



HAL
open science

Gestion des ressources cognitives et stratégies d'adaptation court terme chez les pilotes d'aéronefs

Christophe Bey

► **To cite this version:**

Christophe Bey. Gestion des ressources cognitives et stratégies d'adaptation court terme chez les pilotes d'aéronefs. Autre. Université de Bordeaux, 2016. Français. NNT : 2016BORD0428 . tel-01496282

HAL Id: tel-01496282

<https://theses.hal.science/tel-01496282>

Submitted on 27 Mar 2017

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

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

THÈSE PRÉSENTÉE
POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR DE
L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX

ÉCOLE DOCTORALE DES SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGENIEUR
SPÉCIALITÉ : Cognitive

Par Christophe BEY

GESTION DES RESSOURCES COGNITIVES ET STRATEGIES D'ADAPTATION
COURT TERME CHEZ LES PILOTES D'AERONEFS.

Sous la direction de : Jean-Marc André

Soutenance le 08 décembre 2016

Membres du jury :

M. CHAUDRON, Laurent Directeur de recherche - ONERA	Rapporteur
M. SALEMBIER, Pascal Professeur – Université Technologique de Troyes	Rapporteur
M. CLAVERIE, Bernard, Professeur – ENSC, IMS Cognitive, Bdx-INP	Examineur
M. ANDRE, Jean-Marc Professeur, ENSC, IMS Cognitive – Bdx-INP	Directeur

Invités :

M. HOURLIER, Sylvain Docteur, Thales Avionics	Invité
--	--------

GESTION DES RESSOURCES COGNITIVES ET STRATEGIES D'ADAPTATION COURT TERME CHEZ LES PILOTES D'AERONEFS

Résumé

L'industrie aéronautique poursuit depuis de nombreuses années l'objectif d'un niveau optimal de sécurité dans le cadre du transport aérien. En ce qui concerne l'aviation militaire, plus exactement tactique, cette priorité se double d'une recherche de performance de plus en plus élevée et polymorphe. Ce qui caractérise ce type d'aviation, c'est le rapport entre la performance poursuivie et les risques acceptés. Il dépend essentiellement du contexte et des enjeux des missions à réaliser.

L'approche facteur humain constitue un levier d'action majeur pour permettre la réalisation de cet enjeu. Ainsi, dans le cadre contraint de l'aéronautique, la conception et la mise au point d'outils permettant d'assister la cognition des équipages demeure une perspective d'avenir même si la formation des pilotes devient également un enjeu majeur pour les prochaines années. Dans ce contexte, la gestion des ressources cognitives, et plus particulièrement les stratégies spécifiques de gestion mises en place par les pilotes, sont centrales au processus de prise de décision sous contraintes.

Dans une démarche de recherche et d'ingénierie en cognitive, nous avons entrepris une étude impliquant des pilotes et permettant la compréhension de ces mécanismes ainsi que la production de recommandations pour la conception d'outil d'aide à la gestion de leurs ressources cognitives. A partir de l'analyse du retour d'expériences, et sur la base des résultats d'une approche expérimentale préliminaire, nous avons construit un protocole pour mettre en évidence les stratégies mises en place par les pilotes, dans le cadre d'une activité réelle, lors de la descente et de l'approche finale sur l'aéroport de Clermont-Ferrand avec une panne critique. Les résultats expérimentaux conciliés à nos hypothèses de compréhension sur la gestion des ressources cognitives et les stratégies de gestion, achèvent notre analyse et nos recommandations pour un outil d'aide à la gestion des ressources des pilotes.

14 équipages d'Airbus A400M de l'armée de l'air ont participé à cette évaluation en simulateur.

Mots-clés : Gestion des Ressources Cognitives, Stratégies Adaptatives, Interfaces Homme-Système, Ingénierie Cognitive, Aéronautique, Aviation Tactique, Conception Centrée Utilisateurs

DYNAMIC COGNITIVE RESSOURCES ALLOCATION AND PILOT SHORT-TERM ADAPTATION STRATEGIES

Abstract

The aviation industry has for many years pursued the objective of an optimum level of safety in the air transport sector. With regard to military aviation, more precisely tactical, this priority is coupled with an increasingly high and polymorphic search for performance. What characterize this type of aviation is the relationship between the performance pursued and the accepted risks. It depends essentially on the context and the stakes of the missions to be carried out.

The human factor approach is a major leverage for achieving this challenge. Thus, within the constrained domain of aeronautics, the design and development of tools to assist crew cognition remains a prospect for the future, even if pilot training also becomes a major challenge for the coming years. In this context, the management of cognitive resources, and in particular the specific management strategies put in place by the pilots, are central to the decision-making process under constraints.

In a research and engineering approach in cognition, we undertook a study involving pilots and allowing the understanding of these mechanisms as well as the production of recommendations for the design of tools to help manage their cognitive resources. On the basis of the analysis of feedback, and results of a preliminary experimental approach, we have built a protocol to highlight the strategies implemented by the pilots in the context of an activity during the descent and the final approach on the Clermont-Ferrand airport with a critical breakdown. The experimental results reconciled with our understanding hypotheses on the management of cognitive resources and management strategies, complete our analysis and recommendations for a tool to help manage the resources of the pilots.

14 Airbus A400M crews from the French Air Force participated in this simulator assessment.

Keywords: Cognitive Resources Management, Adaptative Strategies, Human Machine Interface, Cognitics Engineering, Aerospace, Tactical Aviation, User-Centered Design

Thèse réalisée au sein de l'équipe :
« Cognitive & Ingénierie Humaine »
Laboratoire de l'Intégration du Matériau au Système
(IMS – UMR CNRS 5218)
Université de bordeaux
109 Avenue Roul, 33405 Talence.

A Marielle, Marie-Lys & Pierre-Clément.

Remerciements

L'achèvement de ce travail mené sur plusieurs années procure une grande satisfaction. Il est l'occasion de se remémorer les différentes embûches qu'il a fallu surmonter mais surtout les personnes qui m'ont permis d'en arriver là.

Je tiens donc à exprimer toute ma reconnaissance à Monsieur Bernard Claverie, Professeur des Universités et Directeur de l'Ecole Nationale Supérieure de Cognitique, qui n'a eu de cesse de m'encourager tout au long de ce parcours et qui m'a permis finalement de réaliser cet objectif. Je tiens également à le remercier pour l'honneur qu'il me fait en participant à ce jury.

Je tiens également à remercier Monsieur Laurent Chaudron, Maître de Conférences (HDR) et Directeur de Recherche à l'Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales, pour avoir accepté d'être rapporteur de mes travaux et pour ses observations qui m'ont permis d'améliorer la qualité de ce mémoire. Je tiens à lui exprimer mes remerciements pour l'honneur qu'il me fait en participant à ce jury.

Je tiens à remercier Monsieur Pascal Salembier, Maître de Conférences (HDR) et Chargé de Recherche à l'Université Technologique de Troyes, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant d'être rapporteur de mon travail et pour ses remarques qui ont permis d'améliorer la qualité de ce mémoire. Je tiens à lui exprimer tous mes remerciements pour l'honneur qu'il me fait en participant à ce jury.

Je remercie tout particulièrement Monsieur Jean-Marc André, Professeur des Universités et Directeur de recherche du groupe Cognitique et Ingénierie Humaine du laboratoire d'Intégration du Matériau au Système (IMS, CNRS UMR5218) pour avoir dirigé mes recherches. Je le remercie surtout pour la confiance sans faille qu'il m'a témoignée tout au long de ces années, de son infinie patience et pour tous ses conseils et relectures qui m'ont permis de produire ce mémoire. Il peut-être assuré de mon sincère respect ainsi que de ma profonde gratitude. Je tiens à lui exprimer mes remerciements pour l'honneur qu'il me fait en participant à ce jury.

Je remercie Monsieur Sylvain Hourlier, Docteur en Médecine, chercheur et grand spécialiste des Facteurs Humains en situation opérationnelle pour m'avoir encadré. Je le remercie pour la patience et la disponibilité dont il a fait preuve à mon égard. Nos très nombreux échanges sur une approche holistique de la spécialité, ces conseils et remarques m'ont permis d'améliorer grandement la qualité de

mes travaux et de ce mémoire. Je tiens également à lui exprimer mes remerciements pour l'honneur qu'il me fait en participant à ce jury.

Je tiens à remercier Axel et Jean-Christophe, en tant qu'associés et amis, pour leur grande tolérance vis à vis de ma disponibilité pour notre société ces derniers mois. A Axel tout particulièrement qui ne m'a jamais fait ressentir ce déficit et ce malgré la charge de travail personnelle qu'il assumait.

Je tiens à remercier spécifiquement Sami Lini pour son aide et qui sait parfaitement que sans lui cette recherche n'aurait probablement jamais abouti. Depuis les premiers jours où nous établissions nos plans d'actions respectifs jusqu'à la réalisation de nos expérimentations, il a été d'un soutien sans faille tout au long de ce travail.

Je voudrais également remercier toutes les personnes extérieures au domaine académique qui m'ont apporté leur aide à la réalisation de cette recherche.

A commencer par le général Richard Reboul, commandant le Centre d'Expériences Aériennes Militaires de l'armée de l'air, qui m'a permis de réaliser cette étude « in vivo » parmi les équipages opérationnels. Ce retour aux sources fut une expérience des plus enrichissantes qui soit.

Mes remerciements également à mon camarade Daniel Hauret qui m'a accompagné tout au long de cette démarche ainsi qu'à Stéphane Caïd et aux nombreux échanges que nous avons menés ensemble.

Je tiens tout particulièrement à remercier Guillaume Henneguez, pilote d'essai A400M, pour la confiance qu'il m'a accordée dans le cadre des études menées au sein de son unité mais aussi pour son amitié et sa gentillesse.

Un grand merci aux équipages de l'armée de l'air pour leur collaboration, ce mémoire est d'abord le résultat de leur implication dans cette recherche et ce sans la moindre réserve. Je n'oublierai pas les moniteurs simulateur qui ont bien voulu jouer le jeu tout au long des passations et ce malgré les difficultés que je ne cessais de leur imposer.

Je tiens également à remercier tous mes amis et collègues de l'équipe CIH pour leur aide, leur soutien. Qu'ils soient tous assurés de mon estime. J'exprime en particulier ma gratitude à Jean-Marc S., Christophe, Véronique et Damien (je finirai par répondre à tes questionnaires ©) pour toute l'aide qu'ils ont su m'apporter. Un merci particulier à Amélie et Audrey pour l'aide apportée dans la phase finale de production de ce mémoire.

Je tiens à remercier les membres de ma famille pour la patience dont ils ont fait preuve durant ces années.

Mes parents qui n'ont pas vraiment compris ma démarche et son but mais qui l'ont acceptée.

Mes enfants, Marie-Lys et Pierre-Clément, qui ont du supporter un père qui retourne à l'école en même temps qu'eux. Si cela a pu parfois les amuser, en de bien nombreuses occasions cela les a irrité, cependant jamais ils m'en ont fait le reproche.

A Marielle, mon épouse, pour son infinie patience et son soutien sans faille. Sans elle, son amour et son énergie, je n'aurai probablement pas pu mener à bien cette tâche. C'est aussi le résultat de son implication et de son travail qui est publié aujourd'hui.

Bien entendu, cette liste n'est pas exhaustive et je remercie tous ceux et celles qui me connaissent et qui m'ont permis d'en arriver à ce jour.

Merci à toutes et à tous

Enfin, je tiens à dédier l'ensemble de ce travail à tous mes frères d'armes et ce quel que soit leur uniforme. A ceux qui sont encore présents et aux autres qui se sont sacrifiés. A tous ceux qui sont encore indemnes et à tous ceux qui survivent, touchés dans leurs chairs ou dans leurs âmes. Ce travail accompli est ma modeste contribution à nos espérances.

« Finally, I would like to dedicate this work to all my brothers in arms regardless of nationality or uniform. To those who are still present and to our dead sacrificed. In all those who are still safe and to all those who are surviving, affected in their flesh or in their soul. This work is a small contribution to our hopes. »

« Don't Quit », TB GSL.

Table des matières

RESUME	3
ABSTRACT	5
REMERCIEMENTS	9
TABLE DES MATIERES	13
LISTE DES FIGURES	17
TABLE DES TABLEAUX	21
GLOSSAIRE	22
INTRODUCTION	25
<i>I. Le domaine de la recherche</i>	<i>25</i>
<i>II. Le contexte scientifique</i>	<i>27</i>
<i>III. Le contexte opérationnel</i>	<i>29</i>
PARTIE 1 - CONTEXTE THEORIQUE & PROBLEMATIQUE	31
CHAPITRE 1.1.....	33
CONTEXTE THEORIQUE	33
<i>I. Introduction</i>	<i>33</i>
<i>II. Environnement dynamique</i>	<i>34</i>
<i>III. Gestion des ressources cognitives</i>	<i>35</i>
III. A. Définition des ressources cognitives.....	35
III. B. L'approche Spérandio ou les phénomènes régulateurs associés aux variations de la charge de travail	36
III. C. L'approche Tricot	37
III. C. 1. Précisions sur la notion de charge de travail	37
III. C. 1. i. Charge mentale	37
III. C. 1. ii. Charge physique	38
III. C. 1. iii. Charge de travail	38
<i>IV. Modèle de la gestion des ressources</i>	<i>39</i>
IV. A. Une source unique de ressources.....	39
IV. B. Plusieurs sources de ressources.....	41
<i>V. Mesure de la charge mentale</i>	<i>43</i>
<i>VI. Ergonomie cognitive</i>	<i>45</i>
VI. A. Schématisation.....	45
VI. B. Changement du niveau de contrôle.....	47
VI. C. Principe de suffisance	49
VI. D. Anticipation.....	49
<i>VII. Conscience de la situation</i>	<i>51</i>
VII. A. Modèle d'Endsley.....	51
VII. B. Histoire et Etude de la SA dans le domaine aéronautique	55
VII. C. Modèle combiné de Klein	59
<i>VIII. Compréhension de la situation</i>	<i>60</i>
<i>IX. Conscience de la situation et charge cognitive</i>	<i>61</i>
<i>X. mémoire</i>	<i>61</i>
X. A. Mémoire de travail	62
X. B. Mémoire à long terme et mémoire de travail à long terme	64

