett réside en le fait qu'un schème intègre l'action de l'opérateur, il le place comme acteur de la situation, tandis qu'un schéma est une représentation mentale où l'opérateur est observateur de la dynamique de la situation.

Klein *et al.*, pour leur modèle de *Sensemaking* (2006), abordent les deux notions mais ne semblent pas clairement se positionner. De plus, rien ne semble indiquer que l'action de l'opérateur soit prise en compte dans la sélection/modification du cadre et dans la sélection des données pertinentes.

La notion de **représentation mentale occurrente** est définie comme une construction circonstancielle élaborée dans une situation donnée et pour faire face aux exigences de la tâche en cours (Richard, Bonnet, Ghiglione, Bromberg, Beauvois, Doise & Deschamps, 1990).

On retrouve cette notion dans le modèle d'Endsley (1995), où elle est nommée *Situation Awareness*. Celle-ci prend effectivement en compte les données perçues dans l'environnement et les intègre à un schéma afin de constituer une représentation mentale de la situation. La limite de ce modèle réside comme mentionné plus haut dans la non-prise en compte de l'effet de l'action de l'opérateur sur l'état futur de la situation. De même, la représentation de la situation dans le *Sensemaking*, une fois que le cadre et les données correspondent, n'est pas ajustée par les actions que prévoit l'opérateur. On leur préférera donc la notion de représentation occurrente définie par Hoc et Amalberti (1994) comme un « modèle intériorisé de la réalité, élaboré en mémoire à court terme », car il dépasse cette limite en prenant en compte l'action de l'opérateur dans la boucle.

Nous avons vu qu'afin de prendre des décisions, les opérateurs doivent avoir élaboré une représentation de la situation. Cette représentation sert de base à la prise de décision. Elle est alimentée par les données internes à l'opérateur (contenue en mémoire à long terme et stockées sous forme de schèmes), et/ou par les données externes, prélevées dans l'environnement. La sélection de l'origine de ces données est fonction non seulement de l'expertise de l'opérateur (dispose-t-il de ces données ou non ?) mais également de la pression temporelle subjective qui s'exerce sur l'opérateur. Les modèles de contrôle cognitif (COCOM et Contrôle Métacognitif) stipulent que plus la pression temporelle subjective est forte, plus l'opérateur se basera sur les caractéristiques saillantes de la situation, sans analyser la situation en profondeur. De même, cette pression temporelle subjective module les processus de compréhension de la situation, qui seront plus ou moins poussés.

Cette pression temporelle subjective résulte de la complexité globale de la situation, caractérisée par le temps réellement disponible, le nombre de données et leur complexité, et le nombre d'objectifs et de tâches à traiter. En fonction de la complexité, les modèles de contrôle cognitifs décrivent l'instanciation de modes de contrôle cognitif plus ou moins proactifs,

permettant ainsi une analyse (et donc une compréhension) plus ou moins approfondie de la situation, afin de prendre une décision, et d'implémenter le cours d'action correspondant.

Nous pouvons ainsi constater le rôle clé du contrôle cognitif dans le processus de prise de décision. En effet, le contrôle cognitif affecte la construction de la représentation occurrente, sur laquelle l'opérateur base ses décisions.

Enfin, **la notion d'erreur** est apparue à de nombreuses reprises. L'erreur peut intervenir à chaque étape du processus de décision. Elle est, comme nous l'avons vu, souvent liée à une représentation mentale erronée. Une performance insatisfaisante peut être également causée par l'adoption d'un mode de contrôle non optimal, tel que le mode « brouillé » identifié dans le modèle COCOM. Le chapitre suivant présente plus en détail les erreurs de décision.



CHAPITRE 3.

ACTIVITE DE DECISION ET ERREURS DE DECISION DANS L'AVIATION COMMERCIALE

La prise de décision est une composante essentielle de l'activité des pilotes. Comme le souligne Orasanu (2010), elle intervient à tous les moments d'un vol, de l'acceptation par le commandant de l'avion et du plan de vol avant le départ à la porte d'arrivée après atterrissage. Les pilotes sont entraînés à répondre à de nombreuses situations d'urgence, telles qu'une panne moteur ou un feu moteur ; cependant, les événements qui surviennent en situation réelle peuvent différer de ceux vus en entraînement. Ils nécessitent donc de mettre en œuvre des processus de décision qui ne consistent pas toujours en une simple reconnaissance de situation (Dismukes, Goldsmith & Kochan, 2015) et qui nécessitent de rediriger son attention vers l'événement qui survient, de reconnaître sa nature, d'évaluer la situation et d'y apporter une réponse satisfaisante. Or, des erreurs peuvent survenir à chacune de ces étapes. Orasanu et

Fischer (1996) observent que les erreurs de décision peuvent survenir soit au niveau de l'évaluation de la situation (*i.e.* construction de la représentation mentale ou « *situation assessment* »), soit au niveau de la sélection d'un plan d'action ; ces deux étapes correspondent aux deux parties de la Double Echelle de décision.

Ce chapitre est consacré aux erreurs humaines, et plus particulièrement aux erreurs de décision qui ont été analysées dans le domaine de l'aviation. Il est composé de deux sections. La première présente des modèles et outils qui permettent d'appréhender l'erreur humaine en aviation, ce qui nous amènera ensuite à relever le taux d'erreurs de décision dans différentes études analysant les accidents d'avion. La seconde donne un aperçu de ce que sont ces erreurs de décision en aéronautique et des facteurs pouvant y contribuer.

3.1 COMPRENDRE LES ERREURS HUMAINES EN AVIATION

3.1.1 Quels modèles pour décrire l'erreur humaine en aviation ?

James Reason propose de considérer le terme d'« erreur » dans un sens générique, couvrant tous les cas où une séquence planifiée d'activités mentales ou physiques ne parvient pas aux fins désirées, et qui concerne des échecs ne pouvant être attribués à l'intervention du hasard (Reason, 1990, p. 9). Une autre définition intéressante est proposée par Lipshitz ; elle porte spécifiquement sur l'erreur de décision. L'auteur considère le processus qui conduit à l'erreur comme « des déviations d'un processus standard de prise de décision qui augmentent le risque de mauvais résultats » (Lipshitz, 1997, p. 152). Les erreurs de décision, qui sont l'objet de notre étude, sont définies par Wiegmann et Shappell (2003, p. 53) comme survenant lorsque les intentions des opérateurs sont en inadéquation avec la situation, que ce soit par manque de connaissances, ou simple mauvais choix. Trois types d'erreurs sont décrites par les auteurs : les erreurs procédurales, qui apparaissent par exemple lorsqu'un opérateur applique la mauvaise procédure à une situation donnée ; les mauvais choix, pouvant survenir par exemple lorsque l'opérateur dispose d'une expérience insuffisante ; et les erreurs liées à la résolution de problèmes survenant lorsque les opérateurs sont confrontés à une situation non reconnue et qu'ils ne comprennent pas correctement. Nous allons ci-dessous décrire des modèles et outil permettant d'appréhender l'erreur humaine en aviation, ce qui nous permettra ensuite de présenter la prévalence des erreurs de décisions dans les accidents d'avion.

L'erreur humaine a fait l'objet de nombreuses études qui ont abouti à des tentatives de modélisation des processus qui la génèrent, ainsi qu'à la mise en évidence des facteurs qui peuvent y contribuer. Depuis la fin des années 90, il est admis que l'analyse des accidents, et par là même des erreurs, doit reposer sur des modèles systémiques et organisationnels. Les modèles linéaires complexes, tels que le modèle *Swiss cheese* de Reason (1997) ou bien des modèles systèmes non-linéaires, tels que le modèle FRAM (Hollnagel, 2004) présentent l'avantage de « capturer » la complexité des systèmes sociotechniques et d'offrir une bonne compréhension des facteurs qui participent de la genèse d'un accident. Nous présenterons ici le modèle « *Swiss cheese* » de Reason (1990, 2000). Ce modèle systémique a servi de base à la classification HFACS (Shappell & Wiegmann, 2000) qui a été conçue pour analyser le rôle des facteurs humains dans les accidents d'avions.

Dans son ouvrage de 1990 « *Human Error* », James Reason propose un modèle qui se concentre sur le versant multifactoriel des accidents. Après de multiples variantes que nous ne présenterons pas ici (pour une revue détaillée, voir Larouzée *et al.*, 2014), Reason propose en 2000 la quatrième et dernière version de son modèle, également la plus populaire. Celui-ci est composé de quatre barrières permettant normalement d'empêcher deux types de défaillances :

- les conditions latentes, qui sont propres au système. Elles peuvent créer des conditions propices aux erreurs, et créer des trous ou des faiblesses de longue durée dans les défenses du système. Ces conditions latentes peuvent être « dormantes » pendant plusieurs années avant de se combiner à une erreur active et créer une opportunité d'accident. Les conditions latentes peuvent être détectées et corrigées avant la survenue d'un accident ;
- les erreurs actives, actes non sûrs commis par les personnes qui sont en contact direct avec le système, autrement dit les « opérateurs de première ligne ». Ces erreurs ont un effet direct et à court terme sur l'intégrité des défenses.

Les barrières de défense permettent d'éviter les situations autorisant la survenue d'une erreur. Ces barrières de défense ne sont cependant pas infaillibles. Malgré toutes les mesures mises en place, des conditions latentes peuvent être présentes à chacun des niveaux, et des erreurs actives peuvent également être commises. Du fait de la structure du modèle, une erreur survenant à un niveau donné est le fruit d'une erreur qui n'a pas été parée au niveau précédent. On peut alors imaginer ces barrières de défense comme trouées par endroits, les trous représentant les failles

pouvant amener à une erreur. Un accident survient lorsque toutes les lignes de défense sont franchies ; c'est-à-dire lorsque les trous sur chaque ligne de défense sont alignés. Dans la représentation graphique de son modèle, Reason utilise la métaphore du fromage suisse ; en effet, celui-ci prend la forme de tranches comportant des trous. Ainsi chaque tranche représente une barrière de défense, et les trous représentent les failles de ces barrières ; d'où le nom de « *Swiss cheese* » donné à son modèle (Figure 12) (Reason, 2000). Ces trous sont dynamiques, ils s'ouvrent, se ferment et se déplacent, et chacun est dû à une condition latente ou à une erreur active.

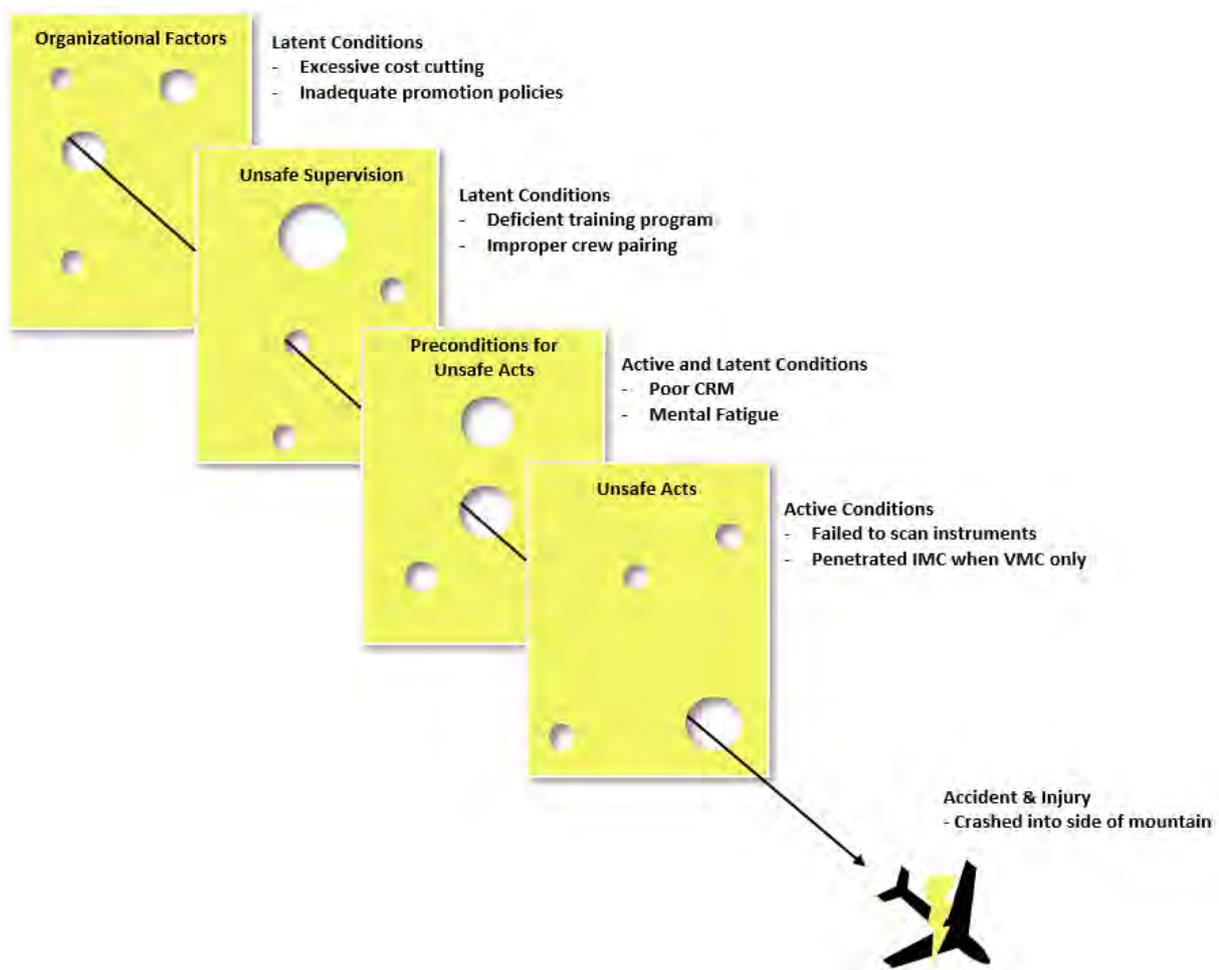


Figure 12 - Le modèle « *Swiss Cheese* » de cause des accidents. Tiré de Shappell & Wiegmann (2000).

Chaque barrière de défense est nommée d'après la catégorie d'erreurs actives ou de conditions latentes qu'elle doit parer. On retrouve ainsi dans l'ordre, d'amont en aval, les catégories :

- *Facteurs organisationnels (organisational factors)*, qui décrit les failles dans la gestion d'une entreprise, par exemple une compagnie aérienne. Il s'agit principalement de

mauvaises décisions concernant les aspects financiers ou de ressources humaines de l'entreprise. Ce niveau englobe également les règles et procédures mises en place au sein de l'entreprise. Les failles observées à ce niveau affectent directement l'intégrité du niveau suivant.

- *Supervision non sûre (unsafe supervision)*, qui comprend les failles pouvant survenir tout au long de la chaîne de commandement. Ce niveau regroupe des défaillances telles que le manque d'entraînement, le non-respect du temps de repos des équipages, ou encore la non-correction de défauts pourtant connus et affectant des éléments du système.
- *Préconditions aux actes non sûrs (preconditions for unsafe acts)*, qui décrit les conditions et pratiques non-conformes des opérateurs de première ligne pouvant les amener à commettre des erreurs. Ce niveau comprend aussi bien la fatigue due à un manque de sommeil que les illusions visuelles (*conditions of operators*), ou encore une mauvaise coordination au sein de l'équipage (*personnel factors*).
- *Actes non sûrs (unsafe acts)*, qui décrit les erreurs commises par les opérateurs de première ligne, et qui entraînent directement des accidents.

Ce modèle permet de prendre en compte les multiples facteurs entrant en jeu dans un accident, en amont des erreurs commises par les opérateurs. Ce modèle sert ainsi de base à un système de classification d'accidents (présentée ci-après) utilisée par plusieurs acteurs de la sécurité (ATSB, 2005) et chercheurs afin de classer les accidents par type d'erreurs. Ceci permet d'obtenir des statistiques sur les types de facteurs impliqués dans les accidents.

Les catégories décrites par le modèle de Reason sont reprises au sein de l'outil *Human Factor Analysis and Classification System* (HFACS), qui a été développé pour la « *Federal Aviation Administration* » américaine. Ses deux auteurs, Shappell et Wiegmann, sont partis du constat que les systèmes de classification d'accidents de l'époque ne se basaient sur aucune étude théorique de l'erreur humaine, qui était pourtant impliquée dans 70 à 80 % des accidents (étude des accidents d'avion de l'U.S. Navy entre janvier 1977 et décembre 1992, Shappell & Wiegmann, 1996). Le besoin d'un cadre autour duquel articuler les méthodes d'investigation pour les accidents se faisait ressentir, d'où la création de cet outil.

L'outil HFACS (Figure 13) se base sur le modèle « *Swiss cheese* », et reprend donc les quatre niveaux déjà présentés. Le tableau 2 présente plus en détail chacune des catégories.

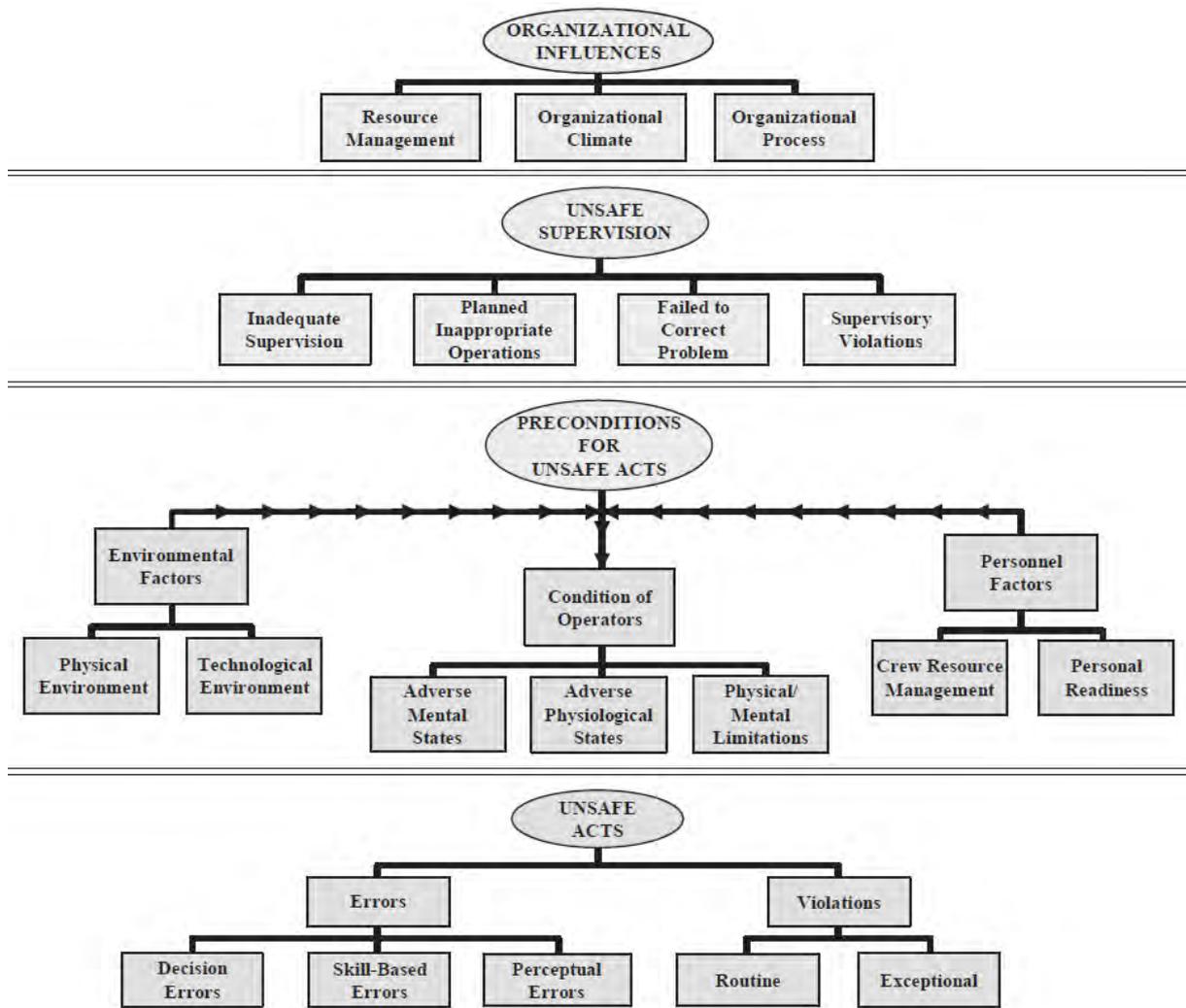


Figure 13 - Vue de synthèse du système d'analyse et de classification des facteurs humains. Tiré de Wiegmann & Shappell, 2003.

Niveaux	Description
Actes non-sûrs : Erreurs	<p><u>Erreurs basées sur les habiletés</u> (<i>Skill-based errors</i>) : cette partie regroupe les erreurs de pilotage à proprement parler, par exemple une mauvaise manœuvre sur le manche de l'avion, ou l'appui par erreur sur un bouton plutôt qu'un autre. Wiegmann et Shappell (2003) expliquent que les erreurs basées sur les habiletés sont souvent liées à des défauts attentionnels et de mémoire.</p> <p><u>Erreurs de décision</u> (<i>Decision errors</i>) : lorsque les intentions des opérateurs sont en inadéquation avec la situation. Les auteurs distinguent trois types d'erreurs de décision : les erreurs procédurales, les mauvais choix et les erreurs de résolution de problèmes. Les erreurs procédurales sont décrites par Rasmussen (1983) comme étant des erreurs au niveau de contrôle basé sur les règles. Elles sont observées par exemple lorsqu'un opérateur applique la mauvaise procédure à une situation donnée. Les auteurs précisent que ce type d'erreur survient principalement lors d'urgences présentant une forte pression temporelle, telles qu'une panne moteur au décollage (Shappell & Wiegmann, 2000). Les mauvais choix sont apparentés au niveau de contrôle basé sur les connaissances (Rasmussen Ibid). Ceci arrive principalement lorsque des pressions extérieures entrent en compte dans la prise de décision, ou que l'expérience de l'opérateur est insuffisante. Enfin, les auteurs mentionnent les erreurs liées à la résolution de problèmes qui surviennent lorsque les opérateurs se retrouvent confrontés à une situation non reconnue et qu'ils ne comprennent pas correctement.</p> <p><u>Erreurs perceptives</u> (<i>Perceptual errors</i>) : surviennent lorsqu'un opérateur a une perception de son environnement qui diffère de la réalité. Les auteurs classent ici les réponses erronées des opérateurs résultant par exemple d'illusions visuelles ou de désorientations spatiales (classées plus bas dans la sous-partie <i>Etats physiologiques dégradés</i>).</p>
Préconditions aux actes non- sûrs	<p>Condition des opérateurs (<i>Conditions of operators</i>) :</p> <p><u>Etats mentaux dégradés</u> (<i>Adverse mental states</i>) : lorsque l'opérateur n'est pas préparé mentalement à effectuer une tâche, par exemple à cause d'un état de fatigue mentale, ou lorsque des éléments affectent cet état mental, comme par exemple certains traits de personnalité. Les auteurs expliquent qu'en cas de fatigue mentale, le risque pour un opérateur de commettre une erreur sera plus élevé. De plus, les traits de personnalité tels que l'arrogance et l'impulsivité augmenteront le risque pour un opérateur de commettre une violation (Shappell & Wiegmann, 2000).</p> <p><u>Etats physiologiques dégradés</u> (<i>Adverse physiological states</i>) : lorsque la condition physique d'un opérateur est dégradée, pouvant être source d'erreurs. Sont classées ici les illusions visuelles et la désorientation spatiale, mais aussi le simple fait pour un pilote d'être malade et de se rendre au travail. En effet, un simple rhume, lorsqu'il est accompagné d'une infection de l'oreille interne, peut augmenter la possibilité pour un pilote d'être victime de désorientation spatiale.</p> <p><u>Limitations physiques/mentales</u> (<i>Physical/mental limitations</i>) : lorsque les exigences d'une tâche dépassent les capacités de l'opérateur. Les auteurs prennent pour exemple le pilotage de nuit, qui demande une vigilance accrue car les obstacles sont plus difficiles à déceler (autres avions, lignes électriques, etc.). La pression temporelle est également un élément de cette catégorie. Lorsque l'exigence temporelle de la tâche est trop élevée, la possibilité pour un pilote de commettre une erreur est accrue car ses temps de réaction sont incompatibles avec cette exigence.</p> <p>Facteurs personnels (<i>Personnel factors</i>) :</p> <p><u>Gestion des ressources d'équipage</u> (<i>Crew resource management</i>) : lorsque la coordination entre les opérateurs est mauvaise, que ce soit entre les deux pilotes, ou entre les pilotes et le contrôle aérien. Ceci peut arriver pendant le vol, ou avant et après lors des briefings et débriefings.</p> <p><u>Aptitude personnelle</u> (<i>Personal readiness</i>) : concerne le comportement des opérateurs en dehors du travail ; ce sont les actes qui influent sur la capacité des opérateurs à être aptes à effectuer leurs tâches (par exemple avoir un repos convenable, éviter un exercice physique excessif, etc.). Cette partie ne sera donc pas abordée dans cette étude.</p> <p>Facteurs environnementaux (<i>Environmental factors</i>) :</p> <p><u>Environnement physique</u> (<i>Physical environment</i>) : impact que peuvent avoir les paramètres physiques de l'environnement sur l'équipage de l'avion. Par exemple, une mauvaise météo réduit la visibilité et donc les repères visuels des pilotes, ce qui peut induire une désorientation spatiale. Un autre exemple serait les accélérations subies par les pilotes de chasse et de voltige qui perturbent l'afflux sanguin dans le cerveau, ce qui peut mener à des troubles visuels et à des pertes de connaissance.</p> <p><u>Environnement technologique</u> (<i>Technological environment</i>) : concerne les caractéristiques des équipements du cockpit (affichages, interfaces de contrôle, disposition des checklists, etc.) qui peuvent impacter la performance des pilotes. Par exemple, la présence d'une automatisation très fiable pousse les pilotes à lui faire confiance sans forcément la remettre en cause.</p>

Tableau 2 - Description des catégories Actes non-sûrs et Préconditions aux actes non-sûrs du HFACS (Wiegmann & Shappell, 2003).

Dans le cadre de cette thèse nous nous intéresserons uniquement aux catégories « *Préconditions aux actes non-sûrs* » et « *Actes non-sûrs* ». En effet, notre étude est centrée sur l'activité des pilotes aux commandes de leur avion, en vol. Ainsi, les facteurs organisationnels et de supervision n'entrent pas directement en ligne de compte. Nous n'aborderons pas non plus les violations au sein des *Actes non-sûrs*. Cette catégorie concerne des actes délibérés, or notre étude porte sur les erreurs involontaires.

3.1.2 Analyse des accidents d'avion à l'aide de l'outil HFACS

3.1.2.1 Les actes non-sûrs

L'utilisation de l'outil HFACS dans le cadre de l'étude des accidents d'avions permet de déterminer l'implication des différentes classes de facteurs dans ces événements, et de savoir ainsi quelles sont les catégories de facteurs les plus importantes. Comme nous venons de l'indiquer, nous nous sommes particulièrement intéressés aux actes non sûrs d'une part et aux préconditions de ces actes d'autre part. Les résultats des études ayant utilisé le HFACS permettent de connaître le pourcentage des erreurs de décision dans les accidents d'avion.

Le Tableau 3 ci-dessous résume les résultats de quatre études ayant utilisé le HFACS et met en évidence la contribution des différents types d'actes « non-sûrs » aux accidents répertoriés. La somme des pourcentages pour chaque étude peut être supérieure à 100 car un accident peut être associé à plusieurs catégories.

Etude	Année	Pays	Période	Actes non-sûrs		
				Erreurs basées sur les habiletés (%)	Erreurs de décision (%)	Erreurs perceptives (%)
ATSB	2005	Australie	01/01/93 - 31/12/2002	84	33	6
ATSB	2005	USA	01/01/93 - 31/12/2002	77,3	29,2	
Li et al.	2008	Chine	1999 - 2006	70,7	70,7	51,2
Li	2011	Chine	1999 - 2010	58,6	68,8	27,5
Daramola	2014	Nigeria	1985 - 2010	66,6	25	5

Tableau 3 - Implication des différents types d'actes non sûrs dans les accidents d'avion

Parmi les quatre études recensées, plusieurs font ressortir l'importance relative des *erreurs de décision*.

C'est le cas de l'étude menée par le Bureau Australien pour la Sécurité des Transports (ATSB, 2005). Ses auteurs ont utilisé le HFACS pour analyser les classes de facteurs impliquées dans des accidents d'avion survenus entre le 1^{er} janvier 1993 et le 31 décembre 2002 en Australie et aux Etats-Unis, à des fins de comparaison entre les deux pays, en excluant les accidents impliquant les actes de sabotage, de suicide, de vol ou de détournement. Cette étude couvre tous les domaines de l'aviation, incluant aussi bien l'aviation générale que l'aviation commerciale. Les résultats de cette étude montrent, tous domaines d'aviation confondus, que les *erreurs de décision* sont impliquées dans 33 % des accidents survenus en Australie. En comparaison, on compte 84 % pour les *erreurs basées sur les habiletés*, 8 % pour les *violations* et 6 % pour les *erreurs de perception*. Les pourcentages des accidents survenus aux Etats-Unis sont comparables, puisque 29,2 % des accidents sont associés à des *erreurs de décision*. En comparaison, on compte 77,3 % d'*erreurs basées sur les habiletés*. Les *erreurs de décision* décrites dans cette étude consistent, entre autres, en la sélection d'un terrain inadéquat pour l'atterrissage, le décollage ou le roulage, en un mauvais planning prévol ou pendant le vol, ou encore en la réalisation de manœuvres à basse altitude.

En 2014, une étude menée par Daramola utilisait également le HFACS pour classer les causes de 45 accidents d'avions survenus au Nigeria entre 1985 et 2010. Au sein de la catégorie des *Actes non-sûrs*, les *erreurs de décision* étaient impliquées dans 25 % des accidents. En comparaison, on comptait 66,6 % d'*erreurs basées sur les habiletés* et 5 % d'*erreurs perceptives*.

Les deux études menées par Li et collaborateurs aboutissent à des résultats sensiblement différents. En 2008, une étude menée par Li *et al.* sur 41 accidents d'avion survenus en Chine entre 1999 et 2006 montre un pourcentage équivalent de 70,7 % pour les *erreurs de décision* et les *erreurs basées sur les habiletés* ; les *erreurs perceptives* étant impliquées dans 51,2 % des accidents.

Une étude plus récente menée par Li en 2011 prend en compte 51 accidents d'avion survenus en Chine entre 1999 et 2010. 321 instances d'erreurs humaines ont été observées dans ces 51 accidents. Les résultats de cette étude montrent que les *erreurs de décision* ont été impliquées dans 35 des 51 accidents, soit 68,6 %, et représentent la prévalence la plus élevée devant les autres catégories. Les *erreurs basées sur les habiletés* sont impliquées dans 58.6 % des accidents, et les *erreurs perceptives* dans 27.5 %.

Les erreurs de décision apparaissent donc plus importantes dans les études de Li que dans les autres études citées. Il est intéressant de s'interroger sur les causes de ces disparités. Nous proposons ci-dessous des éléments d'explication.

Nous pouvons, tout d'abord, souligner que les études de Li concernent uniquement l'aviation professionnelle, tandis que l'étude menée par l'ATSB s'intéresse à tous les types d'aviation, aussi bien professionnelle que de loisir. La formation des pilotes de loisir (par exemple les pilotes privés d'avions monomoteurs d'aéroclub) est moins conséquente que celle des pilotes de ligne. Les pilotes de loisir sont généralement moins expérimentés que leurs homologues professionnels car ils volent moins, et c'est également à ce niveau que commencent les apprentis pilotes, encore sujets aux erreurs de débutant. De plus, une forte proportion d'avions de loisirs ne présente que très peu, voire pas du tout d'automatisation. Le pilotage se fait manuellement. Enfin, les pilotes de loisir volent le plus souvent à vue et sans dépôt préalable de plan de vol strict, comme doivent le faire les pilotes de ligne. L'ensemble de ces facteurs peut expliquer la proportion plus élevée d'erreurs basées sur les habiletés que d'erreurs de décision dans l'étude de l'ATSB. Les pilotes de ligne volent sur des appareils disposant d'une automatisation performante, suivent des procédures strictes et sont très entraînés. Par rapport à l'aviation de loisir, ils ont par conséquent une propension moins élevée aux erreurs basées sur les habiletés ; ils peuvent être, en revanche, confrontés à des décisions présentant une certaine complexité. Ceci pourrait ainsi expliquer l'importance du taux d'erreurs de décision dans l'étude de Li, qui est comparable à celui qui caractérise les erreurs basées sur les habiletés.

Les différences apparaissant entre les pourcentages d'erreurs de décision répertoriés dans les études de Li et dans l'étude de Daramola peuvent être dues, quant à elles, à la fenêtre temporelle qui a été considérée. L'étude de Daramola couvre une période de 25 ans débutant en 1985, alors que les études de Li couvrent une période plus limitée débutant plus tard (en 1999). Certains accidents analysés par Daramola impliquent ainsi des avions de conception ancienne (de type BAC 1-11, 737-200, 727), disposant d'une automatisation moins avancée que les avions plus récents impliqués dans les accidents analysés par les études de Li (parmi ces appareils, on notera les A320, A330, 737 *Classic*, 747, etc.) qui disposent d'une automatisation plus moderne et performante. Ces différences expliquent certainement la proportion importante d'erreurs basées sur les habiletés apparaissant dans l'étude de Daramola, et la proportion plus faible d'erreurs de décision.

Cet exposé situe la prévalence des erreurs de décision dans les accidents d'avions par rapport aux autres types d'erreur et permet d'en confirmer l'importance. Il ne suffit cependant pas d'étudier le taux d'erreurs de décision. Il est nécessaire d'examiner les causes de ces erreurs, détaillées au niveau des préconditions, dans la partie suivante.

3.1.2.2 Les préconditions aux actes non-sûrs

Les études que nous venons de présenter mettent en évidence les actes non-sûrs mais aussi les préconditions qui ont joué un rôle dans la survenue de ces actes. Nous pouvons, en réexaminant les études citées plus haut, constater que certaines préconditions sont souvent associées aux erreurs de décision. Le Tableau 4 synthétise les résultats disponibles. Il montre l'implication des différentes préconditions aux actes non-sûrs détaillés dans la partie précédente. Il inclut une étude supplémentaire menée par Erjavac, Iammartino et Fossaceca (2018) qui se focalise justement sur les préconditions des actes non-sûrs. Elle prend en compte 479 accidents, plus ou moins graves, survenus entre 2006 et 2015 dans les domaines de l'aviation générale et de l'aviation professionnelle.

Préconditions (voir définitions au tableau 2, p. 73)	Etudes			
	Li <i>et al.</i> (2008)	Li (2011)	Daramola (2014)	Erjavac <i>et al.</i> (2018)
Etats mentaux dégradés	14%	17,60%		
Gestion des ressources d'équipage	28%	47,10%		
Environnement physique	19%	47,1	40%	20,80%
Environnement technologique		23,50%	30%	

Tableau 4 - Implication de différentes catégories de préconditions dans la survenue des accidents

Outre ces prévalences, les deux études de Li nous informent des actes non-sûrs auxquels les préconditions sont les plus à même de mener. On note que les erreurs basées sur les habiletés et les erreurs de décision sont le plus souvent liées aux préconditions *états mentaux dégradés* et *gestion des ressources d'équipage* (Li *et al.*, 2008). Dans son étude de 2011, Li ajoute trois préconditions comme étant le plus souvent liées aux erreurs de décision : *l'aptitude personnelle*, *l'environnement physique* et *les limitations physiques/mentales*.

Dans le cadre de notre étude de la prise de décision, certaines de ces préconditions nous interpellent, car elles concernent directement les opérateurs. Il s'agit des *états mentaux dégradés* ainsi que des *limitations physiques/mentales*. Li *et al.* (2008) décrivent les états mentaux dégradés comme englobant différents phénomènes affectant la performance des opérateurs, tels que la perte de conscience de la situation, la fixation sur une tâche, la distraction, et la fatigue mentale, elle-même définie comme les « effets que les individus peuvent ressentir après ou pendant une période prolongée d'activité cognitive » (Boksem, Meijman & Lorist, 2005, p. 107) et entraînant des difficultés à se concentrer sur les tâches à effectuer. La fatigue mentale a notamment été observée par Bartlett dès 1943 lors d'une expérimentation où des pilotes confrontés à de longues sessions de simulateur de vol ont été sujets à des baisses d'attention de plus en plus fréquentes avec le temps, et une plus forte propension à la distraction. Quant aux limitations physiques et mentales, elles apparaissent lorsque les exigences d'une situation dépassent les capacités des opérateurs (Shappell & Wiegmann, 2003), par exemple en termes de pression temporelle ou de nombre de tâches. Ces différents phénomènes sont décrits dans la partie suivante qui porte sur les mécanismes sous-jacents aux erreurs de décision.

3.2 MECANISMES MENANT AUX ERREURS DE DECISION

3.2.1 Quelles défaillances mènent aux erreurs de décision ?

Orasanu et Fischer (1996) définissent la prise de décision en aéronautique comme comprenant deux étapes : d'abord l'évaluation de la situation, ensuite le choix d'un plan d'action. Ainsi, dans le domaine aéronautique (comme dans d'autres domaines), les erreurs de décision recouvrent deux grands types de défaillances : une mauvaise interprétation de la situation ou la définition d'un plan d'action incorrect (Orasanu *et al.*, 2001).

La mauvaise interprétation de la situation peut être de plusieurs types. Elle peut provenir d'une mauvaise interprétation des indices, d'un mauvais diagnostic de ceux-ci, ou bien encore de leur non-prise en compte. Ceci entraîne une mauvaise représentation du problème. Le temps disponible peut également être mal évalué. Les problèmes surviennent surtout lorsque les conditions changent graduellement, et que les pilotes ne mettent pas à jour leurs modèles de la situation.

Les erreurs dans la sélection d'un plan d'action peuvent également être de plusieurs types. Lors de décisions basées sur une règle, la réponse appropriée peut ne pas être remémorée, soit parce qu'elle n'est pas connue, soit parce que certains facteurs contextuels peuvent entraîner le pilote sur une autre piste. A l'inverse, une règle inappropriée peut être appliquée, en particulier si elle est utilisée fréquemment. Dans les décisions impliquant des choix, certaines options peuvent ne pas être considérées. Les contraintes déterminant l'adéquation de plusieurs options peuvent ne pas être prises en compte pendant l'évaluation. Orasanu *et al.* (Ibid) notent, par ailleurs, que les décisions créatives peuvent présenter le plus de difficulté puisque, par définition, elles ne peuvent pas être déclenchées par un indice présent dans l'environnement. Les solutions doivent être imaginées afin de répondre aux conditions existantes et d'atteindre les objectifs. Enfin, si les conséquences d'un plan d'action n'ont pas correctement été considérées, il peut être sélectionné et exécuté alors qu'il est inadapté à la situation.

Orasanu *et al.* (Ibid.) distinguent, au sein de cette seconde catégorie, le cas particulier de la non-révision d'un plan malgré la présence d'indices indiquant qu'il n'est plus pertinent, autrement appelée « erreur de continuation de plan ». Dans sa thèse, Bourgeon (2011) parle de persévération pour désigner « la persistance dans l'application d'un plan d'action malgré la présence d'indices signalant une augmentation du niveau de risque de la situation et indiquant que le plan d'action est devenu inadapté ». Elle note trois mécanismes principaux à l'origine de ce type d'erreur :

- Le défaut de détection de changements de la situation alors que ces changements présentant un risque pour la poursuite du vol. La détection des changements de la situation est basée sur les caractéristiques physiques de ces changements ainsi que sur les croyances, buts et attentes des pilotes. Les études de Goh et Wiegmann, (2001) ou Muthard et Wickens (2002, 2003) ont montré, d'une part, que les changements relatifs au trafic aérien, rapides, étaient plus fréquemment détectés que les changements relatifs aux conditions météorologiques, plus lents, et d'autre part que les changements ayant un impact direct sur le plan de vol étaient plus rapidement détectés que les changements sans lien direct. Les erreurs de continuation de plan résulteraient ainsi d'un défaut de détection de changements pertinents. Muthard et Wickens (2003) notent l'implication de la charge de travail dans l'apparition de ce type d'erreur. Ils ont observé que plus la charge de travail était importante, plus ce type d'erreur était fréquent.
- La difficulté de mise à jour de la conscience de la situation, résultant d'une interprétation incorrecte des changements ou de l'importance de ceux-ci.

- La perception inadéquate du risque lié au plan d'action choisi. Le choix du plan d'action serait lié à la perception du risque, influencée par les pressions organisationnelles, comme par exemple l'atterrissage avant la fermeture d'un terrain, quitte à braver de mauvaises conditions météo.

Bourgeon a mené une expérimentation afin d'explorer le lien entre la persévération et la charge de travail. Elle a confronté 30 pilotes professionnels à des scénarios en simulateur de vol. Ces scénarios étaient conçus autour de la survenue d'un événement menaçant la sécurité du vol, de manière à ce que les solutions ne puissent être délivrées par une procédure. Les plans d'action ne dépendaient donc que du seul jugement des pilotes. Les résultats des expérimentations menées par Bourgeon montrent que lorsque la charge de travail est élevée, le nombre d'informations cibles prises en compte dans les décisions est plus faible, le nombre de diagnostics incorrects est plus élevé, et le nombre de critères de décision basés sur le recours aux procédures est plus élevé que lorsque la charge de travail est faible. Elle note ainsi des liens entre le phénomène de persévération et ces trois variables, ce qui permet d'établir un lien de causalité entre charge de travail et persévération. Bourgeon (2011) observe également que ce phénomène apparaît plus fréquemment lors des phases de décollage et d'approche, phases liées à une plus forte charge de travail que la phase de croisière.

3.2.2 Quels sont mécanismes, contextuels ou cognitifs, de génération des erreurs de décision ?

Orasanu (2010) présente plusieurs catégories de facteurs pouvant être à l'origine ou contribuer aux erreurs de décision.

Les contextes induisant en erreur constituent la première catégorie. Cette catégorie recouvre une mauvaise qualité d'information, incluant des conditions dynamiques ambiguës ou des informations affichées de manière peu claire, des pressions organisationnelles, ou des contraintes liées à l'environnement.

- Les problèmes liés à la qualité de l'information se traduisent par le manque de clarté de certaines informations signalant un problème. Woods et Sarter (1998) notent qu'ils peuvent provenir d'une interface fournissant des informations qui ne permettent pas de diagnostiquer correctement un problème. Orasanu (Ibid) note que les conditions peuvent se dégrader de manière graduelle, de sorte que la conscience de la situation du pilote ne soit pas correctement mise à jour. Les signaux ambigus peuvent également être

interprétés de différentes manières. De plus, si l'ambiguïté n'est pas relevée, les pilotes peuvent placer toute leur confiance dans leur compréhension de la situation, qui peut pourtant être fausse.

L'ambiguïté peut également influencer la prise de décision. Un pilote peut ainsi détecter une information incohérente mais éprouver des difficultés à justifier un changement de plan d'action. Orasanu (Ibid) indique que pour certaines décisions (telles qu'un décollage interrompu ou un déroutement), les pilotes doivent être absolument convaincus de leur nécessité, étant donnée l'importance de l'impact financier.

- Les problèmes liés aux pressions organisationnelles peuvent interférer avec la sécurité. Ces problèmes peuvent être liés au fait de chercher à tenir les horaires prévus, de réaliser des économies de carburant, d'arriver à destination plutôt que de dérouter, etc.
- Les contraintes environnementales recouvrent une pression temporelle forte, un trafic important, une météo dégradée, des changements de dernière minute, et des retards (Orasanu, Ibid). Hockey (1979) ainsi que Desmond et Hancock (2001) exposent les conséquences de ces contraintes : elles incluent la focalisation attentionnelle, le dépassement de la limitation de la capacité de la mémoire de travail, et la prise de risque et sont associées à une charge de travail élevée. Ces effets influencent le processus de prise de décision en affectant la prise d'information, la détection de signaux, la génération d'hypothèses, et l'évaluation d'options.

Orasanu (Ibid) note que le décollage et l'approche présentent le plus de contraintes dues notamment au trafic et à la très faible marge d'erreur acceptable. De plus, ces contraintes conduisent souvent les opérateurs à surestimer la pression temporelle à laquelle ils sont soumis (Keinan, 1988).

La seconde catégorie de facteurs notée par Orasanu (Ibid) correspond aux facteurs cognitifs. Elle comprend l'économie cognitive entraînant l'utilisation de schémas habituels mais inadéquats, le manque de connaissance, les facteurs sociaux, et les contraintes personnelles.

- Les décisions basées sur les schémas entraînent les pilotes à agir selon un plan d'action qu'ils ont l'habitude d'appliquer et qu'ils vont appliquer lorsqu'ils pensent être dans une situation familière, alors qu'il faudrait mobiliser un autre plan d'action. Ce cas de figure peut s'expliquer par le principe d'économie cognitive, qui conduit les opérateurs à se fixer un objectif suffisant et satisfaisant (mais pas optimal) atteignable à un coût cognitif acceptable pour eux.