<i>XI. Prise de décision</i>	65
<i>XII. Gestion du temps</i>	66
<i>XIII. Psychologie du temps</i>	67
XIII. A. Représentation temporelle.....	67
XIII. B. Temps et contrôle cognitif.....	68
XIII. C. Distance de projection au but.....	70
<i>XIV. Planification</i>	72
XIV. A. Concepts	72
XIV. B. Plans.....	74
XIV. C. Plans et anticipation	75
<i>XV. GLOBALISATION</i>	76
<i>XVI. CONCLUSION</i>	79
CHAPITRE 1.2.....	81
PROBLEMATIQUE ET QUESTION DE RECHERCHE	81
PARTIE 2 – APPROCHE EMPIRIQUE	85
CHAPITRE 2.1.....	87
METHODOLOGIE GENERALE.....	87
I. <i>Organisation générale et méthodologie de la partie empirique de la démarche de thèse</i>	87
II. <i>Les méthodes d'évaluation mises en oeuvre de façon récurrente au cours du travail de thèse.</i>	92
II. A. Mesure subjective.....	92
II. B. Mesure physiologique : pupillométrie	94
II. C. Mesures de performance.....	100
CHAPITRE 2.2 - RESULTATS.....	101
ELABORATION D'UN MODELE DE GESTION DES RESSOURCES COGNITIVES EN CONTEXTE AERONAUTIQUE : SUR LA BASE DE CONCEPTS ET DE MODELES EXISTANTS	101
I. <i>Introduction</i>	101
II. <i>Les modèles de références : intérêts et limites</i>	102
III. <i>Les bases de notre modele</i>	107
III. A. Couche haute : la métapolitique.....	107
III. B. Couche intermédiaire : la politique	108
III. C. Couche basse : La mise en oeuvre.....	108
IV. <i>Conclusion</i>	111
CHAPITRE 2.3 - RESULTATS.....	113
ANALYSE D'UN EVENEMENT AERONAUTIQUE EXCEPTIONNEL CRITIQUE SIMULTANE.....	113
REDISTRIBUTION DYNAMIQUE DES PRIORITES	113
I. <i>Introduction et Contexte d'étude</i>	113
II. <i>Situation d'étude</i>	114
III. <i>Description du dispositif de convoyage et cadre de la mission</i>	115
III. A. Les avions.....	116
III. B. Organisation de la patrouille.....	117
III. C. Cadre de la mission	118
III. D. Contexte humain, les équipages.....	119
IV. <i>Méthodes de recueil des observations</i>	119
V. <i>Résultats d'observations, verbatim explicités et comparés pour les deux équipages en temps réel</i>	120
V. A. Phase 1 : Dégradation météorologique soudaine et non prévue	120
V. B. Phase 2 : Apparition simultanée de la panne sur les deux mirages	122

V. C. Phase 3 : Dislocation du dispositif	123
V. D. Phase 4 : Divergence de stratégie entre les deux chasseurs	124
V. E. Phase 5 : Observation de l'évolution de la situation.....	126
V. F. Phase 6 : Evaluation des possibles	127
V. G. Phase 7 : Evolution de l'empan temporel du pilote 1.....	128
V. H. Phase 8 : Retour à la normale	129
VI. Analyse synthétique des comportements observés.	131
VI. A. Equipage n° 2	131
VI. B. Equipage n°1	132
VI. C. Renégociation dynamique du terme du plan d'action.....	133
VI. D. Contrôle permanent du stress par adaptation du plan d'action.....	134
VII. Conclusion	135
CHAPITRE 2.4 - RESULTATS.....	137
EVALUATION COMPAREE DES MESURES PHYSIOLOGIQUES DE LA CHARGE COGNITIVE.....	137
CAS D'APPLICATION : ENVIRONNEMENT OPERATIONNEL DE JEU VIDEO	137
I. Introduction	137
III. Méthode.....	141
III. A. Participants	141
III. B. Mesures	141
III. B. 1. Mesure subjective	141
III. B. 2. Mesures comportementales	141
III. B. 3. Mesures physiologiques	141
III. B. 3. i. EEG	141
III. B. 3. ii. HRV.....	142
III. B. 3. iii. Données pupillométriques	143
III. C. 2.4.2.3. Procédure.....	143
IV. Résultats.....	144
IV. A. Sensibilité des mesures.....	144
IV. B. Cohérence des mesures	145
V. Discussion.....	146
V. A. Sensibilité des mesures de contrôle	147
V. B. Evaluation des indices EEG	147
V. C. Conclusion.....	149
CHAPITRE 2.5 - RESULTATS.....	151
VALIDATION DE LA PERTINENCE DES MISES EN SITUATION ET COMPARAISON DES APPORTS DES TECHNIQUES NASA TLX ET EYE TRACKING.	151
CAS D'APPLICATION : LES VOLS EFFECTUES DANS LE CADRE D'UNE ETUDE SUR ELABORATION DES PROCEDURES D'EMPLOI DANS LE CAS D'UNE INTERRUPTION DU DECOLLAGE SUR A400M	151
I. Introduction	152
II. Objet de l'étude.....	153
III. Méthodologie.....	154
III. A. Moyens	154
III. A. 1. Ressources humaines de la MEST A400M impliquées dans l'évaluation	154
III. A. 2. Matériel de la MEST A400M.....	155
III. B. Méthodes.....	156
III. B. 1. Méthodologie de l'évaluation de la charge de travail.....	156
III. B. 2. Construction d'un scénario.....	162
V. Résultats et analyse	165
V. A. Analyse critiques des mises en place méthodologiques	165
V. B. Résultats CEAM.....	166
V. C. Résultats propres	169

VI. Conclusion	175
CHAPITRE 2.6 - RESULTATS.....	177
ETUDE DES STRATEGIES ADAPTATIVES DES PILOTES D’AIRBUS A400M EN SITUATION SOUS FORTE PRESSION	
TEMPORELLE.....	177
I. Introduction	177
II. Objectifs et hypothèses.....	178
IV. Méthode et Plan d’expérimentation	179
IV. A. Description de la tâche et scenario.....	179
IV. B. Description du panel des participants	186
IV. C. Méthodes prises en compte dans le suivi expérimental.....	187
IV. C. 1. Entretiens de débriefing et d’Auto-confrontation.....	187
IV. C. 2. Mesure de la charge cognitive.....	188
IV. C. 2. i. Mesures physiologiques : pupillométrie	188
IV. C. 2. ii. Mesures subjective : NASA-TLX	189
IV. C. 3. Mesure de la performance	189
V. Résultats.....	190
VI. Conclusion	199
PARTIE 3 – SYNTHÈSE & PERSPECTIVES.....	201
I. DISCUSSION	203
II. RECOMMANDATION	207
III. CONCLUSION.....	217
VALORISATION SCIENTIFIQUE.....	219
CONFÉRENCES INTERNATIONALES A COMITÉ DE LECTURE	219
CHAPITRE D’OUVRAGE.....	221
POSTERS :	221
WORKSHOPS :	221
BIBLIOGRAPHIE	223
ANNEXES.....	281

Liste des figures

FIGURE 1 : IHS AVIONIQUE 2020 ET SA TIME LINE	28
FIGURE 2. GESTION DES RESSOURCES COGNITIVES DANS LE TEMPS	35
FIGURE 3. THEORIE DE LA RESSOURCE UNIQUE.....	39
FIGURE 4. PROCESSUS LIMITES PAR LES RESSOURCES ET PAR LES DONNEES, D'APRES NORMAN & BOBROW (1975)	40
FIGURE 5. THEORIE DES RESSOURCES MULTIPLES.....	42
FIGURE 6. MODELE 4D, WICKENS (2008A)	43
FIGURE 7. LES HIERARCHIES D'ABSTRACTION ET DE RAFFINEMENT, D'APRES RASMUSSEN (1986).....	45
FIGURE 8. MODELE SRK, D'APRES RASMUSSEN (1983).....	48
FIGURE 9. ANTICIPATION PAR PREPARATION A L'ACTION.	50
FIGURE 10. CONSCIENCE DE LA SITUATION DANS LE CADRE DE LA DYNAMIQUE TEMPORELLE.....	51
FIGURE 11. MODELE DE LA CONSCIENCE DE LA SITUATION (ENDSLEY, 1995).....	53
FIGURE 12. MODELE DE LA CONSCIENCE DE LA SITUATION (ENDSLEY, 1995).....	54
FIGURE 13. MODELE DE ENDSLEY ET AL. (2000) APPLIQUE AU FANTASSIN US.....	58
FIGURE 14. LES TROIS MODES D'EVALUATION DU MODELE RECOGNITION PRIMED DECISION DE KLEIN (1993) :	59
FIGURE 15. MODELE MULTI-FILS, D'APRES AMALBERTI (1996)	60
FIGURE 16. CORRELATION DIMINUTION DE LA CHARGE/CONSCIENCE DE LA SITUATION, WICKENS (2008)	61
FIGURE 17. POSITIONNEMENT DE LA MEMOIRE DANS UN PERSPECTIVE DE DYNAMIQUE TEMPORELLE.....	62
FIGURE 18. MEMOIRE DE TRAVAIL, BADDELEY (1986), PRESENTE DANS (GAONAC'H & LARIGAUDERIE, 2000)	62
FIGURE 19. MODELE DE NORMAN & SHALLICE (1980), SIMPLIFIE PAR BADDELEY (1986)	63
FIGURE 20. MODELE DE LA MEMOIRE DE TRAVAIL LONG TERME, ERICSSON & KINTSCH (1995)	65
FIGURE 21. MODELE DE PRISE DE DECISION, D'APRES WICKENS ET AL. (2004)	66
FIGURE 22. TEMPS ET CONTROLE COGNITIF, D'APRES HOLLNAGEL (1998)	69
FIGURE 23. MODELE ECOM (HOLLNAGEL, 2003)	70
FIGURE 24. CHARGE MENTALE FONCTION DE LA DISTANCE PERÇUE AU BUT ET DE L'ESTIMATION DU TEMPS DISPONIBLE, D'APRES HANCOCK & CAIRD (1993)	71
FIGURE 25. INCERTITUDE DES PROJECTIONS EN FONCTION DU TEMPS, D'APRES REYNOLDS (2006)	72
FIGURE 26. EXEMPLE DE HIERARCHISATION DANS LA PLANIFICATION D'APRES (SACERDOTI, 1977, HOC & NGUYEN-XUAN, 1987)..	73
FIGURE 27 : MODELE DE L'ARCHITECTURE COGNITIVE DE CONTROLE DYNAMIQUE (HOC & AMALBERTI, 1994)	77
FIGURE 28 : DIMENSION COGNITIVE DU MODELE DE CONTROLE DYNAMIQUE DE LA SITUATION (HOC & AMALBERTI, 2007)	78
FIGURE 29. REPRESENTATION DE L'ORGANISATION GENERALE ET METHODOLOGIE DE LA PARTIE EMPIRIQUE DE LA DEMARCHE DE THESE, EN 3 PHASES ET 5 ETAPES.	91
FIGURE 30. STRUCTURES NEURONALES ET VOIES CONTROLANT LE DIAMETRE PUPILLAIRE	95
FIGURE 31. OCULOMETRE PORTATIF TOBII GLASSES, SON BOITIER D'ACQUISITION ET LES MARQUEURS INFRAROUGES (D'APRES TOBII GLASSES EYE TRACKER USER MANUAL)	96

FIGURE 32. PROCEDURE DE CALIBRATION (D'APRES TOBII GLASSES EYE TRACKER USER MANUAL).....	97
FIGURE 33 : TENDANCE GENERALE DE L'EVOLUTION DU DIAMETRE PUPILLAIRE APRES LOESS (SPAN = 0.25)	98
FIGURE 34 : SIGNAL DEBRUTE (APRES LOESS, SPAN = 0,011) ET MISE EN REGARD DES EVENEMENTS DU VOL (PASTILLES ROUGES) .	99
FIGURE 35. LOI DE YERKES-DODSON CONCERNANT LE LIEN ENTRE NIVEAUX DE PERFORMANCE ET NIVEAUX DE VIGILANCE (D'APRES WICKENS ET HOLLANDS, 2000).....	100
FIGURE 36. LA SA D'APRES LE MODELE D'ENSDLEY (1995).....	103
FIGURE 37. INCERTITUDE DES PROJECTIONS EN FONCTION DU TEMPS, D'APRES REYNOLDS (2006)	104
FIGURE 38. REPRESENTATION SYNTHETIQUE DES DIFFERENTS APPORTS DES MODELES RETENUS.	106
FIGURE 39. REPRESENTATION DE LA STRUCTURE EN 3 COUCHES DU MODELE DE GESTION DES RESSOURCES COGNITIVES	108
FIGURE 40. PROCESSUS D'ACTIVATION ET INHIBITION; LES SCHEMAS D'ACTION SONT REPRESENTES EN ROUGE.....	109
FIGURE 41. PROJECTION EN FONCTION DE LA SENSIBILITE ET DE LA DISTANCE OBJECTIVE	110
FIGURE 42. REPRESENTATION GEOGRAPHIQUE DE L'ITINERAIRE TRANSATLANTIQUE DU VOL DEPUIS FORT WAYNE (USA) JUSQU'AU ILES ACORES	115
FIGURE 43. LES AVIONS CONCERNES PAR NOTRE ETUDE : MIRAGE 2000-D (EN HAUT A GAUCHE), AIRBUS A310 MRTT (EN HAUT A DROITE), FALCON MARINE (EN BAS).....	117
FIGURE 44. REPRESENTATION DU DISPOSITIF DE CONVOYAGE, ORGANISATION DE LA PATROUILLE ET POSITIONNEMENT RELATIF DES AERONEFS.....	118
FIGURE 45. SYNTHESE DES VERBATIM DE LA PHASE DEGRADATION METEOROLOGIQUE SOUDAINE ET NON PREVUE.....	121
FIGURE 46. SYNTHESE DES VERBATIM DE LA PHASE D'APPARITION SIMULTANEE DE LA PANNE SUR LES DEUX MIRAGES	122
FIGURE 47. SYNTHESE DES VERBATIM DE LA PHASE DE DISLOCATION DU DISPOSITIF	124
FIGURE 48. SYNTHESE DES VERBATIM DE LA PHASE DE DIVERGENCE DE STRATEGIES	125
FIGURE 49. SYNTHESE DES VERBATIM DE LA PHASE D'OBSERVATION DE L'EVOLUTION DES STRATEGIES	127
FIGURE 50. SYNTHESE DES VERBATIM DE LA PHASE D'EVOLUTION DE L'EMPAN TEMPOREL DU PILOTE 1	129
FIGURE 51. SYNTHESE DES VERBATIM DE LA PHASE DE RETOUR A LA NORMALE	130
FIGURE 52. REPRESENTATION SYNTHETIQUE DU COMPORTEMENT DE L'EQUIPAGE 2 AU COURS DE L'INCIDENT.....	132
FIGURE 53. REPRESENTATION SYNTHETIQUE DU COMPORTEMENT DE L'EQUIPAGE 1 AU COURS DE L'INCIDENT.....	133
FIGURE 54. REPRESENTATION DE LA RENEGOCIATION DYNAMIQUE DU TERME DU PLAN D'ACTION	134
FIGURE 55. REPRESENTATION DU CONTROLE PERMANENT DU STRESS PAR ADAPTATION DU PLAN D'ACTION.....	134
FIGURE 56. CAPTURE D'ECRAN D'UN DES DEUX NIVEAUX CHOISIS POUR L'EXPERIENCE	139
FIGURE 57. POSITION DES ELECTRODES EEG (ADVANCED BRAIN MONITORING, 2013)	142
FIGURE 58. MOYENNE DE CHAQUE MESURE A TRAVERS LES SUJETS POUR LES CONDITIONS FACILE ET DIFFICILE. LES BARRES D'ERREUR REPRESENTENT UN ECART-TYPE A LA MOYENNE. LES VALEURS DE P AFFICHEES RESULTENT DES TESTS DE WILCOXON.	145
FIGURE 59. DISPOSITIF DE EYE TRACKER, LES PODS (A), LES LUNETTES (B) ET L'ENREGISTREUR (C).....	157
FIGURE 60. REPRESENTATION DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL DANS LE COCKPIT DU SIMULATEUR A400M. POSITIONNEMENT DES 2 GOPROS, EYE-TRACKER, CAPTEURS POD-IR.....	157
FIGURE 61. REPRESENTATION DE LA MAQUETTE D'UN QUESTIONNAIRE NASA-TLX EN LANGUE ANGLAISE.....	159
FIGURE 62. REPRESENTATION GRAPHIQUE DU MODELE DE DE WAARD (SELON DE WAARD, 1996, P24)	160
FIGURE 63. REPRESENTATION CARTOGRAPHIQUE DU TRACE DE MISSION. CHRONOLOGIE DE LA MISSION :	163