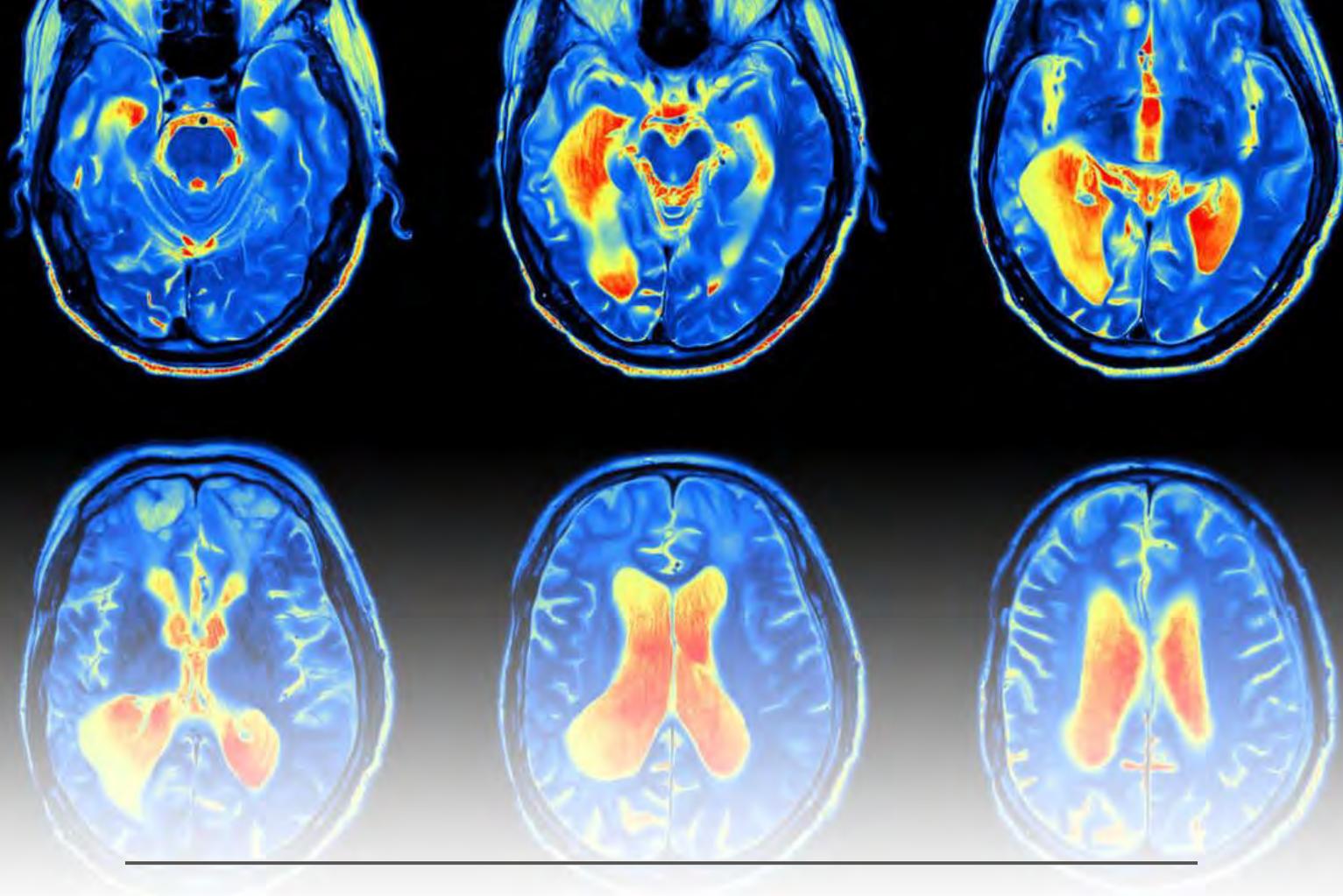
- Le manque de connaissance est associé aux cas dans lesquels les opérateurs réalisent des actions inhabituelles. Dans ce cas de figure, les novices sont désavantagés. Ceci peut se manifester par une évaluation inadéquate de la situation ou par le choix de plans d'action risqués. Une étude de Wiegmann, Goh et O'Hare (2002) en simulateur de vol et par mauvaises conditions météorologiques montre par exemple que les pilotes les plus expérimentés ont mis moins de temps à prendre une décision de déroutement et se sont moins engagés dans les conditions météo dégradées que les pilotes moins expérimentés. Ceci suggère une conscience inadéquate de la situation chez les plus jeunes pilotes, conséquence soit du manque de connaissance, soit d'une perception différente du risque.
- Les facteurs sociaux peuvent créer des conflits d'objectifs pouvant accroître la difficulté de prendre une décision. Les différences de perception entre les pilotes peuvent encourager les comportements risqués, ou peuvent entraîner l'un des deux pilotes à croire que l'autre en sait plus sur la situation, même si ça n'est pas le cas. Paletz *et al.* (2009) notent plusieurs phénomènes pouvant augmenter la prise de risque d'un équipage :
 - o La considération d'une information donnée par un autre comme une réalité évidente, sans remise en question ;
 - o L'acceptation d'une modification de plan de faible importance, augmentant le risque d'accepter plus tard une modification de plan plus importante ;
 - o L'acceptation progressive, par un groupe de personnes, d'un niveau de sécurité moins élevé ;
 - o Le fait de vouloir faire bonne impression ;
 - o Le fait de vouloir absolument agir selon ses propres plans.
- Enfin, les contraintes personnelles incluent les problèmes familiaux, les problèmes sociaux au sein de l'entreprise, ou des problèmes de santé. Ces problèmes peuvent être source de distraction pour certains pilotes. Orasanu (Ibid) note qu'ils peuvent avoir des effets sur la prise de décision car ils interfèrent avec le sommeil, ce qui peut affecter négativement l'éveil, l'attention, et la communication.

3.3 CONCLUSION

Ce chapitre avait pour objectif de faire le point sur les erreurs de décision, leurs préconditions et les mécanismes de leur production.

Les études ayant utilisé le HFACS pour analyser les accidents d'avion révèlent qu'un pourcentage important d'accidents impliquant des avions de ligne est lié à des erreurs de décision, confirmant, si besoin était, la nécessité d'étudier la prise de décision des pilotes. Plus intéressant, ces études nous informent que ces erreurs de décisions sont associées notamment aux états mentaux dégradés des opérateurs ainsi qu'à des limitations physiques et mentales. Ces deux facteurs, et plus particulièrement une charge mentale élevée, peuvent mener à l'apparition de deux types de défaillance : la mauvaise interprétation de la situation et la définition d'un plan d'action incorrect. L'étude des mécanismes de génération de ces erreurs de décision montre que certains contextes induisent en erreur (tels que l'ambiguïté des informations ou les contraintes environnementales pouvant générer de la charge de travail) et que certains facteurs cognitifs sont impliqués dans la survenue de ces défaillances (tels que la recherche d'économie cognitive menant à prendre des décisions basées sur des schémas habituels dans une situation inadaptée, ou le manque d'expertise). Dans tous les cas, les erreurs de décision sont fondamentalement liées à un défaut d'adaptation à la situation.

Ces observations invitent à investiguer plus avant la question de la charge mentale et de sa régulation dans les situations dynamiques ainsi que son lien avec la performance. Elles invitent également à revenir sur le concept de contrôle cognitif qui rend compte de la capacité d'adaptation.



CHAPITRE 4.

REGULATIONS ET CHARGE MENTALE

Les modèles de contrôle cognitif, mettant notamment en exergue le contrôle métacognitif (Hoc & Amalberti, 2007), décrivent la manière dont les opérateurs adaptent leur comportement en fonction de la situation rencontrée, et de l'évaluation qu'ils en réalisent. En fonction de la complexité de la situation et de sa familiarité, un mode de contrôle cognitif plus ou moins proactif est adopté. L'adoption d'un mode de contrôle adéquat permet de conserver une performance satisfaisante, tout en gardant un coût cognitif maîtrisé. Il existe des mécanismes de régulation permettant d'instancier en permanence le mode de contrôle cognitif adéquat en fonction des exigences de la situation, du niveau de performance des opérateurs et du coût cognitif. Les composantes de ces mécanismes de régulation sont décrites dans la première partie de ce chapitre. Cette revue nous amènera ensuite à nous attarder sur la charge mentale, notion aux multiples dimensions que nous décrirons en seconde partie. Enfin,

la dernière partie de ce chapitre nous amènera à considérer les moyens de mesure de la charge mentale, physiologiques et subjectifs.

4.1 CONTROLE COGNITIF ET MECANISMES DE REGULATION

Les travaux de Hockey (2003) avancent une théorie intéressante à l'appui de la notion de régulation. Selon Hockey, il existerait des mécanismes de contrôle compensatoire permettant d'adapter la stratégie des opérateurs en fonction des exigences perçues de la situation et de l'effort investi par ceux-ci. L'existence de ces mécanismes serait selon lui prouvée par la relative stabilité de la performance au regard des buts prioritaires d'un individu, même en présence de contraintes situationnelles et de fortes exigences. Ceci mettrait en évidence une stratégie de « protection de la performance », c'est-à-dire un processus de régulation adaptative permettant de maintenir la performance relative aux buts prioritaires (dans les limites acceptables), au détriment d'autres activités moins prioritaires.

La littérature (Hockey, 1986, 1986 bis, 1997 ; Hockey & Hamilton, 1983) montre que lorsque des baisses de performance surviennent, elles sont généralement faibles, sélectives (elles n'affectent pas les aspects critiques de la tâche), et qu'elles sont plus facilement observables en laboratoire qu'en conditions écologiques. De plus, elles n'apparaissent en général qu'après une période de travail prolongée ; par ailleurs, plus les individus investissent des efforts pour accomplir leurs tâches, moins la dégradation de performances est prononcée. Navon et Gopher (1979) qualifient cette baisse de performance de « *graceful degradation* » (que l'on pourrait traduire par « dégradation sans heurts ») permettant d'éviter un effondrement de la performance potentiellement catastrophique. Ceci permettrait de limiter l'impact de cette baisse de performances sur les tâches prioritaires.

Au vu de ces observations, Hockey (2003) a mis au point un modèle théorique permettant d'apporter une explication au fonctionnement de ces phénomènes de régulation (Figure 14). Ce modèle présente un processus de « surveillance de l'action » (*action monitor*), sensible aux variations des performances et des exigences perçues de la tâche, et un processus de « surveillance de l'effort » (*effort monitor*), sensible aux variations du niveau d'effort mental investi par l'opérateur. Hockey définit également deux niveaux limites d'effort : un niveau « bas », basé sur l'anticipation par l'individu des ressources nécessitées par la tâche, et un

niveau « haut », représentant le niveau d'effort maximum « confortable ». Sous la limite basse, les hausses d'exigence perçue ne sont pas considérées comme coûteuses, le contrôle paraît automatique. La différence entre les deux limites constitue une « réserve d'effort » (*reserve effort budget*), permettant de gérer les exigences supplémentaires et de faire face aux événements aléatoires. De plus, la limite haute peut être revue à la hausse au cas où l'individu devrait accomplir des activités de nature imprévisibles, ou dont l'issue pourrait être critique.

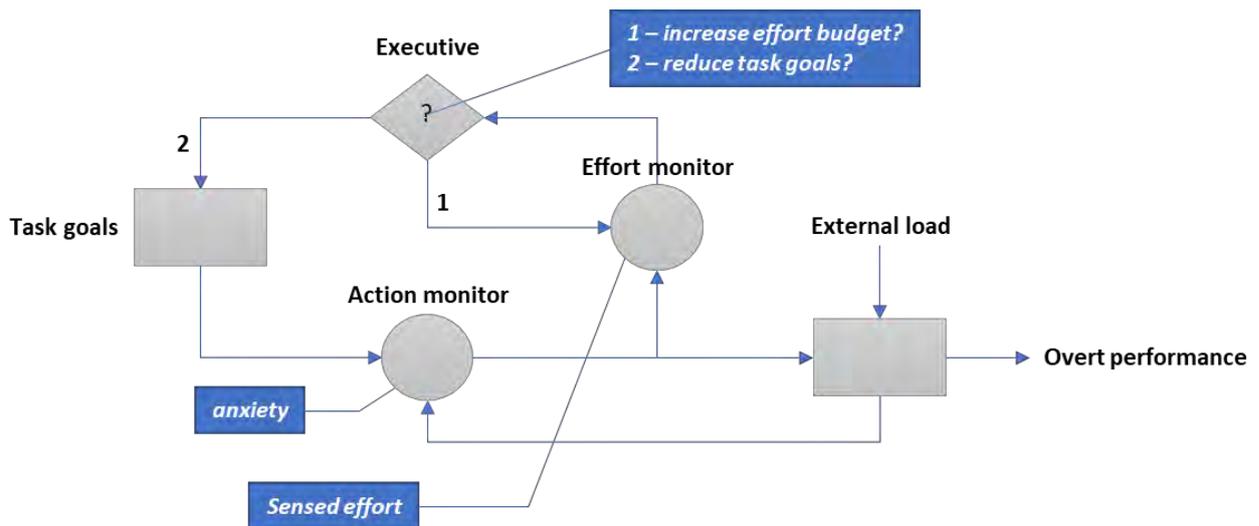


Figure 14 - Modèle de contrôle compensatoire. Tiré de Hockey, 2003.

Le modèle présenté par Hockey présente trois modes de contrôle régulateur. Ces trois modes permettent de répondre de manière adaptative à une contrainte, avec différentes balances performance/coût.

Le premier mode est le mode **engagé**. Il est mis en place lorsque l'individu perçoit un niveau d'effort au-delà de la limite basse, et qu'il y a donc nécessité temporaire de supervision. Lorsque la hausse d'exigences se fait plus persistante, ceci entraîne un ajustement à la hausse de la réserve d'effort. Cette hausse d'exigences peut par exemple survenir lorsque certaines habiletés (*skill*) sont mal intégrées. Dans ce cas, le comportement des individus reste stable, et le niveau d'effort reste dans les limites acceptables, même si le niveau général est plus élevé. Les comportements des individus sont ainsi basés sur des règles (*rule*) ou des connaissances (*knowledge*) (modèle SRK, Rasmussen, 1983).

Le second mode pourrait être traduit par « mode **forcé** » (*strain*). Ce mode est observé quand le niveau d'exigences perçu est trop élevé par rapport à la réserve d'effort actuelle, même mobilisée à son maximum. Les opérateurs instancient ce mode lorsque les conséquences d'un

échec sont estimées inacceptables. Ainsi, la limite haute de la réserve d'effort peut être revue à la hausse afin de répondre aux exigences. De ce fait, les critères de performance peuvent être maintenus, à la condition d'une augmentation considérable des coûts. Le travail à des niveaux aussi élevés d'effort est inconfortable et normalement évité.

Le troisième et dernier mode est le mode **désengagé**. Il peut être instancié lorsque les exigences sont fortes, en alternative au mode « forcé ». Les contraintes de performance sont ainsi abaissées, et le niveau maximal de budget d'effort n'est pas modifié. Il n'y a ainsi pas de coût supplémentaire. En contrepartie, il n'y a plus de protection contre les chutes de performance. Il y a donc une réduction des objectifs, en autorisant par exemple les occasionnelles erreurs, ou en acceptant une vitesse de traitement moindre. Dans la forme extrême de ce mode, on peut observer un désengagement de l'atteinte des objectifs. Cette forme extrême peut être observée lorsque la pression temporelle est modérée, et que la tâche peut éventuellement être remise à plus tard.

Cette notion de régulation met en évidence l'importance du comportement des opérateurs face aux exigences des situations rencontrées. Ils doivent en effet adapter leur activité en permanence. Cependant, le fait que les opérateurs modulent leur activité met en lumière l'existence de limites cognitives de traitement de l'information. Cette occupation des capacités cognitives est nommée charge mentale (Cegarra, 2012). Ainsi, la compréhension du concept de charge mentale est cruciale dans l'étude du comportement des opérateurs en situations dynamiques.

4.2 REGULATIONS ET VARIATIONS DE LA CHARGE MENTALE

Il n'existe pas de consensus sur une définition claire et précise du concept de charge mentale (Young, Brookhuis, Wickens & Hancock, 2015). Afin d'aborder cette notion, nous reprendrons la proposition de Cegarra (2012). Cet auteur précise tout d'abord trois sources de désaccord. Il souligne tout d'abord l'approche pluridisciplinaire de la charge mentale ; en effet il existe autant d'approches de la charge mentale que de disciplines dans laquelle elle est étudiée. Ensuite, le concept de charge mentale est relativement ancien, et a donc beaucoup évolué avec le temps. Enfin, il existe une diversité de définitions du concept liée au fait qu'il a été appliqué dans plusieurs domaines. Nous allons passer en revue les différentes approches de la charge mentale en nous basant sur la revue effectuée par Kostenko (2017) dans ses travaux de thèse.

Meshkati (1988, p. 309) définit la charge mentale comme une grandeur « reflétant l'interaction d'éléments tels que les exigences de la tâche et du système, les capacités de traitement et d'effort de l'opérateur, les critères de performance subjectifs, le processus de traitement de l'information, les stratégies de l'opérateur, ainsi que sa formation et son expérience antérieure ». Sur la base de cette définition mettant en avant le côté multifactoriel de la charge mentale et des travaux de Cegarra (2012), quatre approches de cette notion peuvent être distinguées :

- Une approche **exogène** qui met en exergue l'influence de la situation que rencontre l'opérateur sur sa charge mentale ressentie ;
- Une approche **capacitaire** mettant en exergue le versant propre à l'individu, c'est-à-dire les ressources attentionnelles dont il dispose et qu'il met en jeu ;
- Une approche **énergétique**, relative à l'effort mental développé par l'opérateur pour répondre à une situation donnée ;
- Une approche dite **holistique** portant sur la perception qu'a l'opérateur de sa charge mentale ressentie et sur les stratégies utilisées. Cette approche est une synthèse des approches précédentes.

L'approche **exogène** met en avant les exigences propres à la tâche, sans tenir compte du ressenti de l'opérateur. Sperandio (1988) distingue les exigences de la tâche (la contrainte) de ses effets sur l'opérateur (l'astreinte). Ces 2 dimensions, astreinte et contrainte, sont par ailleurs reprise dans la définition normalisée de la charge mentale (DIN FR ISO 10075-1: 2017). Dans le cadre de l'approche exogène, on considère qu'il suffit de mesurer la contrainte d'une tâche pour en déduire l'astreinte. Or cela présupposerait une relation directe, voire linéaire, entre la contrainte et l'astreinte.

Afin de contourner cette simplification, certains auteurs, notamment De Waard (1996) (sur la base des travaux de Meister, 1976, et Mulder, 1986), prennent en compte la mesure de la performance afin de la coupler à la contrainte, pour une estimation plus juste de l'astreinte. Or les résultats montrent que la contrainte a des effets différents selon les individus. Il existe ainsi des variations interindividuelles entre les opérateurs qu'il faut prendre en compte. Dès 1977, Sperandio note par ailleurs que la charge mentale résulte d'une interaction entre l'opérateur et

la tâche réalisée, ce qui va dans le sens d'un lien plus complexe que celui présumé. Ce constat débouche donc sur l'approche suivante, dite capacitaire.

L'approche s'intéressant aux ressources attentionnelles de l'opérateur est nommée approche **capacitaire** (Cegarra, 2012). Selon cette approche, la charge de travail peut être exprimée comme le rapport entre les exigences de la tâche et la capacité mentale qui est exigée de l'opérateur (Welford, 1977 ; Cegarra, Ibid). Ainsi, si l'exigence de la tâche augmente, l'opérateur peut maintenir une performance satisfaisante tant que sa capacité maximale n'est pas dépassée. Si par contre l'exigence de la tâche dépasse la capacité maximale de l'opérateur, la performance diminue.

Chanquoy *et al.* (2007) utilisent la métaphore hydraulique afin d'expliquer cette approche. Les ressources représenteraient « l'essence » consommée par le « moteur cognitif » lors de la réalisation d'une tâche. Le « réservoir » représenterait ainsi la capacité de l'opérateur.

Cette approche est utile dans l'étude de la réalisation d'une double tâche par l'opérateur. En effet, lorsqu'un opérateur effectue une première tâche et qu'une seconde tâche se présente à lui, celle-ci pourra être traitée avec la capacité restante de l'opérateur, c'est-à-dire celle qu'il n'utilise pas pour effectuer la première tâche. Cependant, si la première tâche a une exigence trop importante, la capacité restante pour le traitement de la seconde tâche sera trop faible, et on notera une dégradation des performances sur cette dernière. Aussi, Piolat *et al.* (1999) suggèrent que la mesure de la dégradation de la performance à cette seconde tâche pourrait renseigner sur la charge mentale générée par la première.

Un lien peut être réalisé entre cette répartition des ressources et la théorie des ressources attentionnelles multiples (Wickens, 2008) selon laquelle il existerait plusieurs « réservoirs » de ressources. Ces ressources varieraient :

- selon les phases de traitement de l'information (perception et cognition *versus* réponse),
- selon la codification de l'information (nature de l'information traitée),
- selon les modalités de perception (vision *versus* audition),
- et selon les modalités de vision (fovéale *versus* périphérique).

Selon cette théorie, deux tâches utilisant des modalités différentes n'utiliseraient donc pas les mêmes ressources et n'entreraient pas en concurrence.

Cependant, comme le souligne Sperandio (1988), la capacité d'un individu est dépendante des caractéristiques du système, de l'environnement, et de l'individu lui-même. La capacité est

alors difficilement mesurable. Cette approche permet de mettre en évidence les limites de traitement de l'information d'un opérateur, mais sans tenir compte de l'allocation volontaire de ses ressources sur une tâche plutôt qu'une autre. Ceci ouvre la voie aux notions d'effort et de stratégie (Chanquoy *et al.*, 2007), que nous aborderons plus loin.

L'approche centrée sur l'**effort mental**, également appelée approche **énergétique**, renvoie selon Leplat (1977) aux ressources cognitives que mobilise un opérateur afin de répondre aux exigences de la tâche qu'il réalise. Elle diffère des approches précédentes par le fait qu'elle considère l'opérateur comme actif dans la gestion de la charge mentale ; c'est-à-dire qu'il peut moduler les ressources qu'il met en jeu pour réaliser une tâche. Cette approche est portée notamment par Sperandio (1977), pour qui la charge mentale est une conséquence de l'interaction entre l'homme et la tâche qu'il réalise. De nombreux auteurs (Sheridan *et al.*, 1979 ; Tricot & Chanquoy, 1996 ; Delignières & Deschamps, 2000) lient cette modulation de la charge mentale à la notion d'effort mental investi par l'opérateur, ce qui ouvre la voie aux mesures physiologiques de la charge mentale (Kahneman, 1973 ; Mulder, 1986).

Le modèle proposé par Kahneman (1973) emprunte aux modèles capacitaires la notion de modulation. Selon lui, les processus cognitifs nécessitent des informations à traiter, ainsi qu'un apport énergétique. L'opérateur distribue ensuite librement ses ressources entre les différentes tâches à réaliser. La notion d'effort représenterait ainsi un potentiel énergétique permettant d'activer et de contrôler les structures de traitement de l'information.

Ces niveaux énergétiques sont au nombre de trois selon Pribram et McGuiness (1975) : l'activation, l'éveil et l'effort. Aussi, selon Barry *et al.* (2005), le niveau d'éveil correspond au niveau énergétique de base, et l'activation correspond à la mobilisation énergétique en réponse à une tâche. Ainsi, la performance est corrélée au niveau d'activation, et l'effort coordonne les niveaux d'éveil et d'activation. Sanders (1983) propose par ailleurs un modèle qui intègre ces trois niveaux (Figure 15).

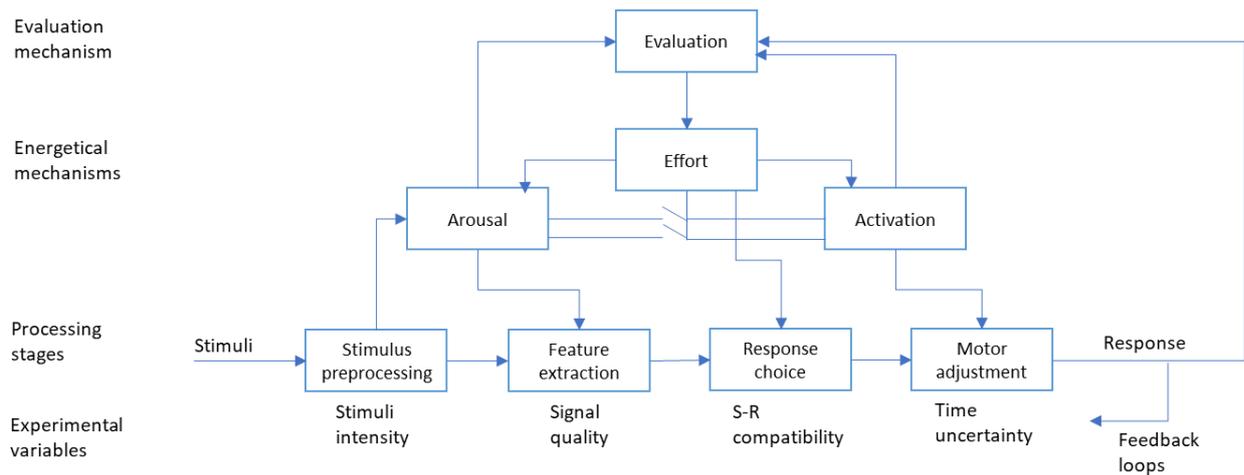


Figure 15 - Modèle cognitif-énergétique à niveaux linéaires du traitement de l'information chez l'humain (Sanders, 1983), montrant les trois niveaux d'activation, d'éveil et d'effort.

Barrouillet (1996) stipule cependant que l'effort mental ne dépend pas uniquement de la tâche, mais également de l'expertise, de l'expérience et des stratégies de l'opérateur. C'est également ainsi que Young *et al.* (2015) définissent la charge mentale (p. 2) comme un « construit multidimensionnel, déterminé par les caractéristiques de la tâche (exigences, performance), de l'opérateur (aptitudes, attention), et le contexte environnemental » dans lequel l'opérateur accomplit ses tâches. L'opérateur régule ainsi le niveau d'effort investi dans une tâche en fonction de ces différents facteurs. Cette régulation implique une gestion à un méta-niveau de la charge mentale, ce qui fait l'objet de l'approche holistique.

Cette approche **holistique** (terme proposé par Kostenko, 2017) a la particularité de ne pas se focaliser sur une approche en particulier, mais de les prendre en compte dans leur ensemble. Cette approche multidimensionnelle permet ainsi de surmonter les problèmes de sélectivité et de sensibilité que peuvent présenter séparément les autres approches. Elle inclut également la compréhension des régulations, qui permet d'améliorer le pouvoir diagnostique (Cegarra, 2012). Ainsi, cette approche prend en compte la stratégie qu'adopte l'opérateur en fonction de la charge mentale qu'il ressent ou qu'il anticipe (Sperandio, 1977 ; Segal & Wickens, 1990). En effet, Sperandio (1988) précise que l'analyse de la charge mentale doit également tenir compte de la stratégie mise en place par l'individu. Cette adaptation de la stratégie implique la mise en place de processus de régulation, afin de maintenir un niveau de charge mentale acceptable.

Il existe plusieurs modèles de gestion de la charge mentale (Hart & Staveland, 1988 ; Sperandio, 1971). Nous aborderons ici celui de Cegarra (2012) qui est une synthèse de plusieurs travaux le précédant (Figure 16). Ce modèle implique que la détermination de la charge mentale nécessite la combinaison entre les exigences de la situation, l'atteinte d'un certain niveau de performance, et la perception par l'opérateur de l'état du système. Ces trois paramètres participent alors à une expérience de la charge mentale. Ces éléments sont constitutifs d'un modèle mettant en jeu trois boucles de régulation :

- La boucle de régulation à partir du dispositif, avec laquelle l'opérateur régule ses ressources vis-à-vis de l'état du dispositif avec lequel il interagit ;
- La boucle de régulation à partir des résultats, l'opérateur comparant les buts à atteindre et les résultats de ses actions ;
- La boucle de régulation à partir du comportement, l'opérateur modulant sa charge en fonction de sa perception de la nécessité d'une charge mentale importante ou de l'anticipation de cette charge.

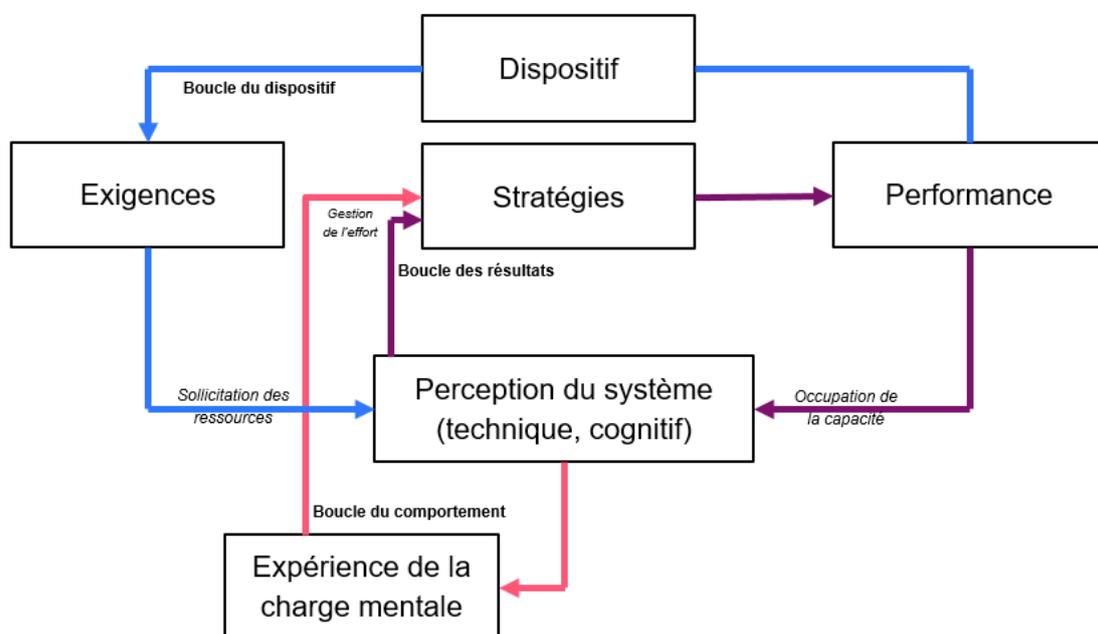


Figure 16 - Facteurs influençant l'évaluation subjective de la charge mentale (Cegarra, 2012).

Cegarra (2012) note que la défaillance des régulations provoque deux phénomènes opposés : la sous- et la surcharge mentale. La sous-charge mentale se manifeste généralement par de faibles

performances. Young et Stanton (2002) proposent d'expliquer ce phénomène par l'existence d'une réserve malléable de ressources attentionnelles, fortement liée à la charge mentale. Ainsi, lorsque l'opérateur effectue une tâche très automatisée, la charge mentale nécessaire à la gestion de cette tâche diminue, ainsi que les ressources attentionnelles qui lui sont allouées. Lorsque la tâche nécessite de l'opérateur une reprise en main soudaine du système, les performances peuvent être affectées car les ressources attentionnelles ne sont plus disponibles pour cette tâche.

La surcharge mentale est également accompagnée d'une baisse de performance des opérateurs, pouvant entraîner des erreurs, voire des accidents. De nombreux travaux ont tenté d'amener des explications à ce phénomène. Cegarra (2012) cite notamment les travaux de Smolensky (1991), qui évoque une hystérèse de type I pour expliquer le décalage dans le temps de la récupération d'un niveau de performance concordant avec les exigences de la tâche suite à une surcharge, et une hystérèse de type II pour désigner la baisse du niveau de performance suite à une surcharge et à des stratégies inadaptées au niveau de charge actuel.

Young *et al.* (2015) mettent également en avant ces notions de sur- et sous-charge mentale, et leur lien avec la performance des opérateurs. Ils définissent la surcharge mentale comme survenant lorsque l'opérateur est confronté à plus de stimuli qu'il n'est capable de gérer tout en maintenant ses propres standards de performance. Ils définissent, par contraste, la sous-charge mentale comme étant la résultante d'un nombre trop faible de stimuli, entraînant la réallocation des ressources sur une seconde tâche (telle que le *mind-wandering*), ou leur réduction à cause de leur sous-exploitation. Cependant, selon les mêmes auteurs, le concept de sous-charge mentale est encore plus nébuleux, dans ses tentatives de définition, que le concept de charge mentale lui-même. Il est toutefois admis que la sous-charge comme la surcharge mentale peuvent être toutes deux responsables de dégradation de performance (Wilson & Rajan, 1995 ; Young *et al.*, 2015)

Young *et al.* (2015) notent que le courant de pensée actuel pencherait pour l'existence d'une fourchette optimale de niveau de charge mentale, qui serait associée aux meilleures performances (Hancock & Warm, 1989). La surcharge et la sous-charge mentale seraient causées par un décalage entre les exigences et les capacités des opérateurs (Csikszentmihalyi, 1990 ; Yerkes & Dodson, 1908). Ainsi, les auteurs précisent qu'il n'y a aucune garantie quant au fait que la simple réduction de la charge mentale entrainerait une hausse des performances,

et présupposent même le contraire. Les dégradations de performance dues à la surcharge et à la sous-charge peuvent être compensées par la mise en jeu de ressources additionnelles, par un effort volontaire, stratégique et demandeur d'efforts (Hancock & Warm, *Ibid* ; Hockey, 1997 ; Matthews & Davies, 2001). Ainsi, un investissement en termes d'effort permettra de maintenir la performance. Ceci augmentera cependant le niveau de charge mentale (Perrey *et al.*, 2010 ; Shaw *et al.*, 2013), ce qui peut être un effet positif en cas de sous-charge mentale, mais qui peut également être délétère en cas de surcharge mentale. Les opérateurs peuvent ainsi choisir l'alternative de changer leurs priorités au sein de la tâche en cours (Sperandio, 1978 ; Brookhuis & De Waard, 2000). Ces observations résonnent avec les travaux sur la régulation (Hockey, 2003) étudiés plus haut.

Il existerait donc un lien entre le contrôle cognitif, vu comme une adaptation des stratégies et une régulation de l'effort investi par l'opérateur, et les variations de charge mentale. Cette piste a notamment été explorée récemment par Cegarra, Baracat, Calmettes, Matton et Capa (2017). Dans cette étude, les auteurs s'intéressent à la possibilité de prédire l'instanciation des différents niveaux de performance SRK grâce à l'évaluation de la charge mentale, via des mesures comportementales et cardiaques. Les auteurs ont ainsi montré des niveaux distincts et croissants de charge mentale pour les niveaux S et R. Concernant le niveau K, les résultats ont montré un niveau plus faible de charge mentale, associé à des performances dégradées par rapport aux deux autres niveaux. Les auteurs ont expliqué ce dernier résultat en particulier par le désengagement des participants en regard des tâches concernées, investissant alors moins d'effort, ce qui entraîne une performance moindre.

Afin de poursuivre l'investigation de cette voie, et de démontrer le lien entre charge mentale et contrôle cognitif, il nous faut maintenant aborder les moyens d'évaluation et de mesure de la charge mentale.

4.3 MOYENS DE MESURE DE LA CHARGE MENTALE

Dans cette partie, nous décrivons les méthodologies permettant de rendre compte de la charge mentale des opérateurs. Diverses méthodes permettent l'évaluation de la composante astreinte de la charge mentale. Les méthodes subjectives, les plus classiques, prennent la forme de questionnaires ou d'échelles à remplir par l'opérateur selon son ressenti. Les méthodes

physiologiques, plus récentes, sont de plus en plus exploitées, et permettent d'apporter une dimension objective à l'évaluation de la charge mentale. On peut noter, parmi ces types de mesure, l'activité cardiaque, l'activité oculaire, l'activité électrodermale, et plus récemment, l'activité cérébrale par spectroscopie proche infrarouge. Ce chapitre décrit ces différents types de mesure, en commençant par les mesures physiologiques.

4.3.1 Mesure de l'activité cérébrale à l'aide de la spectroscopie infrarouge

Un certain nombre d'études lient l'activité du cortex préfrontal à la charge mentale. Dès 2000, Miller suggère que le contrôle cognitif serait lié à un schéma d'activation neurologique au niveau du cortex préfrontal (CPF). Il explique notamment que le CPF a une influence « *top-down* » sur de nombreux processus cérébraux. Ainsi, le CPF permet notamment d'extraire des informations concernant les régularités rencontrées pendant les différentes expériences vécues, et d'en tirer des règles pouvant être utilisées pour guider la pensée et l'action.

Dans la lignée de ces observations, dès 2012, Niendam, Laird, Ray, Dean, Glahn et Carter observent que le contrôle cognitif est lié à un réseau cérébral spécifique qui superviserait et contrôlerait les autres. Ce réseau comprendrait le CPF dorsolatéral, le cortex frontopolaire, le cortex orbitofrontal, et le cortex cingulaire antérieure. Dans le même temps, Braver (2012) étudie plus spécifiquement les aires cérébrales associées aux modes de contrôle proactif et réactif. Il observe que le mode proactif est accompagné d'une activation soutenue des aires latérales du CPF. En revanche le mode réactif ne s'accompagne que d'une activation transitoire de ces mêmes aires. Ceci est en accord avec sa théorie du « *dual mechanism of control* » stipulant que les différences entre modes proactif et réactif seraient sous-tendues par une activation des mêmes aires, mais différente en temporalité.

Ces observations sont confirmées par Ryman *et al.* (2019), dont les expérimentations montrent l'activation des mêmes aires aussi bien en mode proactif que réactif. En outre, elles mettent en évidence le rôle flexible du CPF ventrolatéral (VLPFC), avec cette fois une activation différente structurellement : le mode proactif s'accompagne soit d'une activation du VLPFC droit, soit bilatéral, tandis que le mode réactif s'accompagne d'une activation homogène du VLPFC. Les travaux de Ryman *et al.* mettent également en évidence l'activation du CPF dorsolatéral (DLPFC) associée au mode réactif. Cette activation est absente en mode proactif.

Mäki-Marttunen, Hagen et Espeseth (2019) expliquent ces observations par le fait qu'en mode proactif, il y a maintien en mémoire de travail d'informations relatives aux buts avant même la

survenue d'évènements. Ces informations sont gardées en mémoire aussi longtemps que requis par la tâche. Ceci explique l'activation soutenue du CPF. En mode réactif se met en place un mécanisme de correction tardif, guidé par les stimuli d'un évènement qui surviendrait. Ceci explique l'activation plus transitoire et plus large du CPF.

La mesure de l'activité cérébrale, notamment au niveau du CPF, semble ainsi pertinente pour la détermination du niveau de charge mentale des opérateurs. Il est possible de rendre compte de l'activité cérébrale en mesurant son activité métabolique. En effet, l'activité électrique des neurones est dépendante de leur activité métabolique, et plus précisément de leur besoin en sang oxygéné. Plus l'activité des neurones augmente, plus le débit sanguin dans les artérioles et capillaires environnants augmente afin d'augmenter leur oxygénation. Ce phénomène est connu sous le nom de couplage neurovasculaire. Il est possible de mesurer ce phénomène afin d'en déduire l'activité cérébrale. En effet, les variations hémodynamiques peuvent être mesurées à partir de la transmission de la lumière au niveau de la zone cérébrale d'intérêt. Ces mesures permettent d'en déduire le taux d'oxygénation sanguine, qui lui est lié à l'activité neuronale (Villringer & Chance, 1997 ; Obrig *et al.*, 2000 ; Strangman *et al.*, 2002 ; Huppert *et al.*, 2006).

Ce phénomène peut être exploité à l'aide de l'imagerie fonctionnelle par spectroscopie proche infrarouge (*functional Near InfraRed Spectroscopy*, fNIRS, Figures 17, 18 et 19). Cette technique d'imagerie, non invasive, permet de mesurer la réflexion de la lumière transmise dans les tissus biologiques afin d'en déduire le taux d'oxygénation sanguine. La fNIRS permet notamment de distinguer les concentrations en hémoglobine oxygénée ([HbO₂]) et en hémoglobine désoxygénée ([HHb]) (Strangman *et al.*, 2002 ; León-Carrión & León-Domínguez, 2012). En fonction de leur état (oxygéné ou non), les molécules d'hémoglobine possèdent un spectre d'absorption différent pour la gamme de lumière proche infrarouge. C'est cette particularité qui permet à la fNIRS de déterminer le taux d'oxygénation sanguine. Elle possède de plus une grande pénétration lumineuse dans les tissus, lui permettant de traverser les tissus osseux, ce qui rend possible l'exploration corticale.



Figure 17 - Exemple de système fNIRS (ici de type Artinis Octamon, système utilisé dans notre étude), ici sous forme de bandeau frontal afin de mesurer les variations d'oxygénation au niveau du cortex préfrontal.

Il est ainsi possible d'observer l'oxygénation des tissus biologiques, notamment de la couche superficielle du cortex cérébral (Hoshi, 2003, 2005 ; Ekkekakis, 2009). Communément, les parties du cerveau observées à l'aide de cette technique sont le cortex moteur et le CPF (Girouard *et al.*, 2010). La fNIRS présente plusieurs avantages à l'utilisation, tels que la non-invasivité des mesures sur de longues durées, les faibles interférences électromagnétiques, un rapport signal/bruit correct lorsque le sujet est en mouvement, la transportabilité, l'utilisation dans un environnement naturel au cours d'activités quotidiennes, et la rapidité d'acquisition et d'interprétation des données (Mandrick, 2013). Sa résolution temporelle est de l'ordre de la seconde, et peut descendre jusqu'à la milliseconde si le ratio signal/bruit est correct (Villringer & Chance, 1997). Sa résolution spatiale est de l'ordre de quelques centimètres (Boas, Dale & Franceschini, 2004). La fNIRS est ainsi bien adaptée à l'évaluation du travail cortical impliquant les hautes fonctions cognitives (Obrig *et al.*, 1996).



Figure 18 - Placement des optodes au niveau du CPF. 8 émetteurs de lumière sont présents (1 à 4 pour l'hémisphère droit, 5 à 8 pour l'hémisphère gauche) ainsi que deux récepteurs (R1 pour la lumière émanant des émetteurs 1 à 4, R2 pour les émetteurs 5 à 8).

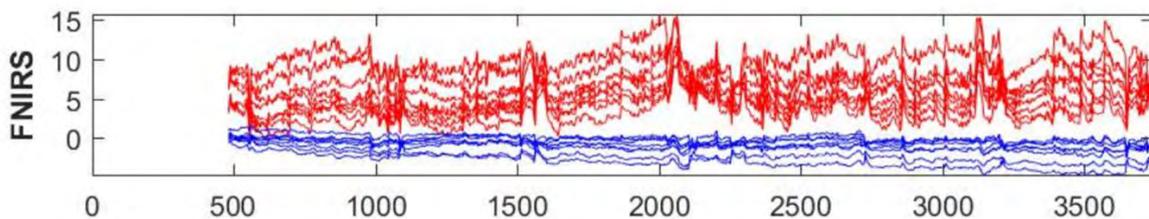


Figure 19 - Exemple de résultat obtenu à l'aide d'une fNIRS placée au niveau du CPF. Les tracés rouges représentent les variations en $[HbO_2]$, les bleus en $[HHb]$, le tout au cours du temps. Lorsque l'activité s'accroît au niveau du CPF, l'afflux sanguin apporte une quantité d' HbO_2 supérieure à la consommation des neurones, ce qui explique la diminution d' $[HHb]$.

De ce fait, la fNIRS a très largement été employée pour étudier le fonctionnement cortical au cours d'activités de repos ou de sollicitations fonctionnelles chez l'adulte (Villringer & Chance, 1997). Ainsi, son utilisation est pertinente pour l'évaluation du niveau de difficulté d'une tâche plus ou moins complexe. Dans sa thèse, Mandrick (2013) liste plusieurs études ayant utilisé la fNIRS dans ce but :

- Girouard *et al.* (2009, 2010) : lors de l'exécution de différentes tâches sous forme de jeu (rubicub et Pacman à plusieurs niveaux de difficulté), les auteurs ont pu distinguer les différents niveaux de charge de travail selon le niveau de difficulté du jeu.
- Obrig *et al.* (1996) : lors d'une tâche motrice de dextérité manuelle (tâche d'opposition de doigts avec le pouce), les auteurs ont observé une plus grande magnitude du signal lorsque la tâche est difficile.
- Izzetoglu *et al.* (2003) : lors d'une épreuve de n-back à trois niveaux de difficulté, le CPF augmentait son activité avec la complexité de l'exercice.
- Ayaz *et al.* (2012) : les auteurs montrent la possibilité d'utilisation de la fNIRS dans des environnements écologiques, en estimant la charge mentale de 24 contrôleurs aériens

effectuant une tâche standard (n-back à 4 niveaux de difficulté) ou une tâche cognitive complexe (contrôle aérien) avec différents niveaux de difficulté. Les résultats montrent que la fNIRS est sensible à la charge mentale. Les auteurs montrent, via la moyenne des variations d'oxygénation du CPF ($[HbO_2] - [HHb]$), que plus les niveaux de difficulté des tâches sont élevés, plus les niveaux d'oxygénation du CPF sont dissociables. La distinction de faibles niveaux de difficulté n'est en revanche pas possible.

Toutes ces études ont contribué à montrer l'existence d'un lien étroit entre l'activation des diverses régions du CPF, mesurée par la fNIRS, et la charge mentale provoquée par des tâches simples ou complexes. Les réponses fNIRS recueillies au niveau du CPF reflètent les changements de l'activité hémodynamique liés à la charge mentale (Mandrick, 2013). Ces réponses sont, de plus, proportionnelles à la performance que doit produire un opérateur : en effet, plus la performance que doit produire l'opérateur est élevée, et/ou plus la difficulté de la tâche est élevée, plus la réponse hémodynamique sera grande (Obrig *et al.*, 1996).

Au vu de sa capacité à rendre compte de la charge mentale d'un opérateur, la fNIRS a été très utilisée en aviation afin de déterminer la charge mentale des pilotes au sein des cockpits, virtuels ou réels.

En 2000, Takeuchi a étudié la réponse hémodynamique du CPF lors d'une tâche de simulation de vol de 60 secondes. Les participants étaient confrontés à 4 niveaux de difficulté (une condition sans vent, puis trois autres avec des vitesses de vent croissantes). En l'absence de variations de l' $[HHb]$, les auteurs ont observé les variations d' $[HbO_2]$. Les résultats obtenus montrent une plus grande activation corticale en fonction de la difficulté de la tâche, avec une prédominance pour l'hémisphère droit.

En 2014, Durantin *et al.* ont mené une étude sur 12 participants devant accomplir une tâche de pilotage de véhicules radiocommandés de difficulté variable. A l'aide de la fNIRS, les auteurs ont observé une corrélation entre la variation du niveau d'oxygénation du cortex préfrontal dorsolatéral (DLPFC) gauche et la difficulté de la tâche. En effet, il a été observé que le niveau d'oxygénation dans la région du DLPFC augmentait avec la difficulté de la tâche. Les auteurs notent que cette région du cerveau joue un rôle clé dans les tâches de supervision et de contrôle cognitif. Ils notent également que ce déclin du niveau d'oxygénation est associé au niveau de performance le moins bon, et au niveau de charge mentale subjective le plus élevé. Ils

expliquent ainsi que lors de la condition la plus difficile, les participants n'ont pas pu mobiliser de ressources cognitives pour faire face à la demande de la tâche, et se sont donc retrouvés en situation de surcharge mentale. Avec ces résultats, les auteurs confirment des observations réalisées par d'autres études utilisant des moyens de mesures plus classiques tels que l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) et l'EEG. De multiples études ont également corrélé la difficulté des tâches avec l'activité des cortex préfrontaux (Ayaz *et al.*, Ibid ; Fishburn *et al.*, 2014).