FIGURE 64. PRESSION TEMPORELLE RESSENTIE (SCORE NASA-TLX).	171
FIGURE 65. CONTRAINTE PHYSIQUE RESSENTIE (SCORE NASA-TLX).	171
FIGURE 66. DIFFICULTE RESSENTIE DE LA PASSATION (EN SCORE NASA-TLX).	172
FIGURE 67. RESULTATS COMPARES DE NASA-TLX ET EYETRACKER POUR LE PILOTE PF1.....	174
FIGURE 68. RESULTATS COMPARES DE NASA-TLX ET EYETRACKER POUR LE PILOTE PF2.....	175
FIGURE 69.VUE INTERIEURE DU SIMULATEUR A400M (BA 123, ORLEANS-BRICY).....	179
FIGURE 70. CARTE D'APPROCHE POUR UN ATERRISSAGE A CLERMONT FERRAND PISTE 26.	181
FIGURE 71. FICHE DE PERCEE SUR CLERMONT FERRAND (CLF).	182
FIGURE 72. SCENARIO ET PRINCIPALES CONSEQUENCES SUR LE SYSTEME.	183
FIGURE 73. DEROULEMENT CHRONOLOGIQUE DU SCENARIO THEORIQUE.	184
FIGURE 74. MODELE REPRESENTANT LE PASSAGE EN FONCTIONNEMENT "SURVIVAL SKILLS" DANS LE CAS DE SITUATIONS EXCEPTIONNELLES A PARTIR DE LA METACOGNITION (D'APRES LE MODELE SRK DE RASMUSSEN, 1979)	205
FIGURE 75. MODELE DE MISE EN PLACE DE STRATEGIE DE GESTION ALTERNATIVE EN 3 ETAPES	206
FIGURE 76. REPRESENTATION DE LA PROPOSITION D'ECRAN PRINCIPAL EN MODE D'AFFICHAGE SIMPLIFIE..	208
FIGURE 78. ÉTAT NOMINAL DES AFFICHAGES (PFD ET ND).	209
FIGURE 79. ENTREE DANS LE MODE PILOTAGE EN PRIORITE LORS DE LA SURVENUE DE L'INCIDENT CRITIQUE (PFD SIMPLIFIE ET ND NEUTRALISE). REALISATION DE FLY.	209
FIGURE 80. ENTREE DANS LE MODE NAVIGATION, UNE FOIS LE PILOTAGE ASSURE (PFD SIMPLIFIE ET ECHELLE ND ADAPTEE A LA TEMPORALITE). REALISATION DE NAVIGATE.	210
FIGURE 81. ENTREE DANS LE MODE ETAT SYSTEMES, UNE FOIS LA TRAJECTOIRE SECURISEE (PFD SIMPLIFIE ET ND EN PAGE ETAT SYSTEMES AGREGES). REALISATION MANAGE.	210
FIGURE 82. ENTREE EN MODE PAGE APPLICATION DE LA SOLUTION (PFD SIMPLIFIE ET ND EN PAGE DO-LIST). REALISATION DE MANAGE & COM.	210
FIGURE 83. RETOUR EN MODE STANDARD, SORTIE APRES RESOLUTION DE L'ÉVENEMENT (PFD ET ND CLASSIQUES)..	210
FIGURE 84. REPRESENTATION DE LA PROPOSITION DE PRESENTATION DE L'ÉTAT DES SYSTEMES.	212
FIGURE 85. REPRESENTATION DU POINT SITUATION SOUS FORME DE DIAGRAMME RADAR.	212
FIGURE 86. PRESENTATION DES SOLUTIONS POSSIBLES AVEC INDICATION DE LEUR CRITICITE SELON 3 PARAMETRES : HUMAIN, ENVIRONNEMENT, SYSTEME	213
FIGURE 87. PRESENTATION DES AVANTAGES, INCONVENIENTS ET DES LIMITES DE LA SOLUTION SELECTIONNEE.....	213
FIGURE 88. "DO LIST" AVEC TIMELINE ASSOCIEE.	214
FIGURE 89. BRIEFING, PRESENTATION DE LA MISE EN ACTION DE LA SOLUTION SELECTIONNEE.	214
FIGURE 90. ÉTAT NOMINAL DES AFFICHAGES (PFD ET ND).	215
FIGURE 91. ENTREE DANS LE MODE PILOTAGE EN PRIORITE (PFD SIMPLIFIE ET ND NEUTRALISE).....	215
FIGURE 92. ENTREE EN MODE ETAT SYSTEMES (PFD SIMPLIFIE ET ND EN PAGE ETAT SYSTEMES AGREGES).	215
FIGURE 93. ENTREE EN MODE PROJECTION DES CONTRAINTES SUR LA MISSION (PFD SIMPLIFIE ET ND EN PAGE POINT DE SITUATION).	216
FIGURE 94. ENTREE EN MODE CHOIX DES SOLUTIONS (PFD SIMPLIFIE ET ND EN MATRICE DE RISQUE).....	216

FIGURE 95. ENTREE EN MODE AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA SOLUTION (PFD SIMPLIFIE ET ND EN PAGE AVANTAGES / INCONVENIENTS).....	216
FIGURE 96. ENTREE EN MODE PAGE APPLICATION DE LA SOLUTION RETENUE (PFD SIMPLIFIE ET ND EN PAGE DO-LIST)..	216
FIGURE 97. ENTREE EN MODE BRIEFING ET REALISATION (PFD SIMPLIFIE ET ND EN PAGE BRIEFING).....	217
FIGURE 98. RETOUR EN MODE STANDARD, SORTIE APRES RESOLUTION DE L'EVENTEMENT (PFD ET ND CLASSIQUES)	217

Table des tableaux

TABLEAU 1. ORDRE DE PRESENTATION DES RUNS POUR CHAQUE SUJET.	144
TABLEAU 2. DESCRIPTION DES PROFILS DES 4 PILOTES EN FONCTION (PF). (HDV : HEURES DE VOL).	155
TABLEAU 3. EXPOSE DES SITUATIONS POUR LESQUELLES L'EXPERIMENTATION A ETE CONDUITE (VERT), RESTE A FAIRE (AMBRE) OU BIEN NE SERA PAS ABORDEE DANS LE CADRE DE L'EXPERIMENTATION DE L'A400M.....	167
TABLEAU 4. RESULTATS DES SCORES NASA TLX PAR PF, PAR TACHE TI (ETAPE DE LA MISSION) ET PAR DIMENSION MESUREE (EFFORT MENTAL, EFFORT PHYSIQUE, CONTRAINTE TEMPORELLE, PERFORMANCE, EFFORT, FRUSTRATION, DIFFICULTE DE LA PASSATION).	170
TABLEAU 5. DESCRIPTIF DU PANEL ET PROFILS DES PILOTES AYANT PARTICIPE A L'EXPERIMENTATION.....	187
TABLEAU 6. REPRESENTATION DES COMPORTEMENTS OBSERVES CHEZ CHACUN DES PILOTES ET ETAPES DU SCENARIO	192
TABLEAU 7. REPRESENTATION DES PILOTES N'AYANT PAS DE STRATEGIE ADAPTATIVE, EXEMPLE DU PILOTE X.	194
TABLEAU 8. REPRESENTATION DES PILOTES AYANT DEVELOPPE DES STRATEGIES ADAPTATIVES, EXEMPLE DU PILOTE 5.....	197

Glossaire

Abordage : collision en vol entre deux aéronefs.

Airmanship : mise en oeuvre des connaissances, compétences et expériences aéronautiques favorisant des opérations aériennes sûres et efficaces ; elle est acquise par l'expérience et des connaissances initiales.

ASAP (Anticipation Support for Aeronautical Planning) : démonstrateur de concept industriel développé par Thales Avionics.

Back to Basics : processus qui consiste à revenir aux bases fondamentales de l'aviation et du pilotage en particuliers.

Checklist : liste de vérification des tâches réalisées pour valider une procédure ou une phase de vol.

Commandant de bord : pilote légalement en charge de l'aéronef et de la prise des décisions finales. L'expertise et l'ancienneté permettent aux pilotes d'accéder à cette qualification.

Collision : accident d'un aéronef avec un obstacle au sol, également utilisé pour un accident au sol entre deux aéronefs

Copilote ou OPL : titre donné au pilote assistant le commandant de bord.

Crew Resource Management : voir CRM.

CRM (Crew Resource Management) : gestion efficace des ressources dans le cockpit ; l'objectif premier est la synergie d'équipe, mais participe également à l'amélioration de la gestion des risques, des pratiques et de la culture professionnelle liée à la sécurité.

Décrochage : Phénomène aéronautique se produisant quand l'aéronef perd brusquement sa portance et tombe alors comme une pierre. Ce phénomène relève d'une incidence trop importante entre la direction du vent relatif et la surface des ailes et est favorisé par une faible vitesse.

Dégagement : Alternative en cas d'impossibilité d'atterrissage à destination.

Déroutement : Terrain de secours accessible en route.

Dispositif : consiste en un groupe d'aéronefs volant ensemble pour réaliser la mission

Estimated Time of Arrival : voir ETA.

ETA (Estimated Time of Arrival) : heure estimée d'arrivée à destination (à l'aéroport ou au stand).

Hierarchical Task Analysis : voir HTA.

HTA (Hierarchical Task Analysis) : analyse hiérarchisée de la tâche, méthodologie d'étude et de modélisation de l'activité.

ILS (Instrument Landing System) : système d'atterrissage aux instruments reposant sur des moyens de radiocommunication et consistant en un guidage spatial de l'aéronef de précision, permettant un atterrissage en conditions météorologiques très dégradées.

GLIDE : Composante verticale du guidage de l'aéronef indiquant une pente idéale vers l'aéroport de destination.

Navigation Display : voir ND.

ND (Navigation Display) : écran présentant le plan horizontal de navigation, typiquement de type cartographique.

Officier Pilote de Ligne : voir OPL.

Patrouille : consiste en un ensemble d'avion du même type.

PF (Pilot Flying) : nom donné au pilote qui est en exécution effective de la charge de pilotage ainsi que de navigation de l'aéronef.

PF (Primary Flight Display) : écran de visualisation des instruments premiers nécessaires au vol.

PM (Pilot Monitoring) : nom donné au pilote qui est responsable de la surveillance des systèmes et d'assister le PF.

PNF (Pilot Non Flying) : ancien nom donné au PM

Portance : en aérodynamique, force s'opposant au poids de l'avion.

Remise de gaz : manœuvre consistant à interrompre l'atterrissage ou la phase d'approche

STAR (Standard Terminal Arrival Route) : trajectoire à suivre à l'arrivée sur un aéroport, représentée sur les cartes par la projection de la trajectoire et les altitudes de survol.

Stress test : forme d'évaluation et de tests intenses et minutieux visant à déterminer la stabilité d'un système ou d'une entité.

TEM (Threat & Error Management) : méthodologie d'analyse de la situation et de prise de décision collaborative d'équipage consistant à identifier les menaces, les moyens d'y répondre et les actions à entreprendre.

Threat & Error Management : voir TEM.

Trainée : en aérodynamique, force qui s'oppose à l'avancement de l'avion.

Volets : Dispositifs permettant d'augmenter la portance de l'aéronef au détriment de la trainée.

VOR (VHF Omnidirectional Range) : est un système de positionnement radioélectrique utilisé en navigation aérienne et fonctionnant avec les fréquences VHF(ou UHF pour les militaires).

Waypoint : point de passage sur la route suivie aidant la navigation.