Une autre étude (Causse *et al.*, 2017) a été menée sur 26 participants devant accomplir deux scénarios de pilotage en simulateur de vol, l'un facile et l'autre difficile, ainsi qu'une batterie de tests neuropsychologiques de difficulté variable. Les participants étaient équipés de fNIRS afin de mesurer leur activité cérébrale pendant ces tâches. Les résultats montrent encore une fois qu'aussi bien sur les tests en laboratoire qu'en simulateur de vol, l'augmentation de la difficulté des tâches était associée à une dégradation des performances, une augmentation de la charge mentale subjective, et à une augmentation de l'oxygénation au niveau du cortex préfrontal, avec une prédominance au niveau du DLPFC droit. Les auteurs concluent ainsi que l'utilisation de la fNIRS pourrait permettre de détecter la variation de l'effort mental en temps réel, et que des systèmes adaptatifs pourraient se baser sur cette mesure afin d'ajuster le niveau de charge mentale chez les opérateurs en prenant par exemple en charge certaines tâches connexes pour laisser l'opérateur se concentrer sur les plus importantes.

L'équipe de Dehais *et al.* (2018) a ensuite transposé l'utilisation de la fNIRS en vol réel, avec une expérimentation (4 pilotes) pendant laquelle une tâche de détection de stimuli auditifs a été effectuée. L'expérimentation présentait deux conditions, une facile et une difficile. La fNIRS, couplée à un algorithme, avait pour but de distinguer la condition facile de la condition difficile, en se basant sur les mesures physiologiques. Le score obtenu par l'algorithme couplé à la fNIRS était ainsi de 81,5 % de classifications correctes. Ce résultat montre la capacité de la fNIRS à mesurer l'activité cérébrale des opérateurs en conditions réelles.

Il est à noter que la fNIRS présente cependant quelques limites. Comparée à l'électroencéphalographie notamment, la résolution temporelle est moindre car elle est dépendante des variations hémodynamiques. De plus, la résolution spatiale est limitée aux couches corticales, du fait de la capacité limitée de la lumière à diffuser à travers les tissus profonds. Elle est cependant moins sensible au mouvement et aux contractions musculaires que

l'EEG, et permet d'obtenir des résultats de type IRMf pour un coût moindre et surtout en conditions opérationnelles.

Au vu de ces éléments, les mesures d'activité cérébrales à l'aide de la fNIRS semblent prometteuses pour nos expérimentations.

4.3.2 Mesure de la variabilité du rythme cardiaque

La variabilité du rythme cardiaque (VRC) est une variable d'intérêt pour les ergonomes depuis les années 1960 (Monod, 1967). Avec les avancées technologiques, la mesure de cette variable s'est vue de plus en plus facilitée. Grâce à un électrocardiogramme (ECG), la VRC peut être déterminée en analysant les intervalles entre deux battements consécutifs, et plus précisément entre les pics R des complexes QRS des battements (Figure 20).

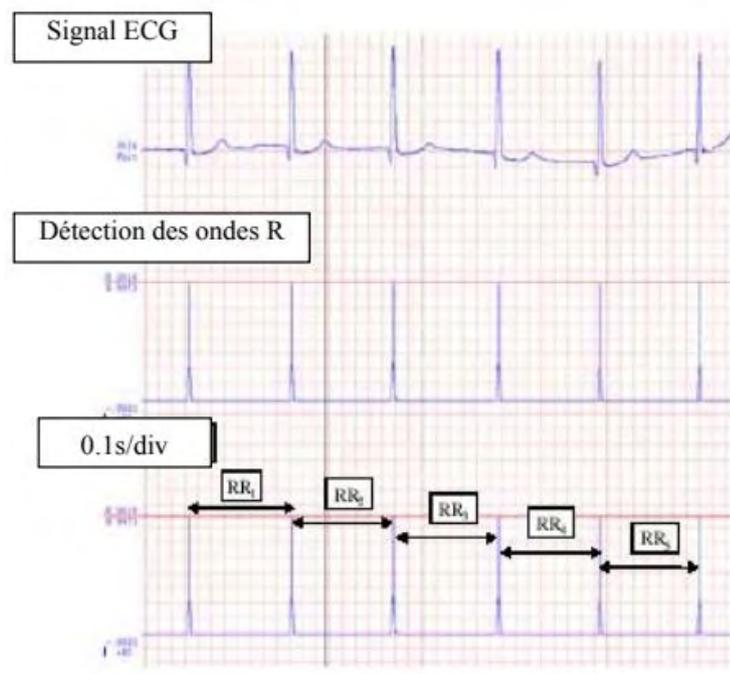


Figure 20 - Détection des battements cardiaques et mesure de l'intervalle R-R entre deux battements consécutifs (d'après Viola, 2004).

Il existe différentes méthodes d'analyse de la VRC, décrites en grande partie dans un article de 1996 : *Heart Rate Variability – Standards of Measurement, Physiological Interpretation, and Clinical Use* (Malik *et al.*, 1996). Trois méthodes d'analyse se dégagent :

- L'analyse temporelle, incluant :
 - La fréquence cardiaque (en battements par minutes) ;
 - L'écart-type des temps interbattements pour les battements normaux N-N (SDNN, en ms) ;
 - L'écart-type des moyennes des temps interbattements normaux calculés sur des tranches de 5 minutes successives (SDANN, en ms) ;
 - La racine carrée de la moyenne des différences au carré entre les intervalles R-R successifs (RMSSD, en ms) pour examiner la variabilité moyenne ;
 - Le pourcentage d'intervalles N-N dont la différence est supérieure à 50 ms (pNN50, en %).

- L'analyse spectrale, permettant d'identifier le niveau d'activité du système nerveux autonome et d'évaluer l'équilibre entre les systèmes sympathique et parasympathique. Le système sympathique est dit *ergotrope*, intervenant en période de forte activité afin de mobiliser l'énergie (augmentation de la sudation, du rythme cardiaque, dilatation pupillaire, etc.) tandis que le système parasympathique est dit *trophotrope*, s'opposant aux effets du système sympathique. Ainsi, une forte charge mentale, caractérisée par une activation du CPF, sera également caractérisée par une forte activité sympathique. Réalisée par la transformation rapide de Fourier sur des échantillons de 5 minutes chacun, l'analyse spectrale permet d'analyser :
 - Les ultra basses fréquences (ULF) (< 0,003 Hz), principalement dues au rythme circadien ;
 - Les très basses fréquences (VLF) (0,003 à 0,04 Hz), correspondant probablement à l'activité physique ;
 - Les basses fréquences (LF) (0,04 à 0,15 Hz) généralement liées à l'activité sympathique (cardio-accélérateur) ;
 - Les hautes fréquences (HF) (0,15 à 0,4 Hz) liées à l'activité parasympathique (s'oppose à l'activité sympathique et diminue la fréquence cardiaque) ;
 - La puissance totale (0 à 0,4 Hz) liée à l'activité globale du système nerveux autonome ;
 - Le ratio des basses fréquences sur les hautes fréquences (LF/HF), bon indicateur de l'équilibre entre parasympathique et sympathique.

Notons qu'il existe une méthode d'analyse, nommée VRC à très court terme (*Ultra Short Term HRV*) qui permet de mesurer la VRC sur des échantillons plus courts que les 5 minutes requises pour la mesure classique (30 s, 1 min, 2 min, 3 min). Plusieurs études (Salahuddin *et al.*, 2007 ; Baek *et al.*, 2015 ; Castaldo *et al.*, 2019) ont montré que la VRC à très court terme était un bon substitut à la VRC classique, et était plus à même de mesurer cette variable en temps réel.

- L'analyse non linéaire (ou analyse de Poincaré) consistant à étudier à la fois les dispersions (écarts-types) des ponts de part et d'autre (SD1) et le long (SD2) de la ligne d'identité reliant les temps interbattements $N-N_n$ aux temps interbattements $N-N_{n+1}$. SD1 représente la variabilité à court terme, tandis que SD2 représente plutôt la variabilité à long terme.

Le lien entre VRC et charge mentale a largement été étudié (pour une revue des études antérieures à 1988, voir Meskhati, 1988). Il est admis que la charge mentale diminue la VRC (Mulder & Mulder, 1981 ; Hjortskov *et al.*, 2004 ; Wang *et al.*, 2005, Delliaux *et al.*, 2019), phénomène probablement lié à une activation sympathique et/ou à une déactivation parasympathique (Hatch *et al.*, 1986 ; Grossman & Svebak, 1987 ; Grossman, 1992 ; Hjortskov *et al.*, Ibid, Collins *et al.*, 2005, Wang *et al.*, Ibid ; Taelman *et al.*, 2011, Delliaux *et al.*, 2019). Ces propriétés ont également été étudiées en condition réelles. L'étude réalisée par Bonner et Wilson (2002) montre notamment que la mesure du rythme cardiaque comme de sa variabilité (dans les basses et hautes fréquences) sont sensibles aux variations de charge mentale lors d'un vol réel. Une autre étude (Sauvet, Jouanin, Langrume, Van Beers, Papelier & Dussault, 2009) a également démontré la sensibilité de la variabilité du rythme cardiaque en vol réel, notamment des mesures de l'intervalle R-R, SDNN, SD1 et SD2, ainsi que du ratio LF/HF. Ces observations nous ont mené à effectuer des mesures cardiaques lors de notre expérimentation, en complément des mesures cérébrales. Ces mesures présentent toutefois certaines limites, en fonction des conditions physiologiques d'application. Par exemple, l'exercice physique intense est accompagné d'une élévation de la fréquence cardiaque, et induit une baisse de l'indice normalisé LF/(LF+HF), ce qui est dû à la forte influence respiratoire modifiant la puissance dans la bande de fréquence HF. L'indice normalisé, dans ce cas, n'est plus représentatif de l'activité sympatho-vagal (Viola, 2004).

4.3.3 Autres mesures physiologiques

4.3.3.1 Mesure de l'activité oculaire

De nombreuses études se sont intéressées au lien existant entre l'activité oculaire et la charge mentale. Ce type de mesure est facilement accessible et peu, voire non invasif, ce qui explique l'intérêt qu'il suscite.

Il est possible de rendre compte de la charge mentale des opérateurs en mesurant la durée et la fréquence des fixations. Un point de fixation (si l'opérateur y porte attention, ce qui n'est par exemple pas le cas lors du *mind-wandering*) permet de traiter les informations sur lesquelles se porte le regard (Just & Carpenter, 1984) et a une durée supérieure à 100 à 200 ms. Il a été mis en évidence que lorsque la charge de travail des opérateurs augmentait, elle était accompagnée d'une augmentation de la durée et de la fréquence des longues fixations (Van Orden *et al.*, 2001). Une autre étude (Peter *et al.*, 2001) fait état de différences au niveau de l'activité oculaire entre les novices et les experts. Il a été constaté que les pilotes experts présentaient de plus nombreuses fixations de courte durée, regardaient plus leur cible et leur vitesse, et moins leur altimètre que leurs homologues novices.

Les saccades sont également un indicateur de la charge mentale. Elles correspondent au déplacement du regard d'un point à un autre. C'est donc le mouvement oculaire entre deux fixations. Une saccade peut durer entre 20 et 200 ms, avec une vitesse pouvant aller au-delà de 50° d'angle d'œil par seconde (Tokuda, Obinata, Palmer, & Chaparro, 2011). Une expérimentation menée en laboratoire par l'équipe de Tokuda montre un lien entre la charge mentale et le nombre de saccades, lien plus puissant que pour les autres mesures oculaires. Scannella, Peysakhovich, Ehrig et Dehais (2018) ont démontré que cette mesure permettait la discrimination de plusieurs niveaux de charge mentale en vol réel.

Il est également possible de mesurer le diamètre de l'ouverture pupillaire. En effet, 100 à 200 ms après un stimulus, on peut observer une dilatation de la pupille de l'ordre de 0,2 à 0,5 mm. Cette dilatation disparaît rapidement après la fin du traitement du stimulus. Ce phénomène est nommé *Task Evoked Pupillary Response* (TEPR). Il a notamment été observé par Hess et Polt (1964). Greef *et al.* (2009) montrent qu'une charge mentale élevée entraîne une augmentation du diamètre pupillaire moyen par rapport aux phases de sous-charge. En 2011, Wang montre que si l'on mesure la valeur moyenne de la dilatation pupillaire sur une période particulière de

la tâche, celle-ci est alors corrélée à la charge mentale ressentie par l'opérateur. Cegarra et Chevalier (2008) notent cependant que la mesure de la dilatation pupillaire n'est pas une mesure fiable de la charge mentale dans le sens où elle est très sensible, peu sélective, et où elle possède une faible capacité de diagnostic. En effet, une étude de Tryon (1975) énumère 23 paramètres ayant une influence sur le diamètre pupillaire. Ceci n'empêche pas l'utilisation de cette mesure en tant qu'indicateur de la charge mentale, mais dans des conditions très contrôlées (voir par exemple Matton, Paubel & Puma, 2020).

Les clignements de paupières sont également pris en compte dans la mesure de la charge mentale. En effet, Brooking (1996) observe que la fréquence des clignements augmente avec la charge mentale. Certains auteurs notent cependant que la fréquence des clignements serait plus liée à la charge visuelle que mentale (Chen & Epps, 2014).

Cette mesure ne sera pas utilisée dans notre étude. En effet, en ayant à l'esprit l'expérimentation que nous réaliserons en simulateur de vol, une étude spécifique aurait été nécessaire afin de contrôler les inévitables variations de luminosité générées par le cockpit et l'environnement extérieur, ce qui a conduit à ne pas retenir cette mesure. De plus, sans contrôle sur les horaires des passations des expérimentations, l'état de fatigue des participants peut être très variable d'un individu à l'autre. De ce fait, les mesures de fixations et de clignements peuvent être faussées.

4.3.3.2 Mesure de l'activité électrodermale

L'activité électrodermale peut rendre compte de l'état mental d'un opérateur (Siddle, 1991). En effet, la peau participe au phénomène de thermorégulation grâce à la sudation. Celle-ci modifie le niveau électrique de la peau. Or les glandes eccrines, responsables de la sudation, sont sous le contrôle du système nerveux sympathique, qui est associé le plus souvent à un état d'activation (effort, émotions...) (Gil, 2009). Ainsi, la mesure du niveau électrique de la peau rend compte de la sudation, qui elle-même rend compte de l'activité du système nerveux sympathique, qui permet donc de rendre compte de l'activité cognitive de l'opérateur.

Le niveau électrique de la peau est mesuré en injectant un léger courant électrique à la surface de celle-ci, ce qui permet d'en déduire la conductance. Les variations de conductance de la peau sont ainsi le reflet de son niveau électrique (Dawson *et al.*, 2007). Cette mesure ne sera

cependant pas utilisée lors de nos expérimentations : la mesure spectrale de la VRC permet déjà de rendre compte de l'activité du système sympathique.

4.3.4 Mesures subjectives

Les mesures subjectives sont les moyens classiques d'évaluation de la charge mentale ressentie par un opérateur réalisant une tâche. Ces moyens prennent la forme de questionnaires standardisés dans lesquels l'opérateur renseigne plusieurs informations permettant d'évaluer le niveau de charge mentale qu'il a ressenti pendant la réalisation d'une tâche. Parmi ces questionnaires nous pouvons citer le NASA-TLX (Hart & Staveland, 1988), l'ISA, le SWAT, le Bedford ou encore le MCH.

Le NASA-TLX est un questionnaire développé dans les années 80 au centre de recherche de la NASA. Il comprend 6 échelles de Likert (correspondant à 6 dimensions : exigence mentale, exigence physique, exigence temporelle, performance, effort, niveau de frustration), sur lesquelles l'opérateur est invité, à l'aide d'une question explicite, à noter le niveau ressenti correspondant à chacune des dimensions. Les opérateurs doivent ensuite pondérer chacune des dimensions, et la moyenne pondérée des scores est réalisée afin d'obtenir un indice de charge mentale.

Ces questionnaires se basent sur le postulat que l'opérateur est le mieux placé pour évaluer la charge mentale qu'il ressent au cours d'une activité. Ce sont ainsi des mesures directes et faciles à obtenir. Cependant ces mesures présentent des inconvénients. On peut noter, tout d'abord, qu'elles ne peuvent pas être réalisées pendant l'expérience (c'est le cas du NASA-TLX, qui doit être réalisé a posteriori), ou en tous cas pas de manière non-intrusive. C'est le cas par exemple de l'ISA (Jordan, 1992), qui se présente sous la forme d'une échelle permettant aux opérateurs de noter leur niveau de charge mentale, de 1 à 5. Ce questionnaire doit être complété durant la tâche, et régulièrement répété après un certain intervalle de temps, ce qui interfère avec la réalisation de la tâche et fausse donc le caractère écologique d'une expérimentation. De plus, Sperandio (1988) remarque que les résultats des mesures subjectives ne sont pas toujours corrélés à ceux des mesures objectives, ce qu'il explique par le fait que la motivation du sujet et la satisfaction qu'il retire de son travail influencent fortement le sentiment d'astreinte qu'il ressent.

4.3.5 Conclusion

Les cadres théoriques que nous avons explorés dans ce chapitre, autour des régulations et de la charge mentale, mettent en avant le lien entre l'effort cognitif investi par les opérateurs et le contrôle cognitif que ceux-ci exercent sur les tâches qu'ils doivent gérer. En effet, la charge mentale est la résultante de multiples facteurs, tels que les exigences de la situation, l'expertise des opérateurs, ou les contraintes environnementales. Les régulations mises en place par les opérateurs sont également déterminées par leur niveau de charge mentale, et ces régulations sont responsables des différents modes de contrôle cognitif instanciés par les opérateurs afin de gérer les tâches qui leur incombent avec le meilleur rapport coût/bénéfices. Il est à noter qu'il ne s'agit pas d'un lien unidirectionnel ; en effet le mode de contrôle cognitif instancié peut également influencer sur le niveau de charge mentale.

La revue des moyens d'évaluation de la charge mentale met en lumière les différents moyens d'explorer l'astreinte ressentie par les opérateurs en situation de travail. Si tous les moyens abordés ici permettent, avec plus ou moins de sensibilité et de sélectivité, d'appréhender la charge mentale, nous n'en retiendrons que trois pour nos expérimentations. Nous sélectionnons la fNIRS pour mesurer l'activité cérébrale de nos participants. Cette mesure se révèle précise, fiable, et utilisable en conditions écologiques. Elle semble donc idéale pour nos expérimentations, dont l'une se déroulera dans un simulateur de vol. Nous sélectionnons également les mesures cardiaques, qui ont été (et sont) largement utilisées pour rendre compte de la charge mentale. Nous ne sélectionnerons ni les mesures oculaires, ni les mesures électrodermales, à cause des limitations évoquées plus haut. Enfin, nous utiliserons le NASA-TLX comme mesure subjective, car il a été conçu spécialement pour l'aviation, et a été très largement utilisé dans ce domaine (sur 550 études utilisant le NASA-TLX revues par Hart (2006), 27 % ont été réalisées dans le domaine de l'aviation).

La combinaison de ces trois types de mesures nous semble pertinente pour appréhender la charge mentale des participants à nos expérimentations.

CHAPITRE 5.

PROBLEMATIQUE

Dans l'introduction, deux enjeux industriels et opérationnels avaient été mis en avant. Ils portaient d'une part sur la compréhension des facteurs affectant la performance des pilotes lors de la prise de décision, et d'autre part sur l'optimisation de la coopération humain-machine pour accompagner l'intégration des automatismes au sein des cockpits. De ces enjeux découle la question initiale de la thèse : Quels sont les facteurs de dégradation de la prise de décision ? Comment l'assister de façon efficace ? Cette question a été reformulée, et aboutit à ce qui suit :

Comment évaluer la dégradation de la prise de décision chez les pilotes, due à des perturbations exogènes (ou « contrainte », comme par exemple l'évolution de la situation de vol), ou endogènes (ou « astreinte », liées aux effets de la contrainte sur l'état mental de l'opérateur) ?

Cette première partie théorique a conduit à défricher et affiner cette question initiale. La littérature a été investiguée pour identifier les modèles, les facteurs et les indicateurs qui permettent d'expliquer et d'évaluer les variations de performance des pilotes dans le processus de prise de décision. Ce chapitre intermédiaire vise maintenant à synthétiser les questions qui

émergent de cet état de l'art théorique et méthodologique, et à expliciter la problématique de recherche retenue.

Le premier chapitre a tout d'abord permis de qualifier la question de recherche initiale, en caractérisant les contraintes liées au pilotage. Les pilotes de ligne mènent ainsi une activité de supervision de processus dans des situations dynamiques et incertaines, où la pression temporelle est importante et qui sont souvent caractérisées par de fortes exigences cognitives. Par ailleurs, même si elles apportent un gain en sécurité conséquent, l'introduction de nouvelles « solutions » d'automatisation pourrait mener, si elles ne sont pas conçues en relation avec une approche facteurs humains, de manière paradoxale, à de nouveaux « problèmes » cognitifs pour les pilotes (syndrome OOTL, hypovigilance, etc.). Afin de bien comprendre et de résoudre au mieux ces contraintes, il ressort de ce chapitre le besoin d'**identifier les situations et les fonctions de travail particulières qui peuvent induire des variations de performance lors de la prise de décision (Verrou 1)**.

Les chapitres 2 et 3 ont ensuite donné lieu à une exploration des modèles de la prise de décision mise en œuvre par les pilotes, et des principaux mécanismes cognitifs menant à des erreurs de décision dans le domaine aéronautique (s'appuyant notamment sur une méta-analyse HFACS dans l'aviation). Cette revue de la littérature a notamment mis en exergue le rôle central du contrôle cognitif - voire métacognitif, comme le proposent Hoc et Amalberti (2007) - dans l'adaptation du processus de prise de décision, la compréhension de la situation, et les variations des performances chez les pilotes. Cette notion de contrôle cognitif est séduisante pour notre sujet de recherche, au sens où elle rend compte de la flexibilité des comportements de l'opérateur pour faire face à une situation dynamique. Elle renvoie à plusieurs propositions théoriques, notamment le modèle SRK de Rasmussen (1983) et le modèle COCOM de Hollnagel (1993). Parmi ces travaux, le modèle COCOM a été retenu, car ses dimensions sont intrinsèquement liées aux caractéristiques des situations dynamiques ; il s'agit notamment de la prise en compte des aspects temporels de la contrainte et du nombre d'objectifs simultanément poursuivis. Cependant, comme l'ont montré les quelques études expérimentales portant sur ces modèles théoriques (Stanton *et al.*, 2001 ; Cegarra *et al.*, 2017), se pose encore la question d'**opérationnaliser l'évaluation des modes de contrôle par des mesures objectives (Verrou 2)**. Par ailleurs, l'application du modèle COCOM, basée notamment sur la prise en compte du « temps subjectivement disponible », amène également à **considérer l'effet de l'expertise de l'opérateur sur la gestion de la contrainte de la situation (Verrou 3)**.

Enfin, le chapitre 4 a porté sur l'étude du lien entre le contrôle cognitif et la notion de charge mentale. En effet, il existe tout un pan de la littérature, au sein des théories sur la charge mentale, qui étudie la question des régulations ou des mécanismes compensatoires (Hockey, 1997 ; Kostenko *et al.*, 2016 ; Cegarra *et al.*, 2017). Ces possibles relations conceptuelles entre ces deux construits ouvriraient des perspectives intéressantes, notamment pour l'opérationnalisation du contrôle cognitif, par des mesures comportementales et neurophysiologiques. Elles permettraient également d'ajouter du sens à la mesure de charge mentale (portant sur un niveau d'utilisation de ressources plus ou moins élevées), en ajoutant une information sur le niveau de maîtrise de la situation (contrôle cognitif plus ou moins réactif ou proactif). **Pour cela, il faudra étudier les effets de la contrainte sur le contrôle cognitif, et le lien entre contrôle cognitif et astreinte (Verrou 4).**

En définitive, notre question initiale, portant sur la détection de la dégradation de la prise de décision, a été affinée au travers de cette première partie théorique, pour aboutir à la problématique de cette thèse. Celle-ci, à la fois théorique et méthodologique, peut-être énoncée comme suit :

Peut-on relier le contrôle cognitif et la charge mentale, et ainsi utiliser des mesures neurophysiologiques pour détecter des variations de comportement lors de la prise de décision ?

Elle se résume par ailleurs en quatre questions de recherche, correspondant aux verrous énoncés ci-dessus, et auxquels nous chercherons à répondre dans la partie empirique de ce document.

Q1. Quelles sont les situations et les fonctions de travail qui peuvent amener des changements de mode de contrôle cognitif dans le domaine aéronautique ?

Q2. Comment peut-on opérationnaliser l'évaluation du mode de contrôle cognitif, au moyen de mesures comportementales et neurophysiologiques ?

Q3. Le niveau d'expertise a-t-il une influence sur les modes de contrôle instancié ?

Q4. Peut-on observer et valider expérimentalement les relations entre le mode de contrôle cognitif instancié, le niveau de contrainte de la situation et le niveau d'astreinte de l'opérateur ?

Le chapitre 6 cherchera à répondre à la question Q1, grâce à une analyse cognitive de l'activité (CWA) des pilotes de ligne, dans laquelle nous identifierons des situations types amenant des variations dans les modes de contrôle.

Les deux derniers chapitres 7 et 8 permettront ensuite, par l'analyse de résultats expérimentaux sur les situations types identifiées au chapitre 6, d'explorer la question méthodologique de l'opérationnalisation de l'évaluation du contrôle cognitif (Q2), et la question théorique du lien entre astreinte, contrainte et contrôle (Q4).

Finalement, la comparaison entre ces deux expérimentations, l'une menée avec une population d'étudiants novices sur un micro-monde en laboratoire, et l'autre menée avec des pilotes Airbus sur un simulateur de recherche, apportera des précisions à la question Q3.

La Figure 21 présente cette logique sous une forme schématique.

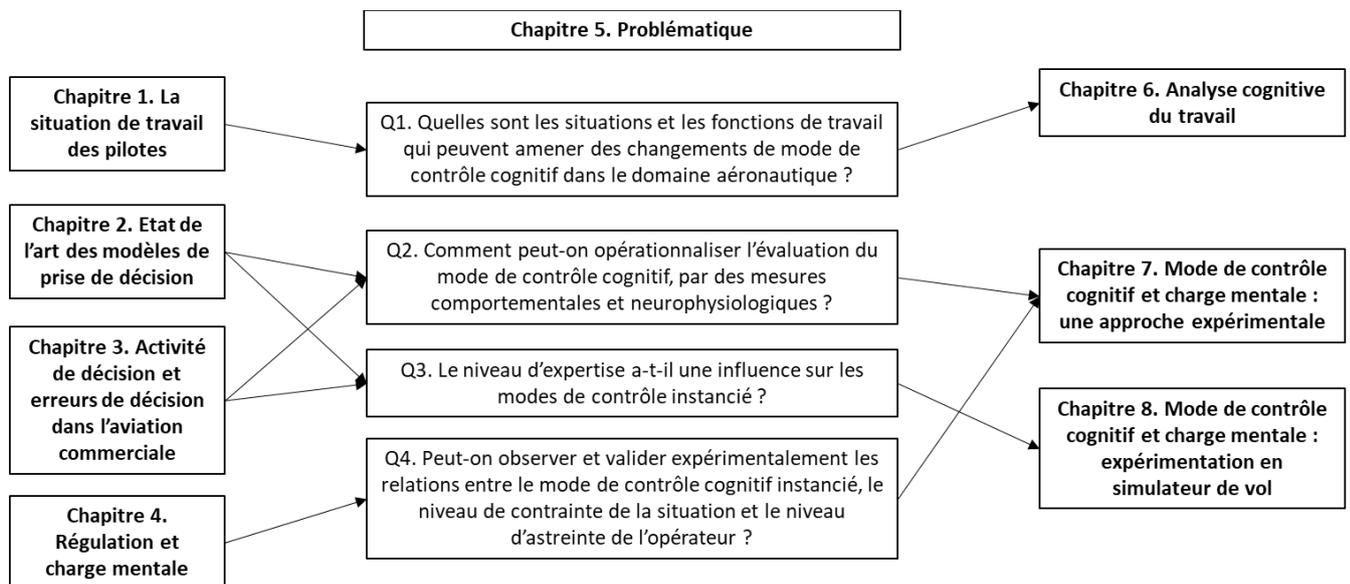


Figure 21 - De la théorie à la démonstration.



PARTIE EMPIRIQUE

La partie empirique présente trois études qui ont été réalisées afin de répondre à notre problématique : **Peut-on relier le contrôle cognitif et la charge mentale, et ainsi utiliser les mesures neurophysiologiques de l'opérateur pour détecter des variations de comportement lors de la prise de décision ?**

La première étude consiste en la réalisation d'une analyse cognitive du travail (*Cognitive Work Analysis*). Cette analyse permet de décrire les tâches que les pilotes doivent réaliser dans une situation donnée, la répartition des rôles au sein de l'équipage et les différentes stratégies que les pilotes peuvent mettre en place afin de gérer ladite situation. Nous avons choisi d'étudier une situation de déroutement suite à une anomalie. En effet, l'activité nominale des pilotes de ligne est très procédurale. Or nous avons vu en partie théorique que le suivi de procédures correspondait à un mode de contrôle cognitif de type tactique. Afin d'observer l'instanciation par les pilotes d'autres modes de contrôle cognitif, il nous faut mettre au point une expérimentation qui amène les pilotes soit à l'imagination de solutions nouvelles en mode stratégique, soit à l'adoption de comportements guidés par les caractéristiques saillantes de la situation, en mode opportuniste voire brouillé. L'analyse cognitive du travail réalisée nous a permis de mettre au point une expérimentation en identifiant le type de situation permettant l'instanciation de ces différents modes de contrôle cognitif.

La seconde étude porte sur l'exploration des liens entre la charge mentale et les modes de contrôle cognitifs. Elle a été menée dans un cadre reproductible et très contrôlé, puisqu'elle confronte vingt étudiants, novices en ce qui concerne les situations dynamiques, à un logiciel informatique permettant la gestion de différentes tâches représentatives du pilotage d'avions. Nous avons ainsi soumis les participants à différents niveaux de contrainte, évalué leurs performances (caractérisées par les choix réalisés durant la simulation, représentatifs de leur prise de décision) ainsi que leur niveau de charge mentale, grâce aux mesures comportementales et physiologiques. Les objectifs de cette étude étaient, d'une part, d'observer l'instanciation des différents modes de contrôle cognitifs en fonction de la contrainte, et d'autre part d'explorer les liens entre les niveaux de charge mentale observés et les modes de contrôle cognitifs instanciés.

La troisième étude porte également sur les liens entre contrôle cognitif et charge mentale, mais elle se déroule cette fois dans un cadre se voulant proche de la réalité. Elle confronte 8 pilotes professionnels (pilotes d'essai et instructeurs) à un scénario de vol au sein d'un simulateur cockpit. L'objectif de cette étude était le même que pour la précédente, à savoir observer

l'instanciation de différents modes de contrôle cognitif en fonction de la contrainte, et explorer les liens entre la charge mentale des participants et les modes de contrôle instanciés.



CHAPITRE 6.

ANALYSE COGNITIVE DU TRAVAIL DES PILOTES

Nous avons sélectionné l'Analyse Cognitive du Travail (*Cognitive Work Analysis*, CWA, Rasmussen *et al.*, 1994 ; Vicente, 1999) afin d'étudier le domaine de travail des pilotes car cette méthode est recommandée pour l'analyse de systèmes complexes (Holman, Walker, Lansdown, Salmon, Read & Stanton, 2020). La CWA est un cadre méthodologique dédié à la conception de systèmes sociotechniques. Cette méthode se distingue des méthodes classiques d'analyse du travail en soulignant l'importance d'une description des contraintes provenant du domaine du travail pour comprendre le comportement des opérateurs. Les contraintes constituent la principale unité d'analyse ; celles-ci délimitent les possibilités d'action mais, à l'intérieur de l'enveloppe qui définit cet espace des possibilités, les acteurs disposent également de marges de manœuvre (Naikar, 2013).

La CWA a été développée au Risø National Laboratory au Danemark par Rasmussen (1986). Depuis sa création, cette méthode de conception a été mise en œuvre dans des domaines à hauts risques très variés, comme par exemple : le domaine militaire (e.g. Bisantz, Roth, Brickman, Lin, Hettinger, & McKinney, 2003 ; Naikar, Moylan & Pierce, 2006 ; Jenkins, Stanton, Salmon, Walker, & Young, 2008a ; Jenkins, Stanton, Walker, Salmon, & Young, 2008b ; Jenkins, Stanton, Salmon, & Walker, 2011) ; le contrôle aérien (e.g. Ahlstrom, 2005) ; l'industrie nucléaire (Olsson & Lee, 1994), la médecine (Burns, Momtaham & Enomoto 2006) ; la conduite automobile (e.g. Jansson, Olsson, & Erlandsson. 2006) ; le transport routier (e.g. Salmon, Stanton, Regan, Lenne, & Young, 2007). Cette méthode a été également être mise en œuvre dans le cadre d'applications plus simples (e.g. Mazaeva & Bisantz., 2007 ; Jenkins, Stanton, Salmon, Walker, & Young, 2010) ou encore pour la conception d'interfaces écologiques (e.g. Vicente, 1999 ; Jamieson, Miller, Ho & Vicente, 2007 ; Burns & Hajdukiewicz, 2004, Chauvin, Rauffet, Tréhin, Berruet & Lassalle, 2015), la conception et l'évaluation de programmes d'entraînement (Naikar & Sanderson, 1999), la conception de stratégies de gestion d'erreurs (Naikar & Saunders, 2003). Le domaine qui nous intéresse, l'aviation, a également fait l'objet de plusieurs études reposant sur la CWA (Naikar & Sanderson, 2001 ; Stanton, Harris & Starr, 2015 ; Varga, Iacob, Grote & Stanton, 2015 ; Schmid, Korn & Stanton, 2020).

La CWA est une méthode d'analyse dite formative. Elle se distingue des approches descriptives (décrivant la réalisation des tâches dans l'environnement de travail) et normatives (qui décrivent la façon dont devraient être réalisées les tâches). L'approche formative décrit les contraintes et non les tâches, elle focalise ainsi l'analyse sur les potentialités de l'environnement de travail (Raymond, Prun & Cegarra, 2016).

La CWA se décompose en 5 phases (Tableau 5) (Vicente, 1999). La première phase est la plus critique, car c'est d'elle dont dépendent toutes les autres phases ; aussi doit-elle être décrite le plus précisément possible (Stanton & Bessell, 2013).

Phase	Outils de formalisation
Analyse du domaine de travail	<i>Abstraction hierarchy</i>
Analyse des tâches de contrôle	<i>Decision Ladder & CAT</i>
Analyse des stratégies	<i>Decision Ladder & Information Flow Map</i>
Analyse de coopération et d'organisation sociale	<i>Social Organization and Cooperation Analysis Contextual Activity Template (SOCA-CAT)</i>
Analyse des compétences des agents	<i>SRK taxonomy</i>

Tableau 5 - Phases de la CWA et outils de formation associés.

Une première analyse de type CWA a d'abord été réalisée, en prenant pour point de départ l'analyse réalisée par Stanton, Harris et Starr (2015), et en l'adaptant à notre contexte à l'aide de documents Airbus décrivant de manière exhaustive les procédures de pilotage ainsi que les rôles attribués à chacun des pilotes (*Standard Operating Procedures, SOP*) concernant l'intégralité d'un vol, de la porte de départ à la porte d'arrivée. Des observations dans les cockpits ont ensuite été effectuées, la majorité avec le support de vidéos, trois d'entre elles en simulateur de vol pendant des séances de 4 heures, et une autre en vol réel au cours d'un vol d'essai. Ensuite, quatre entretiens d'une heure chacun ont été réalisés avec un pilote d'essai (ex-militaire, deux entretiens), une pilote de laboratoire (pilote dont l'activité est en partie assignée aux simulateurs de recherche) et un pilote instructeur (ex-pilote de ligne). Au cours de ces entretiens, il leur a été demandé d'évoquer des situations qu'ils ont rencontrées, en vol de croisière ou au cours de l'approche, durant lesquelles ils ont dû prendre des décisions, notamment celles ayant pu aboutir à un déroutement, tâche sur laquelle nous avons centré l'analyse. Celle-ci a été ajustée et complétée à l'aide des éléments d'observation et d'entretiens obtenus. Enfin, elle a été présentée à un pilote de laboratoire qui a validé la version finale.

6.1 ENVIRONNEMENT DE TRAVAIL : LE COCKPIT

Avant d'aborder la CWA, commençons par brièvement présenter l'environnement de travail des pilotes : le cockpit. Celui-ci, prévu pour deux pilotes, est décomposé en trois sections, comme présenté sur la Figure 22.



Figure 22 - Vue générale d'un cockpit d'Airbus A350-1000. Tirée de : <https://www.airliners.net>

La zone encadrée en rouge, nommée « *main panel* », est principalement composée d'écrans, permettant aux pilotes de disposer des informations nécessaires à la conduite de l'avion (vitesse, altitude, attitude, cap, etc.) ainsi que des informations relatives aux systèmes de l'avion (moteurs, pressurisation, train d'atterrissage, etc.). On y trouve également la commande de train d'atterrissage, ainsi que deux écrans aux extrémités permettant d'afficher des documents sous forme numérisée (cartes d'aéroport, manuels d'opération de l'avion, etc.). Les pilotes disposent de mini-manches (à gauche et à droite) leur permettant de piloter manuellement l'avion. En partie haute de ce tableau de bord se situe un bandeau permettant de sélectionner les différents modes de pilote automatique, ainsi que de régler les informations affichées sur les écrans. En partie basse se trouvent deux écrans supplémentaires faisant office d'ordinateurs de bord, utilisés pour programmer un vol (route, carburant, etc.) dont les informations seront transmises au pilote automatique.

La zone encadrée en jaune, nommée « *overhead panel* » regroupe les commandes des différents systèmes de l'avion : systèmes électrique, hydraulique, carburant, pressurisation, centrales inertiels de navigation, etc. ainsi que les commandes des lumières externes de l'avion. A noter

qu'à bord d'un cockpit de ce type, les commandes relatives aux différents systèmes ne présentent aucun voyant lorsque le système fonctionne normalement ; les voyants ne s'allument qu'en cas d'anomalie.

La zone encadrée en bleu, nommée « *pedestal* », comprend les manettes de poussée des deux moteurs, les commandes des valves d'arrivée de carburant aux moteurs, ainsi que les commandes de volets et d'aérofreins. On y trouve également les commandes de radios, des radars météo et trafic, ainsi que les claviers et souris des ordinateurs de bord.

Aux pieds des pilotes se trouvent des pédales, deux par pilote, servant à contrôler la dérive de l'avion, ainsi qu'à diriger l'avion au sol à haute vitesse (au-delà de 80 nœuds) et à freiner. A basse vitesse, l'avion est dirigé au sol à l'aide de petits volants situés à côté des mini-manches.



Figure 23 - Instruments nécessaires à la conduite de l'avion, PFD à gauche et ND à droite. Tirée de : <https://i0.wp.com/blogrh-thomasvilcot.com/wp-content/uploads/2017/06/Plan-de-vol.jpg?ssl=1>

La Figure 23 ci-dessus présente les écrans nécessaires à la conduite de l'avion. Ces deux écrans, présents devant chacun des pilotes sur la *main panel*, se nomment « *Primary Flight Display* » pour celui de gauche (PFD) et « *Navigation Display* » pour celui de droite (ND). Le PFD affiche au pilote la vitesse indiquée de l'avion sur le bandeau de gauche, l'altitude sur le bandeau de

droite ainsi que la vitesse ascensionnelle via l'aiguille de droite. L'horizon artificiel indique l'attitude¹ de l'avion, le bandeau horizontal informe du cap, et les informations affichées en haut de l'écran sont relatives aux différents modes de pilote automatique activés. Enfin, en bas de l'écran, sont affichées les informations relatives aux volets et aérofreins.

Le ND indique au pilote le cap suivi et affiche la route programmée dans l'ordinateur de bord. En partie basse, il affiche également le profil ascensionnel programmé. Les différentes indications sont relatives à différents points de navigation, ainsi qu'à la vitesse par rapport au sol, la vitesse par rapport à l'air, et la vitesse et la provenance du vent. Cet écran permet également d'afficher le trafic environnant, la météo, le relief, et le plan de l'aéroport lorsque l'avion est au sol.

6.2 APPLICATION DE LA CWA

6.2.1 Analyse du domaine de travail

La première phase de la CWA, l'Analyse du Domaine de Travail (*Work Domain Analysis*, WDA) identifie les contraintes fonctionnelles qui caractérisent le système. Comme dit précédemment, la WDA sert de fondation pour toutes les phases suivantes. L'outil de modélisation associé à cette étape, nommé Hiérarchie d'Abstraction (AH), modélise le système avec un certain nombre de niveaux d'abstraction. Le plus haut niveau considère les objectifs fonctionnels généraux du système, et le niveau le plus bas décrit les composants individuels du système.

5 niveaux d'abstraction sont généralement utilisés et sont décrits comme suit par Stanton et Bessell (2013) :

- les buts fonctionnels (décrivant les buts du système ainsi que les contraintes externes) ;
- les mesures de valeurs et priorités (décrivant les critères que le système de travail utilise afin de mesurer sa progression vers l'atteinte des buts fonctionnels ou objectifs) ;
- les fonctions liées aux buts (décrivant les fonctions générales du système de travail qui sont nécessaires pour accomplir le but fonctionnel) ;
- les processus liés aux objets (décrivant les capacités fonctionnelles et limitations des objets physiques dans le système de travail) ;

¹ L'attitude de l'avion correspond à sa position dans l'espace par rapport aux axes de tangage (cabrage ou piquage du nez), de roulis (inclinaison des ailes à gauche ou à droite) et de lacet (nez à gauche ou à droite).

- les objets physiques (recouvrant l'ensemble des ressources matérielles du domaine - outils, équipements, personnel -, ainsi que leurs caractéristiques en termes d'apparence et de localisation spatiale).

L'analyse du domaine de travail représentée par la Figure 24 est générale. Elle recouvre toutes les phases d'un vol.

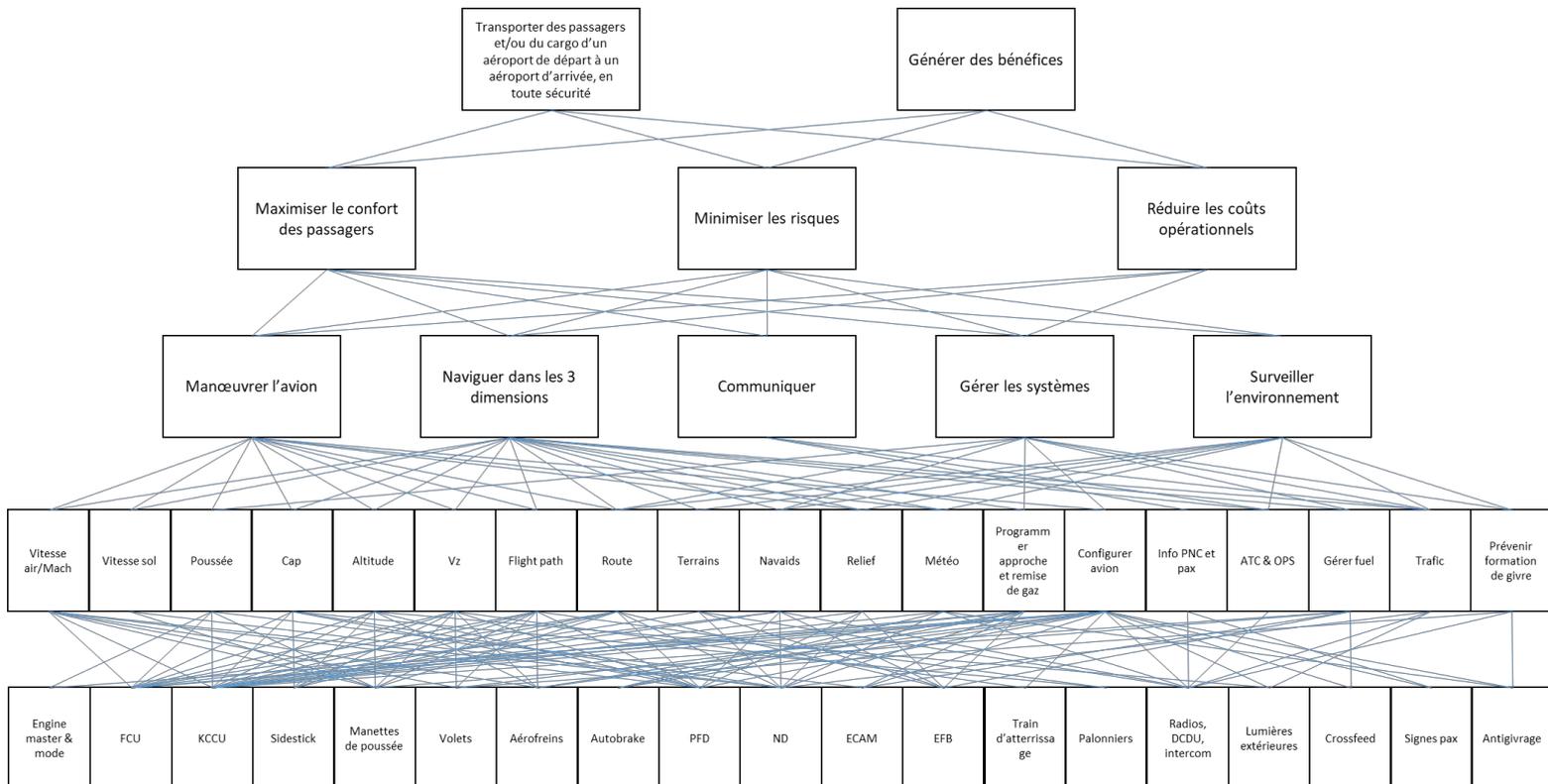


Figure 24 - Analyse du Domaine de Travail.

Comme écrit précédemment, notre point de départ était l'analyse réalisée par Stanton *et al.* (2015). Les trois premiers niveaux de la WDA reprennent en grande partie les résultats de cette étude. Les deux derniers niveaux sont plus spécifiques au pilotage d'un avion de type Airbus A350.