Introduction

I. LE DOMAINE DE LA RECHERCHE

Comme l'indique la mention de la spécialité de ce mémoire de thèse de doctorat, nos travaux s'inscrivent dans un domaine scientifique et d'ingénierie relativement récent, la Cognitique. Le terme "cognitique" a été défini en 1983 par Jean-Michel Truong comme "discipline scientifique et pratique technique, branche de l'informatique, qui a pour objet l'acquisition et la représentation formelle des connaissances et des modes de raisonnement, en vue de leur simulation à l'aide d'ordinateurs". La cognitique serait donc la **science et la technique du traitement automatique de la connaissance**. Elle associe l'automatique, l'informatique, les sciences humaines et biologiques. La cognitique et ses domaines d'applications, bien que nombreux, sont encore trop peu connus du grand public comme des professionnels. En effet, pour le moment, s'il existe de nombreuses formations en rapport avec les sciences cognitives (ensemble de disciplines scientifiques visant à l'étude et la compréhension des mécanismes de la pensée humaine, animale ou artificielle, et plus généralement de tout système cognitif), très peu de formation sont dédiées spécifiquement à la cognitique.

La recherche et l'ingénierie en cognitique s'intéressent à toutes les étapes de la vie des systèmes humains/machines complexes et fait appel aux connaissances et aux méthodes de plusieurs disciplines des sciences de la nature et des sciences sociales et humaines. Elles ont pour objectif fondamental d'améliorer la performance des systèmes humains-machines (J Rasmussen, 1983). Elles permettent donc de pallier le manque, souvent présent, d'adéquation entre les outils fournis aux utilisateurs et leurs besoins d'informations pour réaliser leur travail.

L'ingénierie en cognitique s'appuie sur la démarche dite de conception centrée utilisateur qui consiste à considérer les utilisateurs et leurs besoins tout au long du processus de développement d'un produit. La conception centrée sur l'utilisateur s'appuie sur des critères d'utilisabilité et d'accessibilité. Les domaines d'intervention fréquents de l'ingénierie en cognitique sont le développement ou l'adaptation d'interface Homme/Machine (IHM), dans le but de gérer des opérations complexes. Ces opérations sont souvent soumises aux contraintes suivantes :

- Les variables à gérer sont multiples et interdépendantes

- Les processus à gérer sont dynamiques dans le sens où ils évoluent dans le temps, en particulier en raison de la complexité des systèmes et des différents éléments qui interagissent entre eux.
- Il existe des risques pour le personnel humain et pour les machines.
- Les objectifs sont souvent conflictuels : Il faut faire vite mais ne pas faire d'erreur, maximiser le critère économique et la sécurité

La démarche de l'ingénierie en cognitive pour résoudre un problème, peut se résumer en quatre étapes :

- L'analyse des activités de travail

Elle se fait à l'aide d'entretiens et d'observations réalisées de préférence sur le lieu de travail et pendant le travail. Cette analyse a pour but de connaître les activités des utilisateurs, les stratégies, les décisions, les informations utilisées, les difficultés, les erreurs, les frustrations, les outils utilisés, etc. Le résultat de cette analyse servira à orienter le travail de création ou d'amélioration du système

- Conception de maquette - optimisation

La maquette présente les points clés de la tâche à optimiser, de même que des fonctionnalités-clés de retour d'information, de navigation et de soutien à la tâche. C'est un outil indispensable pour appréhender la nouvelle tâche et la nouvelle interface, et un bon moyen de communication avec les divers participants au projet.

- Les tests d'utilisabilité

Ils servent à évaluer l'ergonomie de l'interface. Ils consistent à demander aux utilisateurs de la nouvelle interface de réaliser un ensemble de tâches et de penser leurs actions à voix haute. Les scénarios de tâches à réaliser correspondent aux tâches habituelles des utilisateurs et sont mis en place pendant la phase d'analyse. On mesure alors la performance des utilisateurs et leur niveau de satisfaction face à la nouvelle interface.

- L'itération des 3 phases précédentes

Pour parvenir au meilleur résultat possible il est nécessaire d'itérer les phases d'analyse conception et évaluation, pour apporter les corrections éventuelles.

II. LE CONTEXTE SCIENTIFIQUE

La question de la gestion des ressources cognitives est centrale à toute la démarche en psychologie cognitive. L'idée d'une forme de « carburant » aux processus cognitifs qu'il serait possible d'évaluer afin de déterminer les marges et limites des opérateurs est investiguée depuis plus de cent ans (Yerkes & Dodson, 1908).

En s'appuyant sur la théorie de l'information, Moray (1967) émet l'hypothèse que l'homme possède un processeur central de capacité limitée. Les opérations mentales effectuées sur les influx sensoriels consomment de la capacité, qui peut être divisée parmi différentes structures de traitement en cas de tâches parallèles. La capacité allouée à une structure de traitement donnée est assujettie à la demande de la tâche.

Ce courant théorique est complété par Kahneman (1973), selon qui l'homme disposerait d'une réserve limitée de « capacité » disponible pour un ensemble de tâches. La performance dépendrait du degré d'allocation de cette capacité à la tâche réalisée. Il est supposé que le montant de capacité disponible soit limité et fonction d'un niveau d'activation. Une stratégie d'allocation déterminerait l'allocation de la capacité aux diverses activités, la stratégie adoptée dépendant de caractéristiques intrinsèques de l'individu et de critères motivationnels, menant à une bonne ou au contraire une mauvaise gestion des ressources. Elle envisage également que l'allocation de capacité ne dépende pas que de la tâche mais également de l'opérateur.

Dans le domaine aéronautique, qui nous intéresse particulièrement, c'est le pilote qui cherche à préserver au mieux ses ressources par l'application de stratégies écologiques d'économie cognitive. Le principe d'économie des ressources cognitives s'entend plus comme un moyen d'optimisation que comme un simple procédé de diminution de la consommation en ressources cognitives : des raccourcis cognitifs existent face à des situations déjà connues, et des moyens permettent de se prémunir de ce qui est mal connu. L'anticipation, la capacité d'abstraction, la délégation et la routinisation sont parmi les principaux moyens.

Dans le cadre du développement d'un modèle d'économie des ressources cognitives des pilotes, un certain nombre de travaux ont déjà été menés en collaboration avec la société THALES AVIONICS en collaboration avec l'équipe Cognitive et Ingénierie Humaine (CIH) du laboratoire de IMS UMR 5218. Ces travaux sont conduits dans le cadre de l'équipe Human Engineering (HEAL) for Aerospace Laboratory, commune à Thales Avionics et l'Ecole Nationale Supérieure de Cognitive. La roadmap de l'équipe HEAL adresse la problématique de la gestion des ressources cognitives des utilisateurs de systèmes complexes

aérospatiaux anthropotechniques. Son objet est de construire des connaissances sur les stratégies des opérateurs pour gérer leur charge de travail. Cette roadmap repose sur quatre étapes abordant des thématiques d'investigation complémentaires :

- étape 1 : L'anticipation. C'était le cadre de la thèse de Sami Lini (2013) et du projet PROJET ASTUTE (financement CEE, 2011-2014). Ce travail a été menée sur la stratégie d'anticipation et a permis la validation de solutions pour la gestion temporelle dans les IHM. La time line dans AV2020 en est un des exemples les plus parlants (figure 1).



Figure 1 : IHS Avionique 2020 et sa time line

- étape 2 : La schématisation. La stratégie d'emploi de représentations mentales structurées par abstraction/raffinement n'a pas pu faire l'objet d'une thèse, mais a été intégrée dans un projet européen H2020 nommé Future Sky safety. Dans ce cadre, le bénéfice de la structuration et de la présentation de données avions respectant les schémas mentaux des pilotes est testé dans une un prototype face à l'IHM système « classique » d'un A320. Le prototype est en cours de développement et sera testé en 2017.
- étape 3 : La délégation et restructuration des priorités. C'est le cadre de notre travail de thèse, mené en collaboration CEAM /A400M
- étape 4 : La routinisation. Enfin, la routinisation sera le dernier volet exploratoire de ces stratégies d'économie de ressources au profit des pilotes. Il s'agira d'explorer les caractéristiques de l'apprentissage (et de l'économie cognitive qui en résulte par la descente dans les niveaux de contrôle de Rasmussen (1983) et des technologies qui le facilite dans les IHM afin de pouvoir améliorer ces dernières.

III. LE CONTEXTE OPERATIONNEL

La problématique de la gestion des ressources cognitives pour les équipages tactiques est un problème central de l'activité des opérations de l'armée de l'air. Dans la plupart des cas ce sont les conséquences d'une mauvaise gestion. Ainsi, des prises de décision inadéquates ou bien encore des stratégies de prise d'information inadaptées sont régulièrement identifiées comme des défaillances potentiellement accidentogènes.

La gestion des ressources cognitives conditionne directement la performance des stratégies de prise d'information, mais aussi la pertinence de la représentation de la situation qui induit la prise de décision guidée par l'expertise. La mise à disposition des ressources ad-hoc, avec l'état pilote et son expertise, est une des garanties d'une prise de décision en adéquation avec la situation. On ne recherche pas nécessairement la meilleure prise de décision, mais celle qui à l'instant donné est la plus adaptée à la mise en œuvre par l'équipage et ce avec la bonne temporalité.

Au cours des vingt dernières années, l'entraînement des personnels puis l'acquisition de nouveaux systèmes, de plus en plus performants, ont permis de réduire significativement le niveau de risque de l'aviation tactique et ce malgré des contraintes d'engagement de plus en plus diverses et variées en terme de gestion des risques. Ces prises de risques sont contraintes par les enjeux et les situations tactiques des différents théâtres d'opérations. Les opérateurs de fait doivent pouvoir s'adapter rapidement à ces conditions d'emploi.

De fait, même si les accidents demeurent à un niveau acceptable, la multiplicité et la variabilité de ces engagements représentent un challenge important pour l'organisation.

La seule réponse technologique ne semble pas suffisante pour adresser ce problème et c'est pourquoi depuis plusieurs décennies l'armée de l'air s'est engagée dans un vaste chantier de prise en compte des facteurs humains. Après une phase d'acculturation des personnels, puis une phase d'optimisation du travail en équipage, elle s'intéresse aujourd'hui à une conception anthropocentrée de ses systèmes opérationnels prenant en compte notamment la gestion des ressources cognitives de façon à produire des systèmes en adéquation aux usages des pilotes dans la multiplicité de leurs usages. Cette conception prend donc en compte la fatigue, le stress, mais aussi toute variation de l'état du pilote ou de l'équipage induite par les possibles théâtres d'opération où les personnels sont engagés.

Il est évident que la conception anthropocentrée, même si elle est efficace ne peut être seule la réponse à cet enjeu. En situation réelle la compréhension des mécanismes mis en œuvre au niveau cognitif par les différents opérateurs doit être étudiée afin de pouvoir guider

l'entraînement des équipages, voire recommander des stratégies spécifiques de partage des ressources cognitives pour l'équipage en fonction des différents cas d'usage.

Notre travail de recherche s'inscrit dans la continuité de cette approche : produire des recommandations pour la conception de systèmes. L'objectif est d'améliorer la performance des processus cognitifs dans la gestion de mission, face à un niveau de risque donné, mais également d'identifier les inducteurs qui pourraient être mobilisés pour l'entraînement des pilotes à faire face à la variabilité des situations.

**PARTIE 1 - CONTEXTE
THEORIQUE &
PROBLEMATIQUE**

Chapitre 1.1

Contexte théorique

I. INTRODUCTION

Les systèmes complexes dynamiques qui font l'objet de notre étude obligent les opérateurs à gérer un ensemble de tâches qui se trouve être en constante évolution. Ces changements s'opèrent aussi bien de façon quantitative (plus de tâches à réaliser) que qualitative (changement d'état des tâches en cours). Le contexte changeant de la mission en cours, impose constamment à l'opérateur de mettre à jour son image mentale de la situation tactique ainsi que de réactualiser la pertinence de ses objectifs finaux. Cette reconstruction continue du modèle mental de la situation tactique (Amalberti, 2001) est abordée dans la littérature à travers le concept de « conscience de la situation », en anglais Situation Awareness (SA).

Cette première partie de notre revue de littérature présente un état de l'art sur le concept de Situation Awareness. Elle doit nous permettre afin de comprendre la façon dont elle se construit chez l'opérateur. Cette représentation du contexte est propre à chacun des membres d'un équipage et elle évolue au fil du temps et au cours des changements de tâche.

Dans un premier temps, nous présentons les différentes approches adoptées dans les travaux antérieurs dans leurs tentatives de définition de la SA. Puis, nous présenterons les travaux de modélisation qui intègrent ce concept non seulement du point de vue de l'individu, mais aussi de l'équipage (systèmes collaboratifs). Enfin, nous présenterons quelques méthodes qui permettent de mesurer le niveau de conscience de situation d'un opérateur.

Au cours de cette synthèse, bibliographique, nous aborderons donc la conscience de situation comme un processus métacognitif via les ressources cognitives disponibles et donc de leur gestion. Le tout s'inscrira dans une temporalité dynamique. La gestion des ressources cognitives se fait sur la base de plusieurs outils comme l'anticipation (Lini, 2013), la planification, la délégation et la redistribution dynamique des priorités.

Nous nous intéresserons plus particulièrement à ce dernier outil qui semble être le mieux adapté aux systèmes dynamiques comme peut l'être l'aviation.

La finalité poursuivie étant l'intégration d'un outil d'assistance au pilotage au sein d'un cockpit d'avion d'arme, nous contextualiserons la conception d'un modèle appliqué à un environnement aéronautique.

II. ENVIRONNEMENT DYNAMIQUE

Notre problématique concerne la tâche de pilotage d'un aéronef. Cet environnement est catégorisé dans la classe des environnements dynamiques, selon la définition qu'en donne Cellier (1996) : « *situation de travail [qui] évolue en l'absence d'action de l'opérateur* ».