Les buts fonctionnels d'un aéronef sont de transporter des passagers et/ou des marchandises d'un aéroport de départ vers un aéroport d'arrivée, tout en générant des bénéfices, condition sine qua none pour le bon fonctionnement d'une entreprise. Ces deux buts doivent être réalisés dans un souci de maximisation du confort des passagers, de minimisation des risques (la sécurité est la clé de voûte de l'aéronautique), et de réduction des coûts opérationnels (par exemple en préférant les routes les plus directes possibles, ou en privilégiant les altitudes où le

vent pousse l'avion de manière à économiser du carburant). Nous reprenons à ce niveau les éléments présentés par Stanton *et al.* (Ibid). Nous conservons cependant uniquement la réduction des coûts opérationnels, car on peut déduire de cet élément l'optimisation du temps d'utilisation de l'avion qui apparaissait dans l'étude de Stanton *et al.* (Ibid). De plus, la gestion du temps d'utilisation de l'avion ne dépend pas des pilotes, mais des compagnies aériennes. Les fonctions liées aux buts comprennent la manœuvre de l'avion (au sol ou en vol), la navigation dans les trois dimensions, la communication (avec le contrôle aérien, l'équipage, les passagers, la compagnie aérienne, le trafic), la gestion des systèmes de l'avion (hydraulique, électrique, carburant, etc.), et la surveillance de l'environnement (terrains environnants, relief, météo, trafic, etc.). Ces fonctions correspondent à celles définies par Airbus pour le pilotage de leurs avions. Leur ordre de présentation dans la WDA change cependant par rapport à l'étude de Stanton, car nous considérons que la navigation doit avoir la priorité sur la communication. Enfin, les deux derniers niveaux de cette analyse du domaine de travail décrivent les nombreux processus à gérer, ainsi que les objets permettant de gérer ces processus :

- les processus concernent des variables permettant le pilotage de l'avion, telles que la gestion de la vitesse, de la poussée, du cap, etc. Par souci de concision, nous écrivons simplement « vitesse », « poussée », « cap » dans les cases de la WDA, mais cela sous-entend bien entendu la gestion de ces éléments.
- Les objets représentent les interfaces physiques avec lesquelles interagissent les pilotes afin de gérer les processus décrits au-dessus.

6.2.2 Analyse des tâches de contrôle

La seconde phase de la CWA, l'Analyse des Tâches de Contrôle (ConTA), identifie les prérequis associés à certaines classes de situations connues et récurrentes. La ConTA utilise l'échelle double de Rasmussen (1986) (Figure 25).

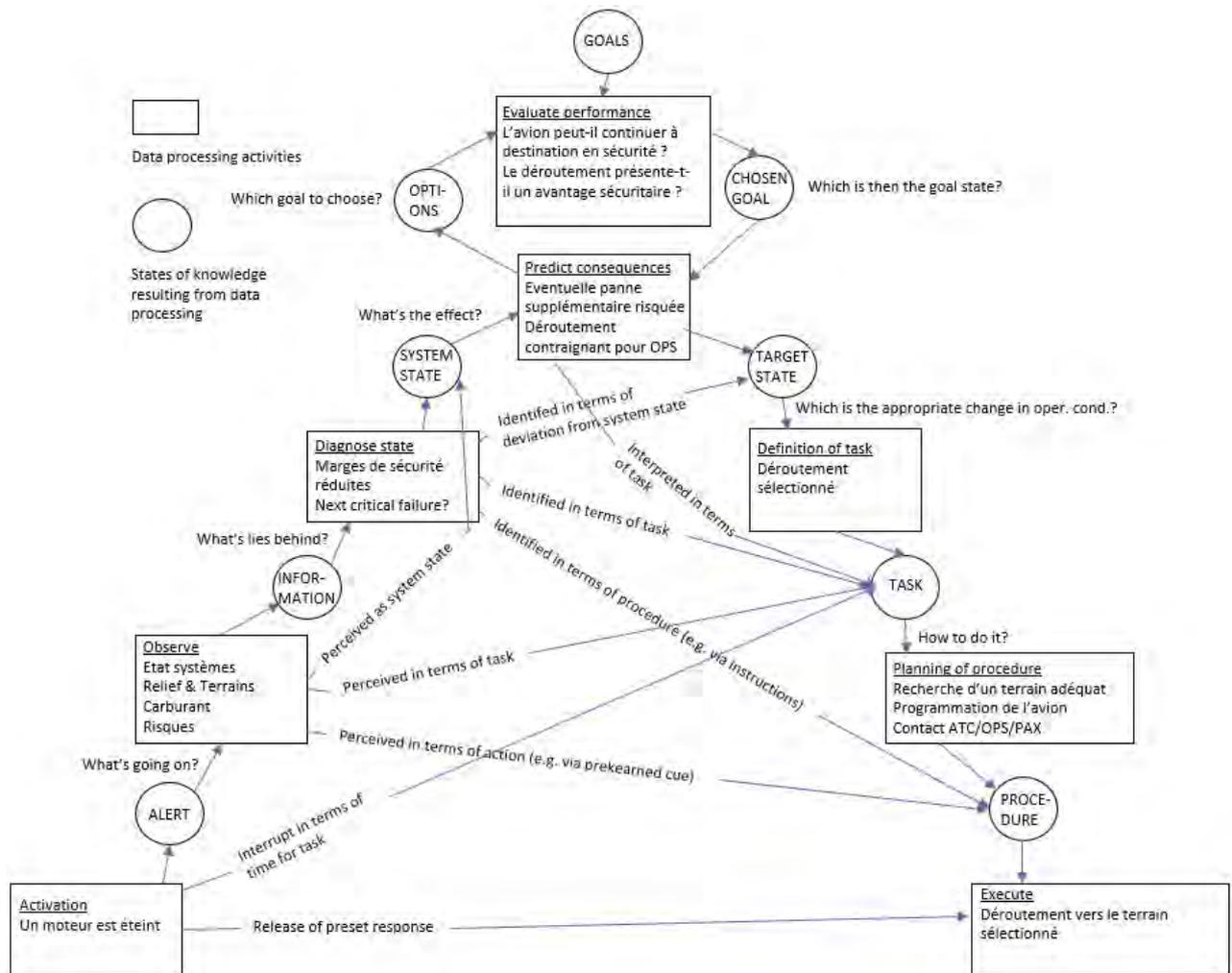


Figure 25 - Échelle double représentant l'Analyse des Tâches de Contrôle. Adaptée de Jenkins et al. (2010).

Nous avons pris ici l'exemple d'un dévirement après feu moteur. Le point de départ est la mise en sécurité du moteur ayant eu un incendie. Le feu est éteint, le moteur coupé et mis en sécurité. L'avion continue de voler sur un seul moteur. L'étape suivante consiste à prélever des informations sur l'intégrité des différents systèmes de l'avion, sur les reliefs environnants (l'avion vole à une altitude moins élevée, la REC MAX ou altitude de rétablissement, en raison de la disponibilité d'un seul moteur), les terrains alentours, le carburant restant ainsi que l'autonomie à cette nouvelle altitude et dans cette nouvelle configuration, et les risques potentiels. Ensuite, à l'étape de diagnostic, les pilotes font le point sur les conséquences en termes de sécurité de cette nouvelle configuration. Quelles sont les nouvelles marges de sécurité, quelles peuvent être les éventuelles pannes critiques pouvant survenir ? Ensuite la sécurité de l'avion est évaluée en tenant compte des conséquences de la panne. En l'occurrence, est-il suffisamment sûr de continuer à destination, ce qui éviterait les contraintes d'un

déroutement en termes opérationnels (réparation de l'avion sur place, réacheminement des passagers, etc.), ou le déroutement présente-t-il plus de sécurité ? Ensuite, dans le cas où le déroutement est jugé plus adéquat, vient la recherche d'un terrain avec la prise en compte de tous les facteurs pertinents (longueur de la piste, météo, relief, recommandation des OPS, etc.), la programmation du vol vers le nouveau terrain, et le contact avec le contrôle aérien, les OPS et les passagers. Enfin, le déroutement est exécuté.

Il est également possible de représenter une tâche selon le formalisme développé par Naikar (2006a, 2006b) (Figure 26). Celui-ci permet de représenter la tâche en distinguant des situations de travail et des fonctions de travail. Rasmussen *et al.* (1994) décrivent les fonctions de travail comme étant une activité caractérisée par son contenu, indépendamment de ses caractéristiques spatiales ou temporelles. Ici, on identifie les processus (en ordonnées) mis en jeu dans chaque phase du vol (en abscisses). En suivant la proposition de Naikar (2006), les cases bleues représentent toutes les situations de travail dans lesquelles il sera « possible » de mettre en œuvre une fonction donnée. L'ajout d'une flèche dans une case indique en outre les situations de travail dans lesquels on retrouve couramment la fonction (c'est donc non seulement « possible », mais « probable »). Au contraire, les cases vides montrent les situations où la fonction de travail n'est pas attendue. Cette analyse s'appuie elle aussi sur l'étude réalisée par Stanton *et al.* (Ibid). Les phases depuis « programmation approche » jusqu'à « finale » sont normalement présentes également en vol nominal, mais elles sont ici classées sous « vol non nominal » car ce tableau présente les phases telles qu'elles seront rencontrées par nos pilotes lors de l'expérimentation en simulateur.

	Vol nominal	Vol non nominal							
		Investigation panne	Evaluation situation	Décision déroutement	Programmation approche	Descente	Sous FL100	Approche	Finale
Vitesse air/Mach	↔		↔			↔	↔	↔	↔
Vitesse sol			↔				↔	↔	↔
Poussée	↔	↔	↔			↔	↔	↔	↔
Cap/pt équitemps	↔	↔	↔			↔	↔	↔	↔
Altitude	↔	↔	↔			↔	↔	↔	↔
Vz						↔	↔	↔	↔
Flight path	↔	↔				↔	↔	↔	↔
Route	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	
Terrains	↔	↔	↔	↔	↔		↔	↔	↔
Navais	↔		↔	↔	↔		↔	↔	↔
Relief	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔
Météo	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔
Programmer vol					↔				
Configurer avion						↔	↔	↔	↔
Info PNC et pax				↔			↔		↔
ATC & OPS	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔
Gérer fuel	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔
Trafic									

Figure 26 - Autre représentation de l'Analyse des Tâches de Contrôle (Information Flow Map).

6.2.3 Analyse des stratégies

La phase suivante, l'analyse des stratégies, examine plus en détail les modes opératoires utilisés pour réaliser une tâche particulière. Elle répond à la question « comment » ? Cette étape de l'analyse reprend les tâches analysées lors de la ConTA et considère les stratégies qui peuvent être employées pour les accomplir. La stratégie adoptée par un opérateur à un moment donné peut significativement varier. Différents opérateurs peuvent réaliser une même tâche de différentes manières, tout comme un même opérateur peut exécuter la même tâche de plusieurs manières différentes (Jenkins *et al.*, 2008). Les différentes stratégies présentées par la Figure 25 ont été identifiées lors d'entretiens réalisés avec les pilotes. La Figure 27 montre les différentes manières de traiter un problème survenant sur un avion selon l'expérience des pilotes et/ou les données dont ils disposent à la base.

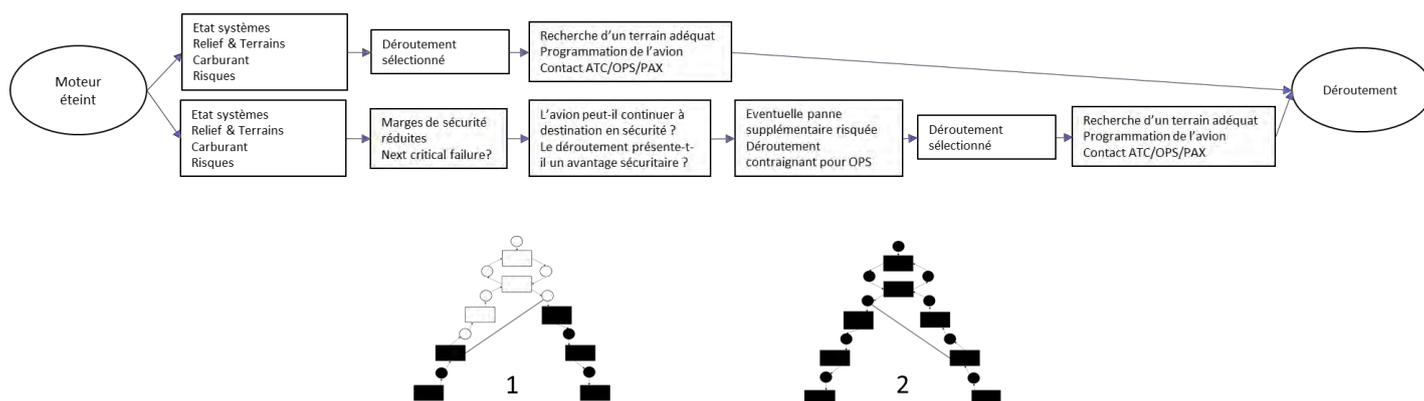


Figure 27 - Analyse des stratégies.

Nous pouvons décrire deux stratégies mises en œuvre dans le cas où un moteur est éteint et aboutissant à un déroutement. La première stratégie consiste en la mise en œuvre d'un processus quasi-automatique où les pilotes s'appuient sur un faisceau d'indices, tels que l'état des systèmes, les terrains environnants ou le carburant afin de directement mettre un plan d'action de déroutement. La seconde stratégie consiste en l'implémentation d'un processus plus contrôlé, où toute l'échelle double est parcourue ; dans ce cas, la situation est évaluée en termes de sécurité, de performance et d'efficacité avant de prendre la décision de déroutement.

6.2.4 Analyse de l'organisation du système et de la coopération

Enfin, une analyse de l'organisation du système et de la coopération entre agents (*Social Organization and Cooperation Analysis – SOCA*) met en lumière la répartition des tâches au sein du cockpit, entre le pilote aux commandes (*pilot flying, PF*) et le pilote monitoring (*PM*) (Figure 28). Il faut noter que cette analyse représente une répartition théorique des tâches. En effet, la répartition n'est pas figée, et les tâches peuvent être redistribuées si besoin, à la discrétion des pilotes. La SOCA reprend le modèle utilisé pour la ConTA, et assigne une couleur à chaque membre d'équipage.

	Vol nominal	Vol non nominal							
PF PM		Investigation panne	Evaluation situation	Décision déroutement	Programmation approche	Descente	Sous FL100	Approche	Finale
Vitesse air/Mach									
Vitesse sol									
Poussée									
Cap/pt équitemps									
Altitude									
Vz									
Flight path									
Route									
Terrains									
Navais									
Relief									
Météo									
Programmer vol									
Configurer avion									
Info PNC et pax									
ATC & OPS									
Gérer fuel									
Trafic									

Figure 28 - Analyse de l'Organisation du Système et de la Coopération entre agents (PF = pilote en fonction, c'est-à-dire le pilote aux commandes ; PM = pilote monitoring).

L'éclairage qu'apporte cette analyse sur la répartition des tâches au sein d'un cockpit nous a permis de mieux cibler notre étude. Dans notre expérimentation en simulateur, nous souhaitions étudier la prise de décision chez un pilote à la fois. Comme le simulateur se pilote à deux personnes, nous avons dû ainsi répartir les tâches de manière à ce que le pilote testé prenne ses décisions seul, sans concertation avec son copilote.

6.3 CONCLUSION

L'aviation est un domaine extrêmement procéduralisé, dans lequel les opérateurs sont très entraînés. Ainsi, pour la plupart des problèmes pouvant survenir, il existe une procédure précise à mettre en œuvre, ou un comportement appris par les pilotes, qui ne nécessite pas de longues et complexes phases d'identification, d'évaluation, d'interprétation, et de définition des objectifs. De ce fait, les décisions que les pilotes ont à prendre s'en trouvent facilitées. Rares sont les problèmes nécessitant de transiter par ces phases d'analyse ; de tels problèmes surviennent d'autant plus rarement que la fiabilité des avions est excellente.

Or, pour les besoins de notre étude, ce sont précisément ces rares problèmes nécessitant évaluation et interprétation que nous avons ciblés, afin d'étudier la prise de décision des pilotes dans ces situations. Nous avons ainsi choisi, pour notre expérimentation en simulateur (chapitre 8), de confronter les pilotes à une situation de déroutement. Mais là encore, le déroutement est très procéduralisé, avec des terrains de déroutement rigoureusement sélectionnés avant le départ tout au long du trajet prévu, et des règles précises quant à son déroulement. C'est pourquoi, au cours de notre expérimentation, les pilotes devaient rechercher des terrains de déroutement et en sélectionner un une fois en vol, lorsqu'ils étaient confrontés à la situation non nominale. Ceci représente une situation non nominale poussée à l'extrême, confrontant les pilotes à un imprévu pour lequel une solution devait être imaginée. L'expérimentation a été définie de telle sorte que le terrain de déroutement présente une certaine complexité tant en ce qui concerne la météo, le relief et l'approche. Ceci nous a permis d'observer la prise de décision des pilotes au cours de différents contextes présentant différents niveaux de contrainte.



CHAPITRE 7.

MODES DE CONTROLE COGNITIF ET CHARGE MENTALE : UNE APPROCHE EXPERIMENTALE UTILISANT UN MICRO-MONDE

Les activités de supervision et de contrôle de processus réalisées dans des situations dynamiques sont caractérisées par la gestion de l'incertitude et du risque, par la multiplicité des tâches à accomplir et par la complexité des systèmes pilotés (Hoc, 1996). Du point de vue cognitif, elles font appel aux processus de diagnostic/pronostic et de prise de décision qui reposent à la fois sur le traitement de données internes (modèles mentaux relatifs aux systèmes contrôlés ou à la dynamique de l'environnement) et sur le traitement de données externes (informations disponibles dans l'environnement ou sur les interfaces). Dans des environnements dynamiques, le pilote d'un mobile (avion, voiture ou navire) sera donc plus ou moins proactif ou, au contraire, plus ou moins réactif.

La notion de contrôle cognitif rend compte de cette flexibilité des comportements. Comme nous l'avons expliqué dans la partie théorique, elle est au cœur de deux modèles centraux dans le domaine des facteurs humains : la taxonomie SRK proposée par Rasmussen en 1982 et le modèle COCOM (*Contextual Control Model*) défini par Hollnagel en 1993. Ces modèles sont extrêmement connus mais ils sont rarement opérationnalisés ou mis en regard de données neurophysiologiques, comme le soulignent Borghini *et al.* (2017). Il apparaît pourtant important d'établir des relations entre les différents modes de contrôle qu'un opérateur est susceptible d'adopter et sa performance d'une part et sa charge de travail d'autre part. L'étude présentée dans ce chapitre se propose d'examiner ces relations. Elle a fait l'objet d'un article de conférence (Rauffet, Said, Laouar, Chauvin & Bressolle, 2020). Réalisée à l'aide du micro-monde MATB (*Multi-Attribute Task Battery*) qui reproduit certaines dimensions de l'activité pilotage, elle utilise le modèle COCOM. Elle poursuit deux visées : distinguer différents modes de contrôle et examiner la relation entre mode de contrôle et charge mentale. La charge mentale est abordée sous ses deux aspects, de contrainte (exigences qui s'imposent à l'opérateur) et d'astreinte (coût de la tâche pour l'opérateur). Plusieurs travaux ont déjà porté sur la performance associée aux quatre modes de contrôle distingués par le modèle COCOM (Stanton, Ashleigh, Roberts, & Xu, 2001 ; Eriksson & Stanton, 2017 ; Chauvin, Said, & Langlois, 2019, Chauvin, Said, & Langlois, 2020) mais, à notre connaissance, aucune étude ne s'est encore intéressée aux relations existantes entre ces différents modes et la charge de travail des opérateurs.

7.1 METHODE

L'expérience a été menée à l'aide du micro-monde MATB qui a déjà été utilisé pour étudier les relations entre modes de contrôle cognitif et charge mentale (Cegarra, Baracat, Calmettes, Matton & Capa, 2017). Cette précédente étude appréhendait la notion de contrôle cognitif au travers la taxonomie SRK proposée par Rasmussen (1983). Hoc et Amalberti (2007) rappellent que la taxonomie SRK considère un aspect du contrôle cognitif qui est le niveau d'abstraction des données traitées dans le cadre des activités de supervision (données sub-symboliques versus symboliques). Il s'agit, ici, de considérer un autre aspect du contrôle cognitif qui concerne l'origine des données traitées : interne dans le cadre d'un contrôle proactif ou externe dans le cadre d'un contrôle réactif.

L'expérience consiste à proposer aux participants la réalisation d'une tâche principale, pour laquelle la performance optimale suppose d'adopter un mode stratégique (il s'agit de gérer le contenu de réservoirs de carburant ; cette tâche a été sélectionnée comme principale car elle correspond à un processus continu que les pilotes doivent également gérer dans la réalité). La tâche est répétée trois fois ; la complexité de la tâche (contrainte) augmente à chacune des répétitions.

7.1.1 Participants

20 participants ayant entre 18 et 21 ans ($M = 18,55$; $SD = 0,83$) ont été recrutés parmi les étudiants de l'Université Bretagne Sud. Les participants étaient tous de sexe masculin. Ils présentaient une audition normale et une vision normale ou corrigée à normale. Les participants ont été informés de leurs droits et ont fourni un consentement écrit de participation à l'étude, en accord avec la Déclaration de Helsinki.

7.1.2 Dispositif expérimental

Il était demandé aux participants d'effectuer des tâches dans l'environnement MATB que présente la Figure 29. La MATB est un micro-monde qui donne la possibilité de réaliser quatre tâches caractéristiques du pilotage d'un avion. Dans le cadre de cette expérience, une de ces tâches a été utilisée comme « tâche principale », alors que les deux autres ont fait office de « tâches secondaires ». Notons ici que nous avons écarté la tâche de communication de notre protocole qui comportait l'écoute de message audio en Anglais, afin d'éviter un effet de biais dû à l'hétérogénéité du niveau linguistique de nos participants.

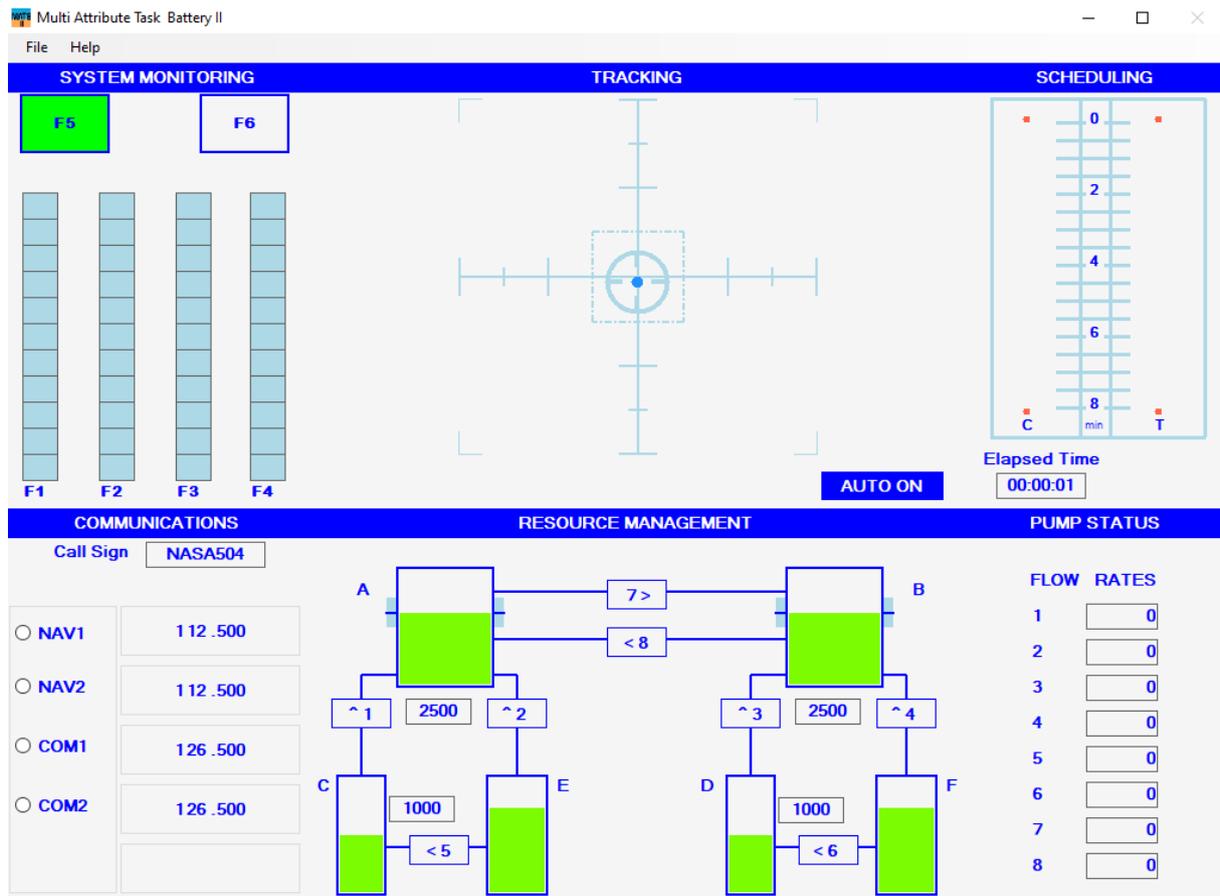


Figure 29 - Capture d'écran de la fenêtre de la MATB.

La tâche principale, intitulée « Resource management » (resman), simule le contrôle d'un processus (Figure 30). Elle représente la gestion de carburant d'un avion civil, à partir d'un ensemble de 6 réservoirs de carburant et de pompes les reliant entre eux. La consigne est de maintenir les deux réservoirs supérieurs à un niveau stable de 2500 litres (symbolisées par les repères bleus sur les réservoirs), sachant que le niveau baisse par défaut afin de simuler la consommation de carburant des moteurs. Pour ce faire, il faut continuellement alimenter ces deux réservoirs en carburant à l'aide des autres réservoirs en utilisant les pompes. Cependant des pannes peuvent survenir sur ces pompes.

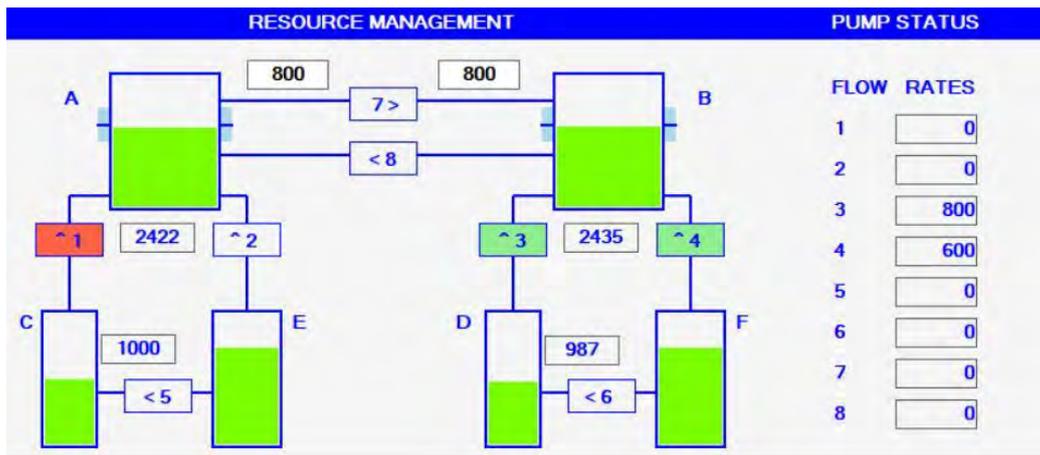


Figure 30 - Aperçu de la tâche de gestion des ressources.

La première des tâches secondaires (track) est une tâche de suivi et maintien de cible (Figure 31). Elle consiste en le maintien d'une cible dans un repère carré, en la dirigeant à l'aide d'un joystick.

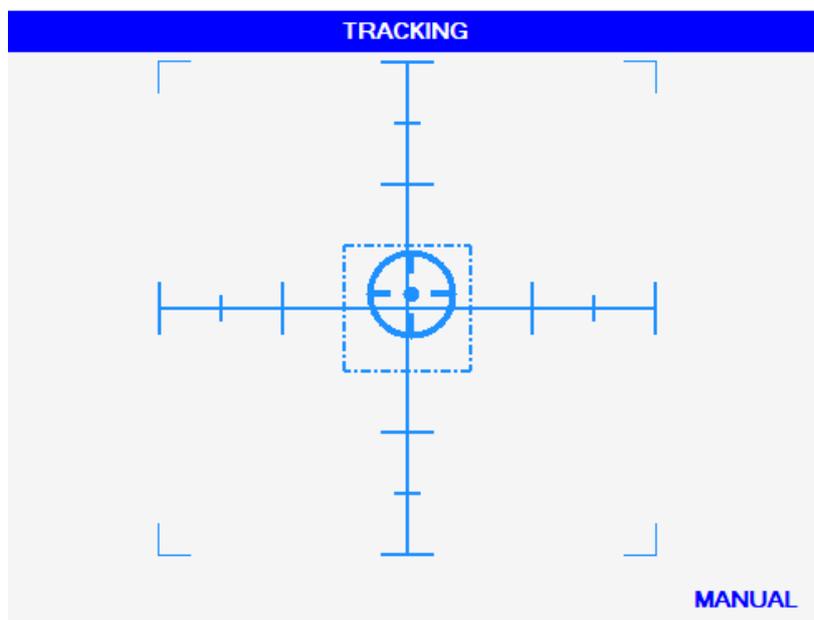


Figure 31 - Aperçu de la tâche de maintien de cible. Le cercle bleu est à maintenir dans le carré central.

La deuxième tâche secondaire (sysmon) consiste à surveiller le système (Figure 32). 6 paramètres sont à surveiller ; ils sont relatifs aux couleurs des cases et à la position des repères. Les deux cases du haut doivent normalement être verte pour celle de gauche, et blanche pour celle de droite. Les quatre repères du bas doivent se situer approximativement au milieu de

chaque échelle. Des déviations peuvent être observées : les deux cases du haut peuvent changer de couleur (rouge pour celle de gauche, verte pour celle de droite) et les repères du bas peuvent se déplacer en haut ou en bas de chaque échelle. Ces déviations représentent des situations anormales auxquelles il faut remédier en pressant la touche correspondant à l'élément incriminé : F5 et F6 pour les cases du haut, F1 à F4 pour les repères du bas. Les participants doivent presser ces touches dans un temps imparti (par défaut, 30 secondes).

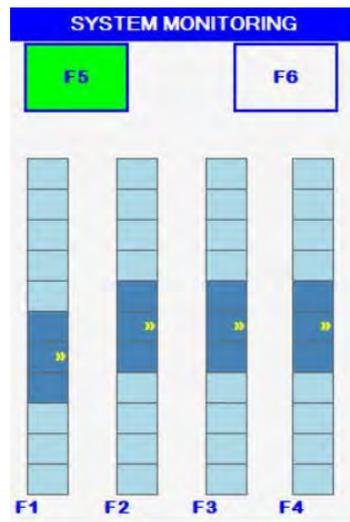


Figure 32 - Aperçu de la tâche de surveillance du système.

Chacune de ces tâches peut être automatisée. Dans ce cas, un message « AUTO ON » apparaît sur fond bleu en regard de la tâche affectée (Figure 33), et le participant ne peut plus agir dessus. Il est possible d'activer ou de désactiver l'automatisation d'une tâche plusieurs fois au cours d'une session, néanmoins cela doit être programmé avant l'expérimentation et ne peut pas être modifié pendant une session.

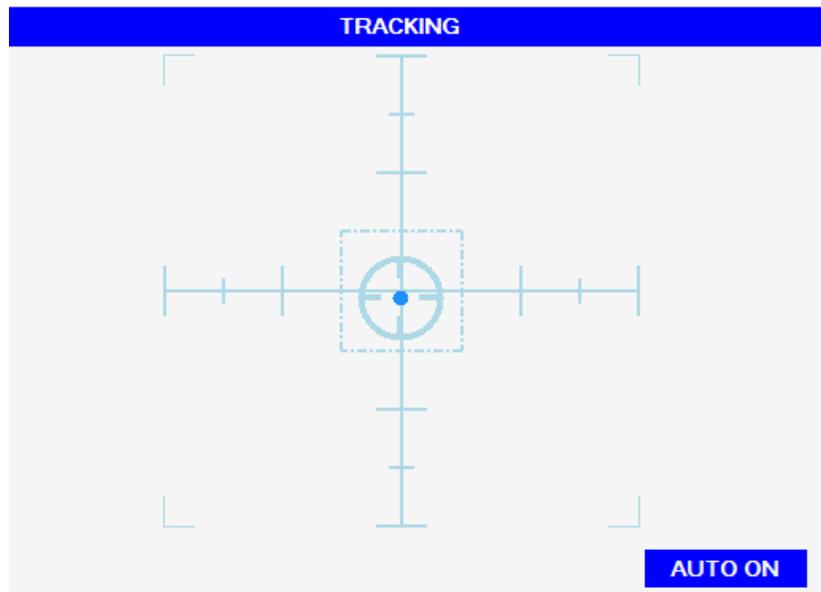


Figure 33 - Aperçu de la tâche de maintien de cible en mode automatique. Noter le message « AUTO ON » sur fond bleu en bas à droite.

7.1.3 Protocole expérimental

Une phase préliminaire consistait en une explication des tâches à réaliser, en une session d'entraînement de 15 minutes puis en une session de test visant à vérifier la bonne compréhension des consignes. La phase expérimentale se décomposait en 3 séquences de 7 minutes : la première séquence comprenant une seule tâche (*i.e.* la tâche principale, « resman »), la deuxième séquence comprenant la tâche principale et la tâche secondaire de surveillance du système (resman + sysmon), et la troisième nécessitant d'exécuter la tâche principale et la tâche secondaire de tracking (resman + track).

Notons ici que la tâche principale de gestion des réservoirs est une tâche continue, le participant devant en effet gérer les niveaux des deux réservoirs qui évoluent toutes les secondes, et dont la dynamique (remplissage ou vidange) peut changer avec la survenue de pannes. Par ailleurs, comme l'expliquent Philips *et al.* (2007) et Gutzwiler et Wickens (2015), nous pouvons également distinguer les deux tâches secondaires de notre scénario : le maintien de la cible est une tâche continue, qui nécessite un contrôle permanent de trajectoire, alors que la surveillance du système est une tâche discrète, consistant à acquiescer des alarmes lorsque celle-ci apparaissent à l'écran. Ainsi, la succession des séquences dans le scénario se traduit par une augmentation de la difficulté : d'abord une tâche continue seule, puis une tâche continue avec

une tâche discrète (qui amène des stimuli « discrets » perturbant occasionnellement le participant dans la tâche principale), et finalement deux tâches continues (nécessitant le contrôle de deux processus dont il faut gérer l'évolution dynamique).

Par ailleurs et comme le montre la Figure 34, chaque séquence se décomposait en deux périodes : une première période de 3 minutes au cours de laquelle la réalisation de la tâche principale était peu complexe et une seconde période de 4 minutes caractérisée par une panne de longue durée affectant une des pompes et rendant la tâche plus complexe.

A la fin de chaque séquence de 7 minutes, un questionnaire de NASA-TLX était présenté aux participants via l'interface de la MATB.

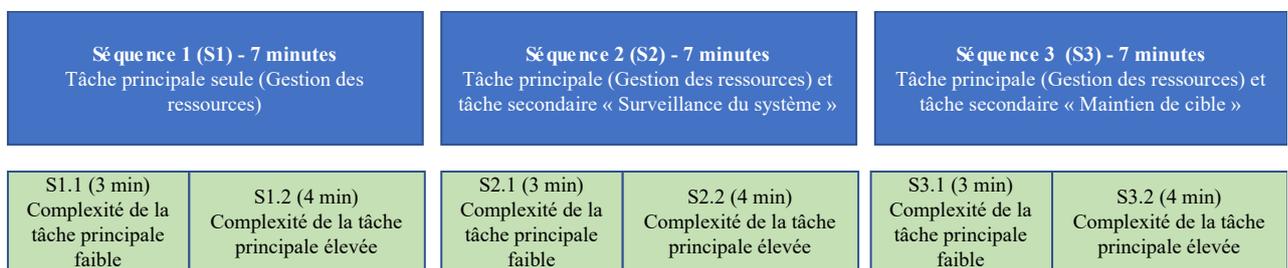


Figure 34 - Trois séquences expérimentales croisées avec deux niveaux de complexité de la tâche principale.

7.1.4 Mesures et codages

Les performances de la tâche principale de gestion des réservoirs ont été codées afin d'identifier les modes de contrôle cognitif susceptibles d'être adoptés par l'opérateur. Nous avons considéré à cette fin deux critères : *i*) le respect des consignes (*i.e.* garder le niveau de chacun des 2 réservoirs entre 2000 litres et 3000 litres) et *ii*) la façon dont les participants avaient géré la « marge de sécurité » par rapport au seuil bas de 2000 litres (le respect du seuil bas est plus difficile à obtenir que le seuil haut, puisque les pannes des pompes accélèrent la vidange des réservoirs). Le Tableau 6 présente les caractéristiques des actions traduisant chacun des modes de contrôle.

Mode de contrôle	Performance
Stratégique	Respect des consignes et marges hautes sur au moins un des 2 réservoirs (valeur max supérieure comprise entre 2750 et 3000)
Tactique	Respect de la consigne, marges plus faibles (oscillation autour de la valeur cible de 2500, les valeurs sont comprises entre 2000 et 2750) sur les deux réservoirs.
Opportuniste	Présence d'erreurs sur au moins un des deux réservoirs, le participant agit lorsque la valeur minimale (entre 2000 et 1950) est dépassée
Brouillé	Présence d'erreurs importantes sur au moins un des deux réservoirs ; la valeur minimale est largement dépassée lorsque le participant agit (inférieure à 1950) ou bien la valeur maximale (supérieure à 3050).

Tableau 6 - Caractérisation des modes de contrôle.

Conformément à ce qui a été vu dans le chapitre portant sur les moyens de mesure de la charge mentale (4.3), deux types de données physiologiques ont été collectées et analysées afin d'appréhender l'astreinte :

- La variabilité du rythme cardiaque, à l'aide d'une ceinture Bioharness 3 (Zephyr, Medtronic, Irlande) placée au niveau du sternum et recueillant l'activité cardiaque ;
- L'oxygénation et la déoxygénation du cortex préfrontal à l'aide d'une fNIRS à 8 canaux (Octamon, Artinis Medical, Pays-Bas). Le placement des optodes est décrit dans le Tableau 7 ci-dessous. Le filtrage des données fNIRS a été réalisé au moyen d'un filtre passe bande (0.01 Hz - 0.09 Hz). Pour choisir les fréquences de coupure nous avons suivi l'approche de Pinti *et al.* (2019), qui préconisent une fréquence basse de 0.01 Hz et une fréquence haute inférieure à la fréquence d'onde de Mayer (0.1 Hz).

	Indicateurs	Relations avec le coût cognitif
Activité cardiaque	Variabilité du rythme cardiaque (VRC), calculée sur le domaine temporel avec des écarts-types sur 100 intervalles R-R successifs.	Décroit lorsque la charge mentale augmente (Malik, 1996 ; Durantin <i>et al.</i> , 2014).
Activité corticale	Concentrations en hémoglobine oxygénée (HbO ₂) et déoxygénée (HHb) sur les 8 optodes de la fNIRS. Les optodes T1 à T4 capturent les changements relatifs à l'activation cérébrale de l'hémisphère droit, tandis que les optodes T5 à T8 mesurent l'activation de l'hémisphère gauche. Plus spécifiquement, T1 et T7 sont associés au cortex préfrontal dorsolatéral, T2 et T8 à l'aire ventrolatérale, T3 et T5 à l'aire ventromédiale, et T4 et T6 à la zone orbitofrontale (voir Figure 18, chapitre 4).	L'activité neuronale est associée à une augmentation de la concentration en hémoglobine oxygénée et à une diminution de la concentration en hémoglobine deoxygénée (Fairclough <i>et al.</i> , 2018 ; Causse <i>et al.</i> , 2019).

Tableau 7 - Liens entre indicateurs cardiaques et neurophysiologiques, et coût cognitif.

7.1.5 Méthode d'analyse des données

Les analyses effectuées relèvent d'une étude exploratoire. Nous avons utilisé une méthodologie en deux étapes afin d'analyser les données. Des analyses reposant sur les tests de Bhapkar et McNemar ont été réalisées afin de rechercher les liens possibles entre la contrainte (prise comme variable indépendante) et le mode de contrôle (considéré ici comme variable dépendante). Par ailleurs, nous avons utilisé R (R Core Team, 2012), et plus précisément le package lme4 (Bates, Maechler & Bokler, 2012), afin de réaliser des analyses linéaires à effets mixtes pour étudier la relation entre la séquence et la complexité (considérées ici comme variables indépendantes) et les indicateurs neurophysiologiques présentés ci-dessus (pris comme variables dépendantes).

L'analyse visuelle des résidus n'a révélé aucune déviation notable de normalité et d'homoscédasticité sur les indicateurs physiologiques. Nous avons entré la séquence (simple ou double tâche), la complexité (faible ou forte, correspondant au fait que tâche principale présente peu ou beaucoup d'incidents sur les pompes) et le mode de contrôle cognitif (avec des termes d'interaction) en tant qu'effets fixes dans le modèle. L'interaction avec les participants était utilisée en tant qu'effet aléatoire. Concernant les effets fixes, une sélection de modèle pas

à pas (stepAIC) a été menée. A chaque étape, un nouveau modèle était constitué, au sein duquel l'un des termes du modèle était éliminé et testé face au modèle précédent.

7.2 RESULTATS

7.2.1 Effet de la contrainte sur les modes de contrôle

Nous avons tout d'abord réalisé une régression logistique multinomiale entre les modes de contrôle et les deux facteurs liés à la contrainte (séquence et complexité). Aucun effet d'interaction n'a été observé entre ces deux facteurs.

Nous avons ensuite examiné l'effet de la complexité de la tâche principale en comparant les modes de contrôle adoptés lorsque la complexité est faible (première période) et lorsqu'elle est plus importante (seconde période). Le Tableau 8 montre, pour les deux niveaux de complexité, le nombre de participants ayant adopté chaque mode de contrôle.

	Brouillé	Opportuniste	Tactique	Stratégique
Faible complexité	4	3	26	23
Forte complexité	15	10	3	28

Tableau 8 - Adoption des modes de contrôle cognitif en fonction du niveau de complexité.

On observe que les modes tactique et stratégique sont très majoritairement adoptés lorsque la complexité de la tâche est faible. Lorsque la complexité de la tâche augmente, le mode stratégique est toujours présent mais le mode tactique tend à disparaître.

Un test de Bhapkar révèle que le niveau de complexité a un effet significatif sur le mode de contrôle indépendamment de la tâche secondaire : resman ($\chi^2(3,19) = 30.38, p < 0.001$), resman + sysmon ($\chi^2(3,19) = 11.08, p = 0.01$), et resman + track ($\chi^2(3,18) = 20.79, p < 0.001$). Des tests post-hoc de McNemar avec ajustement (méthode de Bonferroni) montrent que, pour la tâche principale seule (resman), le mode brouillé est significativement plus fréquent quand la complexité est forte ($p = .03$). Par ailleurs, le mode tactique est significativement plus fréquent dans les tâches présentant un faible niveau de complexité que dans les tâches présentant une forte complexité : resman ($p < .001$), resman + sysmon ($p = .043$) et resman + track ($p = .019$).

Nous avons également calculé, à partir d'une matrice de transition (cf. Tableau 9), la probabilité de passer d'un mode X lorsque la complexité est faible à un mode Y lorsque la complexité est plus importante.

Complexité faible↓/ complexité forte →	Brouillé	Opportuniste	Tactique	Stratégique	Total
Brouillé	4				4
Opportuniste	3				3
Tactique	5	9	3	9	26
Stratégique	3	1		19	23

Tableau 9 - Matrice des transitions entre le mode adopté lorsque la complexité est faible et le mode adopté lorsque la complexité est forte

Cette analyse met en évidence la stabilité du mode stratégique et, à l'inverse, l'instabilité du mode tactique. On remarque, ainsi, à la lecture de la Figure 35 que la probabilité de conserver le mode stratégique est de 0.82 (parmi les 23 participants qui avaient adopté le mode stratégique lors de la première phase, 19 l'ont conservé lors de la deuxième phase) alors qu'elle n'est que de 0.12 pour le mode tactique (parmi les 26 participants qui avaient adopté le mode tactique lors le première phase, seuls 3 l'ont conservé lors de la seconde phase).

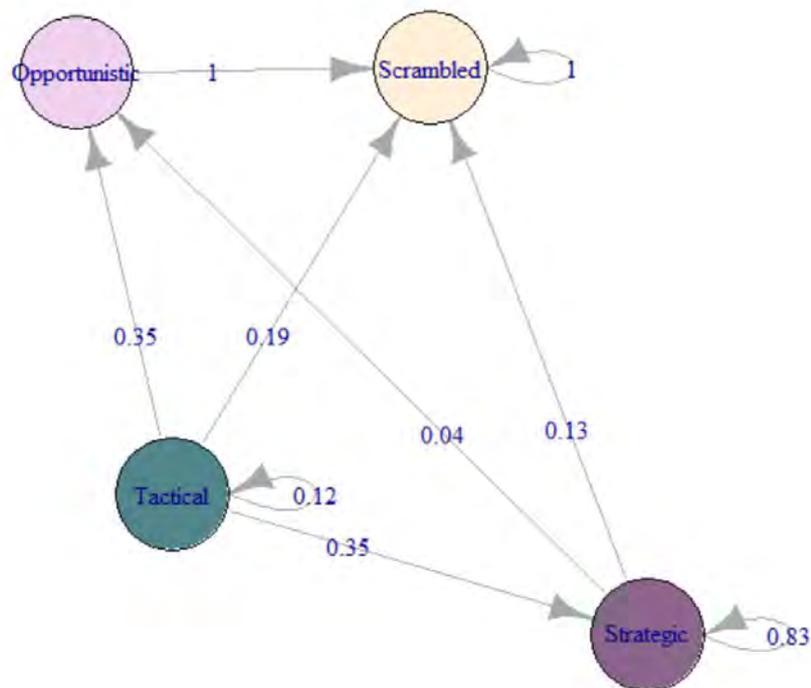


Figure 35 - Transitions entre modes entre les périodes de faible complexité de la tâche principale (S1.1, S2.1, S3.1) et les périodes de plus forte complexité (S1.2, S2.2, S3.2).

En revanche, les comparaisons réalisées pour chaque niveau de complexité, entre la séquence 1 (tâche principale seule) et les séquences 2 et 3 (tâche principale et tâches secondaires de surveillance du système et de tracking) ne permettent pas de mettre en évidence un effet négatif de la tâche secondaire sur les modes de contrôle. On observe même, à l'inverse, que la majorité des participants conservent le mode de contrôle que celui qu'ils avaient adopté lors de la séquence 1 (tâche principale seule) ou adoptent un mode de contrôle plus performant. Un tel résultat évoque un effet d'apprentissage.