En suivant les critères qu'il définit, nous pouvons établir que, pour cet environnement :

- La distance entre l'opérateur et le processus apparaît « paradoxalement » faible : si très concrètement une longue chaîne de systèmes complexes sépare le pilote de l'effet de ses actions (assistances électroniques, mécaniques), ce dernier a toujours l'impression de piloter « à l'ancienne », d'être proche de son avion ;
- Le pilote est confronté à un affichage de variables à la fois continu et discret (cadrans). Cela apporte une complexité certaine dans la représentation mentale des valeurs du vol et de leur évolution ;
- La dynamique d'évolution du processus peut varier du très court, en cas de crise ou pour certains changements de fréquences radio par exemple, à très long, à l'échelle d'un vol par exemple. La coexistence de ces dynamiques entremêlées est un facteur de complexité supplémentaire ;
- Le processus est relativement stable durant la phase de croisière. Il devient de plus en plus instable en phase de descente où de nombreux éléments sont à prendre en compte, et où l'exigence en matière de surveillance, diagnostic, anticipation est élevée. Cela se traduit par une augmentation progressive de la charge, et une diminution des activités annexes au profit de la tâche de pilotage et de surveillance de processus.

Il s'agira donc de prendre en compte l'ensemble de ces dimensions dans la réflexion que nous mènerons.

III. GESTION DES RESSOURCES COGNITIVES

III. A. Définition des ressources cognitives

Face à la dynamique temporelle, le principe de gestion des ressources cognitives est celui qui offre la vision la plus macroscopique : il est ancré dans l'instant présent, en visant à allouer des ressources, en fonction d'allocations passées, tout en prévoyant les allocations à venir Figure 2. Le concept d'allocation de ressources sera précisé dans cette partie.

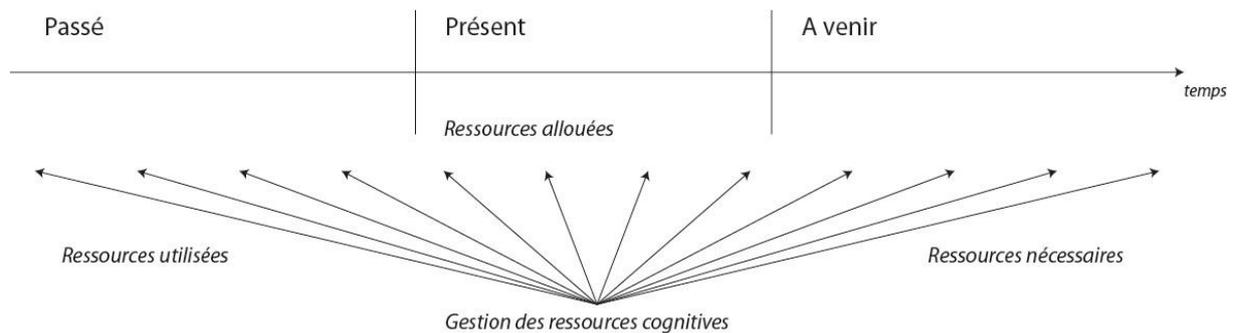


Figure 2. Gestion des ressources cognitives dans le temps

Avant d'aller plus loin, il est sans doute nécessaire de préciser ce que nous entendons par ressources cognitives.

Des mesures de performance de l'activité des opérateurs ont depuis longtemps mis en évidence l'existence d'une forme de « coût cognitif », supposant par là même l'existence d'une variable « ressources cognitives ». La question de la métaphore de représentation se pose très tôt : traitant d'une forme d'« énergie », c'est tout naturellement que les premiers modèles s'inspirent de systèmes économiques et thermodynamiques / hydrauliques : problématique de l'offre et de la demande pour les modèles d'inspiration économique, réservoir(s) d'énergie/liquide se vidant parallèlement ou séquentiellement pour ceux d'inspiration thermodynamique et hydraulique.

L'aspect systémique de ces représentations ne parvient cependant pas à expliquer la dynamique hautement adaptative des systèmes biologiques : évolutions des performances liées à la motivation ou l'état émotionnel, ou à de la fatigue par exemple. Inversement, une modélisation se rapprochant trop de la biologie se verrait reprocher l'absence d'isomorphismes avérés entre mécanismes physiologiques et psychologiques, comme le soulignent Hancock & Szalma (2002). L'approche même du processus de modélisation soulève

des questions, mettant en avant la difficulté à faire émerger une théorie unifiée de la gestion des ressources cognitives.

En situation de pilotage de son aéronef, le pilote se trouve confronté en permanence à des situations demandant une gestion parallèle ou séquentielle de tâches. Quels sont les processus cognitifs qui permettent cette performance ? Ont-ils des limitations ? Pour répondre à ces questions, les deux courants théoriques principaux mobilisables sont : la théorie de la source unique de ressources ; et la théorie des sources multiples.

Cen n'est que dans un second temps que pourra être abordé la problématique de la mesure effective de la charge et des processus d'économie cognitive.

III. B. L'approche Spérandio ou les phénomènes régulateurs associés aux variations de la charge de travail

Soit une double approche avec la variation des modes opératoires en fonction de la charge de travail ou encore la charge de travail comme variable intermédiaire dans la régulation de la charge de travail.

Je ne comprends pas les sens du paragraphe précédent ni son lien avec le tire en bleu.

En résumé, un opérateur humain peut être considéré comme doué d'une capacité de travail limitée. Cependant, il semble difficile de définir un seuil de charge en dessous duquel le sujet fonctionnerait correctement et au-dessus duquel il serait clairement en surcharge.

En tout état de cause il n'y a pas grand sens à parler en valeur absolue de capacité de travail et par suite de charge de travail le mode opératoire concerné n'est pas précisément défini au préalable.

Il va de soi que le sujet peut être amené à modifier son activité opératoire et cela sans aucun rapport avec la charge de travail. Par exemple, cela peut résulter d'évolution de la situation de travail qui exige alors d'autres modes d'interactions.

De fait tout changement opératoire n'est donc pas un indicateur exclusif de la variation du niveau de la charge.

Bien évidemment, ces dernières remarques devront être prise en compte lors de la conception et la mise en œuvre de notre méthodologie de recherche. En particulier lors des expérimentations en vols, nous devons veiller à prendre toutes les précautions expérimentales nécessaires pour permettre une interprétation correcte des résultats.

III. C. L'approche Tricot

III. C. 1. Précisions sur la notion de charge de travail

Selon Sperandio¹ (1984), le travail mental concerne le traitement de l'information : perception, mémoire, raisonnement et décision. La charge mentale dépend des contraintes qui s'exercent sur le travail mental. Elles peuvent elles-mêmes ne pas être mentales (ex : temps, environnement bruit chaleur etc.).

III. C. 1. i. Charge mentale

Selon Tricot² (1996), évaluer la charge cognitive d'un opérateur consiste à quantifier son effort mental lorsqu'il effectue une tâche. Il ne s'agit pas d'une évaluation qualitative. On évalue le coût des opérations indépendamment de leur nature, ce coût peut être élevé au point que l'opérateur ne parvienne plus à réaliser la tâche.

Cette quantification doit prendre en compte au moins 6 paramètres principaux :

- 1) Le nombre d'informations à traiter et les relations entre elles, c'est-à-dire **quantité et complexité des informations**,
- 2) Le **niveau d'expertise** de l'opérateur : plus l'expertise est élevée et moins la charge est importante,
- 3) La **stratégie employée** c'est-à-dire les différentes façons d'exécuter la tâche. Un même opérateur effectuant une même tâche avec une stratégie A peut fournir plus d'effort qu'avec une stratégie B,
- 4) La présence d'**interférences** dans la situation : de type sonore, visuelle, émotionnelle ou encore dues au stress,
- 5) La **proximité** entre les traitements sensoriels, perceptifs, cognitifs : plus il y a de proximité et plus la charge est importante,

¹Jean-Claude Spérandio : Professeur émérite des universités / Université Paris-Descartes

² André Tricot : Professeur des universités / CNRS - Université de Toulouse 2 le Mirail

- 6) L'**effort consenti** par l'opérateur : paradoxalement, un opérateur qui est capable ou prêt à fournir un gros effort va plus se retrouver en état de surcharge qu'un individu qui baisse les bras dès qu'un effort devient trop important.

III. C. 1. ii. Charge physique

L'**astreinte** est la réponse physiologique d'un opérateur lors de la réalisation d'une tâche. On peut y rajouter l'astreinte psychologique : j'aime cette activité et c'est un plaisir et a contrario je n'aime pas cette activité et c'est une charge d'après Monod & Kapitaniak (2003).

III. C. 1. iii. Charge de travail

La charge de travail représente donc la somme de la charge physique et de la charge mentale. Mais cette quantification du coût ne peut pas être effectuée de façon objective. En effet, les facteurs à prendre en compte pour l'évaluation de la charge de travail sont les suivants :

- la situation : quantité d'effort physique et mental à fournir en tenant compte des interférences et de la pression induite par les enjeux,
- l'individu : expertise, fatigue, épanouissement, affects, ...
- la tâche.

Lancry³ (2007) rappelle l'influence fondamentale du temps qui, lorsqu'il est réduit pour réaliser la tâche (contraintes temporelles), génère une pénibilité ressentie par l'opérateur en raison des marges de manœuvre insuffisantes.

Mais le véritable enjeu n'est pas de lutter contre la charge de travail ou de la diminuer car, a contrario, la sous-charge peut être une source de difficulté (maintien de la vigilance) et d'inefficacité. Il s'agit bien de **diminuer la « surcharge » de travail** c'est-à-dire les exigences de la tâche et les caractéristiques de la situation qui font que l'opérateur n'arrive pas à réaliser sa tâche dans le temps qui lui est imparti ou alors qu'il y arrive mais avec des

³ Alain Lancry : Professeur des universités / Université Jules Verne Picardie

conséquences en termes de fatigue, stress, nombre d'erreurs qui font que l'opérateur est en difficulté et que la situation de travail est dégradée.

IV. MODELE DE LA GESTION DES RESSOURCES

IV. A. Une source unique de ressources

La première pierre de la théorie d'une source unique de ressources cognitives est posée par Moray (1967). En s'appuyant sur la théorie de l'information, il émet l'hypothèse que l'homme possède un processeur central de capacité limitée. Les opérations mentales effectuées sur les influx sensoriels consomment de la capacité, qui peut être distribuée parmi différentes structures de traitement en cas d'attention divisée. La capacité allouée à une structure de traitement donnée est assujettie à la demande de la tâche Figure 3.

Ce courant théorique est complété par Kahneman (1973) selon qui l'homme disposerait d'une réserve limitée de « capacité » disponible pour un ensemble de tâches. La performance dépendrait alors du degré d'allocation de cette capacité à la tâche réalisée. Il est supposé que le montant de capacité disponible soit limité et fonction d'un niveau d'activation. Une stratégie d'allocation déterminerait l'allocation de la capacité aux diverses activités. La stratégie adoptée dépendrait de caractéristiques intrinsèques de l'individu et de critères motivationnels, menant à une bonne ou au contraire une mauvaise gestion des ressources. Cette contribution à la théorie initiale ajoute l'idée de rapport à la performance. Elle envisage également que l'allocation de capacité ne dépende pas que de la tâche, mais également de l'individu.

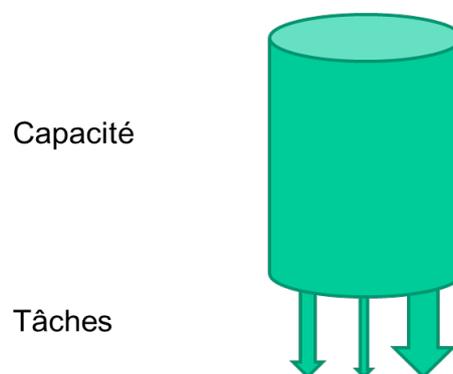


Figure 3. Théorie de la ressource unique

Ce n'est finalement que dans les travaux de Norman & Bobrow (1975) qu'apparaît le terme de « ressource ». À cette contribution lexicale est ajoutée une distinction concernant la performance. La variation de performance s'expliquerait par des contraintes sur les tâches qui seraient de deux types : les contraintes sur les ressources et les contraintes sur les données. Sur des tâches limitées par les ressources, une augmentation des ressources allouées améliorerait la performance, au contraire des tâches limitées par les données qui ne seraient pas sensibles à l'augmentation de ressources allouées, comme l'illustre la Figure 4.

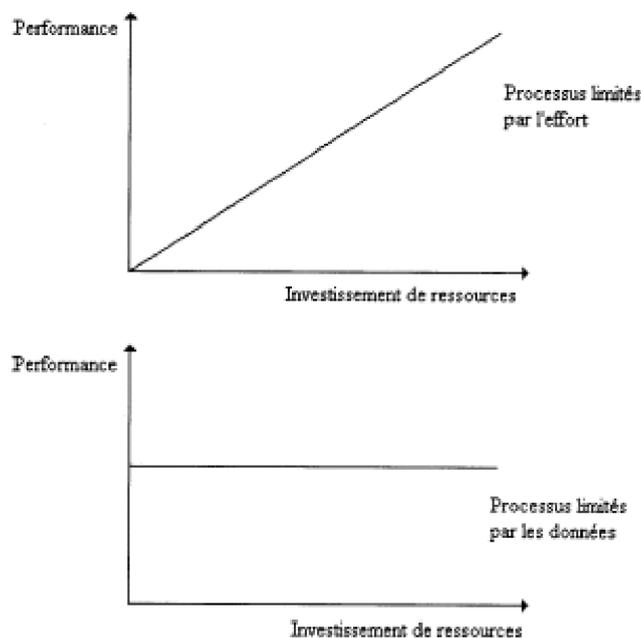


Figure 4. Processus limités par les ressources et par les données, d'après Norman & Bobrow (1975)

Navon & Gopher (1979) développent l'idée de tâches limitées par les données en introduisant le paramètre sujet-tâche. Ce paramètre regroupe les caractéristiques de la tâche, telles que la qualité des données, l'environnement ainsi que les propriétés permanentes et les états ponctuels du sujet. Il permet ainsi de définir le cadre de contraintes au sein duquel les ressources sont sélectionnées et allouées pour une meilleure performance. Une idée nouvelle est soumise : les ressources ne seraient pas en quantité fixée mais auraient une certaine flexibilité qui leur permettrait une dynamique de variation en fonction d'une activation. Dans certaines situations, une augmentation de la charge liée à la tâche augmenterait l'activation et permettrait la mise à disposition d'une plus grande quantité de ressources.

Le paradigme de la double tâche, consistant à faire réaliser deux tâches en parallèle afin d'observer les variations de performances, souligne en certaines circonstances une limitation

majeure de ce modèle. Il ne parvient par exemple pas à expliquer pourquoi certaines tâches peuvent être menées parfaitement en parallèle sans diminution de performance sur aucune des tâches. L'adaptation de stratégie en fonction de l'estimation de la charge (Sperandio, 1984), que nous présenterons plus en détails plus loin, en est une illustration. Une autre situation ne peut être expliquée : dans le cas de deux tâches interférant chacune avec une troisième, il arrive que la plus difficile des deux interfère moins que l'autre sur la troisième. Il semblerait donc qu'il faille dissocier la difficulté de la structure même de la tâche.

IV. B. Plusieurs sources de ressources

L'alternative à la théorie de la source unique de ressources est la théorie des sources multiples de ressources. Navon & Gopher (1979) considèrent que l'homme possède un processeur multicanal, une structure de traitement permettant une utilisation en parallèle de ressources différenciées. Chaque canal aurait sa propre capacité qui pourrait être partagée par plusieurs processus. L'impact sur les ressources d'un changement dans la difficulté de la tâche ne serait pas purement quantitatif, c'est-à-dire énergétique, mais également qualitatif, autrement dit structurel. Le phénomène de stress⁴ soulève par exemple une question concernant ce modèle : influence-t-il de manière indifférenciée l'ensemble des canaux ou certains canaux plus particulièrement ?

⁴ La problématique du stress est directement liée à la gestion des ressources cognitives. Hans Selye découvre le phénomène en 1936 et en propose une première définition médicale : « le stress est la réponse non spécifique du corps à une demande quelconque. » L'accord-cadre européen de 2004 sur le stress au travail précise cette définition : « un état de stress survient lorsqu'il y a déséquilibre entre la perception qu'une personne a des contraintes que lui impose son environnement et la perception qu'elle a de ses propres ressources pour y faire face. » On soulignera l'aspect subjectif et contextualisé de cette définition : des différences inter et intra-personnelles existent.

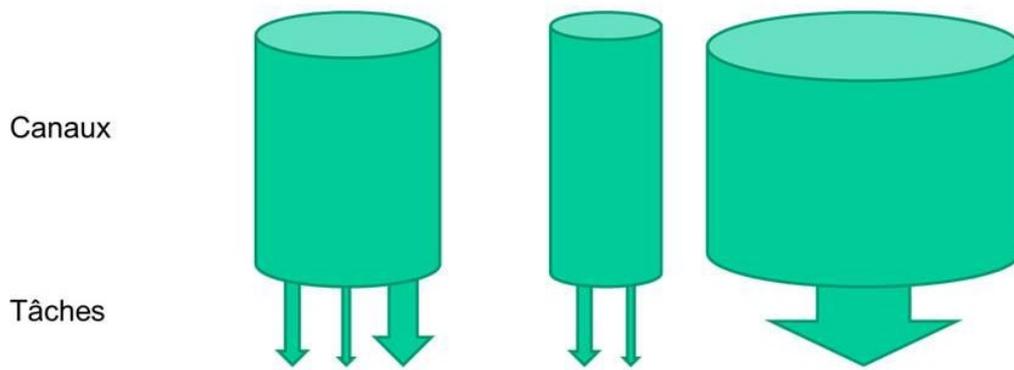


Figure 5. Théorie des ressources multiples

Afin de répondre aux interrogations soulevées par le premier courant théorique (source unique), Wickens (1984) construit le modèle 4D à partir d'une étude comparative des expériences menées sur le partage des ressources (Figure 6). Sur la base de paradigmes de double tâche, une corrélation est établie entre structures de traitement de l'information et un « phénomène d'insensibilité à la difficulté ». Ce dernier se caractérise par une constance dans la performance en dépit d'une augmentation de la difficulté de la deuxième tâche. Ce modèle présente en conséquence quatre dimensions dichotomiques : pour le type de matériel manipulé le spatial est opposé au verbal, pour la modalité sensorielle impliquée, la vision est opposée à l'audition ; l'étape de traitement d'information oppose perception/traitement à réponse ; enfin le mode de réponse oppose moteur à vocal. Il est alors établi que deux tâches interféreront d'autant moins qu'elles auront des demandes de ressources séparées. Une tâche audito-verbale et une tâche visuo-spatiale seront moins dégradées que deux tâches audito-verbales. Il s'agit donc de la composante structurelle de la problématique de la gestion des ressources qui est traitée ici, l'aspect énergétique étant mis de côté.

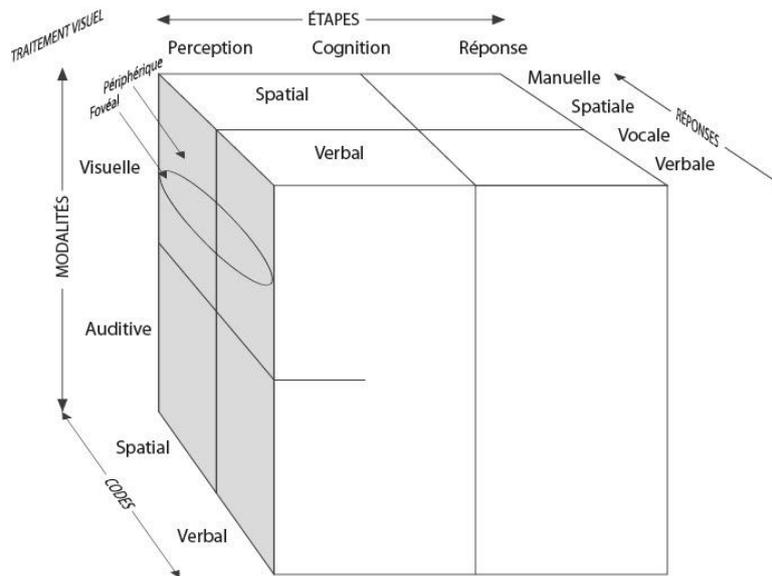


Figure 6. Modèle 4D, Wickens (2008a)

Gopher (1986) le souligne : traiter du problème de la gestion des ressources, c'est essayer de définir les deux faces d'une même pièce. D'une part, la problématique énergétique : d'où viennent les ressources cognitives, comment expliquer la corrélation entre performance et excitabilité ? D'autre part la problématique structurelle : comment sont-elles allouées, comment expliquer les phénomènes d'interférence en double tâche, les phénomènes de stress ? Les modèles et courants traitant d'une face de la pièce ne parviennent pas aujourd'hui à traiter l'autre, il s'agit d'un défi majeur dans la compréhension de la gestion des ressources cognitives.

V. MESURE DE LA CHARGE MENTALE

A défaut de définir précisément ce que sont les ressources mentales, les travaux de Kahneman & Beatty (1966), puis Bi & Salvendy (1994), permettent d'étayer l'hypothèse selon laquelle il est possible d'évaluer ce qu'on appelle la charge mentale, ou charge cognitive. Nous retiendrons ici la définition qu'en donnent Cegarra & Chevalier (2008) : « **la charge cognitive présuppose que les processus cognitifs ont un coût tiré d'une réserve limitée de ressources cognitives. En conséquence, la charge mentale est souvent définie comme le rapport entre la demande de la tâche et les ressources humaines disponibles** ». Comme nous l'avons fait à propos du stress, il est important de souligner l'aspect subjectif sous-jacent à cette définition : il ne s'agit pas tant des ressources disponibles que de la perception subjective de la disponibilité de ces ressources à être affectées.

Cegarra & Chevalier (2008) distinguent et comparent trois types de mesures :

- Mesure de performance : on mesure divers indices de performances, dépendant de la tâche effectuée, temps de réaction, rapidité, ou encore nombre d'erreurs, sur la tâche principale ou sur une tâche secondaire. Une objection majeure à ce type de mesure concerne le fait qu'une mauvaise performance peut refléter tant une surcharge cognitive qu'une sous-charge.
- Mesures subjectives : il s'agit de demander au sujet d'évaluer a posteriori l'effort cognitif qui lui a été demandé pour réaliser la tâche. L'objection principale concerne le fait que cette méthode repose sur l'hypothèse que le sujet est capable d'évaluer sa propre charge cognitive. L'avantage en revanche est qu'elle n'est pas intrusive par rapport à la tâche réalisée, facile à implémenter et la littérature souligne que les sujets sont relativement consistants dans leur auto-évaluation. De nombreuses échelles existent, les plus utilisées sont la MCH (*Modified Cooper-Harper scale*, Wierwille & Casali, 1983) et le NASA-TLX (*National Aeronautics and Space Administration Task Load Index*, Hart & Staveland, 1988).
- Mesures physiologiques : reposant sur l'hypothèse que des variations de la charge cognitive impliquent des variations physiologiques. On mesure alors le diamètre pupillaire, l'arythmie cardiaque ou encore le rythme respiratoire qui, par isomorphisme supposé, nous renseigneront sur la charge cognitive du sujet. Les contraintes liées à l'aspect physiologique des mesures, contraintes temporelles, invasivité, limitent leur utilisation à certains types de tâches.

Cegarra & Chevalier (2008) soulignent enfin l'intérêt de croiser les types de mesure afin de s'affranchir des limites de chaque méthode. Pour pallier une augmentation trop importante de la charge, deux axes sont empruntés dans la conception d'aide à l'opérateur : le délester de sa charge en prenant en charge automatiquement certaines tâches qui lui étaient attribuées, ou l'aider à mieux répartir sa charge. Dans le contexte qui est le nôtre, il est impératif de maintenir l'opérateur au centre de la boucle. La seconde alternative s'impose donc à nous comme cela sera précisé par la suite.

VI. ERGONOMIE COGNITIVE

Contrairement à ce qu'une lecture trop littérale pourrait amener à penser, le principe d'économie cognitive s'entend plus comme un moyen d'optimisation que comme un simple procédé de diminution de la consommation en ressources cognitives. Ainsi, des raccourcis cognitifs existent face à des situations déjà connues. De la même façon, des moyens permettent de se prémunir de ce que l'on connaît mal : représentation mentale, capacité d'abstraction, principe de suffisance et anticipation sont quelques-uns de ces moyens.

VI. A. Schématisation

Dans le cadre de l'activité de planification, Hoc (1987) souligne que l'élaboration de structures de représentation de la situation, comprend nécessairement un découpage de cette structure. La hiérarchie de raffinement introduite par Rasmussen (1986) décompose un système en ses sous-parties (Figure 7). Orthogonalement est distinguée une seconde hiérarchisation, d'abstraction, s'appuyant sur une autre relation entre sous-parties : la relation entre une fonction et sa mise en **œuvre**

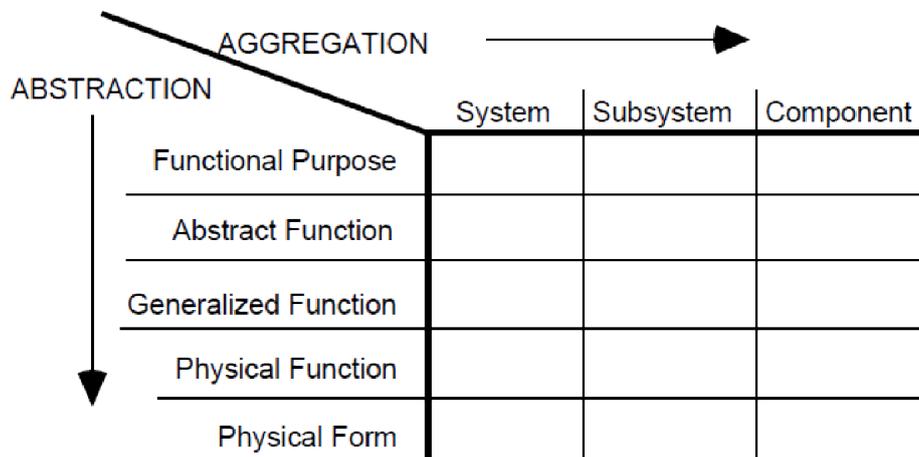


Figure 7. Les hiérarchies d'abstraction et de raffinement, d'après Rasmussen (1986)

On s'accorde alors sur la définition de la schématisation que donne Hoc (1987) : « la schématisation [s'entend] comme une activité de construction de représentations schématiques, en remontant l'une ou l'autre de ces deux hiérarchies de représentations ».

Nous trouvons une illustration de ce découpage dans la différence entre experts et novices dans un cadre de résolution de problème : l'expert se caractérise par sa capacité à s'élever

dans les strates de ses schémas. La plupart du temps le novice gère la situation en bout de chaîne, tandis que l'expert est capable d'avoir une vision plus macroscopique et d'avancer progressivement vers un niveau de détails plus fin. Larkin & Reif (1979) l'illustrent par la résolution de problèmes en sciences physiques : quand le débutant s'oriente vers une résolution algébrique du problème en traitant immédiatement les variables comprises dans l'énoncé, l'expert décrit physiquement le problème, parvient à en faire une particularisation d'un schéma plus général, avant d'appliquer ces principes physiques à la résolution algébrique.

Le schéma est défini par Bartlett (1932) de la manière suivante : « une organisation active de réactions passées ou d'expériences passées, que l'on doit toujours supposer à l'œuvre dans toute réponse organique bien adaptée. Ceci veut dire que, à chaque fois que le comportement se révèle ordonné et régulier, une réponse particulière n'est rendue possible que par sa relation à d'autres réponses similaires qui ont été organisées séquentiellement, mais qui opèrent néanmoins comme une masse unitaire et non comme des éléments individuels venant l'un après l'autre », ce qu'Amalberti (1996) précise en ajoutant que cette structure de données est destinée à représenter des situations génériques, des séquences d'événements, des procédures, ce que le langage courant peut intercepter par le terme de stéréotype. Son contenu permet de comprendre la situation comme un tout finalisé orienté vers un but, ceci sera abordé plus en détails ultérieurement. Il s'agit en cela d'un modèle mental du monde qui présente un bon compromis entre complexité et efficacité opérationnelle : plus il est simplifié, plus il est facile à utiliser, mais plus il est caricatural de la réalité. Simon (1982) affirme qu'il s'agit très pragmatiquement de gérer l'impossibilité psychologique de tout percevoir, tout savoir, tout comprendre et tout faire. Amalberti (1996) montre enfin que chez l'expert, le schéma est optimisé pour atteindre son but à moindre coût cognitif, en utilisant toutes les propriétés de l'environnement.