7.2.2 Relations entre la contrainte et l'astreinte

Nous avons réalisé différentes analyses linéaires multi-effets afin de tester les effets de la tâche, de la complexité et des modes de contrôle cognitifs (CCM) sur les réponses physiologiques. Les effets significatifs (chiffres en gras dans le tableau 10) sont donnés de façon relative à la condition de référence. Par exemple, nous pouvons observer l'effet de la séquence sur la variabilité du rythme cardiaque, qui diminue de 13.72 ms entre la condition « resman seul » et la condition « resman + sysmon », et de 12.46 ms entre « resman seul » et « resman + tracking » (voir le tableau 10 et la partie gauche de la figure 36).

Les analyses montrent que la VRC peut être expliquée par la contrainte, c'est-à-dire par la séquence, la complexité et leurs interactions (voir Tableau 10 et Figure 36).

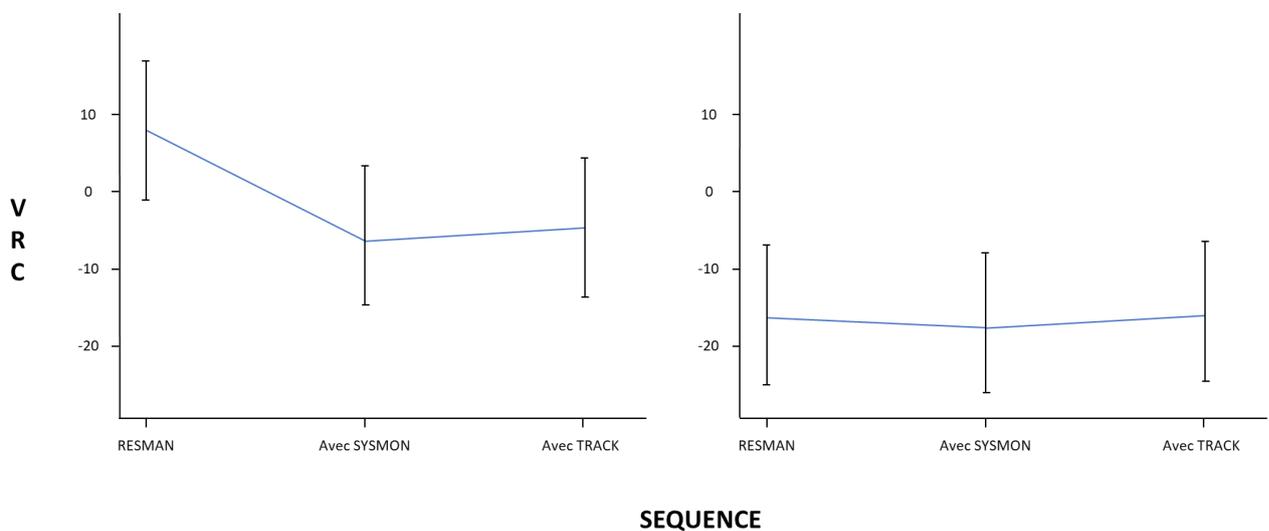


Figure 36 - Interaction de la séquence et de la complexité sur la VRC.

	<i>HBO2 T1</i> ~ CCM + Sequence	<i>HBO2 T2</i> ~ CCM	<i>HBO2 T3</i> ~ CCM	<i>HBO2 T4</i> ~ CCM + Sequence	<i>HBO2 T5</i> ~ CCM	<i>HBO2 T6</i> ~ CCM	<i>HBO2 T7</i> ~ CCM	<i>VRC</i> ~ Complexity * Sequence
(Intercept)	0.13 (1.66)	3.08 (0.95)**	0.26 (2.56)	1.39 (1.16)	0.36 (2.53)	2.66 (0.95)**	1.35 (0.94)	7.25 (4.66)
CCM (reference = Tactical)								
<i>Opportunistic</i>	0.94 (0.21)***	1.11 (0.32)***	0.69 (0.30)*	0.99 (0.34)**	0.48 (0.29)	0.97 (0.32)**	0.59 (0.28)*	
<i>Scrambled</i>	1.08 (0.24)***	0.71 (0.36)*	1.26 (0.33)***	0.84 (0.39)*	0.62 (0.33)	0.85 (0.35)*	0.71 (0.32)*	
<i>Strategic</i>	0.63 (0.18)***	0.78 (0.27)**	0.76 (0.25)**	0.53 (0.29)	0.71 (0.25)**	0.74 (0.27)**	0.79 (0.24)**	
Sequence (reference = single task resman)								
<i>with sysmon</i>	0.23 (0.15)			0.30 (0.24)				-13.72 (3.60)***
<i>with track</i>	0.48 (0.15)**			0.69 (0.24)**				-12.46 (3.69)***
Complexity (reference = low complexity)								
high complexity								-24.03 (3.60)***
Sequence:Complexity								
<i>with sysmon :</i> <i>high complexity</i>								13.07 (5.09)*
<i>with track :</i> <i>high complexity</i>								13.24 (5.19)*
Num. obs.	100	100	100	100	100	100	100	82
Num. groups: Participant_	17	17	17	17	17	17	17	14
Var: Participant_	46.61	14.82	110.76	21.72	108.17	14.62	14.52	212.55
(Intercept)								
Var: Residual	0.36	0.82	0.70	0.93	0.69	0.80	0.64	90.84

Tableau 10 - Estimations des effets fixes du modèle linéaire multi-effets pour HbO₂ sur les 8 optodes de la fNIRS et pour la VRC (les facteurs fixés résultant de la sélection du modèle pas à pas par AIC sont indiqués sous les variables de réponse ; la condition référence est indiquée entre parenthèses pour chaque facteur explicatoire, *** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$).

Nous avons trouvé un effet principal significatif de la complexité, avec une tendance à la diminution pour la VRC lorsque la complexité est forte par rapport à une complexité faible ($\beta = -24.03$, $SE = 3.60$, $t(63) = -6.67$, $p < 0.001$). De plus, nous observons également un effet significatif de la séquence. Nous avons remarqué une VRC plus faible lorsque la tâche principale était réalisée avec la tâche secondaire de tracking ($\beta = -12.46$, $SE = 3.69$, $t(63) = -3.38$, $p < 0.01$) ou avec la tâche de surveillance du système ($\beta = -13.72$, $SE = 3.60$, $t(63) = -3.81$, $p < 0.001$) que lorsqu'elle était réalisée seule.

Cet effet de la séquence sur l'astreinte (*i.e.* le coût cognitif) est également observé sur la dimension « exigence mentale » du NASA-TLX. Une Anova à un facteur entre sujets montre que l'exigence mentale est significativement plus faible en condition simple tâche qu'en double tâche ($F(2,48) = 4.32$, $p < 0.05$). L'interaction entre la complexité et la séquence est également

significative, avec un plus fort contraste entre les conditions simple tâche et double tâche quand la complexité est faible. Il n'y a par ailleurs pas de corrélation significative entre les indicateurs neurophysiologiques et les scores du NASA-TLX.

7.2.3 Relations entre les modes de contrôle et l'astreinte.

Les analyses linéaires mixtes ont également montré un effet significatif des modes de contrôle sur le taux d' HbO₂. Comme le montre la sélection du modèle pas à pas par AIC, le taux d' HbO₂ peut être expliqué uniquement par le mode de contrôle pour les optodes T2, T3, T5, T6 et T7, tandis qu'il peut être expliqué par le mode de contrôle et la séquence pour les optodes T1 et T4. Nous avons suivi la même procédure pour le taux d'HHb, mais aucun résultat significatif n'a été constaté.

Il est important de noter que pour les optodes T1 à T7, le mode de contrôle tactique (utilisé comme référence dans le modèle linéaire mixte) génère toujours un taux d' HbO₂ significativement plus faible que les modes plus réactifs (brouillé ou opportuniste) ou que le mode le plus proactif (stratégique).

7.3 DISCUSSION

Les apports de cette étude sont à la fois théoriques et méthodologiques.

Premièrement, concernant la relation contrainte-astreinte, nous avons observé un effet significatif de la contrainte sur la VRC, ce qui n'est pas surprenant. Il y a un effet principal de la complexité de la tâche de gestion des réservoirs sur l'activité cardiaque. L'autre facteur de contrainte, la séquence (*i.e.* addition d'une tâche secondaire) joue également un rôle significatif, mais moindre lorsque la complexité de la tâche principale est faible. Nous notons également que les indicateurs neurophysiologiques (fNIRS) sont peu ou pas sensibles à la contrainte.

Nous avons exploré de plus, et d'une manière plus originale, les relations entre les modes de contrôle cognitif et la charge mentale, en considérant à la fois la contrainte et l'astreinte. Nos analyses débouchent sur deux contributions théoriques principales.

D'une part, il y a un effet significatif de la complexité de la tâche sur l'adoption et la variation des modes de contrôle. Nous avons mis en évidence, en particulier, une instabilité du mode tactique, montrant une attraction entre ce mode et une faible complexité, et une répulsion entre ce mode et une complexité plus forte. Cette instabilité du mode tactique a également été étudiée au moyen d'une analyse des transitions entre les périodes consécutives de faible et forte complexité. Nous avons observé qu'une augmentation de la complexité entraîne principalement des transitions du mode tactique vers un mode moins proactif (54 % des transitions). En comparaison, les modes stratégique et brouillé étaient plutôt stables (respectivement 83 % et 100 % des participants ayant adopté l'un de ces modes l'ont conservé quelque soit la complexité durant une séquence donnée). De plus, et en accord avec l'étude de Stanton *et al.* (2001), nous avons observé que la majeure partie des transitions se fait entre deux modes "proches" (70 % des transitions de tactique vers opportuniste ou stratégique, 100 % des transitions d'opportuniste vers brouillé). Ce résultat suggère que les transitions entre les modes de contrôle s'effectuent d'une manière linéaire.

D'autre part, nous avons trouvé des liens entre les modes de contrôle et l'astreinte, comme l'avait montré Cegarra *et al.* (2017). La présente étude indique que le mode tactique est associé à l'astreinte la plus faible, lorsque l'on considère le taux d' HbO₂ comme indicateur de la charge mentale. Comme constaté par Leon-Carrion *et al.* (2008), "les différences hémodynamiques inter-individuelles dans cette région pourraient refléter les différentes stratégies cognitives utilisées dans la résolution de tâches". Notre étude montre que le mode tactique est le mode le plus efficient, car il est associé à une performance satisfaisante et au niveau d'astreinte le plus faible.

Ce résultat démontre l'intérêt de l'étude de l'activité cérébrale pour détecter les changements de modes de contrôle. Si, dans notre étude, l'activité cérébrale semble peu corrélée aux variations de contrainte, nous observons tout de même - sur presque toutes les zones du cortex préfrontal - une différence significative du taux d'HbO₂ entre le mode tactique et les autres modes. De ce fait, une augmentation de l'activité corticale pourrait aider à révéler le passage du mode tactique vers un mode plus réactif (les modes opportuniste ou brouillé, où le contrôle de la situation n'est plus garanti) ou au contraire vers un contrôle plus proactif (le mode stratégique, requérant plus d'anticipation). La possibilité de déceler ces variations, et par conséquent ces changements de mode, ouvre de nouvelles perspectives pour la conception et le déclenchement d'assistances ayant pour objectif, lorsque la situation se complexifie, de soutenir le mode tactique qui semble être le plus efficient. De telles perspectives sont intéressantes dans

tous les domaines où des opérateurs ont à contrôler des situations dynamiques qui peuvent évoluer rapidement et dans lesquelles ils doivent faire, en temps réel, des compromis entre vitesse et efficacité, entre performance et risque, entre compréhension et action (Hoc, 2000) ; il s'agit du domaine des transports mais également de la supervision de processus industriels, du domaine médical (anesthésie notamment) ou encore de la gestion d'une crise.

Enfin, il est à noter que ce travail de recherche présente certaines limites. L'expérimentation a été menée uniquement avec des participants novices, ce qui pourrait amener une plus grande hétérogénéité en termes de contrôle cognitif qu'une population d'experts. On peut ainsi se demander s'il n'existe pas des facteurs individuels qui pourraient expliquer la propension de certains participants à adopter un mode de contrôle en particulier. De ce fait, il sera nécessaire de vérifier si les mêmes résultats s'appliqueraient également à des experts (une population de pilotes d'avion par exemple). Par ailleurs, notre étude, ne portant que sur des participants de sexe masculin, peut occulter des effets de genre sur l'adoption des modes de contrôle. De plus, nous avons codé les quatre modes de contrôle du modèle COCOM en fonction des performances des opérateurs sur la tâche principale et non sur la performance globale dans le cas des situations à double tâche. Quand les participants devaient gérer de multiples tâches, il pourrait y avoir eu un phénomène de focalisation ou de priorisation de la tâche principale. Cette focalisation pourrait avoir entraîné le maintien d'un niveau de contrôle cognitif efficace pour la gestion des réservoirs, au détriment du contrôle des tâches secondaires. Dans les études à venir, il serait pertinent de considérer le contrôle cognitif en adoptant une approche consistant à modéliser la gestion multi-tâche des opérateurs sur la MATB-II, comme proposé par Gutzwiller *et al.* (2014). Enfin, nous n'avons pas contrôlé les aspects chronobiologiques dans cette étude (que cela soit la prise de nourriture ou de caféine avant la passation, ou la durée du sommeil la nuit précédant l'expérimentation). Nous n'avons également pas mesuré le niveau de fatigue pendant les différentes phases de l'expérimentation. Il serait intéressant de considérer ces éléments dans le futur pour analyser la relation entre fatigue et modes de contrôle, et expliquer les variations de performance observés dans le temps au cours d'une passation.

7.4 CONCLUSION

A partir d'une expérimentation sur la plateforme MATB-II, cette étude explore le lien entre les modes de contrôle cognitif et la charge mentale. Comme la Figure 37 le montre, les modes de

contrôle du modèle COCOM pourraient permettre la régulation de la charge mentale des opérateurs, ce qui modérerait la relation contrainte-astreinte (Hockey, 1997 ; Kostenko *et al.*, 2016 ; Cegarra, 2017). Une contrainte plus forte pourrait amener les opérateurs à quitter le mode tactique, ce qui peut être détecté à l'aide de la fNIRS. Le passage du mode tactique vers un mode de contrôle dégradé et plus réactif (modes opportuniste ou brouillé), ou au contraire vers un contrôle plus proactif et élaboré (mode stratégique), pourrait également expliquer l'augmentation de l'astreinte observée au niveau physiologique à l'aide de la VRC. Pour terminer, la capacité potentielle de la fNIRS à détecter le mode tactique à l'aide du taux d'HbO₂ pourrait, dans le futur, contribuer au déclenchement d'assistances adaptatives permettant de soutenir les opérateurs dans l'adoption de ce mode efficace lorsque la situation se complexifie.

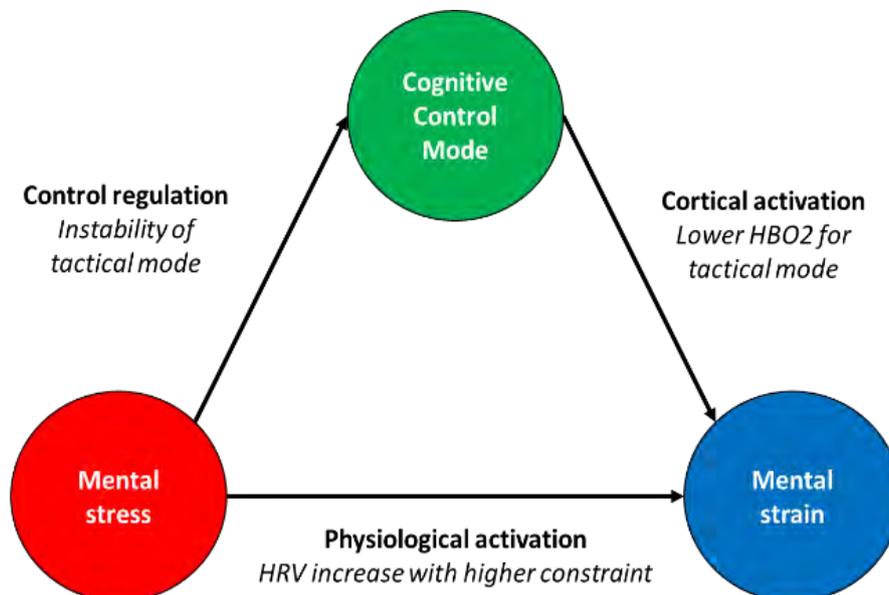


Figure 37 - Vers un effet modérateur du mode de contrôle sur le lien entre la contrainte et l'astreinte. A noter ici que la contrainte est traduite par « Mental stress » conformément à la norme ISO 10075-1:2017.



CHAPITRE 8.

MODES DE CONTROLE COGNITIF ET CHARGE MENTALE : EXPERIMENTATION EN SIMULATEUR DE VOL AVEC DES EXPERTS

Au cours de la première expérimentation, nous avons étudié les liens entre les modes de contrôle cognitif, la contrainte et l’astreinte. Cette étude nous a permis de mettre en évidence le lien entre la contrainte et le mode de contrôle cognitif adopté. En effet, lorsque la complexité était faible, nous avons constaté une adoption préférentielle du mode tactique. En revanche, lorsque la complexité augmentait, nous avons noté que les participants quittaient le mode tactique pour adopter soit un mode plus

proactif (*i.e.* le mode stratégique), soit des modes plus réactifs (*i.e.* le mode opportuniste ou le mode brouillé).

Nous avons également pu mettre en évidence des liens entre les modes de contrôle cognitifs et l'astreinte. En considérant le taux d' HbO₂ comme indicateur de la charge mentale, nous avons noté que le mode tactique était associé à l'astreinte la plus faible.

Ces deux résultats nous ont amené à conclure que le mode tactique, associant une performance satisfaisante à un faible niveau d'astreinte, était le mode le plus efficient.

Nous avons ainsi souligné l'utilité de l'étude de l'activité cérébrale pour la détection des changements de modes de contrôle. Nous avons noté qu'une élévation de l'activité corticale pourrait être un indicateur de la transition depuis le mode tactique vers un mode plus réactif ou au contraire plus proactif. Nous avons cependant évoqué le fait que les participants novices recrutés lors de cette étude pouvaient amener une plus grande hétérogénéité qu'une population de pilotes experts. De plus, les modes de contrôle n'étaient codés que sur une seule tâche, ce qui pouvait avoir masqué un phénomène de focalisation sur cette tâche lorsque les participants devaient gérer des tâches multiples.

La présente étude propose, comme la précédente, d'étudier les liens entre modes de contrôle cognitif, contrainte et astreinte. Nous allons cependant plus loin, en nous concentrant cette fois sur une population d'experts (pilotes d'essai et instructeurs), et en réalisant l'expérimentation sur un simulateur de vol qui, même s'il n'est pas totalement « écologique », représente néanmoins fidèlement l'avion réel ainsi que l'environnement dans lequel il évolue. Le simulateur permet ainsi de reproduire des tâches réalistes pour les pilotes, y compris la gestion multi-tâches. Nous nous centrons, au cours de cette expérimentation, sur les phases de descente et d'atterrissage. Ces deux phases ont été mises en évidence par la CWA réalisée au chapitre 6 comme étant parmi celles qui rassemblent le plus de tâches à réaliser, et le plus de décisions à prendre.

8.1 METHODE

8.1.1 Participants

8 participants ont été recrutés parmi les pilotes internes Airbus. Les participants étaient tous de sexe masculin. En tant que pilotes professionnels en activité, ils détenaient tous une aptitude médicale de Classe 1 leur permettant d'exercer. Les participants ont été informés de leurs droits et ont fourni un consentement écrit de participation à l'étude, en accord avec la Déclaration de Helsinki.

8.1.2 Dispositif expérimental

Il était demandé aux pilotes de réaliser deux scénarios de vol programmés sur un simulateur de vol. Le simulateur de recherche (non représentatif d'un avion existant) reproduisait le cockpit d'un avion de ligne de type Airbus A350-900. Il était installé sur une base fixe, et ne reproduisait donc pas les mouvements de l'avion. Le pilote était installé en place gauche du simulateur, avec un copilote à sa droite.

8.1.3 Scénarios

Les scénarios auxquels les pilotes ont été confrontés en simulateur de vol ont été réalisés de manière à pouvoir observer l'instanciation de différents modes de contrôle cognitifs. Nous nous sommes basés sur le Tableau 11 ci-dessous afin de mettre au point ces scénarios. Ce tableau, validé par des pilotes et des spécialistes en Facteurs Humains d'Airbus, découpe l'activité du pilote en 5 grandes fonctions (reprenant le niveau 3 de l'Analyse du Domaine de Travail réalisée dans la CWA). Pour chaque fonction, il décrit le comportement des pilotes dans chaque mode de contrôle cognitif.

	Manœuvrer l'avion (FLY)	Naviguer (NAV)	Communiquer (COM)
Stratégique		Idem tactique supervisé mais avec une projection dans le temps plus importante et plus de solutions prises en compte. Consideration d'éléments additionnels d'ordre secondaire (ex : infrastructures passagers, etc.). Les solutions peuvent être hors procédure (éléments non décrits dans la procédure pris en compte). Maximisation de l'efficacité du vol.	
Tactique supervisé	Actions au manche et aux moteurs réfléchies de manière à optimiser la trajectoire et l'efficacité du vol.	Construction et suivi d'un plan d'action global (ex : suivi du plan de vol), capacité à envisager des alternatives, planification de l'action à l'avance.	Anticipation des interactions avec l'ATC et des changements de fréquences.
Tactique non supervisé	Réalisation des actions nécessaires au placement et au maintien de l'avion sur la trajectoire désirée au moment requis.	Suivi d'un plan d'action (plan de vol) et capacité de réajustements.	Interaction nominale avec l'ATC, prise de contact lorsque la situation le requiert.
Opportuniste	Pilotage approximatif de l'avion, potentielles imprécisions dans les maintiens de vitesse, altitude et cap.	Suivi d'un plan d'action, mais si imprévu, difficultés à ajuster, actions tardives ou non optimales, Non-anticipation amenant à ne pas utiliser les moyens les plus adaptés à la situation. Pas de double vérification des trajectoires. Pas d'anticipation des différentes solutions possibles dans une situation donnée.	Phraséologie non procédurale, non adaptée et/ou hésitante.
Brouillé	Actions exploratoires sur les organes de contrôle.	Recherche de la position de l'avion, recherche des repères géographiques et de navigation, trajectoire aléatoire.	Inattention vis-à-vis des messages diffusés par l'ATC. Non-prise de contact de la part du pilote.

	Gérer les systèmes (SYS)	Surveiller l'environnement (ENV)	Définitions Hollnagel
Stratégique	Utilisation des connaissances afin d'adapter/de compléter les checklists et les SOP en fonction de la situation rencontrée.	Conscience de l'environnement extérieur à l'avion, sur sa route, sur tous les terrains de déroutement possibles ainsi que leurs conditions d'accessibilité (météo, trafic, infrastructures..), et conscience de l'évolution de ces paramètres.	Plus grand horizon temporel, buts de plus haut niveau. Choix de l'action moins influencé par les caractéristiques dominantes de la situation ou de l'interface. Performance plus efficiente et robuste que les autres modes. Influencé par les connaissances et aptitudes, dont le degré d'accessibilité peut varier en fonction des personnes, ce qui détermine leur performance. Les dépendances fonctionnelles entre les tâches et les interactions entre les multiples buts sont également prises en compte.
Tactique supervisé	Conscience de l'état de systèmes, complétion checklists et SOP, gestion optimisée des différents systèmes et organes de l'avion dans un but d'efficacité et d'économie (par exemple, économie de carburant, limitation de l'usure des freins, etc..).	Conscience de l'environnement extérieur à l'avion, sur sa route, et sur les terrains de déroutement sélectionnés, ainsi que l'évolution de ces paramètres.	La performance suit une procédure ou règle connue. Planification au-delà de ce que requiert la situation présente, mais scope ou portée limités et parfois prise en compte ad hoc des besoins. Si un plan est fréquemment utilisé, la performance peut ressembler à du procédural (niveau Rule), mais la base en est totalement différente. Situation un peu inhabituelles, ou avec conditions de performance inflexibles requérant une grande attention.
Tactique non supervisé	Conscience de l'état des systèmes et complétion des checklists et SOP.	Conscience de l'environnement extérieur à l'avion et sur sa route, mais sans contrôles/mises à jour approfondies.	Situation familière où les personnes savent ce qu'elles doivent faire mais ne le suivent pas en détail, car situation très familière ou beaucoup de temps subjectif disponible. Conditions favorisant l'apparition d'erreurs, faux sentiment de sécurité dans ce que les gens font.
Opportuniste	Non-anticipation de l'évolution de l'état des systèmes, action sur les systèmes uniquement lors d'une alerte/alarme, ou lors des checklists. Possibles oublis d'action sur certains systèmes.	Prise en compte des éléments à proximité immédiate de l'avion (vent local, terrains au ND, TCAS, GPWS..), manquement possibles, pas d'anticipation de l'environnement sur la route prévue de l'avion.	Choix de l'action suivante déterminé par les caractéristiques saillantes de la situation. Planification et anticipation limitées car le contexte n'est pas totalement compris ou car la situation est chaotique. Heuristique appliquée quand les connaissances sont inadéquates (inexpérience, manque de connaissances, environnement dans un état inhabituel). Le choix d'actions résultat peut ne pas être très efficace et peut générer plusieurs essais vains. Personne guidée par les caractéristiques perceptuellement dominantes ou par celles qui sont le plus souvent utilisées (expérience ou habitude).
Brouillé	Actions exploratoires, ou non-prise en compte de l'état des systèmes et/ou des alertes/alarmes.	Non-prise en compte ou non-perception de l'environnement extérieur de l'avion (météo, trafic, relief..).	Choix de l'action suivante apparemment irrationnel ou hasardeux. Peu ou pas de cognition impliquée, comportement de type essai-erreur. Typiquement personnes paniquées, peu ou pas de correspondance entre la situation et les actions. Inclut le cas extrême du zéro contrôle.

Tableau 11 - Détail des comportements des pilotes en fonction des modes de contrôle cognitifs, pour chaque grande fonction de l'activité de pilotage.

Le premier scénario servait de contrôle (Figure 38). Il simulait un vol de Paris à Nice, et comprenait un point de décision. La simulation débutait en vol de croisière, avant le début de descente vers Nice. Une période de croisière était prévue afin que les pilotes puissent se repérer et programmer leur descente vers Nice dans l'ordinateur de bord. Au moment où les pilotes demandaient au contrôle aérien l'autorisation de débuter la descente, le contrôleur les informait que l'aéroport de Nice était fermé pour une durée de deux heures. Le pilote devait alors prendre

une décision concernant la suite du vol (il était demandé au copilote de ne pas intervenir dans la prise de décision). Une fois la décision prise, le scénario était arrêté. Ce scénario a été conçu pour observer chez les pilotes la mise en place de la stratégie 1 décrite dans l'analyse des stratégies du chapitre CWA (6.2.3, Figure 27), mettant en œuvre un processus quasi-automatique.

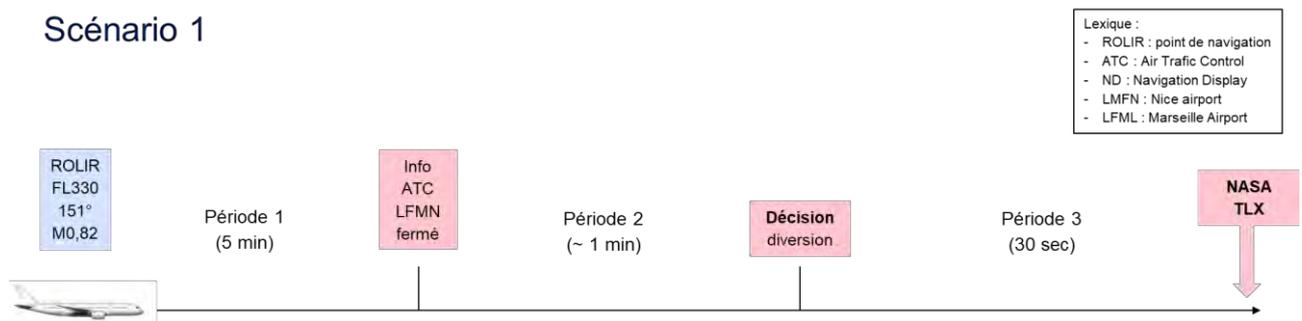


Figure 38 - Schéma décrivant le scénario contrôle.

Le second scénario dit de « test » simulait un vol de Paris à Hanoï (Figure 39). Durant ce scénario, les pilotes devaient prendre trois décisions, à des moments différents et dans des situations différentes. La simulation débutait en vol de croisière, au-dessus de la Chine. Une période de 10 minutes était laissée aux pilotes afin de se repérer et de programmer la suite de leur vol. Ensuite un feu moteur était déclenché. Les pilotes devaient éteindre le feu, compléter les procédures, et le pilote devait décider de la suite des événements, par exemple se diriger vers un terrain de déroutement, ou continuer à destination (décision 1). Cette partie du scénario a été conçue afin d'observer chez les pilotes la stratégie n°2 décrite dans l'analyse des stratégies du chapitre CWA (6.2.3, Figure 27), soit une stratégie basée sur l'implémentation d'un processus contrôlé nécessitant une évaluation approfondie de la situation, des différentes options disponibles et de leurs conséquences. Une fois la décision prise, la simulation était mise en pause afin d'être réinitialisée à proximité du terrain de déroutement, qui était le même pour tous les pilotes, quelle que soit la décision précédente. La suite de la simulation se déroulait à l'aérodrome de Lhasa (Chine). Les pilotes devaient y tenter un atterrissage d'urgence par mauvaise visibilité. Lors de leur approche, les instruments leur permettant d'atterrir sans visibilité (*Instruments Landing System, ILS*) disparaissaient. Les pilotes reprenaient alors de l'altitude et décidaient de la suite des événements, par exemple attendre la récupération de l'ILS, tenter un autre type d'approche, voire se dérouter (décision 2). Une seconde approche

était alors tentée (à l'aide d'autres instruments appelés VOR/DME ou LOC). Lors de cette approche, la visibilité était trop dégradée pour que les pilotes soient légalement autorisés à continuer jusqu'au sol. Ils devaient alors décider s'ils annulaient l'approche (remise de gaz pour refaire un tour de piste, attendre que la météo s'améliore ou tenter une autre approche) ou s'ils continuaient malgré tout jusqu'au sol (décision 3). En cas d'approche annulée, le scénario était arrêté à ce moment-là. En cas d'atterrissage, la simulation était arrêtée après que les pilotes aient quitté la piste.

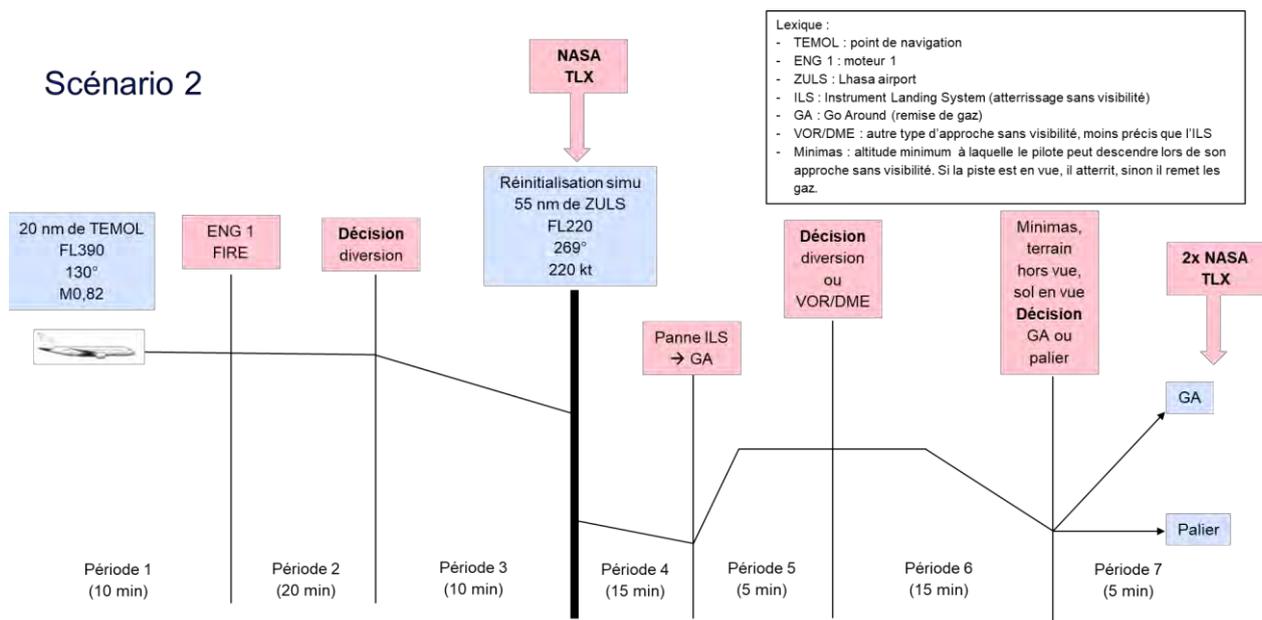


Figure 39 - Schéma décrivant le scénario de test.

8.1.4 Protocole expérimental

Les pilotes se présentaient en salle de simulation, où ils étaient reçus par l'expérimentateur. Les pilotes étaient informés du but de l'expérimentation et de son déroulement. Le copilote pouvait être présent lors de ce briefing. Ils étaient familiarisés avec le matériel de recueil physiologique utilisé lors de l'expérimentation. Les pilotes étaient ensuite invités à lire et signer le formulaire de consentement éclairé. L'électrocardiogramme était alors installé, puis les pilotes étaient invités à prendre place dans le simulateur, où la fNIRS était installée. Il était enfin demandé aux pilotes de rester assis 5 minutes en essayant de se détendre et de regarder devant eux sans rien fixer de particulier, afin de réaliser la baseline des équipements de mesure. Lorsque ce temps

était écoulé, le dossier de vol du premier scénario (scénario de contrôle) était remis aux pilotes. Une fois les pilotes prêts, le premier scénario était lancé.

A la fin de ce scénario, les pilotes devaient remplir une évaluation de type NASA-TLX (Hart & Staveland, 1988) dans une version informatisée. Cette évaluation concernait la décision qu'ils venaient de prendre. Ils devaient également répondre à des questions posées par l'expérimentateur concernant leur ressenti vis-à-vis de cette même décision. Une fois l'évaluation terminée, le dossier de vol du second scénario (scénario de test) était remis aux pilotes, puis le scénario lancé une fois les pilotes prêts.

Pendant le temps de pause dédié à la réinitialisation du simulateur, il était demandé aux pilotes testés de compléter une évaluation NASA-TLX concernant la première décision de ce scénario. A la fin de ce deuxième scénario, il était demandé aux pilotes de sortir du simulateur et l'équipement de mesure physiologique était retiré. Les pilotes étaient ensuite invités à échanger avec l'expérimentateur. Au cours de ce débriefing, les pilotes devaient remplir deux NASA-TLX, un pour chacune des deux dernières décisions prises pendant le vol. Une fois les NASA-TLX complétés, les pilotes devaient répondre à des questions (Tableau 13 présenté plus bas) concernant leur ressenti sur le déroulement du scénario et les décisions prises. La séance de débriefing était entièrement enregistrée sur dictaphone pour écoute ultérieure et retranscription par l'expérimentateur.

La durée totale de présence des pilotes était d'approximativement 3 heures (Tableau 12).



Briefing	10 minutes
Installation du matériel de mesure et baseline	15 minutes
Scénario contrôle et questionnaire	20 minutes
Scénario test	1h30
Retrait du matériel de mesure	5 minutes
Debriefing	30 minutes

Tableau 12 - Détail des différentes étapes d'une expérimentation pour un participant, et durées associées à chaque étape.

8.1.5 Décisions et Codage des modes de contrôle cognitif

Grâce à l'analyse CWA présentée dans le chapitre 6 et au Tableau 11 présenté plus haut, nous avons décrit les tâches que devait effectuer le pilote aux commandes (pilote testé dans notre expérimentation) pour pouvoir prendre les décisions dans les différents scénarios. Ces tâches sont décrites dans la Figure 40 ci-dessous.

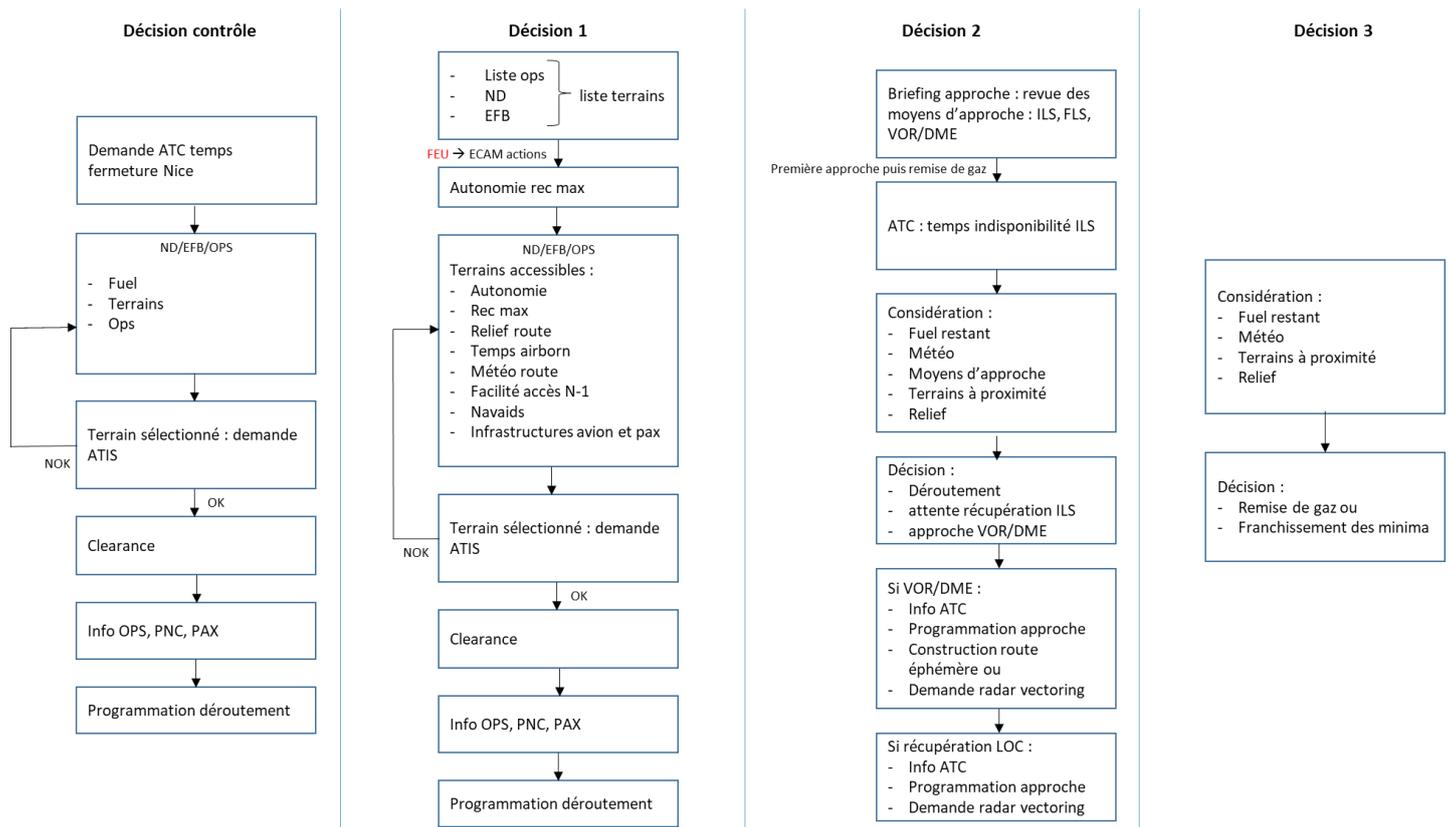


Figure 40 - Détail des tâches à réaliser et des paramètres à prendre en compte pour chaque décision.

Concernant le scénario contrôle (Figure 40, colonne « Décision contrôle »), après annonce de la fermeture du terrain de destination (Nice), la procédure à suivre consistait à demander le temps de fermeture dans le cas où il n'aurait pas été communiqué préalablement par l'ATC (*Air Traffic Control*). Une fois le temps de fermeture connu, venait la comparaison avec le temps pendant lequel l'avion pouvait attendre (dépendant notamment du carburant à bord), et la prise en compte des éventuels terrains de repli, notamment ceux conseillés par les opérations de la compagnie (Ops). Si un nouveau terrain était sélectionné, l'équipage demandait la météo sur ce terrain (ATIS). Si celle-ci était praticable, alors l'équipage demandait une autorisation de

déroutement sur ce nouveau terrain (clearance), puis informait les Ops, le personnel de cabine (PNC) et les passagers (PAX), et enfin programmait la route vers ce nouveau terrain dans l'ordinateur de bord.

Concernant le scénario de test, le descriptif (Figure 40, colonne « Décision 1 ») commençait en vol de croisière, avant l'incident. Les pilotes devaient ainsi resituer leur position, et chercher des terrains de déroutement adéquats. Ensuite survenait l'incendie moteur, que les pilotes devaient maîtriser. Une fois l'incendie maîtrisé et l'avion en sécurité, les pilotes devaient déterminer l'autonomie qui leur restait à leur nouvelle altitude de vol (autonomie à REC MAX, le vol sur un seul moteur ne permet pas de maintenir une altitude aussi élevée qu'avec deux moteurs). En fonction de cette autonomie et de multiples autres paramètres (le relief, les moyens d'approche sur les différents terrains, etc., se reporter à la Figure 36 pour prendre connaissance de l'ensemble des paramètres), un terrain de déroutement était sélectionné (décision 1). Enfin, comme pour le scénario contrôle, la météo du terrain cible était demandée, et si elle était praticable, une clearance était demandée, les Ops, PNC et PAX était informés, et le déroutement était programmé dans l'ordinateur de bord.

Concernant la seconde décision, le descriptif (Figure 40, colonne « Décision 2 ») commençait pendant l'approche du terrain de déroutement. Les pilotes passaient en revue les moyens d'approche pendant le briefing. Ensuite, lorsque l'ILS tombait en panne, que les pilotes remettaient les gaz, et une fois l'avion stabilisé, ils s'informaient sur le temps d'indisponibilité de l'ILS. Puis, en fonction de plusieurs paramètres (météo, carburant, etc.), les pilotes prenaient une décision quant à la suite des événements (décision 2). Le scénario était réalisé de façon à amener les pilotes à sélectionner une approche VOR/DME. Quand la décision était prise, les pilotes en informaient l'ATC, programmaient leur approche dans l'ordinateur de bord, et pouvaient également construire une route éphémère² *ad hoc* (ce qui permettait de gagner en sécurité) ou demander un radar vectoring (l'ATC donnait alors les caps à suivre au fur et à mesure de la progression de l'avion). Ensuite, le scénario permettait de récupérer le LOC (une des composantes de l'ILS, permettant d'accroître la précision d'approche). Les pilotes pouvaient ainsi utiliser ce moyen d'approche.

² Une route éphémère est une route dont les points de navigation ne figurent pas sur une carte officielle. Les points de navigation sont créés par le pilote et insérés dans l'ordinateur de bord, de façon à construire une route qui permette au pilote automatique de guider précisément l'avion. Dans une zone montagneuse et avec un ILS en panne comme dans notre expérimentation, ceci permet à l'aéronef d'évoluer en sécurité loin des reliefs et d'avoir un guidage plus précis jusqu'au terrain, en évitant le risque d'écart involontaire.

Concernant la dernière décision (Figure 40, colonne « Décision 3 »), les pilotes descendaient jusqu'à une altitude réglementaire, appelée *minima*. A cette altitude, les pilotes devaient avoir la piste en visuel afin de continuer leur approche, à défaut de quoi ils étaient légalement contraints à une remise de gaz. Dans notre scénario, la piste n'était pas visible aux minima. Les pilotes devaient alors décider de la suite des événements en fonction de différents paramètres (tels que le carburant restant, le carburant utilisé à chaque tour de piste, etc. cf. Figure 36). Ils pouvaient alors décider de remettre les gaz ou de continuer l'atterrissage malgré l'absence de visibilité, en violation avec la réglementation.

8.1.5.1 Codage des Modes de contrôle cognitif : observations en simulateur

Nous avons analysé les comportements des pilotes en termes de modes de contrôle cognitifs, ainsi que les verbatims recueillis lors des entretiens de débriefings. Ces verbatims sont présentés dans le Tableau 14, p. 162.

La décision du scénario contrôle nécessitait la sélection d'un terrain de déroutement à la suite de la fermeture du terrain de destination.

- Le mode de contrôle attendu ici était le mode tactique : le pilote disposait de suffisamment de temps, l'avion était en condition nominale, et la météo était bonne. De plus, la région était connue des pilotes, et de nombreux terrains de déroutement étaient disponibles. Ainsi, le pilote pouvait sélectionner le terrain de déroutement optimal. En fonction de l'expérience et du profil des pilotes, certains pouvaient également sélectionner immédiatement un terrain de déroutement approprié sans analyser les différentes options. De plus, les pilotes ayant instancié ce mode devaient, lors du débriefing, produire des verbatims associés à ce mode. Ce comportement correspond à la stratégie 1 décrite dans l'analyse des stratégies de la CWA.
- En mode opportuniste cependant, les pilotes auraient simplement cherché le terrain le plus proche où atterrir, sans prendre en compte d'autres options telle que la possibilité d'attendre la réouverture du terrain, ou d'autres paramètres tels que les terrains recommandés par les Ops. De même, les verbatims utilisés lors du débriefing devaient refléter le mode opportuniste.

- Le comportement attendu en mode brouillé n'a pas été décrit car nous considérons qu'il avait très peu de chances d'être instancié dans ces conditions, étant donné l'expertise des pilotes.

Le tableau ci-dessous (Figure 41) montre les différentes tâches à réaliser et les paramètres à prendre en compte pour la décision de déroutement, et leur réalisation (croix verte) ou non (croix rouge) en fonction du mode de contrôle cognitif instancié par le pilote. La dernière ligne indique le type de verbatims attendus lors des débriefings. Ceux-ci sont décrits plus bas dans la partie 8.2.5.2.