Amalberti (2001) insiste sur la composante prédictive de ce modèle mental : ce dernier permet une évaluation de l'évolution de la situation. Il s'agit d'une fonction essentielle permettant à l'opérateur de ne pas être dans de la pure réactivité, ce qui dégraderait considérablement ses performances.

VI. B. Changement du niveau de contrôle

Dans le modèle Skills, Rules, Knowledge, couramment désigné par SRK, Rasmussen (1983) classe les comportements humains en trois catégories : comportements basés sur des habiletés, des règles et des connaissances (Figure 8).

Les comportements basés sur des habiletés sont réalisés automatiquement et ne nécessitent pas une allocation consciente des ressources attentionnelles. Des comportements de ce type sont observés quand la performance est déterminée par l'utilisation de modèles d'instructions préprogrammées.

Les comportements basés sur des règles sont contrôlés par un ensemble de règles ou de procédures (Reason, 1990). La distinction entre comportements basés sur des règles et sur des habiletés dépend du niveau d'attention et d'expertise du sujet. Les comportements basés sur des habiletés évoluent sans attention consciente et le sujet est rarement capable d'expliquer comment la performance est réalisée ou sur quelle information elle est basée, à l'inverse des comportements basés sur des règles.

Les comportements basés sur des connaissances sont ceux pour lesquels les règles ne peuvent être appliquées et le sujet se trouve face à une situation nouvelle pour laquelle un plan doit être développé pour résoudre un problème. Contrairement aux règles, les plans peuvent nécessiter d'être changés en fonction de la situation. Les ressources attentionnelles doivent être allouées au comportement. En conséquence la performance des comportements basés sur des connaissances est contrôlée par le but.

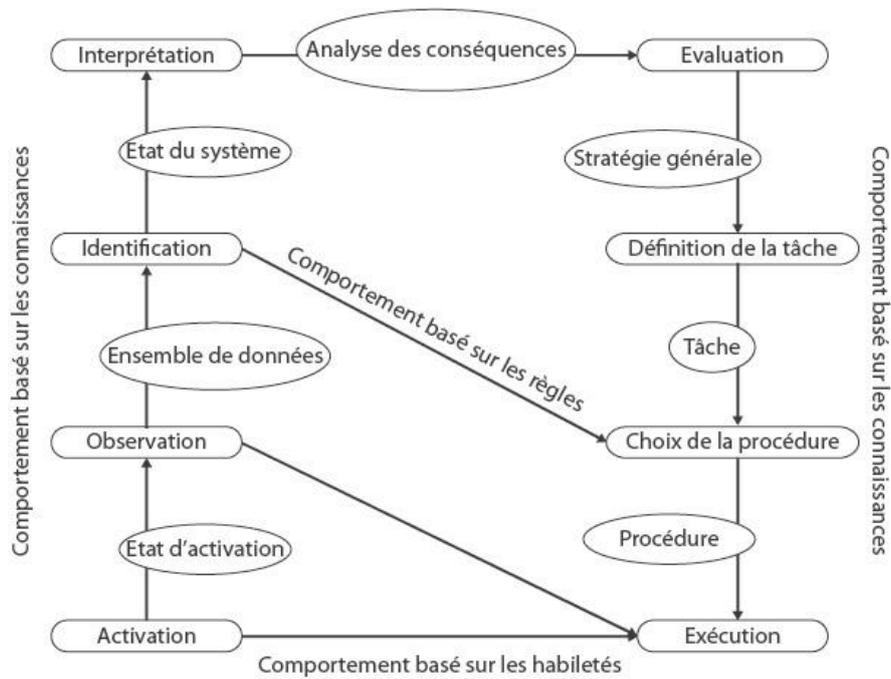


Figure 8. Modèle SRK, d'après Rasmussen (1983)

L'expertise permet de faire passer certains comportements à un niveau inférieur : là où le novice active des raisonnements mettant en œuvre ses connaissances, l'expert active des routines. Il s'agit par exemple du jeune conducteur qui, en arrivant sur un rond-point, doit à la fois gérer les règles régissant la mécanique de la voiture (rétrograder séquentiellement), celles du code de la route (« priorité à gauche » liée au cédez-le-passage) et le comportement des autres usagers de la route. Sa performance est diminuée du fait de la nécessité d'activer des connaissances pour gérer l'ensemble des éléments de la situation. La maîtrise du véhicule est de l'ordre de la routine chez l'expert, de même que les règles du code de la route, il peut consacrer ses ressources à la gestion du comportement des autres conducteurs.

VI. C. Principe de suffisance

Dans la réalisation de sa tâche le sujet se trouve en permanence en position d'ajuster dynamiquement un compromis entre son exigence vis-à-vis de sa performance et la perception qu'il a de ses propres ressources pour y parvenir : c'est le principe de suffisance.

Un exemple connu est celui présenté par Sperandio (1977) dans le cadre de la régulation de trafic aérien. Dans ce cas, face à une d'augmentation de la quantité d'informations à gérer par un contrôleur aérien, une diminution proportionnelle de la performance pourrait être attendue. En l'occurrence, elle se traduirait par une augmentation des erreurs commises.

Dans les faits, il n'en est rien. Face à l'augmentation du niveau d'exigence de la tâche, ici le nombre d'avions à contrôler simultanément, les contrôleurs font varier leur stratégie opératoire : pour les situations simples, ils n'appliquent pas les modes opératoires les plus simples. Ils s'obligent à maîtriser beaucoup d'indicateurs, souvent annexes à la seule sécurisation de l'espace aérien (rapidité d'écoulement des flux, économie de carburant, charge de travail des équipages, etc.). Cela exige des raisonnements plus fins, et une prise d'informations plus régulière.

Pour les situations complexes, il y a adoption de modes opératoires efficaces : la sécurité est alors le seul critère pris en compte, les procédures sont stéréotypées et standardisées, la flexibilité devient très faible. Finalement, cette variation de la stratégie opératoire se traduit par un niveau global de performance constant (quelle que soit la difficulté de la situation).

VI. D. Anticipation

Par la contrainte que lui imposent ses ressources cognitives, l'opérateur humain est limité dans sa performance face aux événements imprévus. L'anticipation est un moyen de s'affranchir de cette limitation de plusieurs manières.

Un premier moyen consiste à étaler les traitements cognitifs dans le temps : Amalberti (1996) soumet l'exemple de la préparation d'une réponse par avance à une conjoncture d'événements probables. Cet exemple s'inscrit dans la continuité du modèle SRK présenté au paragraphe précédent : face à une situation complexe nécessitant la mise en œuvre de connaissances pour construire une réponse, l'anticipation permet de construire une routine prête à l'usage au moment opportun. Amalberti (1996) explicite cette idée : l'opérateur tente d'éviter les situations complexes en regard de ses savoir-faire, et se prépare à celles qu'il ne

peut éviter en pré-organisant ses réponses. Nous qualifions cette situation d'anticipation par préparation à l'action (Figure 9), par opposition à ce que nous qualifierons d'anticipation par pro-action que nous évoquerons plus tard.

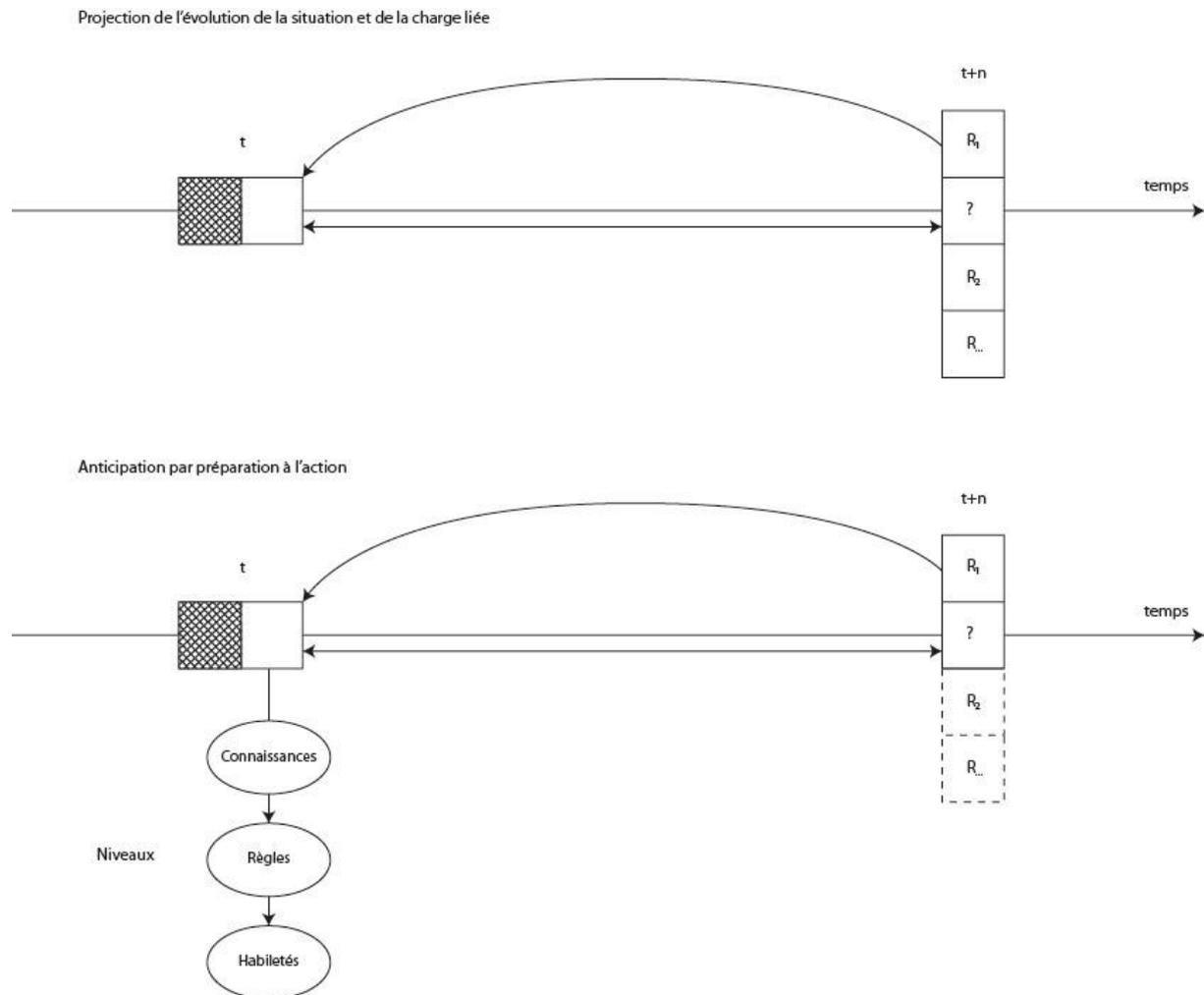


Figure 9. Anticipation par préparation à l'action.

Au sein d'un système complexe, tel qu'un cockpit, l'opérateur peut se trouver face à une situation où coexistent plusieurs dynamiques temporelles distinctes (inertie de l'avion, transmission d'informations via la radio, etc.). Leplat & Rocher (1985) soulignent que l'anticipation permet alors d'exploiter les tolérances temporelles induites par ces dynamiques. Nous avons déjà précisé que « anticiper » consiste également à simuler mentalement l'évolution de la situation en regard d'un plan activé. Quand les exigences de la tâche augmentent, Amalberti (1996) observe l'émission d'hypothèses sur l'évolution de la situation et le test de ces hypothèses. L'opérateur imagine les conséquences des situations auxquelles il est confronté et infléchit sa conduite en conséquence, en adaptant son plan d'action si nécessaire.

Cette attitude lui permet de maintenir la situation dans des limites contrôlables tout en gérant des écarts éventuels par rapport plan initial. Pour illustrer cela, en pédagogie aéronautique, on dit que « *le pilote doit apprendre à être devant son avion* », et l'instructeur l'incite à « *émettre en permanence des hypothèses sur la situation à venir afin de s'adapter activement à cette situation et non d'attendre qu'elle survienne* ».

Ainsi, selon Amalberti (2001), anticiper permet également d'intégrer la capacité du sujet à transformer le monde et à se prévenir des événements redoutés en corrigeant le plan tant que son exécution n'est pas engagée.

VII. CONSCIENCE DE LA SITUATION

A la lumière de la dynamique temporelle de l'action, s'il est un principe qui s'inscrit particulièrement dans le présent c'est bien celui de conscience de la situation.

On l'illustrera, il dessert d'ailleurs essentiellement cet objectif, en s'appuyant sur le vécu de situations similaires, permettant ainsi d'émettre des hypothèses sur l'évolution de la situation.