	Tactique	Opportuniste
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">Demande ATC temps fermeture Nice</div> <div style="text-align: center;">↓</div>	✓	✗
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> ND/EFB/OPS - Fuel - Terrains - Ops </div> <div style="text-align: center;">↓</div>	ND/EFB/OPS ✓ ✓ ✓	ND ✗ ✓ ✗
<div style="text-align: center;">⋮</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">Info OPS, PNC, PAX</div>	✓	✗
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">Verbatims débriefings</div>	Tactique	Opportuniste

Figure 41 - Détail des paramètres permettant la détermination du mode de contrôle cognitif pour la décision du scénario contrôle.

La première décision du scénario de test consistait en la sélection d'un terrain de déroutement après avoir maîtrisé le feu moteur. L'avion volait en sécurité sur un moteur et disposait d'une quantité suffisante de carburant.

- Le mode attendu ici était le mode stratégique. En effet, le pilote disposait de suffisamment de temps pour pouvoir prendre en compte tous les paramètres nécessaires à la décision et analyser plusieurs options de déroutement, en vue de sélectionner la plus optimale. L'utilisation de ce mode devait se retrouver, lors des débriefings, dans les verbatims.

- En mode tactique, nous pouvions nous attendre à ce que le pilote ne prenne pas en compte la variable « infrastructure avions et passagers ». Il aurait considéré ainsi comme secondaire la capacité du terrain à gérer un avion de la taille de l'A350, et à gérer les nombreux passagers transportés (par exemple un petit aéroport régional, ou une base militaire). Là encore, nous devons retrouver des verbatims caractéristiques de ce mode dans les verbatims. Ces deux comportements correspondent à la stratégie 2 décrite dans l'analyse des stratégies de la CWA.
- Enfin en mode opportuniste, nous pouvions nous attendre à ce qu'aucun paramètre ne soit pris en compte et que le pilote sélectionne immédiatement le premier terrain de déroutement à sa portée (Figure 42). Les verbatims devaient, là encore, être révélateurs du mode adopté.
- Pour les mêmes raisons que précédemment, le mode brouillé n'a ici pas été décrit.

	Stratégique	Tactique	Opportuniste
Autonomie rec max	✓	✓	✗
ND/EFB/OPS	ND/EFB/OPS	ND/EFB/OPS	ND
Terrains accessibles : - Météo route - Facilité accès N-1 - Infrastructures avion et pax	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✗	✗ ✗ ✗
Info OPS, PNC, PAX	✓	✓	✗
Verbatims débriefings	Stratégique	Tactique	Opportuniste

Figure 42 - Détail des paramètres permettant la détermination du mode de contrôle cognitif pour la première décision du scénario de test.

La seconde décision intervenait après la première tentative d'atterrissage et la remise de gaz qui suivait la panne de l'ILS. Le pilote devait décider de la suite des événements. Il pouvait tenter une nouvelle approche avec un autre moyen d'aide à l'atterrissage disponible (VOR/DME ou LOC), attendre la récupération de l'ILS, ou se dérouter sur un autre terrain. Le temps disponible

était limité par la faible quantité de carburant, et la marge de manœuvre limitée par le relief entourant le terrain.

- Le mode de contrôle cognitif attendu ici était le mode tactique. Il était effectivement recommandé de passer en revue tous les moyens d'aide à l'atterrissage pendant le briefing avant la première approche afin de connaître les alternatives au moment de la remise de gaz et de pouvoir immédiatement mettre en place le plan d'action adéquat, telle l'application d'une règle. Aussi, une bonne gestion du carburant pouvait permettre un temps d'attente du retour en service de l'ILS. Nous nous attendions à ce que les verbatims produits soient caractéristiques de ce mode.
- En revanche, les pilotes n'ayant pas passé en revue à l'avance les différents moyens d'approche et les recherchant après la remise de gaz (donc au moment le plus tardif) seraient amenés à adopter un mode de contrôle opportuniste (Figure 43). Les verbatims devaient, là aussi, le confirmer.
- Ici encore, le mode brouillé n'a pas été décrit.

	Tactique	Opportuniste
ATC : temps indisponibilité ILS	✓	✗
Décision : - attente récupération ILS ou - Approche VOR/DME	✓ ✓	✗ ✓
Verbatims débriefings	Tactique	Opportuniste

Figure 43 - Détail des paramètres permettant la détermination du mode de contrôle cognitif pour la seconde décision du scénario de test.

Enfin, la troisième décision intervenait au moment de la seconde approche. Les pilotes étaient réglementairement autorisés à descendre jusqu'aux minima. A cette altitude, si les pilotes étaient en vue du sol ou de la piste, ils étaient autorisés à continuer l'approche. En cas de non-visibility de ces éléments, ils devaient remettre les gaz et tenter une autre approche, attendre que la météo s'améliore, ou se dérouter. Dans notre scénario, les pilotes n'avaient aucune visibilité aux minima, et aucun changement de météo n'était prévu. Le peu de carburant restant

n'était pas propice à un déroutement. Les pilotes n'avaient donc pas d'autres choix que de remettre les gaz, ou de continuer l'approche malgré la non-visibilité aux minima.

- Le mode de contrôle cognitif attendu ici était le mode opportuniste. La décision devait être prise après la remise de gaz, pendant la sélection de la seconde approche, ou plus tardivement en approchant des minima. Les verbatims devaient le confirmer.
- En cas de mode de contrôle cognitif brouillé, aucun paramètre n'aurait été pris en considération, et le comportement des pilotes n'aurait pas été prévisible. Ainsi l'issue aurait été incertaine, d'où les points d'interrogation ci-dessous (Figure 44). Les pilotes ayant instancié ce mode devaient, lors des débriefings, utiliser des verbatims caractéristiques de ce mode.

	Opportuniste	Brouillé
Considération : - Fuel restant - Météo	✓ ✓	✗ ✗
Décision : - Remise de gaz ou - Franchissement des minima	✗ ✓	? ?
Verbatims débriefings	Opportuniste	Brouillé

Figure 44 - Détail des paramètres permettant la détermination du mode de contrôle cognitif pour la troisième décision du scénario de test.

8.1.5.2 Codage des MCC : Débriefing avec les pilotes

La trame d'entretien utilisée avec les pilotes à la fin de chaque scénario est présentée ci-dessous. Les questions sont inspirées de la méthode appelée « *Critical Decision Method for Eliciting Knowledge* » (Klein *et al.*, 1989) ; elles ont été modifiées avec l'aide d'une spécialiste en Facteurs Humains d'Airbus afin de les adapter aux scénarios d'expérimentation. En fonction des événements constatés pendant le scénario, les questions pouvaient être ajustées. Les

réponses apportées par les pilotes permettaient d'obtenir des précisions sur leur comportement durant les scénarios, et ainsi de confirmer le mode de contrôle cognitif observé. Le Tableau 13 ci-dessous présente la trame d'entretien utilisée avec un pilote lors de l'une des premières sessions.

Introduction	Comment as-tu perçu, ressenti la situation ?
	- Généralement, comment t'es-tu senti sur le scénario, comment perçois-tu ce qui s'est passé ?
	- Par rapport à la décision de déroutement, comment qualifierais-tu ta décision, comment ça s'est passé pour toi ?
	- Qu'as-tu ressenti lorsque l'ILS a disparu des écrans ?
Indices	Que s'est-il passé ? Qu'as-tu vu, entendu ? Qu'as-tu considéré ?
	- N'as-tu aucune confirmation visuelle dans le cockpit de l'extinction du feu ?
	- Combien te restait-il de carburant à ce moment-là ?
	- Étais-tu un peu trop haut pendant cette approche ou pas ? (une réponse affirmative entraîne la question suivante)
	- Qu'est ce qui a fait que tu n'as pas repéré le fait de passer verticale VOR ?
	- Le franchissement des minima était-il involontaire de ta part ?
Connaissances	Quelle information t'a servi pour prendre cette décision ? Comment l'as-tu obtenue ?
	- Qu'est ce qui a fait que tu as choisi Lhasa ?
	- Qu'est ce qui a fait que tu as continué ? (après les minima, ndlr)
	- Pour toi, cette décision et les données à analyser pour la prendre étaient plutôt complexes ou simples ?
	- (Concernant le 1er scénario) Qu'est ce qui a fait que tu as choisi Marseille ?
Analogues	Est-ce que tu as déjà eu une expérience similaire ?
	- Est-ce que ton expérience de Lhasa ou une autre expérience t'a influencé dans cette décision de continuer ? (après les minima, ndlr)
	- L'expérience de la région t'a-t-elle aidé dans ta décision ?
Buts	Quels étaient tes buts spécifiques à ce moment-là ?
	- Quelle était ta priorité à ce moment-là ?
	- Donc ta priorité était de suivre la trajectoire d'approche interrompue ?
	- Quel était ton but principal au moment de l'approche VOR/DME ?

	- Quel était ton but principal à ce moment-là ?
Options	Quelles autres options as-tu considérées ?
	- Tu n'as considéré aucune autre option à part Lhasa ?
	- Voyais-tu d'autres options à ce moment-là ?
	- Tu n'avais pas considéré d'autres options à ce moment-là hormis la VOR/DME ?
Base	Comment as-tu sélectionné cette option ? Comment as-tu rejeté les autres ? As-tu suivi une règle ? Laquelle ?
	- Dirais-tu que tu as toi-même choisi le terrain de déroutement ?
	- Est-ce toi qui a demandé le vecteur (vers Lhasa, ndlr) ?
	- Tu as directement envisagé l'approche VOR/DME ? (à la suite de l'évocation de cette approche par le pilote)
	- Est-ce que le niveau de carburant a influencé ta conduite une fois aux minima ?
Pression temporelle	Est-ce que tu ressentais de la pression temporelle à ce moment-là ?
	- Qu'est ce qui a joué dans la pression temporelle que tu as notée dans le NASA-TLX ?
Aide	Si cette décision n'était pas la meilleure, qu'aurais-tu fait différemment ? Quelle information, connaissance ou information aurait pu t'aider ?
	- Avec le recul, que penses-tu des décisions que tu as prises ? Si tu avais eu plus de temps ou d'informations, qu'aurais-tu fait différemment ?
Hypothèses	Si une caractéristique clé de la situation avait été différente, en quoi ta décision aurait été différente ?
	- Si tu t'étais rendu compte que tu étais aux minima, aurais-tu remis les gaz ou continué ? (après que le pilote a dit qu'il ne s'était pas rendu compte avoir dépassé les minima, ndlr)
	- Qu'aurais-tu fait si tu étais à la bonne altitude à D4 et que tu voyais le sol sans voir la piste ?
	- Penses-tu que ce serait une bonne chose si je t'avais briefé avant sur l'emplacement des différentes commandes et ta localisation au début du scénario ?

Tableau 13 - Questions posées au pilote de l'une des sessions d'expérimentation, lors du débriefing. Les questions posées sont séparées en fonction des catégories de la trame du CDM (cases bleues et questions associées).

Les réponses à cette trame d'entretien ont été analysées à l'aide de la grille de codage présentée dans le Tableau 11, de façon à déterminer le contrôle cognitif instancié par le pilote. Ci-dessous des exemples de réponses formulées par un pilote lors d'un entretien (Tableau 14).

Phase	Réponse du pilote	Classification
Décision 1	« La destination, la météo était calme, tout allait bien, c'était pas mal, après c'est sûr que j'allais continuer encore pas mal de temps en croisière mais après j'avais ma descente, dans toute la descente j'étais pratiquement sur IDLE donc mon bilan ça me paraissait pas si insurmontable que ça. [...] J'avais eu un feu mais il était contrôlé donc il était éteint, donc plus de soucis, il s'est éteint quand même assez rapidement. [...] J'ai opté pour la facilité en prenant plus loin. Et en même temps un peu l'aspect commercial où j'avais tous mes passagers qui étaient à destination, et voilà j'ai pris la décision. »	Stratégique (Idem tactique supervisé mais avec une projection dans le temps plus importante et plus de solutions prises en compte. Les solutions sont plus réfléchies et plus pertinentes qu'en mode tactique supervisé. Les solutions peuvent être hors procédure. Maximisation de l'efficacité du vol.)
Décision 1	« Non, en fait on a balayé plein de terrains qui étaient trop hauts, trop près, qui avaient pas de moyens d'approche, donc on est arrivés qu'avec ZULS finalement. Et après c'est avec le ND que j'ai dit « Y a ce terrain-là, ZLLL ». Je regardais dans le FM, on a vu que la piste était longue, j'ai regardé dans mon EFB, j'ai vu qu'il y avait un ILS donc je me suis dit bah celui-là on peut. Mais on avait pas la météo. Et puis là le feu a pété donc j'ai dit « bah là y a un ILS c'est mieux que ZULS à priori ». Parce que ZULS c'est un peu l'entonnoir, c'est dans les montagnes donc.. »	Tactique (Suivi du plan de vol entré dans le FMS, recherche et implémentation/construction de solutions alternatives (par exemple construction de points éphémères), recherche de raccourcis.)
Décision 2	« Non, j'ai découvert pendant le dernier virage qu'il y avait une finale vor, quand j'ai émis des doutes sur le LOC, je me suis dit « mais y a pas une autre finale ? peut-être qu'il y a une finale GNSS ou quoi », et j'ai regardé, y avait une finale vor, donc.. »	Opportuniste (Suivi d'un plan d'action, mais si imprévu, difficultés à ajuster, actions tardives ou non optimales, Non-anticipation amenant à ne pas utiliser les moyens les plus adaptés à la situation. Pas de double vérification des trajectoires. Pas d'anticipation des différentes solutions possibles dans une situation donnée).
Décision 3	Exemples de verbatims attendus : « Je ne comprenais pas ce que faisait l'avion » « Je ne comprenais pas la situation » « Je ne comprenais pas ce qu'il fallait faire »	Brouillé (Incompréhension de la position de l'avion, perte des repères géographiques et de navigation, trajectoire aléatoire ; Incompréhension de l'état de l'avion, actions au manche et aux moteurs hasardeuses et/ou exploratoires ; Incompréhension de l'état des systèmes, actions hasardeuses et/ou exploratoires, ou non-prise en compte de l'état des systèmes et/ou des alertes/alarmes)

Tableau 14 - Exemples de classification des réponses d'un pilote aux questions de débriefing.

Les réponses des pilotes à l'entretien ont permis de confirmer les modes de contrôle cognitifs observés, et de lever les doutes sur certains paramètres non observables. Par exemple, lors de ce débriefing, un pilote pouvait évoquer certaines options qu'il avait envisagées mentalement, sans les verbaliser sur le moment.

8.1.6 Données physiologiques

Les données physiologiques prises en compte étaient les mêmes que celles utilisées lors de la première expérimentation (Chapitre 7, partie 1.4, Tableau 7, p. 136).

8.1.7 Méthodes d'analyse des données

Le mode de contrôle cognitif instancié par les pilotes a été déterminé à l'aide des grilles d'observation détaillées dans la partie « données comportementales ». Le comportement des pilotes a été observé, les verbatims des pilotes lors des entretiens ont été analysés, et l'ensemble de ces paramètres a été regroupé dans une grille d'observation (présentée en partie Résultats ci-dessous).

Les situations au cours desquelles les pilotes devaient prendre des décisions présentaient des temporalités différentes. Aussi, les mesures physiologiques associées ont donc été analysées selon les temporalités suivantes :

- Scénario contrôle : pendant 1 minute, jusqu'à la décision,
- Scénario test, D1 : 15 minutes, jusqu'à la décision,
- Scénario test, D2 : 10 secondes, jusqu'à la décision,
- Scénario test, D3 : 10 secondes, jusqu'à la décision.

Les périodes pendant lesquelles sont observées les différentes décisions sont intrinsèquement liées aux types de modes de contrôle cognitif que l'on souhaite observer. En effet, une décision prise en mode stratégique prendra, par définition, plus de temps qu'une décision prise en mode opportuniste. Ces différences entre les périodes constituent l'une des limites de notre expérimentation, inévitable cependant lorsque l'on souhaite s'approcher de la réalité du métier des pilotes. Nous avons néanmoins tenté d'en tenir compte en normalisant les données avant analyse statistique.

Des analyses statistiques ont été réalisées sur les mesures physiologiques afin d'en déterminer la significativité. Le logiciel « RStudio » a été utilisé. Les données d'activité cérébrale et d'ECG ont été normalisées afin d'écartier tout risque de biais lié aux différences interindividuelles. Étant donné le petit échantillon de pilotes testés, les conditions de normalité et d'homoscédasticité ne sont pas vérifiées. Des tests non-paramétriques ont donc été réalisés. Les données physiologiques ainsi que les résultats de NASA-TLX ont été analysés à l'aide du test non-paramétrique de Kruskal-Wallis avec un seuil de significativité de $p < 0.05$ et les comparaisons deux-à-deux ont été réalisées à l'aide du test post-hoc de Dunn (package « dunn.test » de RStudio). Pour chaque comparaison deux-à-deux, la p-value devait être inférieure à 0.025 pour que le résultat soit considéré comme significatif.

8.2 RESULTATS

8.2.1 Indicateurs comportementaux, instanciation des modes de contrôle cognitif

Les comportements des pilotes au cours des scénarios sont détaillés dans la grille ci-dessous (Tableau 15). Nous pouvons observer que tous les modes de contrôle cognitif ont été instanciés, excepté le mode brouillé, ce qui est conforme à nos attentes étant donnée l'expertise des participants. Pour rappel, les modes attendus étaient le mode tactique pour la décision du scénario contrôle, stratégique pour la décision 1 du scénario de test, tactique pour la décision 2 et opportuniste pour la décision 3.

Pour la décision contrôle, tous les pilotes ont instancié le mode tactique. Pour la décision 1 du scénario de test, la moitié des pilotes ont instancié le mode tactique, et l'autre moitié le mode stratégique. Pour la décision 2, une majorité de pilotes (cinq) ont instancié le mode opportuniste. Enfin pour la décision 3, tous les pilotes ont instancié le mode opportuniste. Notons une discordance entre les verbatims et les observations pour le pilote 5 lors de la décision 3. Nous avons choisi de conserver le mode de contrôle cognitif observé, car les actes réalisés par le pilote correspondaient à ce qui était attendu dans ce mode.

Pilote	dc	Demande ATC temps fermeture Nice	Fuel	Terrains ND	Terrains EFB	Terrains OPS	Expérience	Verbatims	MCC
1	dc	non	oui	non	non	non	oui	tactique	tactique
2	dc	non	oui	non	non	non	oui	tactique	tactique
3	dc	oui	oui	non	non	oui	oui	tactique	tactique
4	dc	oui	oui	oui	non	oui	oui	tactique	tactique
5	dc	oui	oui	non	non	non	oui	tactique	tactique
6	dc	non	oui	non	non	non	oui	tactique	tactique
7	dc	oui	oui	oui	oui	oui	oui	tactique	tactique
8	dc	oui	oui	non	non	oui	oui	tactique	tactique

Pilote	d1	Autonomie REC MAX	Recherche terrains EFB/OPS	Météo route	Facilité accès N-1	Infrastructures avion pax	Poursuite à destination	Expérience	Verbatims	MCC
1	d1	oui	oui	oui	oui	non	non	non	tactique	tactique
2	d1	oui	oui	oui	oui	non	non	oui	tactique	tactique
3	d1	oui	oui	oui	oui	oui	non	oui	stratégique	stratégique
4	d1	oui	oui	oui	oui	non	non	non	tactique	tactique
5	d1	oui	oui	oui	oui	oui	non	oui	stratégique	stratégique
6	d1	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non	stratégique	stratégique
7	d1	oui	oui	oui	oui	non	non	non	tactique	tactique
8	d1	oui	oui	oui	oui	oui	non	non	stratégique	stratégique

Pilote	d2	Moyens d'approche en briefing	Décision attente ILS	Décision VOR ou LOC	Expérience	Verbatims	MCC
1	d2	oui	non	oui	non	tactique	tactique
2	d2	oui	non	oui	oui	tactique	tactique
3	d2	non	non	oui	oui	opportuniste	opportuniste
4	d2	oui	non	oui	non	tactique	tactique
5	d2	non	non	oui	oui	opportuniste	opportuniste
6	d2	non	non	oui	oui	opportuniste	opportuniste
7	d2	non	non	oui	oui	opportuniste	opportuniste
8	d2	non	non	oui	non	opportuniste	opportuniste

Pilote	d3	Considération terrains à proximité	Considération relief	Décision franchissement des minimas	Expérience	Verbatims	MCC
1	d3	non	non	oui	non	opportuniste	opportuniste
2	d3	non	non	oui	oui	opportuniste	opportuniste
3	d3	non	non	oui	oui	opportuniste	opportuniste
4	d3	non	non	oui	oui	tactique	opportuniste
5	d3	non	non	oui	non	opportuniste	opportuniste
6	d3	non	non	oui	oui	opportuniste	opportuniste
7	d3	non	non	oui	non	opportuniste	opportuniste
8	d3	oui	non	oui	non	opportuniste	opportuniste

Tableau 15 - Mode de contrôle cognitif instancié (MCC) par chaque pilote en fonction de la décision (« dc » = décision du scénario contrôle. « d1 », « d2 » et « d3 » = décisions 1, 2 et 3 du scénario de test.). Le tableau présente également les paramètres pris en compte pour la détermination du MCC à chaque décision.

Des évaluations de type NASA-TLX ont été complétées par les pilotes pour chacune des 4 décisions qu'ils ont eu à prendre au cours de l'expérimentation. Les tests non-paramétriques de Kruskal-Wallis réalisés ne montrent pas d'interaction significative entre les différentes catégories de NASA-TLX et les modes de contrôle cognitif. Les comparaisons deux-à-deux de Dunn (Figure 45) nous montrent cependant une tendance selon laquelle la pression temporelle était plus élevée en mode opportuniste qu'en mode tactique ($p < 0,05$).

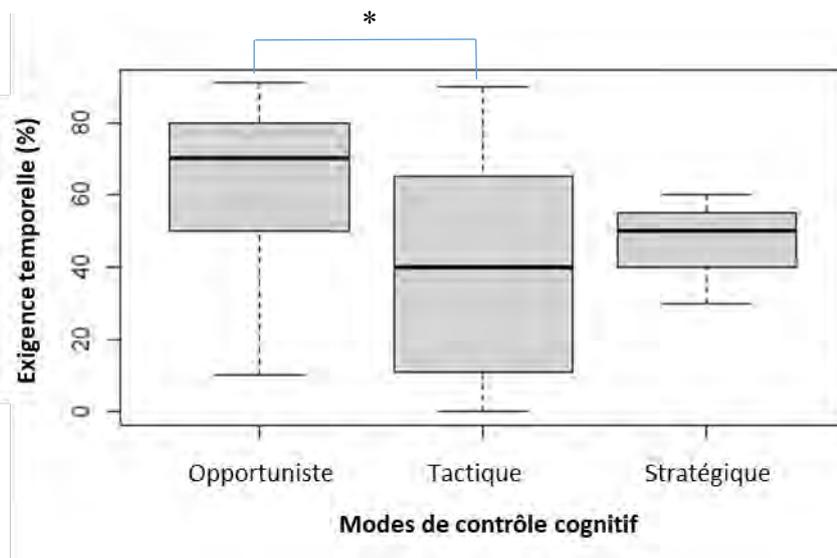


Figure 45 - Scores moyes au NASA-TLX en fonction du mode de contrôle cognitif concernant la pression temporelle. * : $p < 0.05$.

8.2.2 Analyse des indicateurs physiologiques, recherche d'un pattern d'activation physiologique en fonction des modes de contrôle cognitif

8.2.2.1 FNIRS

Des mesures d'activité cérébrales ont été effectuées pendant la réalisation des scénarios par les pilotes. Les données de 7 pilotes étaient exploitables.

Les tests non-paramétriques de Kruskal-Wallis réalisés (Figure 46) montrent une interaction significative entre les différents modes de contrôle cognitif et le taux d'oxygénation sanguine en regard de l'optode 1 ($Chi^2(2) = 6,97, p < 0,05$) et de l'optode 5 ($Chi^2(2) = 10,05, p = 0.01$), c'est-à-dire au niveau des cortex préfrontaux dorsolatéraux gauche et droit.

Les tests post-hoc de Dunn nous montrent que pour l'optode 1, il existe une différence significative entre les taux d'oxygénation associés aux modes opportuniste et tactique ($p < 0,025$) et entre les taux associés aux modes tactique et stratégique ($p < 0,025$). Concernant l'optode 5, il existe une différence significative entre les taux associés aux modes opportuniste et tactique ($p < 0,01$).

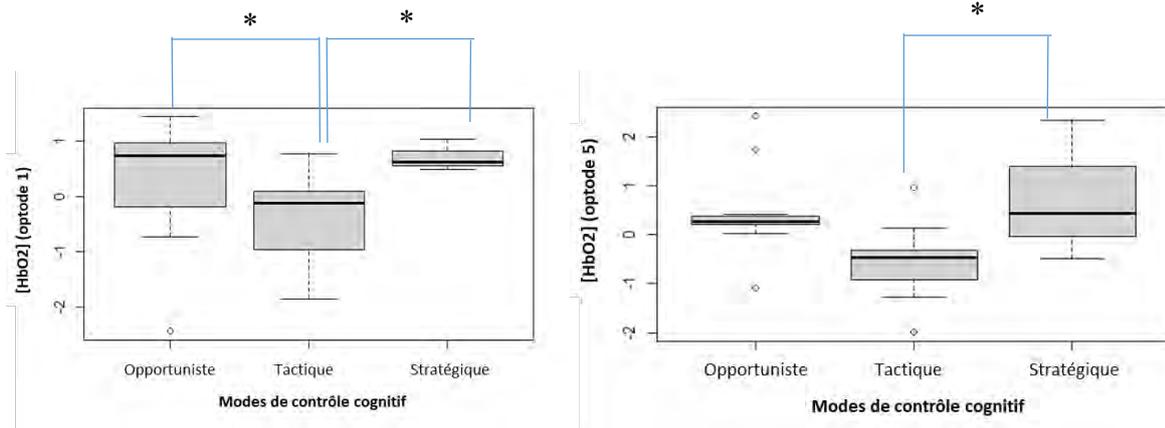


Figure 46 - Concentrations sanguines moyennes en hémoglobine oxygénée au niveau de l'optode 1 (à gauche) et 5 (à droite) en fonction des modes de contrôle cognitif. * : $p < 0,025$; ** : $p < 0,01$.

On remarque, sur ces deux résultats, que le taux d'oxygénation le plus faible est observé lorsque le mode tactique est adopté par les pilotes

8.2.2.2 ECG

Des mesures d'activité cardiaque ont été réalisées pendant la passation des scénarios par les pilotes. Les données de 7 pilotes étaient exploitables. Deux paramètres ont été pris en compte : la déviation standard de l'intervalle entre deux battements cardiaques (SDNN) qui renseigne sur la variabilité globale du rythme cardiaque, et le ratio basses fréquences/hautes fréquences (LF/HF) qui renseigne sur la balance des systèmes sympathique et parasympathique.

Les tests non-paramétriques de Kruskal-Wallis (Figure 47) montrent une différence significative au niveau des ratios LF/HF ($Chi^2(2) = 6,57, p < 0,05$). Les comparaisons deux-à-deux de Dunn effectuées montrent un ratio LF/HF significativement plus élevé pour le mode stratégique que pour le mode opportuniste ($p < 0.01$).

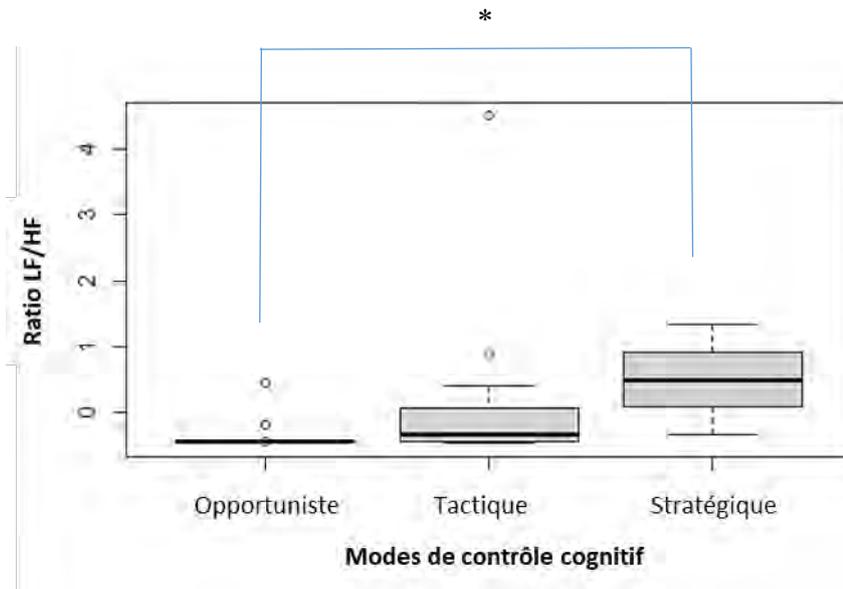


Figure 47 - Valeurs moyennes des ratios LF/HF en fonction du mode de contrôle cognitif instancié. **: $p < 0.01$.

8.2.2.3 Relations entre la contrainte et l'astreinte

Nous avons enfin étudié les relations entre la contrainte générée par les différentes situations où les pilotes devaient prendre des décisions, et l'astreinte des opérateurs. Plusieurs résultats se distinguent.

Notons d'abord un effet significatif de la contrainte sur la pression temporelle ressentie par les participants, et notée au NASA-TLX. La pression temporelle est ainsi significativement supérieure pour la décision 3 du scénario de test, que pour la décision du scénario contrôle (*test de Dunn*, $p < 0,025$).

Ensuite, concernant les mesures d'activité cérébrale, nous observons un effet significatif de la contrainte sur les taux d'oxygénation sanguine en regard des optodes 5 et 7 (Figure 48) :

- Optode 5 : effet général significatif ($Chi^2(3) = 11,15$, $p < 0,01$)
 - o Effet significatif entre décision contrôle et décision 1 (*test de Dunn*, $p < 0,01$)
 - o Effet significatif entre décision contrôle et décision 2 (*test de Dunn*, $p < 0,01$)
 - o Effet significatif entre décision contrôle et décision 3 (*test de Dunn*, $p < 0,01$).

- Optode 7 : effet significatif entre décision contrôle et décision 1 (*test de Dunn*, $p < 0,025$).

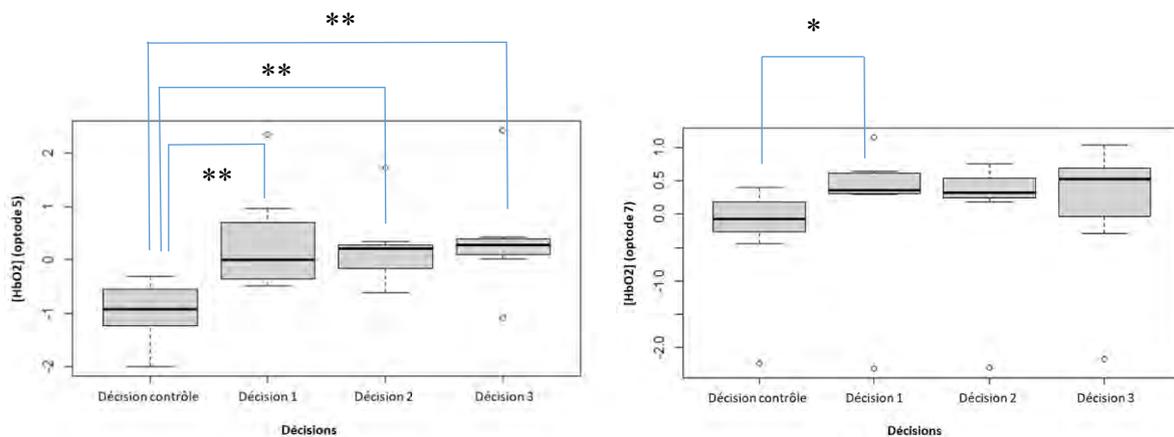


Figure 48 - Concentrations sanguines moyennes en hémoglobine oxygénée au niveau de l'optode 5 (à gauche) et 7 (à droite) en fonction des décisions. * : $p < 0,025$; ** : $p < 0,01$.

Enfin, concernant les mesures d'activité cardiaque, nous observons un effet significatif de la contrainte sur SDNN et le ratio LF/HF (Figure 49) :

- SDNN : effet significatif entre décision 1 et décision 3 (*test de Dunn*, $p < 0,01$)
- LF/HF : effet général significatif ($Chi^2(3) = 8,95$, $p < 0,05$)
 - o Effet significatif entre décision 1 et décision 3 (*test de Dunn*, $p < 0,01$).

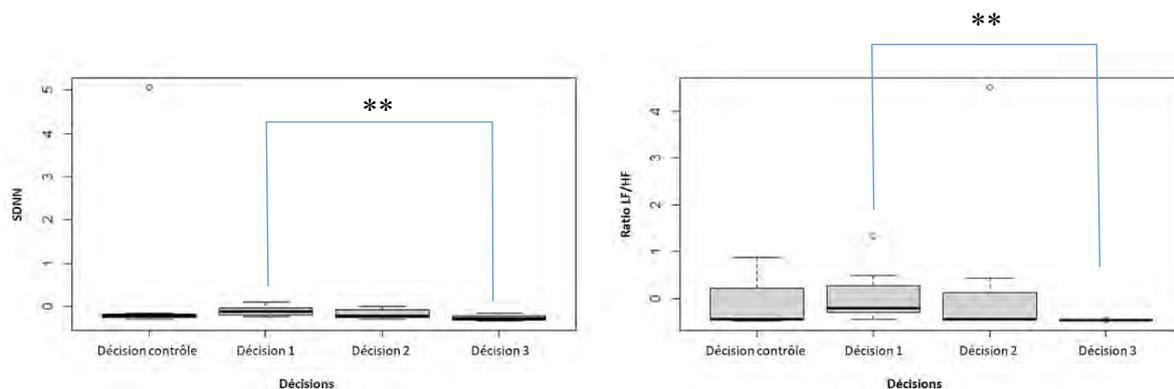


Figure 49 - Valeurs moyennes de SDNN et des ratios LF/HF en fonction du mode de contrôle cognitif instancié. ** : $p < 0,01$.

8.3 DISCUSSION

L'étude réalisée nous a amené à mettre à l'épreuve le modèle COCOM lors d'une expérimentation que l'on peut qualifier de quasi-écologique, puisque s'approchant de la réalité de l'activité des pilotes de ligne. Nous avons observé l'instanciation des modes de contrôle cognitifs par des pilotes confrontés à des scénarios réalistes, et nous avons mesuré les paramètres physiologiques associés à ces modes. Nous nous attendions à retrouver les résultats observés lors de notre première expérimentation, à savoir un effet de la contrainte sur l'astreinte, un effet de la contrainte sur l'adoption et la variation des modes de contrôle, et un lien entre modes de contrôle et astreinte, avec notamment une activité cérébrale plus faible pour le mode tactique par rapport aux autres modes.

8.3.1 Liens entre la contrainte et l'astreinte

Premièrement, les analyses concernant le lien entre la contrainte et l'astreinte montrent, comme pour la première expérimentation, un effet de la contrainte sur la VRC, notamment entre les situations liées aux décisions 1 et 3 du scénario de test. Ceci tend à confirmer la différence de contrainte entre les deux situations, dans le sens d'une plus forte contrainte pour la décision 3. Les résultats au niveau des mesures d'activité cérébrale nous confirment également que le scénario test dans sa globalité génère une contrainte plus forte que le scénario contrôle.

8.3.2 Liens entre la contrainte et les modes de contrôle cognitif

La grille d'observation utilisée permet de constater l'instanciation de différents modes de contrôle cognitifs selon les situations qu'ont rencontrées les pilotes. Les résultats montrent, à l'instar de la première expérimentation, un effet de la contrainte de la situation sur le mode de contrôle cognitif instancié par les participants. Nous pouvons observer que pour la situation contrôle, quasi nominale, les pilotes ont tous adopté le mode tactique. Lorsque la situation se complexifiait, notamment lors de la situation où devait être prise la première décision du scénario de test, les résultats mettent en évidence une transition vers le mode stratégique pour la moitié des pilotes. Nous pouvons par ailleurs noter que les pilotes ayant adopté le mode stratégique ont poussé leur réflexion de manière à intégrer la prise en compte des infrastructures aéroportuaires et la facilité du traitement des passagers une fois au sol. Nous pouvons expliquer

la prise en compte de ces facteurs par le fait que ces pilotes étaient des instructeurs, et étaient sensibilisés à l'aspect commercial de l'aviation. Les pilotes n'ayant pas pris en compte ces paramètres étaient des pilotes d'essais, issus du monde militaire, et donc moins sensibilisés à cet aspect commercial. Enfin, plus la contrainte s'intensifiait, plus nous observons des transitions vers des modes plus réactifs, si bien qu'au moment de prendre la décision finale du scénario de test, tous les pilotes ont adopté le mode opportuniste.

8.3.3 Liens entre l'astreinte et les modes de contrôle cognitifs

A l'instar de la première expérimentation, nous avons utilisé plusieurs mesures physiologiques. Nous avons globalement obtenu peu de résultats significatifs, la principale raison étant le faible nombre de pilotes. Cependant, les résultats obtenus semblent confirmer ceux observés lors de la première expérimentation.

Les résultats liés à l'activation cérébrale montrent, pour les optodes 1 (cortex préfrontal dorsolatéral droit) et 5 (cortex préfrontal dorsolatéral gauche) un taux d'oxygénation sanguine plus faible lorsque le mode tactique est adopté par rapport aux modes opportuniste et stratégique. Ce résultat est cohérent avec les observations de notre première expérimentation, à savoir un mode tactique associé à l'astreinte la plus faible. Ceci confirme également le fait que le mode tactique est le plus efficace, associant performance satisfaisante et faible niveau d'astreinte. Ce résultat est par ailleurs cohérent avec les observations de Leon-Carrion *et al.* (2008) et Causse *et al.* (2017) qui mettent en lien les aires préfrontales avec les différentes stratégies mises en place par les opérateurs.

Des mesures de variabilité du rythme cardiaque ont été réalisées au cours des expérimentations. Alors que les résultats ne montrent pas de différence significative au niveau de la SDNN, ils montrent une différence significative entre les ratios LF/HF liés aux différents modes de contrôle cognitifs. En effet, le ratio lié au mode opportuniste est significativement plus faible que celui lié au mode stratégique.

Ce dernier résultat nous semble intéressant. En effet, nous pouvons observer que le ratio est le plus élevé pour le mode stratégique. Un ratio LF/HF élevé démontre une prédominance du système nerveux sympathique sur le parasympathique, qui se traduit par une élévation globale du rythme cardiaque et des activités cataboliques liées. Ceci est cohérent avec la forte charge

de travail notée par les participants ayant instancié ce mode de contrôle. L'analyse approfondie des données de la situation et la recherche d'une solution optimale mobilisent fortement les ressources attentionnelles, ce qui entraîne une potentialisation inévitable de l'activité catabolique, visible donc à travers la dominance du système sympathique.

Ce ratio LF/HF est le plus faible chez les pilotes lors de l'instanciation du mode opportuniste. Ceci est signe d'une dominance du système nerveux parasympathique, se traduisant par une diminution globale du rythme cardiaque (Taelman *et al.*, 2011, Delliaux *et al.*, 2019). Ce mode de contrôle est pourtant, selon Hollnagel (1998), très mobilisateur en ressources attentionnelles. Nous pouvons avancer plusieurs explications à cette observation. L'une des explications pourrait être le fait que les décisions prises en mode opportuniste ne nécessitent pas d'approfondir l'analyse de nombreuses données afin de sélectionner une solution optimale, ce qui est très mobilisateur de ressources attentionnelles. Au contraire, lors des décisions 2 et 3, les pilotes ont sélectionné la première solution qui fonctionnait, rapidement et sans analyser la situation au-delà du nécessaire. Ceci pourrait expliquer en partie la plus faible activité catabolique observée chez les pilotes en mode opportuniste. Une autre explication pourrait être liée à l'expérimentation elle-même. En effet, elle se déroulait dans un simulateur. Bien que celui-ci permette de reproduire les conditions de vol de manière réaliste, les pilotes savent qu'ils ne sont pas dans un avion réel. Aussi, les pilotes testés participent très régulièrement à d'autres expérimentations en simulateur. Ils sont donc habitués aux scénarios difficiles en situation simulée. Ceci pourrait expliquer le faible ratio LF/HF constaté en mode opportuniste. Ceci est également cohérent avec le ratio plus élevé observé en mode stratégique. En effet, bien qu'étant habitués au simulateur, les pilotes devaient tout de même analyser - pour la première décision - les nombreuses données de la situation, ce qui provoque une élévation de l'activité catabolique. Or sur les décisions 2 et 3, les seules contraintes de la situation ne semblent pas suffisantes pour provoquer la même élévation de l'activité catabolique.

Ces résultats confortent les observations réalisées lors de la précédente expérimentation. L'intérêt des mesures cérébrales se confirme ici. En effet, et ce malgré un échantillon faible et un dispositif expérimental se voulant proche de la réalité, l'étude de l'activité cérébrale peut constituer un indicateur d'un changement de mode de contrôle. De la même manière que dans la première expérience, nous pouvons avancer qu'une augmentation de l'activité cérébrale informe de la transition du mode tactique vers un mode plus réactif ou plus proactif. A cela s'ajoutent les résultats via les mesures cardiaques. Les résultats obtenus via le ratio LF/HF nous

permettent de distinguer, ici, l'adoption du mode opportuniste d'une part et celle du mode stratégique d'autre part.

Enfin, notons que cette étude présente des limites. La première limite provient du faible échantillon de pilotes. Une campagne expérimentale sur une durée plus longue serait nécessaire afin d'être en capacité de recruter davantage de pilotes. La seconde limite est caractérisée par la durée des situations au cours desquelles les pilotes étaient confrontés à des points de décision. En effet, pour la première décision du scénario test, les pilotes analysaient les options pendant environ 15 minutes avant d'en sélectionner une. Pour les décisions 2 et 3 de ce même scénario, la durée de réflexion n'excédait pas 10 secondes. L'inégalité de ces temporalités est inévitable lorsque l'on souhaite réaliser un scénario s'approchant de la réalité. En effet, le mode opportuniste est caractérisé par une forte pression temporelle subjective, c'est-à-dire un faible budget temporel. Ainsi, pour une décision prise en mode opportuniste, une longue analyse d'options est impossible. Cette limite peut avoir eu un impact sur le résultat de la figure 45, présentant l'effet de l'exigence temporelle sur le mode de contrôle cognitif instancié. En effet, il est possible que l'effet observé soit en partie dû au fait que les décisions contrôle et 1, présentant des tâches requérant l'instanciation d'un mode proactif, aient été prises dans des situations présentant une faible pression temporelle, tandis que les décisions 2 et 3 devaient être prises dans des situations présentant une forte pression temporelle, menant inévitablement à l'instanciation d'un mode réactif. On peut cependant imaginer que les modes de contrôle cognitifs sont fortement influencés par la pression temporelle ; en effet, s'il est possible que même sous faible pression temporelle, un opérateur puisse instancier un mode réactif, il semble très peu probable d'observer l'instanciation d'un mode proactif sous forte pression temporelle. La pression temporelle est même l'un des éléments clés de l'instanciation d'un mode de contrôle cognitif. Dans tous les cas, l'exploration de l'effet de la pression temporelle sur l'instanciation des modes de contrôle cognitifs mériterait que l'on s'y attarde dans de futures études, en tentant d'observer l'instanciation de différents modes de contrôle cognitifs lors de tâches présentant le même budget temporel, ce qui nous permettrait d'observer l'influence des autres facteurs de contrainte sur l'adoption des différents modes.

Finalement, cette étude exploratoire pose les bases de futures études plus poussées qu'il serait intéressant de réaliser. Afin d'obtenir des temporalités égales entre les situations où les pilotes adoptent un mode stratégique, et celles où le mode opportuniste est adopté, il serait judicieux, par exemple, de réaliser des scénarios distincts pour ces deux modes, d'une durée égale. Pour observer le mode stratégique, un scénario d'une vingtaine de minutes serait conçu de manière

à inciter les pilotes à analyser des options de manière approfondie afin de prendre une décision finale. Ensuite, pour observer le mode opportuniste, un scénario d'une durée égale au précédent serait conçu, mais présentant des situations où de multiples décisions devraient être prises successivement. Ce scénario, moins représentatif de la réalité, permettrait cependant d'observer l'instanciation du mode opportuniste pendant une durée relativement longue.

8.4 CONCLUSION

A l'instar de notre première expérimentation (chapitre 7), cette étude explore le lien entre les modes de contrôle cognitifs et la charge mentale, mais dans une situation qui se rapproche de la réalité. Comme précédemment, les transitions entre les modes de contrôle cognitif se sont accompagnées de variations de niveaux de charge mentale. D'abord en mode tactique, l'élévation de la contrainte a conduit les pilotes à instancier des modes associés à une plus forte astreinte, ce que nous avons pu détecter à l'aide de la fNIRS, et ce malgré un faible échantillon. De plus, les résultats indiqués par la VRC au niveau du ratio LF/HF tendent à montrer une possibilité de pouvoir distinguer les modes stratégique et opportuniste. Ces résultats laissent imaginer la possibilité de mettre en place de moyens d'évaluation multimodaux de l'astreinte (fNIRS et VRC). Dans le futur, ces résultats pourraient être utiles à l'étude d'assistances adaptatives, comme le suggérait la conclusion de notre précédente expérimentation, pour soutenir les opérateurs dans l'adoption du mode tactique lorsque la situation se complexifie.



CONCLUSION GENERALE DE LA PARTIE EMPIRIQUE

Le thème général de cette recherche est relatif à la prise de décision. Il s'agit de comprendre les mécanismes de prise de décision ainsi que les facteurs de dégradation susceptibles de les altérer. Nous souhaitons, dans la partie expérimentale, explorer les liens existants entre la contrainte, le contrôle cognitif et l'astreinte, ainsi que l'impact de ces liens sur la prise de décision.

Les travaux réalisés permettent de mieux comprendre ces liens, d'explorer les influences qu'exercent ces trois facteurs ainsi que leurs interactions. Deux études expérimentales ont été menées. Elles avaient pour but d'explorer ces liens en plaçant les opérateurs en contrôle d'un système dynamique, avec un certain nombre de tâches et d'objectifs. La première a eu lieu en laboratoire, en plaçant des étudiants face à une tâche informatisée de MATB-II. La seconde a

eu lieu dans un simulateur de vol ; elle a confronté des pilotes professionnels à des scénarios réalistes.

Les résultats de la première expérimentation ont mis en évidence les liens entre la contrainte, l'astreinte et le contrôle cognitif. Nous avons observé un effet de la contrainte sur l'astreinte, notamment sur la VRC, la fNIRS s'y étant montrée peu sensible. Nous avons également observé un effet de la contrainte sur le contrôle cognitif, avec notamment une instabilité du mode tactique, instancié préférentiellement lorsque la contrainte est faible, et abandonné au profit de modes plus réactifs lorsque la contrainte s'intensifie. Les modes brouillé et stratégique ont montré une certaine stabilité quelle que soit la contrainte. Nous avons enfin observé des liens entre le contrôle cognitif et l'astreinte, notamment par une activité cérébrale plus faible en mode tactique.

La seconde expérimentation a confirmé les liens observés dans la première expérimentation. L'examen des liens entre contrainte et astreinte montre un effet de la contrainte sur la VRC. Les liens entre contrainte et contrôle cognitif confirment l'adoption du mode tactique lorsque la contrainte est faible, avec des transitions vers les modes stratégique ou opportuniste en fonction de l'intensification de la contrainte. Enfin l'examen des liens entre contrôle cognitif et astreinte met en évidence une activité cérébrale plus faible pour le mode tactique que pour les autres modes, et un ratio LF/HF plus faible en mode opportuniste qu'en mode stratégique.

D'une façon générale, les résultats obtenus montrent que les opérateurs adoptent préférentiellement le mode tactique lorsque la contrainte est faible à modérée. D'après Hollnagel (1998), le mode tactique est adopté lorsque les opérateurs sont dans une situation bien connue ou lorsqu'ils doivent suivre strictement des procédures. Ces explications sont cohérentes avec les observations faites lors de nos expérimentations. En effet, lorsque la contrainte s'intensifiait, les opérateurs adoptaient d'autres modes de contrôle. Le mode tactique s'accompagne, de plus, de l'astreinte la plus faible. Le niveau de charge mentale, évalué notamment par la mesure de l'activité du cortex préfrontal avec une fNIRS, était effectivement moins élevé pour le mode tactique que pour les autres.

Ces résultats nous amènent à conclure que le mode tactique est le plus efficient. En effet, les résultats obtenus lors de la seconde expérimentation montrent - pour la décision de déroutement - que la moitié des pilotes ont conservé le mode tactique, aboutissant tout de même à une décision adéquate, même si elle ne prenait pas en compte les considérations opérationnelles,

telles que la prise en charge des passagers vers leur destination, ou la facilité de réparation de l'avion sur place. L'adoption du mode tactique s'est accompagnée d'un niveau de charge mentale plus faible que chez les pilotes ayant adopté le mode stratégique pour la même décision. La finalité chez les deux groupes de pilotes était la même, c'est-à-dire poser l'avion en sécurité sur un terrain adapté ; seul changeait le côté opérationnel. Donc pour la même décision adéquate, les pilotes ayant adopté le mode tactique ont eu un niveau d'astreinte plus faible que pour ceux ayant adopté le mode stratégique, nous faisant dire que le mode tactique est plus efficient. Il représente ainsi un compromis cognitif optimal dans des situations à forte contrainte temporelle, et constitue donc le mode vers lequel diriger des opérateurs qui auraient adopté des modes réactifs.

Nous notons également une instabilité de ce mode. En effet, lorsque la contrainte augmentait, nous avons observé des transitions depuis ce mode vers des modes moins efficients. Outre le mode stratégique, nous avons également observé beaucoup de transitions vers des modes plus réactifs, tels que l'opportuniste, ou même le brouillé dans notre expérimentation en laboratoire. Nous avons notamment observé une certaine stabilité dans l'adoption de ces autres modes. Considérant que le mode le plus efficient est le mode tactique, l'une des pistes à explorer serait de mettre en place des moyens pour aider les opérateurs à conserver ce mode. Afin d'être en capacité de rediriger efficacement les opérateurs vers ce mode notamment depuis les modes dégradés (opportuniste et brouillé), il faut être en capacité de les distinguer, ce que nous avons pu réaliser notamment à l'aide de la fNIRS.

Ceci permet de mettre l'accent sur les mesures neuroergonomiques réalisées à l'aide de la fNIRS. Les résultats obtenus à l'aide de cet outil nous ont permis de discriminer différents niveaux d'activité cérébrale liés à différents niveaux de contrainte, aussi bien en conditions de laboratoire qu'en situation proche de la réalité ; des résultats similaires à ceux obtenus par les études citées dans le chapitre 4 (Takeuchi, 2000 ; Ayaz *et al.*, 2012 ; Durantin *et al.*, 2014 ; Causse *et al.*, 2017 ; Dehais *et al.*, 2018). Nous avons également pu lier les résultats obtenus aux modes de contrôle cognitif, comme le suggéraient les études de Miller (2000), Niendam *et al.* (2012), Braver (2012), Ryman *et al.* (2018) et Mäki-Marttunen, Hagen et Espeseth (2019). Nous avons, comme énoncé plus haut, été en mesure de distinguer le mode tactique des autres modes. Ceci confirme le bien-fondé des suggestions des études énoncées ci-dessus, désignant les mesures neuroergonomiques, et notamment de fNIRS, comme étant prometteuses (Young *et al.*, 2015). Cependant, des études comme celles citées plus haut et comme ce travail de thèse

méritent d'être approfondies, pour qu'il soit possible de discriminer plus de modes de contrôle cognitif et d'apporter à terme le bon niveau d'assistance aux opérateurs.



CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté dans ce manuscrit de thèse aborde la problématique de la prise de décision des pilotes de l'aviation commerciale. L'introduction générale mettait en exergue deux enjeux : la compréhension des facteurs affectant la prise de décision des pilotes, et l'optimisation de la coopération homme-machine pour accompagner la définition d'assistance au sein des cockpits. Ces enjeux nous ont conduits à définir notre question de recherche : **comment évaluer la dégradation de la prise de décision chez les pilotes, que celle-ci soit due à des facteurs exogènes ou endogènes.**

La partie théorique de cette thèse nous a amené à mettre l'accent sur un facteur de dégradation de la prise de décision (*i.e.* la charge mentale) et sur un mécanisme sous-jacent à la prise de décision (*i.e.* le contrôle cognitif). La prise de décision repose en effet sur différents modes de contrôle cognitif (sub-symboliques vs symboliques/ réactifs vs proactifs) qui sont plus ou moins coûteux. La flexibilité cognitive permet aux individus d'adapter ces processus aux caractéristiques de la situation, de façon à obtenir un compromis cognitif optimal.

Elle nous a conduits à formuler la problématique suivante : **Peut-on relier le contrôle cognitif et la charge mentale, et ainsi utiliser des mesures neurophysiologiques et physiologiques (cardiaques) pour détecter des variations de comportement lors de la prise de décision ?**

Nous avons également identifié quatre questions découlant de cette problématique :

Q1. Quelles sont les situations et les fonctions de travail qui peuvent amener des changements de mode de contrôle cognitif dans le domaine aéronautique ?

Q2. Comment peut-on opérationnaliser l'évaluation du mode de contrôle cognitif, au moyen de mesures comportementales et neurophysiologiques ?

Q3. Le niveau d'expertise a-t-il une influence sur les modes de contrôle instancié ?

Q4. Peut-on observer et valider expérimentalement les relations entre le mode de contrôle cognitif instancié, le niveau de contrainte de la situation et le niveau d'astreinte de l'opérateur ?

Q1. L'analyse de l'activité des pilotes à l'aide de la CWA nous a amené à identifier la situation de déroutement obligeant à sélectionner un nouveau terrain d'atterrissage en vol, comme susceptible d'amener les pilotes à adopter différents modes de contrôle cognitif.

Q2. Les deux expérimentations nous ont amené à opérationnaliser la notion de contrôle cognitif à l'aide d'analyses de la performance (expérience 1) ou d'analyses comportementales associées à des verbatims (expérience 2). Conjointement à l'adoption des différents modes cognitifs identifiés grâce à ces analyses préliminaires, nous avons observé différents niveaux d'activation cérébrale à l'aide de la fNIRS ; plus particulièrement, nous avons réussi à distinguer l'instanciation du mode tactique par rapport aux autres modes. Nous avons également, lors de la seconde expérimentation, pu distinguer les modes stratégique et opportuniste à l'aide de la VRC. Ces résultats apportent une réponse à notre question, dans le sens où nous avons pu distinguer les modes de contrôle cognitifs du modèle COCOM d'opérateurs en situation dynamique à l'aide de mesures neurophysiologiques et physiologiques, ce qui à notre connaissance n'avait pas encore été observé.

Q3. Les deux expérimentations menées apportent également une réponse à la question de l'effet du niveau d'expertise sur le mode de contrôle cognitif instancié. Lors de la première expérimentation, avec des étudiants (considérés comme des participants novices), un certain nombre de participants ont instancié le mode brouillé, chose qui n'a pas été observée chez les pilotes (considérés comme des participants experts) de la seconde expérimentation. Ensuite,

lors de la seconde expérimentation, nous avons observé, pour la même décision, l'instanciation de deux modes de contrôle cognitifs en fonction du passé des participants : tactique pour les pilotes n'ayant pas d'expérience de l'aviation commerciale (par exemple les ex-militaires), stratégique pour ceux ayant une expérience de l'aviation (par exemple les ex-pilotes de ligne et les instructeurs). Ceci tient au fait que les ex-pilotes de ligne sont formés au côté opérationnel de l'aviation commerciale, ce que sont moins les ex-militaires ; ils ont ainsi pris en compte des paramètres permettant de maximiser l'efficacité sur ce plan (facilité du transfert de passagers, réparation de l'avion sur place, etc.). Ceci nous amène à considérer les caractéristiques de la population de pilotes de lignes à travers le monde. En effet, ceux-ci présentent des cultures différentes en fonction des compagnies, des manières de travailler différentes, ainsi que des niveaux d'expérience différents. Il serait intéressant de tester l'effet de cette variabilité sur l'instanciation des modes de contrôle cognitifs. Enfin, d'une manière générale, nous avons observé une plus grande homogénéité des modes de contrôle cognitifs instanciés chez la population de pilotes (les experts de notre seconde expérience) que la population d'étudiants (les novices de notre première expérience). Les novices, pour une même tâche MATB et avec le même entraînement, adoptaient des modes de contrôle cognitif pouvant être très différents, allant du brouillé au stratégique pour une tâche de faible complexité. Les experts au contraire, pour une même situation en simulateur, adoptaient tous plus ou moins les mêmes modes de contrôle cognitif, proactifs lorsque la contrainte est faible à modérée, réactifs lorsque la contrainte est forte, sans jamais instancier le mode brouillé. Nous pouvons ainsi avancer le fait que l'expertise permet d'obtenir une certaine homogénéité dans l'instanciation des modes de contrôle cognitif chez les opérateurs, et permet de toujours être en mesure d'agir de manière adéquate dans une situation donnée, en évitant l'instanciation du mode brouillé. Il serait par ailleurs intéressant de vérifier ce point avec une plus grande population de pilotes, comprenant débutants et expérimentés. Pour une telle expérimentation, et pour une même situation en simulateur de vol, nous pouvons faire l'hypothèse que les pilotes expérimentés montreront, comme vu ici, une certaine homogénéité dans l'instanciation des modes de contrôle cognitifs, tandis que les débutants montreront l'adoption de modes de contrôle plus variés, voire inadéquats.

Q4. Ces deux expérimentations permettent enfin de répondre à la question des relations entre le mode de contrôle cognitif instancié, le niveau de contrainte de la situation et le niveau de l'astreinte de l'opérateur. Lors des deux expérimentations, nous avons observé que lorsque la contrainte était faible à modérée, les participants instanciaient le mode tactique. Lorsque la

contrainte augmentait, on pouvait observer des transitions vers le mode stratégique. Plus la contrainte augmentait, plus nous observions de transitions vers les modes les plus réactifs, tels que l'opportuniste ou le brouillé. Ces observations nous permettent de valider le lien entre la contrainte et le mode de contrôle cognitif instancié. Nous avons également observé un lien entre la contrainte et l'astreinte, grâce notamment à la mesure de la VRC, qui s'est montrée la plus sensible à la contrainte. La fNIRS s'est montrée moins sensible à la contrainte pure, mais a permis de montrer un lien en particulier entre les modes de contrôle cognitifs et l'astreinte. Comme nous l'avons déjà souligné, la fNIRS nous a permis de distinguer différents modes de contrôle cognitifs, notamment le mode tactique par rapport aux autres. La VRC s'est également montrée sensible aux modes de contrôle cognitifs, en particulier aux modes stratégique et opportuniste. Ces observations permettent ainsi de valider l'existence d'un lien entre les modes de contrôle cognitif et l'astreinte. Elles nous permettent également d'avancer que le mode tactique est le plus efficient, associant performance adéquate et astreinte limitée.

Les réponses apportées aux quatre questions posées ci-dessus permettent d'apporter une réponse à la problématique que nous avons formulée. Nos expérimentations ont mis en évidence le lien entre contrôle cognitif et charge mentale, à l'instar de ce que pouvaient montrer d'autres auteurs (Hockey, 1997 avec les questions de régulation ; Cegarra *et al.*, 2017 avec une étude portant sur le lien entre charge mentale et niveaux SRK). Plus particulièrement, nous avons montré l'existence d'un lien entre la charge mentale et les modes de contrôle cognitifs du modèle COCOM. Nous avons montré qu'il est possible d'utiliser les mesures neurophysiologiques pour distinguer certains modes de contrôle cognitif mis en œuvre par les opérateurs lors de la prise de décision. Cela ouvre des perspectives intéressantes pour la définition d'assistances dans les futurs cockpits et, à terme, l'étude d'aides adaptatives non basées sur la détection d'une « surcharge » mentale pour adapter le système, mais sur l'identification d'un contrôle cognitif inadapté, insuffisant pour garantir la maîtrise de la situation.

APPORTS DE LA THESE

Nous pouvons identifier trois apports majeurs de ce travail de thèse : théorique, méthodologique et pratique.

D'un point de vue théorique, ce travail montre qu'il peut être intéressant d'aborder la prise de décision par le prisme du mode de contrôle cognitif adopté par un opérateur. Celui-ci détermine en effet fortement les capacités d'analyse de la situation. Nous avons choisi d'opérationnaliser la notion de « mode de contrôle » en nous appuyant sur le modèle COCOM qui prend en compte d'une part la contrainte temporelle qui s'exerce sur les opérateurs (le *temps subjectif disponible*) et d'autre le caractère plus ou moins familier et prédictible de la situation. Ce modèle apparaît donc pertinent lorsque l'on s'intéresse à la prise de décision dans des situations dynamiques et imprévues.

Le modèle COCOM est très différent du modèle SRK de Rasmussen qui rend compte du caractère sub-symbolique ou symbolique du contrôle. Ces deux modèles se recouvrent toutefois en partie quand ils font état du mode le plus fréquemment utilisé par les experts : ce mode est appelé « tactique » dans le modèle COCOM et mode basé sur les règles (*Rule-based*) dans la taxonomie SRK. Il est également clairement identifié dans le *Recognition Primed Decision* de Klein (1996).

Les modes de contrôle cognitifs décrits par COCOM permettent de décrire les adaptations que réalisent les opérateurs en réponse à la contrainte et à l'astreinte. L'expérimentation en laboratoire que nous avons réalisée met en évidence le rôle modérateur du contrôle cognitif sur la relation contrainte-astreinte. Ainsi, en réponse à une augmentation de la contrainte et de la charge mentale, une transition se fera vers un mode de contrôle plus adapté à la situation, afin d'apporter une réponse adéquate à la situation tout en gardant un niveau d'astreinte modéré.

D'un point de vue méthodologique, ce travail propose d'opérationnaliser le codage des modes de contrôle cognitif du modèle COCOM. Ce codage s'est effectué en analysant des variations de comportement ou de stratégies, soit à partir de la marge prise par rapport aux valeurs de consigne de la tâche principale (dans l'expérimentation MATB-II), soit en analysant les informations et les options considérées par les pilotes (dans l'expérimentation sur simulateur Airbus).

Cette thèse a également montré qu'il est intéressant de coupler différentes sources de mesures (notamment un capteur ECG et un capteur fNIRS). Ici, nous n'avons pas travaillé sur la fusion de données pour rendre plus robuste un indicateur synthétique de charge mentale (comme cela avait été proposé dans la thèse de Kostenko en 2017), le but étant plutôt de discriminer et de spécialiser les indicateurs neurophysiologiques de l'astreinte en fonction de la contrainte ou du mode de contrôle cognitif. Nous avons ainsi pu voir que la variabilité du rythme cardiaque (capteur ECG) était sensible aux variations de la contrainte (notamment à la pression temporelle

et au nombre de tâches simultanées), alors que les indicateurs HbO₂ (capteur fNIRS) pouvaient être liés au mode de contrôle cognitif.

Par ailleurs, la première expérimentation s'est déroulée dans un environnement expérimental pertinent pour le domaine (MATB-II étant défini par ses concepteurs comme une métaphore d'activités de pilotage d'avion), qui avait également été choisi par Cegarra *et al.* (2017) pour étudier le contrôle cognitif. Il est intéressant de noter que ce micro-monde expérimental connaît un essor récent dans la communauté des neurosciences cognitives et de la neuroergonomie, où il tend à devenir une situation expérimentale de référence pour travailler sur l'activité cognitive et les liens avec l'activation physiologique. De récents « clones » open-source de MATB-II ont ainsi été développés en 2020 (Open MATB, Cegarra *et al.*, 2020, ou ICUa, développé par la Royal Holloway University of London), amenant notamment des fonctionnalités pour l'intégration des capteurs neurophysiologiques dans MATB, mais également la possibilité de piloter des assistances visuelles à partir de l'état de l'opérateur.

Il serait donc envisageable de poursuivre nos travaux de thèse, en repartant des scénarios que nous avons définis, et en ajoutant des propositions d'interface ou d'automatisation à intégrer à un cockpit du futur.

Enfin, les deux expérimentations, assez voisines en termes de méthodologie et d'analyse, ont permis d'explorer la relation entre charge mentale et contrôle cognitif sur des populations distinctes (novices *versus* experts) qu'il est toujours important de comparer, et avec une construction incrémentale concernant la complexité des scénarios. Nous avons en effet cherché une validation initiale de notre approche sur le micro-monde MATB-II en laboratoire, et nous avons ensuite mené une expérimentation dans un simulateur sur un scénario défini avec des experts du domaine au sein d'Airbus, pour mettre à l'épreuve la validité écologique de la démarche.

D'un point de vue pratique, les résultats obtenus dans cette thèse montrent que les mesures neuro-physiologiques, en particulier les mesures fNIRS, permettent de détecter les modes de contrôle cognitifs dans un contexte s'approchant des conditions écologiques. Ce résultat est prometteur car, si d'autres travaux portent sur les liens entre activité cognitive et activité cérébrale (Causse, Dehais, Péran, Sabatini & Pastor, 2013 ; Behrend & Dehais, 2020 ; Braver, Kizhner, Tang, Freung & Etzel, 2020 ; Freund, Etzel & Braver, 2020), peu d'entre eux ont été réalisés dans un contexte expérimental réel ou s'approchant de la réalité (certains travaux récents vont dans ce sens, tels Dehais *et al.*, 2018 ; Gateau *et al.*, 2018).

La possibilité de réaliser des mesures neuro-physiologiques dans un environnement écologique pourraient ainsi nous permettre, dans le futur, de détecter en temps réel le mode de contrôle cognitif instancié par un pilote, afin d'évaluer sa prise de décision. Ceci ouvre la voie à la mise en place d'assistances pouvant s'adapter au contrôle cognitif adopté. Etant donné que les modes de contrôle proactifs sont plus efficaces que les modes réactifs, nous pouvons imaginer le déclenchement d'assistances adaptatives lorsqu'un mode de contrôle réactif est adopté, ou sur le point de l'être. Ces assistances pourraient aider le pilote à prélever les informations pertinentes en fonction du contexte, ou le guider dans ses actions. Des contre-mesures peuvent également être imaginées afin d'aider le pilote à quitter un mode de contrôle dégradé. Jahanpour, Fabre, Dehais & Causse (2018) étudient par exemple l'affichage d'une animation sur les écrans représentant l'action à réaliser afin de guider le pilote. Saint-Lot, Imbert et Dehais (2020) ont, eux, étudié l'efficacité de la génération d'un flash lumineux rouge afin de réduire la focalisation attentionnelle.

Ainsi, lorsque la situation se complexifie, ces assistances permettraient au pilote de maintenir un mode de contrôle tactique en modulant deux des trois paramètres indiqués par le modèle COCOM comme influençant le mode de contrôle adopté : *i)* le nombre et le type de données, en affichant uniquement les données pertinentes de manière claire et synthétique, et *ii)* le nombre de buts, en réallouant certaines actions ou certaines fonctions au système.

LIMITES ET PERSPECTIVES

La première limite concerne le nombre de participants. Dans la première comme dans la seconde expérimentation, le nombre de participants était faible. Malgré les résultats obtenus, ces faibles échantillons peuvent masquer certains phénomènes, comme par exemple une sensibilité accrue de la VRC aux modes de contrôle, ou encore des différences plus marquées de l'activité cérébrale en fonction des modes de contrôle. Les limites temporelles du contexte de cette thèse n'ont pas permis de recruter plus de participants. Ainsi, afin de consolider les résultats obtenus et les liens mis en évidence, les futures études devront s'appuyer sur des échantillons plus conséquents.

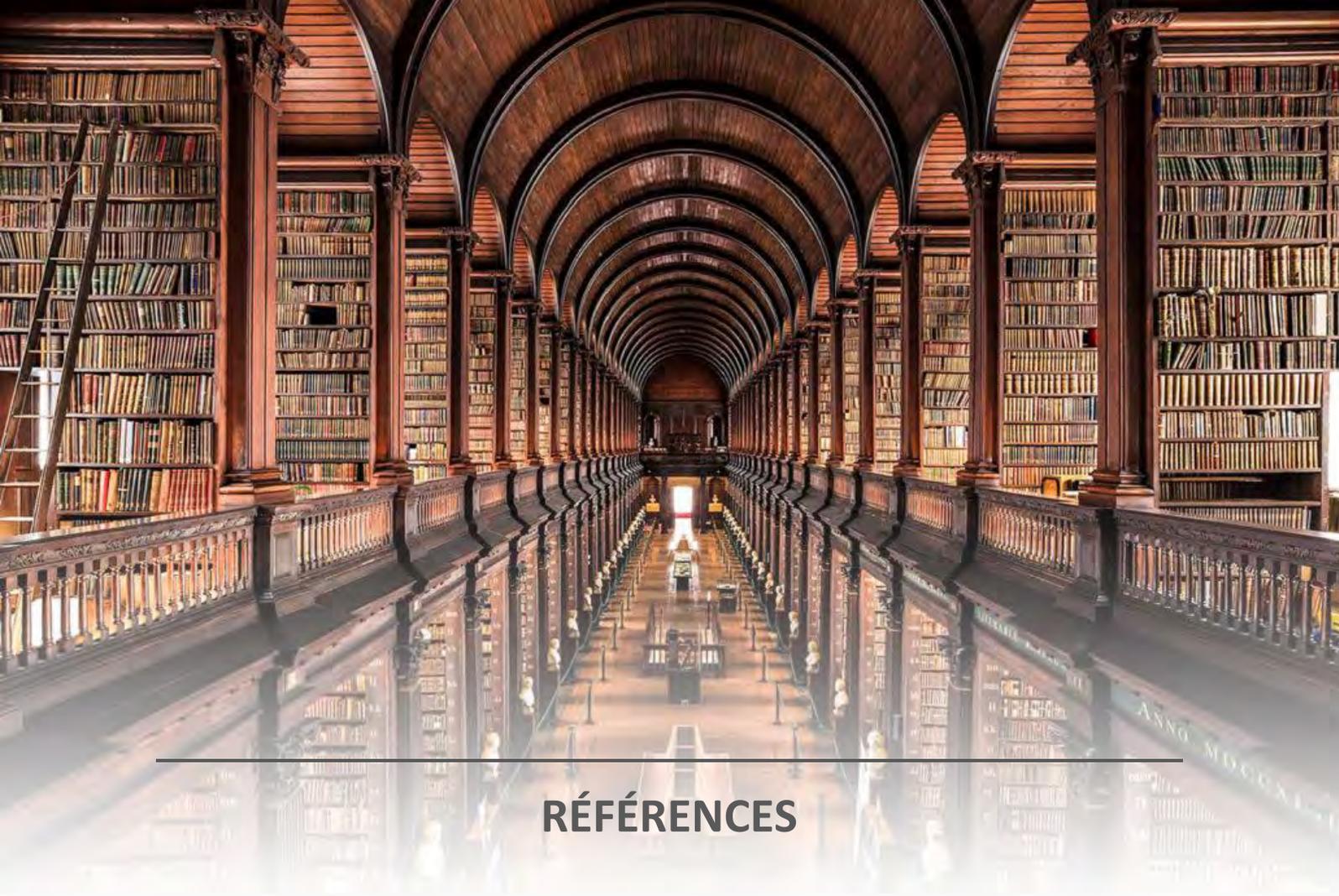
Comme évoqué en discussion de la seconde expérimentation, la seconde limite concerne l'observation des modes de contrôle cognitifs. Les différents modes n'ont pas été observés pendant les mêmes laps de temps (quelques minutes pour les modes les plus proactifs, à quelques secondes pour les modes les plus réactifs). Si ces différences de temporalité sont

caractéristiques des modes de contrôle cognitifs observés, il serait pertinent, lors de futures études, de concevoir des expérimentations permettant l'observation des différents modes de contrôle durant les mêmes laps de temps.

Il nous semble également intéressant, pour les études à venir, d'intégrer l'utilisation de l'eyetracking afin d'obtenir des précisions sur les informations utilisées par les pilotes lors de la prise de décision.

Enfin, il serait utile d'explorer les liens mis en évidence dans ce travail de thèse en conditions réelles, de façon à mieux appréhender les spécificités des activités des pilotes en compagnie aérienne.

En guise de synthèse, ces travaux, s'inscrivant dans le courant de la neuroergonomie, ont permis de faire le lien entre les mesures neurophysiologiques et les modes de contrôle cognitif. Des différences significatives entre le mode tactique et les autres modes ont en effet pu être observées sur différents indicateurs, notamment ceux provenant de la fNIRS. La possibilité de distinguer ces variations neurophysiologiques, et par conséquent ces changements de mode, ouvre de nouvelles perspectives pour la conception et le déclenchement d'assistances, que ce soit en termes d'adaptation de l'affichage des informations, ou en termes d'allocation dynamique des fonctions. Ces assistances, lorsque la situation se complexifie, pourront ainsi aider à maintenir les opérateurs dans un mode tactique, qui semble être le plus efficient.



RÉFÉRENCES

Ahlstrom, U. (2005). Work domain analysis for air traffic controller weather displays. *Journal of Safety Research*, 36, 159–169.

Airbus S.A.S. *A320 Flight Crew Operating Manual*.

Allianz & Embry-Riddle Aeronautical University (2020). *Aviation Risk 2020, Safety and the state of the Nation*.

Amalberti, R. & Deblon, F. (1992). Cognitive modelling of fighter aircraft process control: a step towards an intelligent on-board assistance system. *International journal of man-machine studies*, 36(5), 639-671.

Amalberti, R. (1996). *La conduite de systèmes à risque*. Le travail humain.

Amalberti, R. (2001). La maîtrise des situations dynamiques. Cellier JM, Hoc JM (eds). La gestion des environnements dynamiques, *Psychologie Française*, 46(2), 107-118.

Amalberti, R. (2013). Human error at the centre of the debate on safety. In *Navigating Safety* (pp. 19-52). Springer, Dordrecht., R.

Amalberti, R. (2017). The paradoxes of almost totally safe transportation systems. *Human Error in Aviation*, 101-118.

Australian Transport Safety Bureau (2007). Human factors analysis of Australian aviation accidents and comparison with the United States. ATSB Transport Safety Investigation Report, Aviation Research and Analysis Report, B2004/0321, Final.

Ayaz, H., Shewokis, P.A., Bunce, S., Izzetoglu, K., Willems, B. & Onaral, B. (2012). Optical brain monitoring for operator training and mental workload assessment. *NeuroImage*, 59(1), 36-47.

Baek, H.J., Cho, C-H, Cho, J & Woo, J-M (2015). Reliability of Ultra-Short-Term Analysis as a Surrogate of Standard 5-Min Analysis of Heart Rate Variability. *Telemedicine and e-Health*, 21(5), 404-414.

Bahner, J. E., Hüper, A.-D., & Manzey, D. (2008). Misuse of automated decision aids: Complacency, automation bias and the impact of training experience. *International Journal of Human-Computer Studies*, 66(9), 688–699.

Bailey, R. E., Kramer, L. J., Kennedy, K. D., Stephens, C. L., & Etherington, T. J. (2017, September). An assessment of reduced crew and single pilot operations in commercial transport aircraft operations. In *2017 IEEE/AIAA 36th Digital Avionics Systems Conference (DASC)* (pp. 1-15). IEEE.

Bainbridge, L. (1987). Ironies of automation: increasing levels of automation can increase, rather than decrease, the problems of supporting the human operator. *New technology and human error*. Chichester, UK: Wiley, 276-283.

Banbury, S., Tremblay, S., Rousseau, R, Forbes, K. & Breton, R. (2008). Applying the Contextual Control Model (COCOM) to the Identification of Situation Awareness Requirements for Tactical Army Commanders. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 52(19), 1402-1406.

Barrouillet, P. (1996). Ressources, capacités cognitives et mémoire de travail : postulats, métaphores et modèles : La charge mentale. *Psychologie française*, 41(4), 319-338.

Bartlett, F. C. (1932). *Remembering: A study in experimental and social psychology*. London: Cambridge University Press.

Bartlett, F. C. (1943). Ferrier Lecture-Fatigue following highly skilled work. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B-Biological Sciences*, 131(864), 247-257.

Bates, D.M., Maechler, M., Bolker, B. (2012). lme: Linear mixed-effects using S4 classes. *R package version 0.999999-0*

Bedny, G.Z., Karwowski, W. & Jeng, O. (2004). The situational reflection of reality in activity theory and the concept of situation awareness in cognitive psychology. *Theoretical Issues in Ergonomics Science* 5/4: 275-296.

Behrend, J., & Dehais, F. (2020). How role assignment impacts decision-making in high-risk environments: Evidence from eye-tracking in aviation. *Safety science*, 127, 104738.

Bundesstelle für Flugunfalluntersuchung. (2004). *Final report: Review of the BFU Überlingen accident report*. https://www.bfu-web.de/DE/Publikationen/Untersuchungsberichte/2002/Bericht_02_AX001-1-2.pdf?__blob=publicationFile

Bilimoria, K. D., Johnson, W. W., & Schutte, P. C. (2014). Conceptual framework for single pilot operations. In *Proceedings of the international conference on human-computer interaction in aerospace* (pp. 1-8).

Billings, C. (1996). *Human-Centered Aviation Automation: Principles and Guidelines*. National Aeronautics and Space Administration. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19960016374>

Bisantz, A.M., Roth, E., Brickman, B., Gosbee, L.L., Hettinger, L. & McKinney, J. (2003). Integrating cognitive analyses in a large-scale system design process. *International Journal of Human-Computer Studies*, 58, 177–206.

Blasch, E., Paces, P., & Leuchter, J. (2014, October). Pilot timeliness of safety decisions using information situation awareness. In *2014 IEEE/AIAA 33rd Digital Avionics Systems Conference (DASC)* (pp. 7D6-1). IEEE.

Boas, D.A., Dale, A.M., & Franceschini, M.A. (2004). Diffuse optical imaging of brain activation: approaches to optimizing sensitivity, resolution, and accuracy. *NeuroImage*, 23, 275-288.

Boksem, M. A., Meijman, T. F., & Lorist, M. M. (2005). Effects of mental fatigue on attention: an ERP study. *Cognitive brain research*, 25(1), 107-116.

Bonner, M. A., & Wilson, G. F. (2002). Heart rate measures of flight test and evaluation. *The International journal of aviation psychology*, 12(1), 63-77.

Borghini, G., Isabella, R., Vecchiato, G., Toppi, J., Astolfi, L., Caltagirone, C. & Babiloni, F. (2011). Brainshield HREEG study of perceived pilot mental workload. *Italian Journal of Aerospace Medicine*, 5, 34–47.

Borghini, G., Astolfi, L., Vecchiato, G., Mattia, D., & Babiloni, F. (2014). Measuring neurophysiological signals in aircraft pilots and car drivers for the assessment of mental workload, fatigue and drowsiness. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 44, 58-75.

Borghini, G., Aricò, P., Di Flumeri, G., Cartocci, G., Colosimo, A., Bonelli, S., ... & Pozzi, S., 2017. EEGbased cognitive control behaviour assessment: an ecological study with professional air traffic controllers. *Scientific reports*, 7(1), 1-16.

Bourgeon, L. (2011). *Mécanismes cognitifs et rôle du collectif dans la persévération : gestion d'événements imprévus dans l'activité de pilotage militaire*. Thèse de l'Université de Toulouse 2 Jean Jaurès.

Boy, G. A. (2014). From automation to tangible interactive objects. *Annual Reviews in Control*, 38(1), 1-11.

Braver, T. S. (2012). The variable nature of cognitive control: a dual mechanisms framework. *Trends in cognitive sciences*, 16(2), 106-113.

Braver, T. S., Kizhner, A., Tang, R., Freund, M. C., & Etzel, J. A. (2020). The dual mechanisms of cognitive control (dmcc) project. *bioRxiv*.

Broadbent, D. (1958). *Perception and communication*. London, Pergamon Press.

Brooking, A. (1996). *Intellectual Capital: Core Assets for the Third Millennium Enterprise*. London: Thomson Business Press.

Brookhuis, K. A., & De Waard, D. (2000). Assessment of drivers' workload: performance, subjective and physiological indicators. *Stress, Workload and Fatigue*. Mahwah, New Jersey, USA: Lawrence Erlbaum Associates.

Brown, J. P. (2016). The effect of automation on human factors in aviation. *The Journal of Instrumentation, Automation and Systems*, 3(2), 31-46.

Burns, C.M., & Hajdukiewicz, J. (2004). *Ecological interface design*. CRC Press.

Burns, C.M., Momtaham, K. & Enomoto, Y. (2006). Supporting the strategies of cardiac nurse coordinators using cognitive work analysis. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 50th Annual Meeting, HFES 2006*, 442-446.

Castaldo, R., Montesinos, L., Melillo, P., James, C. & Pecchia, L. (2019). Ultra-short term HRV features as surrogates of short term HRV: a case study on mental stress detection in real life. *BMC Medical Informatics and Decision Making*, 19(12).

Causse, M., Dehais, F., Péran, P., Sabatini, U., & Pastor, J. (2013). The effects of emotion on pilot decision-making: A neuroergonomic approach to aviation safety. *Transportation research part C: emerging technologies*, 33, 272-281.

Causse, M., Chua, Z., Peysakhovich, V., Del Campo, N. & Matton, N. (2017). Mental workload and neural efficiency quantified in the prefrontal cortex using fNIRS. *Scientific reports*, 7(5222).

Causse, M., Chua, Z. K., & Rémy, F. (2019). Influences of age, mental workload, and flight experience on cognitive performance and prefrontal activity in private pilots: a fNIRS study. *Scientific reports*, 9(1), 1-12.

Cegarra, J. & Chevalier, A. (2008). The use of Tholos software for combining measures of mental workload: Toward theoretical and methodological improvements. *Behavior Research Methods*, 40(4), 988-1000.

Cegarra, J., (2012). *De la gestion de la complexité à son assistance : contribution en psychologie ergonomique* (Unpublished habilitation à diriger des recherches). Université de de Toulouse II - Le Mirail, Toulouse, France.

Cegarra, J., Baracat, B., Calmettes, C., Matton, N. & Capa, R. L. (2017). A neuroergonomics perspective on mental workload predictions in Jens Rasmussen's SRK framework. *Le travail humain*, 80, 7-22.

Cegarra, J., Valéry, B., Avril, E., Calmettes, C., & Navarro, J. (2020). OpenMATB: A Multi-Attribute Task Battery promoting task customization, software extensibility and experiment replicability. *Behavior research methods*, 52(5), 1980–1990.

Cellier, J. M., & Hoc, J. M. (2001). La gestion d'environnements dynamiques. *Psychologie française*, 46(2).

Chanquoy, L., Tricot, A., & Sweller, J. (2007). *La charge cognitive : Théorie et applications*. Paris : Armand Colin.

Chauvin, C. (2008). *La prise de décision en situation dynamique : Exemple de la conduite de navire*. HDR, Université de Bretagne Sud.

Chauvin, C., Rauffet, P., Tréhin, M., Berruet, P., & Lassalle, J. (2015). Using Cognitive Work Analysis to design smart grid interfaces. In D. de Waard, K.A. Brookhuis, A. Toffetti, A. Stuijver, C. Weikert, D. Coelho, D. Manzey, A.B. Ünal, S. Röttger, and N. Merat (Eds.) (2016). *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Europe Chapter 2015 Annual Conference*.

Chauvin, C., Said, F., Langlois, S. (2019). Does the Type of Visualization Influence the Mode of Cognitive Control in a Dynamic System? In *International Conference on Intelligent Human Systems Integration*, (pp. 751-757). Springer, Cham.

Chauvin, C., Said, F., Rauffet, P., Langlois, S. (2020). Analyzing the Take-Over performance in an automated vehicle in terms of cognitive control modes. *Le Travail Humain*, 83(4), 379-427.

Chen, S. & Epps, J. (2014). Using task-induced pupil diameter and blink rate to infer cognitive load. *Human-Computer Interaction*, 29(4), 390-413.

Christoffersen, K., & Woods, D. D. (2002). How to make automated systems team players. *Advances in human performance and cognitive engineering research*, 2, 1-12.

Collins, S. M., Karasek, R. A., & Costas, K. (2005). Job strain and autonomic indices of cardiovascular disease risk. *Am. J. Ind. Med.* 48, 182-193.

Csikszentmihalyi, M. (1990). *Flow: The Psychology of Optimal Experience*. New York: Harper.

Cuny, X. & Chauvin, C. (2009). Decision-making in controlling development of driving/piloting situations. *Safety Science*, 47, 1201-1204.

Daramola, A.Y. (2014). An investigation of air accidents in Nigeria using the Human Factors Analysis and Classification System (HFACS) framework. *Journal of Air Transport Management*, 35, 39-50.

Dawson, M. E., Schell, A. M. & Fillion, D. L. (2007). The electrodermal system. *Handbook of psychophysiology*, 2, 200-223.

De Waard, D. (1996). *The measurement of drivers' mental workload* (Unpublished doctoral dissertation). University of Groningen, Groningen, Netherlands.

Debanne, T., & Chauvin, C. (2014). Modes of cognitive control in official game handball coaching. *Journal of cognitive engineering and decision making*, 8(3), 283-298.

Debernard, S., Guiost, B., Poulain, T., Crevits, I., Annebicque, D., & Millot, P. (2009). Integrating human factors in the design of intelligent systems: an example in air traffic control. *International Journal of Intelligent Systems Technologies and Applications*, 7(2), 205-226.

Debernard, S., Riera, B. & Poulain, T. (2013). L'espace de travail commun pour l'aide à la supervision et à la coopération homme-machine. *Ergonomie des systèmes homme-machine*, 8, 295-348.

Dehais, F., Causse, M., Vachon, F., Régis, N., Menant, E. and Tremblay, S. (2014). Failure to detect critical auditory alerts in the cockpit: evidence for inattention deafness. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 56(4), 631-644.

Dehais, F., Fabre, E. F., & Roy, R. N. (2016). Cockpit intelligent et interfaces cerveau-machine passives. In: *Digital Intelligence 2016*, 4 April 2016 - 6 April 2016 (Laval, Canada). (Unpublished)

- Dehais, F., Duprès, A., Blum, S., Drougard, N., Scannella, S., Roy, R. N., & Lotte, F. (2019). Monitoring pilot's mental workload using ERPs and spectral power with a six-dry-electrode EEG system in real flight conditions. *Sensors, 19*(6), 1324.
- Dehais, F., Lafont, A., Roy, R., & Fairclough, S. (2020). A Neuroergonomics Approach to Mental Workload, Engagement and Human Performance. *Frontiers in Neuroscience, 14*, 268.
- Dehais, F., Somon, B., Mullen, T., & Callan, D. E. (2020). A Neuroergonomics Approach to Measure Pilot's Cognitive Incapacitation in the Real World with EEG.
- Dekker, S. & Hollnagel, E. (1999). *Coping with Computers in the Cockpit*. Routledge Revivals.
- Dekker, S. W., & Woods, D. D. (2002). Maba-maba or abracadabra? progress on human-automation coordination. *Cognition, Technology & Work, 4*(4), 240-244.
- Delignières, D., & Deschamps, T. (2000). L'effort mental. In : D. Delignières (Ed.), *L'effort*, 25-40.
- Delliaux, S., Delaforge, A., Deharo, J.-C. & Chaumet, G. (2019). Mental Workload Alters Heart Rate Variability, Lowering Non-linear Dynamics. *Frontiers in Physiology, 10*, 565.
- Desmond, P. A., & Hancock, P. A. (Eds.). (2001). *Stress, workload, and fatigue*. L. Erlbaum Associates.
- Deutsch, S., & Pew, R. W. (2005). Single pilot commercial aircraft operation. *BBN Report. BBN Technologies, Cambridge, MA, USA*.
- DIN EN ISO 10075-1 (2018). Ergonomic principles related to mental workload—Part 1: general issues and concepts, terms and definitions (ISO 10075-1:2017).
- Direction Générale de l'Aviation Civile. (2018). *Rapport sur la sécurité aérienne 2018*. Ministère de la Transition écologique et solidaire. https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/rapport_securite_aerienne_2018.pdf
- Dismukes, R., Goldsmith, T. E., & Kochan, J. A. (2015). Effects of acute stress on aircrew performance: literature review and analysis of operational aspects. *NASA/TM—2015–218930*.
- Dragan, A. D., Lee, K. C., & Srinivasa, S. S. (2013). Legibility and predictability of robot motion. In *2013 8th acm/ieee international conference on human-robot interaction (hri)*, 301-308.
- Durantini, 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.

- Ekkekakis, P. (2009). Illuminating the black box: investigating prefrontal cortical hemodynamics during exercise with near-infrared spectroscopy. *Journal of Sport & Exercise Psychology*, 31(4), 505-553.
- Endsley, M. R. (1987). The application of human factors to the development of expert systems for advanced cockpits. *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting*, 31, 1388–1392.
- Endsley, M. R. (1995). Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 37(1), 32-64.
- Endsley, M. R., & Kiris, E. O. (1995). The out-of-the-loop performance problem and level of control in automation. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 37(2), 381–394.
- Endsley, M. R. (1996). Automation and situation awareness. *Automation and human performance: Theory and applications*, 20, 163–181.
- Endsley, M. R. (1999). Situation awareness in aviation systems. In Garland, D.J., Wise, J.A. & Hopkin, V.D. (Eds.) (1999). *Handbook of aviation human factors*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Endsley, M. R. (1999). Level of automation effects on performance, situation awareness and workload in a dynamic control task. *Ergonomics*, 42(3), 462–492.
- Endsley, M. R. (2000). Theoretical underpinnings of situation awareness: a critical review. In Endsley, M. R., & Garland, D. J. (Eds.), *Situation Awareness Analysis and Measurement*, Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 3-32.
- Endsley, M. R. (2015). Situation awareness misconceptions and misunderstandings. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 9(1), 4-32.
- Ephrath, A. R., & Young, L. R. (1981). Monitoring vs. man-in-the-loop detection of aircraft control failures. In *Human detection and diagnosis of system failures* (pp. 143-154). Springer, Boston, MA.
- Eriksson, A., & Stanton, N.A. (2017). Driving performance after self-regulated control transitions in highly automated vehicles, *Human Factors*, 59, 1233-1248.
- Fairclough, S.H., Venables, L. & Tattersall, A. (2005). The influence of task demand and learning on the psychophysiological response. *International Journal of Psychophysiology*, 56(2), 171–184.
- Fairclough, S. H., Burns, C., & Kreplin, U. (2018). FNIRS activity in the prefrontal cortex and motivational intensity: impact of working memory load, financial reward, and correlation-based signal improvement. *Neurophotonics*, 5(3), 035001.

Feigh, K., Pritchett, A., Denq, T. & Jacko, J. (2006). Contextual Control Modes during an Airline Rescheduling Task. *Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting Proceedings*, 50(3), 457-461.

Fishburn, F. A., Norr, M. E., Medvedev, A. V., & Vaidya, C. J. (2014). Sensitivity of fNIRS to cognitive state and load. *Frontiers in human neuroscience*, 8, 76.

Fitts, P. M. (1951). *Human engineering for an effective air-navigation and traffic-control system*. National Research Council. <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/b815893.pdf>

Freund, M., Etzel, J. A., & Braver, T. (2020). Neural coding of cognitive control: The representational similarity analysis approach.

Funke, J. (2001). Dynamic systems as tools for analyzing human judgement. *Thinking and reasoning*, 7, 69-89.

Galan, R. (2012). *Si l'aviation m'était contée : Encyclopédie de poche de l'aviation*. Privat.

Gateau, T., Ayaz, H. & Dehais, F. (2018). *In silico* vs. Over the Clouds: On-the-Fly Mental State Estimation of Aircraft Pilots, Using a Functional Near Infrared Spectroscopy Based Passive-BCI. *Frontiers in Human Neurosciences*, 12(187), 1-14.

Gawron, V. J. (2019). *Human Performance, Workload, and Situational Awareness Measures Handbook, -2-Volume Set*. CRC Press.

Gevens, A.S., Bressler, S.L., Cutillo, B.A., Illes, J. & Fowler-White, R.M., (1990). Effects of prolonged mental work on functional brain topography. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 76, 339–350.

Gil, S. (2009). Comment étudier les émotions en laboratoire. *Revue électronique de psychologie sociale*, 4, 15-24.

Giraudet, L., St-Louis, M. E., Scannella, S. & Causse, M. (2015). P300 event-related potential as an indicator of inattentive deafness? *PLoS one*, 10(2), e0118556.

Girouard, A., Solovey, E.T., Hirshfield, L.M., Chauncey, K., Sassaroli, A., Fantini, S. & Jacob, R.J. (2009). Distinguishing difficulty levels with non-invasive brain activity measurements. *In Proceedings of the 12th IFIP TC 13 International Conference on Human-Computer Interaction*, I, 440-452. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

Goh, J., & Wiegmann, D. A. (2001). An investigation of the factors that contribute to pilots' decisions to continue to visual flight rules flight into adverse weather. In *Proceedings of the Human factors and Ergonomics Society 45th Annual Meeting* (pp. 26-29). Santa-Monica, CA: Human Factors and Ergonomics Society.

Greef, T., Lafeber, H., van Oostendorp, H. & Lindenberg, J. (2009). Eye movement as indicators of mental workload to trigger adaptive automation. *International Conference on Foundations of Augmented Cognition*, 219-228.

Grossman, P., & Svebak, S. (1987). Respiratory sinus arrhythmia as an index of parasympathetic cardiac control during active coping. *Psychophysiology*, 24, 228–235.

Grossman, P. (1992). Respiratory and cardiac rhythms as windows to central and autonomic biobehavioral regulation: selection of window frames, keeping the panes clean and viewing the neural topography. *Biol. Psychol.* 34, 131–161.

Gutzwiller, R. S., Wickens, C. D., & Clegg, B. A. (2014). Workload overload modeling: An experiment with MATB II to inform a computational model of task management. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, Vol. 58, No. 1, (pp. 849-853). Sage CA: Los Angeles.

Hajdukiewicz, J. R. (1999). *Development of a structured approach for patient monitoring in the operating room* (Doctoral dissertation, National Library of Canada= Bibliothèque nationale du Canada).

Hancock, P. A. & Warm J. S. (1989). A Dynamic Model of Stress and Sustained Attention. *Human Factors*, 31, 519–537.

Hancock, P. A. & Williams, G. (1993). Effect of task load and task load increment on performance and workload. In R. S. Jensen (Ed.), *Seventh International Symposium on Aviation Psychology*, 328-334. Columbus: Ohio.

Hanson, E.K.S. & Bazanski, J. (2001). Ecological momentary assessments in aviation: the development of a Pilot Experience Evaluating Device (PEED) for the in-flight registration of flight phases, mental effort, and reaction time. *Progress in Ambulatory Assessment Computer Assisted Psychological and Psychophysiological Methods in Monitoring and Field Studies*, 477–492.

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). North-Holland.

Hart, S. G. (2006, October). NASA-task load index (NASA-TLX); 20 years later. In *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting* (Vol. 50, No. 9, pp. 904-908). Sage CA: Los Angeles, CA: Sage publications.

- Hatch, J. P., Klatt, K., Porges, S. W., Schroeder-Jasheway, L., & Supik, J. D. (1986). The relation between rhythmic cardiovascular variability and reactivity to orthostatic, cognitive, and cold pressor stress. *Psychophysiology*, 23, 48–56.
- Helmreich, R. L. & Foushee, H. C. (1993). *Why crew resource management? Empirical and theoretical bases of human factors training in aviation*. Academic Press.
- Helmreich, R.L., Merritt, A.C. & Wilhelm, J.A. (1999). The evolution of Crew Resource Management training in commercial aviation. *The International Journal of Aviation Psychology*, 9(1), 19-32.
- Hess, E. H. & Polt, J. M. (1964). Pupil size in relation to mental activity during simple problem-solving. *Science*, 143(3611), 1190-1192.
- Hjortskov, N., Rissén, D., Blangsted, A. K., Fallentin, N., Lundberg, U., & Søgaard, K. (2004). The effect of mental stress on heart rate variability and blood pressure during computer work. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 92, 84–89.
- Hoc, J.-M., & Amalberti, R. (1994). Diagnostic et prise de décision dans les situations dynamiques. *Psychologie française*, 39(2), 177-192.
- Hoc, J.M. & Amalberti R. (1995). Diagnosis: some theoretical questions raised by applied research. *Current Psychology of Cognition*, 14(1), 73-100.
- Hoc, J.M. (1996). Supervision et contrôle de processus : la cognition en situation dynamique. *Presses universitaires de Grenoble*. Grenoble.
- Hoc, J.M. (2000). From human–machine interaction to human–machine cooperation. *Ergonomics*, 43 (7), 833–843.
- Hoc, J.M. (2000). La relation homme-machine en situation dynamique. *Revue d'intelligence artificielle*, 14(1), 55-71.
- Hoc, J.-M. (2001). Towards a cognitive approach to human–machine cooperation in dynamic situations. *International journal of human-computer studies*, 54 (4), 509–540.
- Hoc, J. M., & Debernard, S. (2002). Respective demands of task and function allocation on human-machine cooperation design: a psychological approach. *Connection science*, 14(4), 283-295.
- Hoc, J. M., Amalberti, R., Cellier, J. M., & Grosjean, V. (2004). Adaptation et gestion des risques en situation dynamique. In *Psychologie ergonomique : tendances actuelles* (No. 2, pp. 15-48). Presse Universitaire de France.

Hoc, J.-M. & Amalberti, R. (2007). Cognitive control dynamics for reaching a satisfying performance in complex dynamic situations. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 1, 22–55.

Hoc, J. M., & Chauvin, C. (2011). Cooperative implications of the allocation of functions to humans and machines. *Manuscript submitted for publication*.

Hockey, R. (1979). Stress and the cognitive components of skilled performance. *Human stress and cognition*, 50(3), 141-177.

Hockey, G. R. J. & Hamilton, P. (1983). The cognitive patterning of stress states. *Stress and Fatigue in Human Performance*. Chichester: Wiley.

Hockey, G. R. J. (1986). A state control theory of adaptation and individual differences in stress management. *Energetic and Human Information Processing*, Martinus-Nijhoff.

Hockey, G. R. J. (1986). Changes in operator efficiency as a function of environmental stress, fatigue and circadian rhythms. *Handbook of Perception and Performance*, 2, 44-1-44.

Hockey, G. R. J. (1997). Compensatory control in the regulation of human performance under stress and high workload: A cognitive energetical framework. *Biological Psychology*, 45, 73-93.

Hockey, G. R. J. (2003). Operator Functional State as a Framework for the Assessment of Performance Degradation. *Operator Functional State*, IOS Press, 8-23.

Hoffman, R. R., & Johnson, M. (2019). The quest for alternatives to “levels of automation” and “task allocation. In *Human performance in automated and autonomous systems* (No.3, pp. 43-68). CRC Press, Taylor & Francis Group.

Hollnagel, E. (1993). *Human Reliability Analysis – Context and Control*. Academic Press. London.

Hollnagel, E. (1998). Context, cognition and control. In *Co-operative process management, cognition and information technology* (No. 4, pp. 27-52). Taylor & Francis.

Hollnagel, E. (2002). “Time and time again”. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 3, 143-158.

Hollnagel, E., & Woods, D. D. (2005). *Joint cognitive systems: Foundations of cognitive systems engineering*. CRC press.

Holman, M., Walker, G., Lansdown, T., Salmon, P., Read, G., & Stanton, N. (2020). The Binary-Based Model (BBM) for Improved Human Factors Method Selection. *Human factors*, 18720820926875. Advance online publication. <https://doi.org/10.1177/0018720820926875>

Hoshi, Y. (2003). Functional near-infrared optical imaging: utility and limitations in human brain mapping. *Psychophysiology*, 40, 511-520.

Hoshi, Y. (2005). Functional near-infrared spectroscopy: potential and limitations in neuroimaging studies. *Int. Rev. Neurobiol.*, 66, 237-266.

Huppert, T.J., Hoge, R.D., Diamond, S.G., Franceschini, M.A. & Boas, D.A. (2006). A temporal comparison of BOLD, ASL, and NIRS hemodynamic responses to motor stimuli in adult humans. *NeuroImage*, 29, 368-382.

Izzetoglu, K., Yurtsever, G., Bozkurt, A., Yazici, B., Bunce, S., Pourrezaei, K., et al. (2003). NIR spectroscopy measurements of cognitive load elicited by GKT and target categorization. *In Proceedings of the 36th Hawaii International Conference on System Sciences*, 129-134.

Jahanpour, E., Fabre, E., Dehais, F., & Causse, M. (2018). Giving a hand to pilots with animated alarms based on mirror system functioning. *In Proceedings of the 2nd International Neuroergonomics Conference, Philadelphia, PA.*

Jamieson, G. A., Miller, C. A., Ho, W. H., & Vicente, K. J. (2007). Integrating task-and work domain-based work analyses in ecological interface design: A process control case study. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, 37(6), 887-905.

Jansson, A., Olsson, E., & Erlandsson, M. (2006). Bridging the gap between analysis and design: improving existing driver interfaces with tools from the framework of cognitive work analysis. *Cognition, Technology & Work*, 8(1), 41-49.

Jasper, P., Sibley, C. & Coyne, J. (2016). Using heart rate variability to assess operator mental workload in a command and control simulation of multiple unmanned aerial vehicles. *Proceedings of the human factors and ergonomics society 2016 annual meeting.*

Jenkins, D. P., Stanton, N. A., Salmon, P. M., Walker, G. H., & Young, M. S. (2008a). Using cognitive work analysis to explore activity allocation within military domains. *Ergonomics*, 51(6), 798-815.

Jenkins, D.P., Stanton, N.A., Walker, G.H., Salmon, P.M. & Young, M.S. (2008b). Applying cognitive work analysis to the design of rapidly reconfigurable interfaces in complex networks. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 9(4), 273-295.

- Jenkins, D. P., Stanton, N. A., Salmon, P. M., Walker, G. H., & Rafferty, L. (2010). Using the decision-ladder to add a formative element to naturalistic decision-making research. *Intl. Journal of Human-Computer Interaction*, 26(2-3), 132-146.
- Jenkins, D. P., Stanton, N. A., Walker, G. H., Salmon, P. M., & Young, M. S. (2010). Using cognitive work analysis to explore system flexibility. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 11(3), 136-150.
- Jenkins, D. P., Salmon, P. M., Stanton, N. A., Walker, G. H., & Rafferty, L. (2011). What could they have been thinking? How sociotechnical system design influences cognition: a case study of the Stockwell shooting. *Ergonomics*, 54(2), 103-119.
- Jiao, J., Zhou, F., Gebrael, N. Z., & Duffy, V. (2020). Towards augmenting cyber-physical-human collaborative cognition for human-automation interaction in complex manufacturing and operational environments. *International Journal of Production Research*, 58, 1-23.
- Jones, D. G., & Endsley, M. R. (1996). Sources of situation awareness errors in aviation. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 67(6), 507-512.
- Jordan, N. (1963). Allocation of functions between man and machines in automated systems. *Journal of Applied Psychology*, 47, 161-165.
- Jordan, C.S. (1992). Experimental study of the effect of an instantaneous self-assessment workload recorder on task performance. *DRA Technical Memorandum (CAD5) 92011*, DRA Maritime Command Control Division, Portsmouth.
- Just, M. A. & Carpenter, P. A. (1984). Using eye fixations to study reading comprehension. In *New methods in reading comprehension research* (No. 8, pp. 151-182). Routledge Revivals.
- Kaber, D. B., & Endsley, M. R. (1997). Out-of-the-loop performance problems and the use of intermediate levels of automation for improved control system functioning and safety. *Process Safety Progress*, 16(3), 126-131.
- Kaber, D. B., Onal, E., & Endsley, M. R. (2000). Design of automation for telerobots and the effect on performance, operator situation awareness, and subjective workload. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing*, 10(4), 409-430.
- Kaber, D. B., Riley, J. M., Tan, K. W., & Endsley, M. R. (2001). On the design of adaptive automation for complex systems. *International Journal of Cognitive Ergonomics*, 5(1), 37-57.

Kaber, D. B., & Endsley, M. R. (2004). The effects of level of automation and adaptive automation on human performance, situation awareness and workload in a dynamic control task. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 5(2), 113-153.

Kaber, D. B., & Endsley, M. R. (2004). The effects of level of automation and adaptive automation on human performance, situation awareness and workload in a dynamic control task. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 5(2), 113–153.

Kaber, D. B., Wright, M. C., & Sheik-Nainar, M. A. (2006). Investigation of multi-modal interface features for adaptive automation of a human–robot system. *International journal of human-computer studies*, 64(6), 527-540.

Kahneman, D., (1973). *Attention and Effort*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.

Keinan, G. (1988). Training for Dangerous Task Performance: The Effects of Expectations and Feedback 1. *Journal of Applied Social Psychology*, 18(4), 355-373.

Kessel, C. J., & Wickens, C. D. (1982). The transfer of failure-detection skills between monitoring and controlling dynamic systems. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 24(1), 49–60.

Klein, G.A., Calderwood, R. & MacGregor, D. (1989). Critical Decision Method for Eliciting Knowledge. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, 19(3).

Klein, G.A., Orasanu, J., Calderwood, R. & Zsombok, C.E. (1993). *Decision Making in Action: Models and Methods*. Ablex Publishing Corporation.

Klein, G. A. (1993). A recognition-primed decision (RPD) model of rapid decision making. *Decision making in action: Models and methods*, 5(4), 138-147.

Klein, G. (1998). *Sources of Power – How people make decisions*. MIT Press, Cambridge.

Klein, G., Woods, D. D., Bradshaw, J. M., Hoffman, R. R., & Feltovich, P. J. (2004). Ten challenges for making automation a "team player" in joint human-agent activity. *IEEE Intelligent Systems*, 19(6), 91–95.

Klein, G., Phillips, J. K., Rall, E. L. & Peluso, D. A. (2006). A Data-Frame Theory of Sensemaking. *Expertise Out of Context: Proceedings of the Sixth International Conference on Naturalistic Decision Making*, 113-155.

Kostenko, A., Rauffet, P., Chauvin, C., & Coppin, G. (2016). A dynamic closed-looped and multidimensional model for Mental Workload evaluation. *IFAC-PapersOnLine*, 49(19), 549-554.

Kostenko, A. (2017). *Evaluation multidimensionnelle et dynamique de la maîtrise de la situation par l'opérateur* (Thèse). Université de Bretagne Sud. <http://www.theses.fr/22329800X>

Kostenko, A., Rauffet, P., Moga, S., & Coppin, G. (2019). November. Operator Functional State: Measure It with Attention Intensity and Selectivity, Explain It with Cognitive Control. In *International Symposium on Human Mental Workload: Models and Applications* (pp. 156-169). Springer, Cham.

Laouar-Zouyed, A., Rauffet, P., Chauvin, C. & Bressolle, M.-C. (2018). A step toward decision-making assistance: Understanding pilots' decision making and workload impact. *H-Workload*, Amsterdam, Netherlands.

Larouzzée, J., Guarnieri, F. & Besnard, D. (2014). Le modèle de l'erreur humaine de James Reason. *CRC WP 2014 24*, MINES ParisTech, 44.

Lassalle, J., Rauffet, P., Leroy, L., Guillet, L., Chauvin, C. & Coppin, G. (2014). Innovative multi-sensors device deployment for fighter pilots' activity study in a highly realistic Rafale simulator. In *Proceedings of the HFES (Human Factors and Ergonomics Society) Conference*. Lisbon, 8-10 oct.

Lassalle, J., Rauffet, P., Leroy, B., Guérin, C., Chauvin, C., Coppin, G., & Saïd, F. (2017). COmmunication and WORKload analyses to study the COLlective WORK of fighter pilots: the COWORK 2 method. *Cognition, Technology & Work*, 19(2-3), 477-491.

Le Goff, K. (2016). *Agentivité dans les systèmes fortement automatisés* (Thèse). Aix-Marseille Université. <http://www.theses.fr/2016AIXM4751>

Lee, J. D., & Seppelt, B. D. (2009). Human factors in automation design. In *Springer handbook of automation* (pp. 417-436). Springer, Berlin, Heidelberg.

León-Carrion, J., Damas-López, J., Martín-Rodríguez, J. F., Domínguez-Roldán, J. M., Murillo-Cabezas, F., y Martín, J. M. B., & Domínguez-Morales, M. R. (2008). The hemodynamics of cognitive control: the level of concentration of oxygenated hemoglobin in the superior prefrontal cortex varies as a function of performance in a modified Stroop task. *Behavioural brain research*, 193(2), 248-256.

León-Carrión, J. & León-Domínguez, U. (2012). Functional Near-Infrared Spectroscopy (fNIRS): Principles and Neuroscientific Applications. In *Neuroimaging – Methods* (No. 3, pp. 47-74). InTechOpen.

Leplat, J. (1977). Les facteurs déterminant la charge de travail. *Le Travail humain*, 40, 195-202.

Leplat, J. (1997), *Regards sur l'activité en situation de travail*. Paris : PUF.

Leplat, J. (2003). La modélisation en ergonomie à travers son histoire. In *Formalismes de modélisation pour l'analyse du travail et l'ergonomie* (No. 1, pp. 1-26). Presses Universitaires de France.

Li, W.-C. (2011). The casual factors of aviation accidents related to decision errors in the cockpit by system approach. *Journal of Aeronautics, Astronautics and Aviation, Series A*, 43(3), 159-166.

Li, W.-C., Harris, D & Yu, C.-S. (2008). Routes to failure: Analysis of 41 civil aviation accidents from the Republic of China using the human factors analysis and classification system. *Accident Analysis and Prevention*, 40, 426-434.

Li, W.-C., Chiu, F.-C. & Wu, K.-J. (2012). The evaluation of pilots' performance and mental workload by eye movement. *Proceeding of the 30th European Association for Aviation Psychology Conference*.

Lipschitz, R. (1997). Naturalistic decision-making perspectives on decision errors. In *Naturalistic Decision Making* (No. 15, pp. 151–160). Psychology Press.

Mackworth, N. (1948). The breakdown of vigilance during prolonged visual search. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 1(1), 6–21.

Mäki-Marttunen, V., Hagen, T., & Espeseth, T. (2019). Task context load induces reactive cognitive control: An fMRI study on cortical and brain stem activity. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 19(4), 945-965.

Malik, M. (1996). Heart rate variability: Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use: Task force of the European Society of Cardiology and the North American Society for Pacing and Electrophysiology. *Annals of Noninvasive Electrocardiology*, 1(2), 151-181.

Malik, M., Bigger, J.T., Jr., Camm, A.J., Kleiger, R., Malliani, A., Moss, A. & Schwartz, P. (1996). Heart rate variability: Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. *Eur Heart J*, 17, 354-381.

Mancini, G., Woods, D.D., & Hollnagel, E. (1988). *Cognitive engineering in dynamic environments*. London: Harcourt Brace Jovanovich.

Mandrick, K. (2013). *Application de la spectroscopie proche infrarouge dans la discrimination de la charge de travail* (Thèse). Université Montpellier 1. <https://www.theses.fr/171661095>

Mandrick, K., Derosiere, G., Dray, G., Coulon, D., Micallef, J.-P., & Perrey, S. (2013). Prefrontal cortex activity during motor tasks with additional mental load requiring attentional demand: a near-infrared spectroscopy study. *Neurosci.Res.*, 76, 156–162.

Mandrick, K., Chua, Z., Causse, M., Perrey, S. & Dehais, F. (2016). Why a Comprehensive Understanding of Mental Workload through the Measurement of Neurovascular Coupling Is a Key Issue for Neuroergonomics? *Frontiers in human neuroscience*, 10(250).

Maquestiaux, F. (2017). *Psychologie de l'attention*. De Boeck Supérieur.

Martin, C., Hourlier, S. & Cegarra, J. (2013). La charge mentale de travail : un concept qui reste indispensable, l'exemple de l'aéronautique. *Le travail humain*, 76, 285-308.

Matthews, G., & Davies, D. R. (2001). Individual Differences in Energetic Arousal and Sustained Attention: A Dual-Task Study. *Personality and Individual Differences*, 31, 575–589.

Matton, N., Paubel, P. V., & Puma, S. (2020). Toward the Use of Pupillary Responses for Pilot Selection. *Human factors*, 18720820945163. Advance online publication. <https://doi.org/10.1177/0018720820945163>

Mazaeva, N., & Bisantz, A. M. (2007). On the representation of automation using a work domain analysis. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 8(6), 509-530.

McNames J. & Aboy M. (2006). Reliability and accuracy of heart rate variability metrics versus ECG segment duration, *Med. Biol. Eng. Comput.*, 44, 747–756.

Meister, D., (1976). *Behavioral Foundations of System Development*. England: John Wiley & Sons.

Meshkati, N. (1988). Heart rate variability and mental workload assessment. In *Advances in psychology* (Vol. 52, pp. 101-115). North-Holland.

Meshkati, N. (1988). Toward the development of a cohesive model of workload. In *Human Mental Workload* (pp. 305-314). Amsterdam: North-Holland.

Metzger, U., & Parasuraman, R. (2005). Automation in future air traffic management: Effects of decision aid reliability on controller performance and mental workload. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 47(1), 35–49.

Miller, E. K. (2000). The prefrontal cortex and cognitive control. *Nature reviews neuroscience*, 1(1), 59-65.

Mosier, K. L., Skitka, L. J., Heers, S., & Burdick, M. (1998). Automation bias: Decision making and performance in high-tech cockpits. *The International journal of aviation psychology*, 8(1), 47–63.

Mulder, G., & Mulder, L. J. M. (1981). Information processing and cardiovascular control. *Psychophysiology*, 18, 392–402.

- Mulder, G. (1986). The concept and measurement of mental effort. In *Energetics and human information processing* (pp. 175-198). Springer, Dordrecht.
- Muthard, E. K., & Wickens, C. D. (2002). Change detection after preliminary flight decisions: linking planning errors to biases in plan monitoring. In *Proceedings of the 46th Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society*. Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomics Society.
- Muthard, E. K., & Wickens, C. D. (2003). Factors that mediate flight plan monitoring and errors in plan revision: planning under automated and high workload conditions. In *Proceedings of the 12th International Symposium on Aviation Psychology*. Dayton, OH: Wright State University.
- Naikar, N. & Sanderson, P.M. (1999). Work domain analysis for training-system definition. *International Journal of Aviation Psychology*, 9, 271–290.
- Naikar, N. & Sanderson, P.M. (2001). Evaluating design proposals for complex systems with work domain analysis. *Human Factors*, 43, 529–542.
- Naikar, N. & Saunders, A. (2003). Crossing the boundaries of safe operation: A technical training approach to error management. *Cognition Technology and Work*, 5, 171–180.
- Naikar, N. (2006). Beyond interface design: further applications of cognitive work analysis. *Int. J. Ind. Ergon.*, 36, 423–438.
- Naikar, N. (2006). An examination of the key concepts of the five phases of cognitive work analysis with examples from a familiar system. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 50th Annual Meeting*, 447–451.
- Naikar, N., Moylan, A., & Pearce, B. (2006). Analysing activity in complex systems with cognitive work analysis: concepts, guidelines and case study for control task analysis. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 7(4), 371-394.
- National Transportation Safety Board (NTSB) (1988). Aircraft Accident Report. Northwest Airlines, Inc. McDonnell Douglas DC-9-82, N312RC. Detroit Metropolitan Wayne County Airport, Romulus, Michigan. August 16, 1987. Report n° NTSB/AAR-88/05.
- Neis, S. M., Klingauf, U., & Schiefele, J. (2018, September). Classification and review of conceptual frameworks for commercial single pilot operations. In *2018 IEEE/AIAA 37th Digital Avionics Systems Conference (DASC)* (pp. 1-8). IEEE.

- Navon, D. & Gopher, D. (1979). On the economy of the human information processing system. *Psychological review*, 86, 214-255.
- Niendam, T. A., Laird, A. R., Ray, K. L., Dean, Y. M., Glahn, D. C., & Carter, C. S. (2012). Meta-analytic evidence for a superordinate cognitive control network subserving diverse executive functions. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 12(2), 241-268.
- Norman, D. A. (1990). The 'problem' with automation: inappropriate feedback and interaction, not 'over-automation'. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B, Biological Sciences*, 327(1241), 585–593.
- O'Hare, D., Wiggins, M., Batt, R., & Morrison, D. (1994). Cognitive failure analysis for aircraft accident investigation. *Ergonomics*, 37, 1855-1869.
- Obrig, H., Hirth, C., Junge-Hulsing, J.G., Doge, C., Wolf, T., Dirnagl, U. & Villringer, A. (1996). Cerebral oxygenation changes in response to motor stimulation. *J. Appl. Physiol.*, 81, 1174-1183.
- Obrig, H., Wenzel, R., Kohl, M., Horst, S., Wobst, P., Steinbrink, J., Thomas, F. & Villringer, A. (2000). Near-infrared spectroscopy: does it function in functional activation studies of the adult brain? *Int. J. Psychophysiol.*, 35, 125-142.
- Olsson, G. & Lee, P.L. (1994). Effective interfaces for process operators. *Journal of Process Control*, 4, 99–107.
- Orasanu, J., Dismukes, R. K., & Fischer, U. (1993). Decision Errors in the Cockpit. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 37(4), 363–367.
- Orasanu, J. & Martin, L. (1998). Errors in aviation decision making: a factor in accidents and incidents. *Human Error, Safety, and System Development*, 98, 100-107
- Orasanu, J., Martin, L. & Davison, J. (2001). Cognitive and contextual factors in aviation accidents: decision errors. In *Linking Expertise and Naturalistic Decision Making* (No. 12, pp. 209-225). Psychology Press.
- Orasanu, J. M. (2010). Flight crew decision-making. In *Crew resource management* (No. 5, pp. 147-179). Academic Press.
- Pacaux-Lemoine, M. P., & Debernard, S. (2007, July). Common work space or how to support cooperative activities between human operators: application to fighter aircraft. In *International Conference on Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics* (pp. 796-805). Springer, Berlin, Heidelberg.

- Parasuraman, R., & Davies, D. R. (1977). A taxonomic analysis of vigilance performance. In *Vigilance. NATO Conference Series* (Vol. 3, pp. 559-574). Springer, Boston, MA.
- Parasuraman, R. (1979). Memory load and event rate control sensitivity decrements in sustained attention. *Science*, 205(4409), 924–927.
- Parasuraman, R., Molloy, R., & Hilburn, B. (1993). Adaptive function allocation reduces performance cost of static automation. In *7th international symposium on aviation psychology*, 37–42.
- Parasuraman, R., & Riley, V. (1997). Humans and automation: Use, misuse, disuse, abuse. *Human Factors. The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 39(2), 230–253.
- Parasuraman, R., Sheridan, T. B., & Wickens, C. D. (2000). A model for types and levels of human interaction with automation. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics-Part A: Systems and Humans*, 30(3), 286–297.
- Parasuraman, R., & Wickens, C. D. (2008). Humans: Still vital after all these years of automation. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 50(3), 511–520.
- Patten, C. J. D., Kircher, A., Ostlund, J. & Nilsson, L. (2004). Using mobile telephones: cognitive workload and attention resource allocation. *Accident Analysis and Prevention*, 36, 341-350.
- Perrey, S. (2008). Non-invasive NIR spectroscopy of human brain function during exercise, *Methods*, 45, 289–299.
- Perrey, S., Thedon, T. & Rupp, T. (2010). NIRS in Ergonomics: Its Application in Industry for Promotion of Health and Human Performance at Work. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 40 (2), 185–189.
- Peter, K., Jennifer, S. & Joey, H. (2001). Comparison of expert and novice scan behaviors during VFR flight. *The 11th International Symposium on Aviation Psychology*. Columbus: The Ohio University.
- Pribram, K. H., & McGuinness, D. (1975). Arousal, activation, and effort in the control of attention. *Psychological review*, 82(2), 116.
- Pritchett, A. (2009). Aviation automation: general perspectives and specific guidance for the design of modes and alerts. *Reviews of Human Factors and Ergonomics*, 5(1), 82-113.
- Peter, K., Jennifer, S. & Joey, H. (2001). Comparison of expert and novice scan behaviors during VFR flight. *The 11th International Symposium on Aviation Psychology*. Columbus: The Ohio University.

Phillips, C. A., Repperger, D. W., Kinsler, R., Bharwani, G., & Kender, D. (2007). A quantitative model of the human-machine interaction and multi-task performance: A strategy function and the unity model paradigm. *Computers in biology and medicine*, 37(9), 1259-1271.

Piaget, J. (1960). Les praxies chez l'enfant. *Revue Neurologique*, 102, 551-564.

Piaget, J. (1974). *Adaptation vitale et psychologie de l'intelligence*. Paris : Hermann.

Pinet, J. (2011). *Traitement des situation inattendues d'extrême urgence en vol : test d'un modèle cognitif auprès de pilotes experts*. (Thèse). Université Toulouse 2 Jean Jaurès. <http://www.theses.fr/12918439X>

Piolat, A., Olive, T., Roussey, J. Y., Thunin, O., & Ziegler, J. C. (1999). SCRIPTKELL: A tool for measuring cognitive effort and time processing in writing and other complex cognitive activities. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 31(1), 113-121.

R Core Team (2012). R: A language and environment for statistical computing. *Foundation for statistical Computing*. Vienna, Austria.

Rasmussen, J. (1974). *The human data processor as a system component: Bits and pieces of a model* (Report No. Risø -M-1722). Roskilde, Denmark: Danish Atomic Energy Commission.

Rasmussen, J. (1976). Outlines of a hybrid model of the process plant operator. In T. B. Sheridan & G. Johanssen (Eds.), *Monitoring behaviour and supervisory control*, 371-383. New York: Plenum.

Rasmussen, J. (1982). Human errors. A taxonomy for describing human malfunction in industrial installations. *Journal of Occupational Accidents*, 4, 311-333.

Rasmussen, J., & Lind, M. (1982). *A Model of Human Decision Making in Complex Systems and its Use for Design of System Control Strategies*. Roskilde: Risø National Laboratory. (Risø-M; No. 2349).

Rasmussen, J. (1983). Skills, Rules, and Knowledge; Signals, Signs, and Symbols, and Other Distinctions in Human Performance Models. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 13(3): 257-266.

Rasmussen, J. (1986). A framework for cognitive task analysis in systems design. In *Intelligent decision support in process environments*. NATO ASI Series (Vol. 21, pp. 175-196). Springer Berlin Heidelberg.

Rasmussen, J. (1986). *Information Processing and Human-Machine Interaction: An Approach to Cognitive Engineering*. New York: Elsevier Science.

Rasmussen, J., Pejtersen, A. & Goodstein, L. (1994). *Cognitive Systems Engineering*. New York: Wiley.

Rauffet, P., Said, F., Laouar, A., Chauvin, C., Bressolle, M.-C. (2020). Cognitive Control Modes and Mental Workload: An Experimental Approach. 4th International Conference on Computer-Human, Interaction Research and Applications (CHIRA).

Raymond, C., Prun, D. & Cegarra, J. (2016). Associer l'ingénierie système et le Cognitive Work Analysis pour soutenir l'intégration Homme-Système. *Ergo'IA 2016*, Bidart, France.

Reason, J. (1988). Stress and cognitive failure. In S. Fisher & J. Reason (Eds.), *Handbook of life stress, cognition and health* (p. 405–421). John Wiley & Sons.

Reason, J. (1990). Human error. *Western journal of medicine*, 172(6), 393-396.

Reason, J. (2000). Human error: models and management. *BMJ*, 320, 768-770.

Richard, J. F., Bonnet, C., Ghiglione, R., Bromberg, M., Beauvois, J. L., Doise, W., & Deschamps, J. C. (1990). *Traité de psychologie cognitive : cognition, représentation, communication*. Dunod.

Roy, R.N., Charbonnier, S., Campagne, A. & Bonnet, S. (2016). Efficient mental workload estimation using task-independent EEG features. *Journal of Neural Engineering*, 13(2), 1-10.

Ryman, S. G., El Shaikh, A. A., Shaff, N. A., Hanlon, F. M., Dodd, A. B., Wertz, C. J., ... & Abrams, S. (2019). Proactive and reactive cognitive control rely on flexible use of the ventrolateral prefrontal cortex. *Human brain mapping*, 40(3), 955-966.

Saint-Lot, J., Imbert, J. P., & Dehais, F. (2020, April). Red Alert: a cognitive countermeasure to mitigate attentional tunneling. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 1-6).

Salahuddin, L., Cho, J., Jeong, M.G. & Kim, D. (2007). Ultra Short Term Analysis of Heart Rate Variability for Monitoring Mental Stress in Mobile Settings. 29th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society.

Salmon, P. M., Regan, M., Lenné, M. G., Stanton, N. A., & Young, K. (2007). Work domain analysis and intelligent transport systems: implications for vehicle design. *International journal of vehicle design*, 45(3), 426-448.

Sanders, A. (1983). Towards a model of stress and human performance. *Acta psychologica*, 53(1), 61-97.

Santiago-Espada, Y., Myer, R. R., Latorella, K. A., & Comstock Jr, J. R. (2011). The multi-attribute task battery ii (matb-ii) software for human performance and workload research: A user's guide.

- Sarter, N. B., & Woods, D. D. (1995). How in the world did we ever get into that mode? Mode error and awareness in supervisory control. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 37(1), 5–19.
- Sarter, N. B., Woods, D. D., & Billings, C. E. (1997). Automation surprises. *Handbook of human factors and ergonomics*, 2, 1926–1943.
- Sarter, N. B., Mumaw, R. J., & Wickens, C. D. (2007). Pilots' monitoring strategies and performance on automated flight decks: An empirical study combining behavioral and eye-tracking data. *Human factors*, 49(3), 347-357.
- Sauvet, F., Jouanin, J. C., Langrume, C., Van Beers, P., Papelier, Y., & Dussault, C. (2009). Heart rate variability in novice pilots during and after a multi-leg cross-country flight. *Aviation, space, and environmental medicine*, 80(10), 862-869.
- Scannella, S., Peysakhovich, V., Ehrig, F., Lepron, E., & Dehais, F. (2018). Assessment of ocular and physiological metrics to discriminate flight phases in real light aircraft. *Human factors*, 60(7), 922-935.
- Schmid, D., & Stanton, N. A. (2020). Progressing Toward Airliners' Reduced-Crew Operations: A Systematic Literature Review. *The International Journal of Aerospace Psychology*, 30(1-2), 1-24.
- Schmid, D., Korn, B., & Stanton, N. A. (2020). Evaluating the reduced flight deck crew concept using cognitive work analysis and social network analysis: comparing normal and data-link outage scenarios. *Cognition, Technology & Work*, 22(1), 109-124.
- See, J. E., Howe, S. R., Warm, J. S., & Dember, W. N. (1995). Meta-analysis of the sensitivity decrement in vigilance. *Psychological Bulletin*, 117(2), 230.
- Segal, L. D., & Wickens, C. D. (1990). Taskillan II: Pilot strategies for workload management. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 66-70.
- Shappell, S.A. & Wiegmann, D.A. (1996). U.S. naval aviation mishaps 1977-92: Differences between single- and dual-piloted aircraft. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 67, 65-69.
- Shappell S.A. & Wiegmann, D.A. (2000). The Human Factors Analysis and Classification System – HFACS. FAA Civil Aeromedical Institute, Oklahoma City, OK 73125.
- Shaw, T. H., Satterfield, K., Ramirez, R. & Finomore. V. (2013). Using Cerebral Hemovelocity to Measure Workload during a Spatialized Auditory Vigilance Task in Novice and Experienced Observers, *Ergonomics*, 56 (8), 1251–1263.

- Sheridan, T. B., & Verplank, W. L. (1978). *Human and computer control of undersea teleoperators* (Rapport technique). DTIC Document.
- Sheridan, T. B., & Stassen, H. G. (1979). Definitions, models and measures of human workload. In *Mental workload. NATO Conference Series* (Vol. 8, pp. 219-233). Springer, Boston, MA.
- Sheridan, T. B., & Parasuraman, R. (2005). Human-automation interaction. *Reviews of human factors and ergonomics, 1*(1), 89–129.
- Siddle, D. A. (1991). Orienting, habituation, and resource allocation: An associative analysis. *Psychophysiology, 28*(3), 245-259.
- Silberstein, D. & Dietrich, R. (2003). Cockpit Communication under High Cognitive Workload. *Communication in High Risk Environments, 12*, 9-56.
- Simons, D. J. & Chabris, C. F. (1999). Gorillas in our midst: sustained inattention blindness for dynamic events. *Perception, 28*, 1059-1074.
- Slobounov, S.M., Fukada, K., Simon, R., Rearick, M. & Ray, W. (2000). Neurophysiological and behavioral indices of time pressure effects on visuomotor task performance. *Cognitive Brain Research, 9*(3), 287–298.
- Smith, A., Gevins, A., Brown, H., Karnik, A. & Du, R. (2001). Monitoring task loading with multivariate EEG measures during forms of human-computer interaction. *Human Factors, 43*(3), 366–380.
- Smolensky, M. W. (1991). The effect of work load history on operational errors in air traffic control simulation: The hysteresis effect – expectancy perseverance or short-term memory overload? Dissertation Abstracts International.
- Sorensen, L. J., Stanton, N. A., & Banks, A. P. (2011). Back to SA school: contrasting three approaches to situation awareness in the cockpit. *Theoretical Issues in Ergonomics Science, 12*(6), 451-471.
- Sperandio, J. C. (1971). Variation of operator's strategies and regulating effects on workload. *Ergonomics, 14*(5), 571-577.
- Sperandio, J. C. (1977). La régulation des modes opératoires en fonction de la charge de travail chez les contrôleurs de trafic aérien. *Le Travail humain, 40*, 249-256.
- Sperandio, J. C. (1978). The Regulation of Working Methods as a Function of Workload among Air Traffic Controllers. *Ergonomics, 21*, 367–390.

Sperandio, J. C. (1988). *L'ergonomie du travail mental*. Paris : Masson.

Stanton, N. A., Ashleigh, M. J., Roberts, A. D. & Xu, F. (2001). Testing Hollnagel's Contextual Control Model: Assessing team behaviour in a human supervisory control task. *International Journal of Cognitive Ergonomics*, 5(2), 111-123.

Stanton, N.A. & Bessell, K. (2013). How a submarine returns to periscope depth: Analysing complex socio technical systems using Cognitive Work Analysis. *Applied Ergonomics*, 45, 110-125.

Stanton, N. A., Harris, D., & Starr, A. (2014, July). Modelling and analysis of single pilot operations in commercial aviation. In *Proceedings of the international conference on human-computer interaction in aerospace* (pp. 1-8).

Strangman, G., Boas, D.A. & Sutton, J.P. (2002a). Non-invasive neuroimaging using near-infrared light. *Biol. Psychiatry*, 52(7), 679-693.

Strangman, G., Culver, J.P., Thompson, J.H. & Boas, D.A. (2002b). A quantitative comparison of simultaneous BOLD fMRI and NIRS recordings during functional brain activation. *NeuroImage*, 17, 719-731.

Taelman, J., Vandeput, S., Vlemincx, E., Spaepen, A., & Van Huffel, S. (2011). Instantaneous changes in heart rate regulation due to mental load in simulated office work. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 111, 1497-1505.

Takeuchi, Y. (2000). Change in blood volume in the brain during a simulated aircraft landing task. *Journal of Occupational Health*, 42, 60-65.

Teichner, W. H. (1974). The detection of a simple visual signal as a function of time of watch. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 16(4), 339-352.

Tokuda, S., Obinata, G., Palmer, E., & Chaparro, A. (2011, August). Estimation of mental workload using saccadic eye movements in a free-viewing task. In *2011 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society* (pp. 4523-4529). IEEE.

Tricot, A. & Chanquoy, L. (1996). La charge mentale, "vertu dormitive" ou concept opérationnel ? La charge mentale. *Psychologie française*, 41(4), 313-318.

Tryon, W.W. (1975). Pupillometry: a survey of sources of variation. *Psychophysiology*, 12(1), 90-93.

Valdés, R. A., Comendador, V. F. G., Sanz, A. R., & Castán, J. P. (2018). Aviation 4.0: more safety through automation and digitization. In *Aircraft Technology* (No. 2, pp. 25-41). IntechOpen.

- Van Gaal, S., De Lange, F. P., & Cohen, M. X. (2012). The role of consciousness in cognitive control and decision making. *Frontiers in human neuroscience*, 6, 121.
- Van Orden, K. F., Limbert, W., Makeig, S. & Jung, T. P. (2001). Eye activity correlates of workload during a visuospatial memory task. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 43(1), 111-121.
- Varga, J., Iacob, C., Grote, M., & Stanton, N. (2015). Constraint analysis for aircraft landing in distributed crewing contexts. *Procedia Manufacturing*, 3, 2682-2689.
- Veltman, J. A. & Gaillard, A. W. K. (1996). Physiological indices of workload in a simulated flight task. *Biological psychology*, 42(3), 323-342.
- Verberne, F. M., Ham, J., & Midden, C. J. (2015). Trusting a virtual driver that looks, acts, and thinks like you. *Human factors*, 57(5), 895-909.
- Vicente, K. J., & Rasmussen, J. (1992). Ecological interface design: Theoretical foundations. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics*, 22(4), 589-606.
- Vicente, K.J. (1999). *Cognitive Work Analysis: Toward Safe, Productive, and Healthy Computer- Based Work*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Vicente, K.J. (2002). Ecological interface design: Progress and challenges. *Human factors*, 44(1), 62-78.
- Villringer, A. & Chance, B. (1997). Non-invasive optical spectroscopy and imaging of human brain function. *Trends in Neurosciences*, 20(10), 435-442.
- Viola, A. (2004). La Variabilité Cardiaque au Cours des Cycles de Sommeil chez l'Homme : un Test d'Evaluation de l'Activité du Système Nerveux Autonome (Thèse). Université de Strasbourg. <https://www.theses.fr/099243709>
- Vu, K. P. L., Lachter, J., Battiste, V., & Strybel, T. Z. (2018). Single pilot operations in domestic commercial aviation. *Human factors*, 60(6), 755-762.
- Wang, Z., Yang, L. & Ding, J. (2005). Application of heart rate variability in evaluation of mental workload. *Zhonghua Lao Dong Wei Sheng Zhi Ye Bing Za Zhi*, 23, 182-184.
- Wang, J. T. Y. (2011). Pupil dilation and eye tracking. In *A handbook of process tracing methods for decision research: A critical review and user's guide* (No. 8, pp. 185-204). Psychology Press.

- Weyer, J. (2015). *Can pilots still fly? Role distribution and hybrid interaction in advanced automated aircraft*. TU Dortmund. <https://d-nb.info/1111102945/34>
- Wiener, E. L., & Curry, R. E. (1980). Flight-deck automation: Promises and problems. *Ergonomics*, 23(10), 995–1011.
- Welford, A. T. (1977). Motor performance. *Handbook of the psychology of aging*, 2(450), 95.
- Wickens, C. D., & Kessel C. (1979). The effects of participatory mode and task workload on the detection of dynamic system failures. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9(1), 24–34.
- Wickens, C. D., & Kessel, C. (1981). Failure detection in dynamic systems. In J. Rasmussen & W. B. Rouse (Eds.), *Human detection and diagnosis of system failures* (pp. 155-169). Boston, MA: Springer.
- Wickens, C. D., Helleberg, J., & Xu, X. (2000, July). Decision and workload implications of free flight and the cockpit display of traffic information (CDTI). In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 44, No. 13, pp. 37-40). Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications.
- Wickens, C. D. (2002). Multiple resources and performance prediction. *Theoretical issues in ergonomics science*, 3(2), 159-177.
- Wickens, C. D. (2002). Situation Awareness and Workload in Aviation. *Current Directions in Psychological Science*, 11(4), 128–133.
- Wickens, C. D. (2008). Multiple resources and mental workload. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 50(3), 449-455.
- Wickens, C. D., McCarley, J. S., Alexander, A. L., Thomas, L. C., Ambinder, M., & Zheng, S. (2008). Attention-situation awareness (A-SA) model of pilot error. In *Human performance modeling in aviation*, (No. 9, pp. 213-239). CRC Press.
- Wickens, C. D. & Alexander, A. L. (2009). Attentional Tunneling and Task Management in Synthetic Vision Displays. *The International Journal of Aviation Psychology*, 19(2), 182-199.
- Wickens, C. D., Li, H., Santamaria, A., Sebok, A., & Sarter, N. B. (2010, September). Stages and levels of automation: An integrated meta-analysis. In *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting* (Vol. 54, No. 4, pp. 389-393). Sage CA: Los Angeles, CA: Sage Publications.
- Wickens, C. D., Clegg, B. A., Vieane, A. Z., & Sebok, A. L. (2015). Complacency and automation bias in the use of imperfect automation. *Human factors*, 57(5), 728-739.

Wickens, C.D., Parasuraman, R., Simon, B. & Hollands, J.G. (2015). *Engineering psychology and human performance*. 4th edn. Routledge, London.

Wiegmann, D.A. & Shappell S.A. (2001). A Human Error Analysis of Commercial Aviation Accidents Using the Human Factors Analysis and Classification System (HFACS). FAA Civil Aeromedical Institute, Oklahoma City, OK 73125.

Wiegmann, D. A., Goh, J., & O'Hare, D. (2002). The role of situation assessment and flight experience in pilots' decisions to continue visual flight rules flight into adverse weather. *Human factors*, 44(2), 189-197.

Wiegmann, D.A. & Shappell, S.A. (2003). *A Human Error Approach to Aviation Accident Analysis*. Ashgate.

Wiener, E. L. & Curry, R. E. (1980). Flight-deck automation: Promises and problems. *Ergonomics*, 23(10), 995–1011.

Wiener, E. L. (1988). Cockpit automation. In *Human factors in aviation* (No. 13, pp. 433-461). Academic Press.

Wilson, J. R. & Rajan, J. A. (1995). Human-Machine Interfaces for Systems Control. In *Evaluation of Human Work: A Practical Ergonomics Methodology* (pp. 357–405). Taylor & Francis.

Woods, D. D., & Sarter, N. B. (1998). Learning from automation surprises and "going sour" accidents: Progress on human-centered automation. *NASA*, (19980016965).

Woods, D., & Dekker, S. (2000). Anticipating the effects of technological change: a new era of dynamics for human factors. *Theoretical issues in ergonomics science*, 1(3), 272–282.

Yerkes, R. M. & Dodson, J. D. (1908). The Relation of Strength of Stimulus to Rapidity of Habit Formation. *Journal of Comparative Neurological Psychology*, 18, 459–482.

Young, M. S. & Stanton, N. A. (2002). Malleable Attentional Resources Theory: A new explanation for the effects of mental underload on performance. *Human Factors*, 44(3), 365-375.

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.

Zhao, C., Zhao, M., Liu, J. & Zheng, C. (2012). Electroencephalogram and electrocardiograph assessment of mental fatigue in a driving simulator. *Accident Analysis and Prevention*, 45, 83–90.

Zimmermann, M., Bauer, S., Lütteken, N., Rothkirch, I. M., & Bengler, K. J. (2014, May). Acting together by mutual control: Evaluation of a multimodal interaction concept for cooperative driving. In *2014 international conference on collaboration technologies and systems (CTS)* (pp. 227-235). IEEE.

Zsombok, C. E. & Klein, G. A. (1997). *Naturalistic Decision Making*. L. Erlbaum Associates.