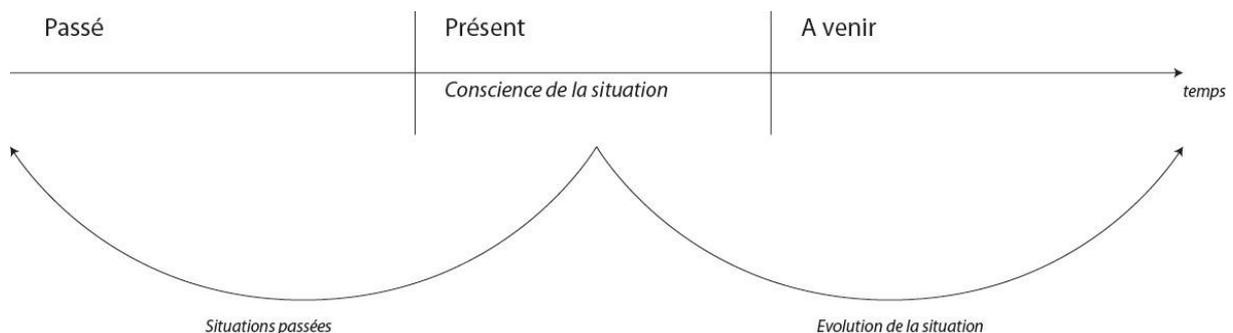


Figure 10. Conscience de la situation dans le cadre de la dynamique temporelle

VII. A. Modèle d'Endsley

La conscience de la situation est une problématique centrale dans le domaine des facteurs humains. Nous nous accordons sur la définition qu'en donne Endsley (M R Endsley, Aircraft, & Hawthorne, 1988) : « *la conscience de la situation est la perception des éléments de l'environnement dans un certain volume spatio-temporel, la compréhension de leur sens, et la projection de leur statut dans un futur proche.* »

Endsley (1995) distingue les concepts de « conscience de la situation » et ceux de « prise de décision » et de « performance ». Un découpage en trois strates est réalisé :

- Le niveau 1 correspond à la perception des éléments dans l'environnement : statuts, attributs et dynamique des éléments pertinents. A ce niveau, par exemple, le pilote perçoit les éléments environnant : aéronefs, montagnes ou encore des témoins lumineux avec leurs caractéristiques, la taille, la couleur, la vitesse, ou encore la position.
- Le niveau 2 correspond à la compréhension de la situation actuelle : il s'agit d'une synthèse des éléments disjoints du niveau 1. Il y a conscience des éléments en présence et inclusion de leur signification à la lumière de buts opérationnels. Concrètement, à ce niveau, un pilote de chasse analyse l'apparition de plusieurs aéronefs ennemis, évalue leur positionnement et la distance les uns des autres, et replace ces informations dans le contexte géographique. L'ensemble lui donne des indications sur les objectifs de ces aéronefs.
- Le niveau 3 correspond enfin à la projection d'états futurs. Celle-ci est rendue possible par la connaissance des statuts et de la dynamique des éléments, ainsi que la compréhension de la situation issue des niveaux 1 et 2. Là encore, concrètement, un pilote de chasse sait déduire les intentions un aéronef ennemi au regard de sa position et de sa trajectoire.

Ce dernier niveau souligne le caractère indissociable des concepts de conscience de la situation et d'anticipation.

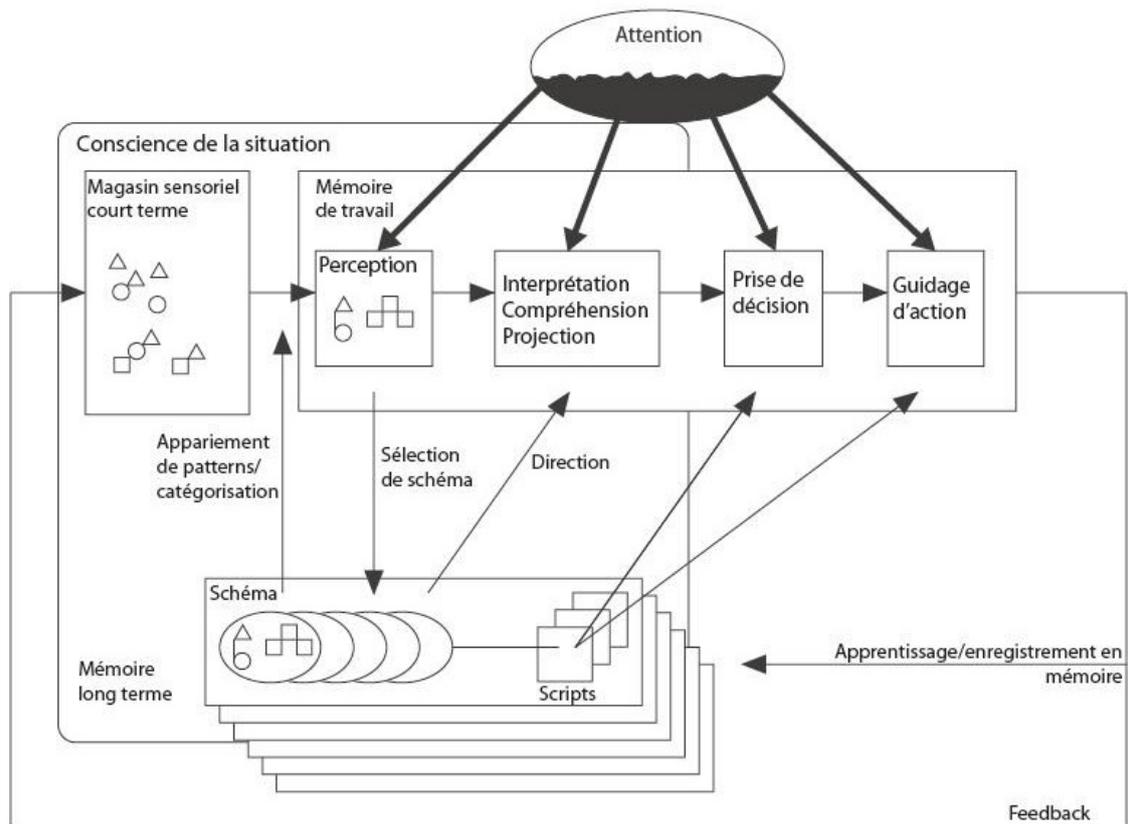


Figure 11. Modèle de la conscience de la situation (Endsley, 1995)

La Figure 11 illustre le fonctionnement de la conscience de la situation selon Endsley (1995) : les influx sensoriels stockés dans un magasin sensoriel court terme permettent un filtrage à gros grain en mémoire à long terme. Les informations de perception dirigent la représentation mentale vers un schéma qui orientera la compréhension et l'interprétation de la situation.

Baumann & Kreams (2009) en s'appuyant sur Kintsch (1998) complètent ce modèle : les informations perçues activent des connaissances stockées dans la mémoire à long terme. A partir de ce réseau de connaissances une représentation cohérente est construite en suivant un processus de type contrainte/satisfaction : les éléments compatibles sont activés, les éléments incompatibles supprimés. L'expertise permet au sujet d'ajouter des attentes quant à l'évolution de la situation. Ces attentes sont liées à des schémas qui sont activés quand certains patterns (motifs informationnels, environnementaux) sont rencontrés.

La compréhension de la situation consiste ainsi tant à donner de la cohérence aux faits qu'à les expliquer et à en prédire leur évolution. Il s'agit donc d'un mécanisme reposant sur un double rapport à la temporalité : à rebours pour expliquer la cause, et dans l'avenir pour

prédire. Toute compréhension s'entend en regard d'un objectif, il s'agit donc de construire une représentation juste à l'instant donné en fonction du but poursuivi.

Dans cette démarche, Richard (1990) distingue quatre processus de construction de la représentation de la situation :

- la particularisation d'un schéma est à rapprocher de l'activité de diagnostic : les indices environnementaux activent plusieurs schémas concurrents, de l'information complémentaire est nécessaire pour affiner le choix. L'erreur la plus fréquente dans ce cas-là est due à la surinterprétation des faits recueillis : simplification et limitation du nombre de faits, tendances à les assigner à des hypothèses existantes.
- la particularisation à une situation : c'est le cas de l'utilisation de schémas moins développés ou spécialisés.
- la construction d'un réseau de relations : dans le cas de situation nouvelle ne permettant pas les deux cas précédent.
- l'analogie : la situation ne présente pas les conditions strictes d'application du schéma mais seulement des conditions approchées de sorte qu'on ne se situe pas dans l'un des cas précédents.

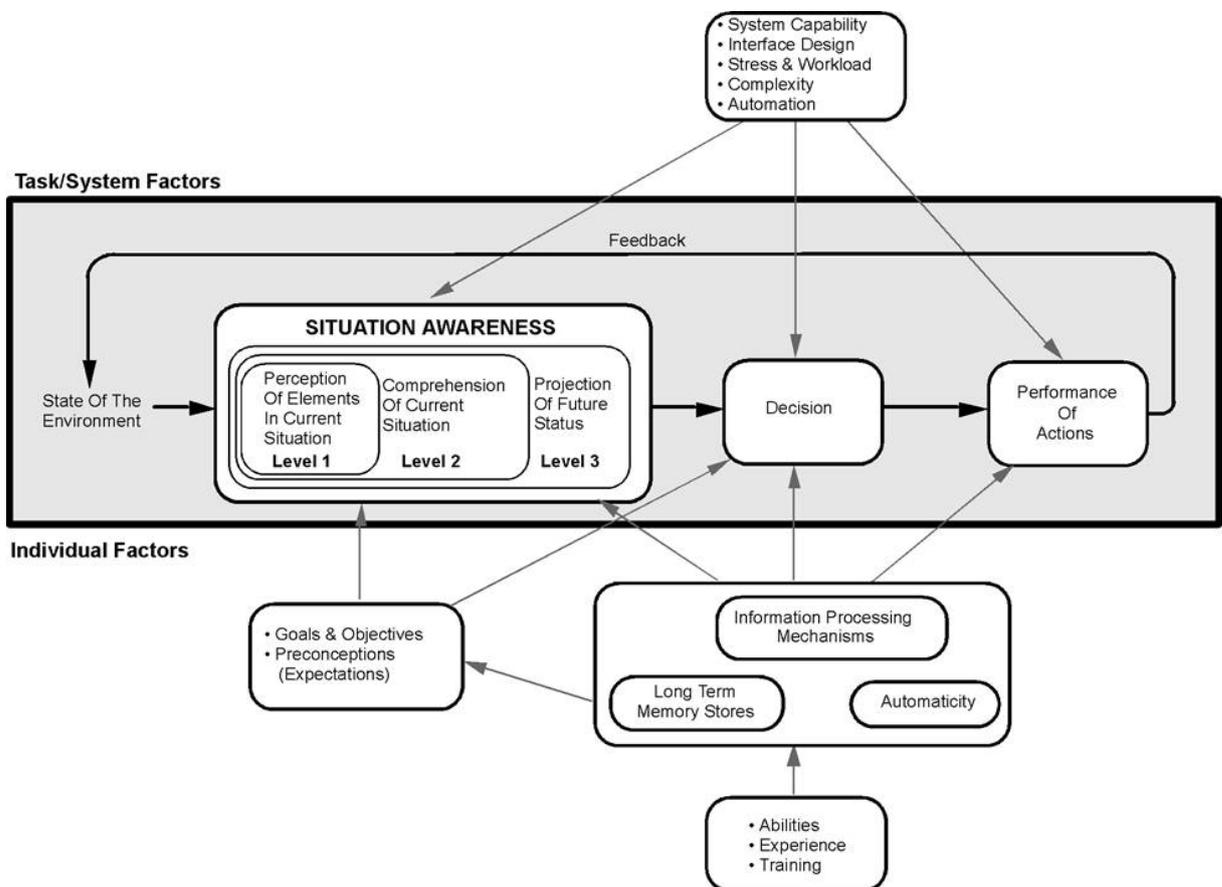


Figure 12. Modèle de la conscience de la situation (Endsley, 1995)

VII. B. Histoire et Etude de la SA dans le domaine aéronautique

D'une façon plus spécifique, en aéronautique, le concept de conscience de la situation (Situation Awareness) existe depuis le début du XXème siècle, où, pendant la Première Guerre Mondiale, il était considéré comme crucial pour les équipages de l'aviation militaire.

De nombreuses définitions de ce concept ont été proposées dans des domaines d'étude comme l'aviation civile ou militaire, le contrôle de trafic aérien, la conduite automobile, ou encore la gestion de centrale nucléaire.

Dans un rapport préparé pour le laboratoire de recherche de l'US Air Force, Vidulich, Dominguez, Vogel, & McMillan (1994) répertorient 15 définitions différentes du terme Situation Awareness et, à partir d'une comparaison des concepts en jeu, l'auteur propose de synthétiser la définition de la Situation Awareness comme : « *l'extraction continue des informations de l'environnement, leur intégration aux connaissances existantes afin de former un modèle mental cohérent, et l'utilisation de cette image [mentale] pour diriger la perception et anticiper les événements futurs* ». Ainsi, ils mettent en avant les quatre étapes nécessaires à la définition du concept de Situation Awareness :

- Extraire les connaissances dans l'environnement,
- Intégrer ces informations aux connaissances internes existantes afin de créer une image mentale de la situation courante,
- Utiliser cette image afin de diriger la perception,
- Anticiper les événements futurs.

Dans la littérature, la définition de la Situation Awareness la plus couramment citée est celle de Endsley qui la décrit comme « la perception des éléments de l'environnement dans un volume spatial et temporel, la compréhension de leurs signification, et la projection de leurs états dans le futur proche » (1995).

Cette définition linéaire considère la Situation Awareness comme le produit des trois niveaux d'analyse de l'information : perception, compréhension et projection. Selon Endsley, Selcon, Hardiman, & Croft (1998), la Situation Awareness est un « état de connaissance » qui doit être distinguée des processus nécessaires à son acquisition. Ces derniers sont regroupés sous le terme de « Situation Assessment » (évaluation de la situation).

Cette dualité entre « état » de la situation et « processus » d'acquisition de la situation constitue un des points les plus discutés de la littérature sur la Situation Awareness. Breton &

Rousseau (2001) proposent une analyse de 26 définitions du terme Situation Awareness, identifiant, pour chacune d'entre elles, leur appartenance à la catégorie des définitions orientées « état » ou « processus ». La répartition des définitions selon ces deux catégories est équilibrée : 14 définitions sont orientées vers le processus d'acquisition de la situation alors que 12 le sont comme le produit de cette analyse.

Rousseau, Tremblay, & Breton (2004), proposent d'étudier le concept de Situation Awareness selon deux nouvelles approches, associées aux approches état et processus :

- l'approche centrée sur l'opérateur « *serait concernée par les propriétés et mécanismes mis en oeuvre par l'opérateur lorsqu'il évalue la situation* » et correspond aux définitions identifiant la Situation Awareness comme un processus. Ainsi, ces définitions s'intéressent à « *l'ensemble des processus cognitifs mis en jeu dans la production d'une représentation mentale de l'état actuel de la situation* ».
- l'approche centrée sur l'environnement, « *déterminée par l'environnement ou la situation dans laquelle se trouve l'opérateur* », correspond aux définitions orientées état. La situation peut alors être définie en termes « *d'évènements, d'objets, de systèmes, des autres personnes et de leurs interactions mutuelles* ».

Il existe une seconde approche, dans laquelle le concept représente un ensemble de connaissances sur la situation (état du système, phase de l'activité, liste des buts courants, projection de l'état du système), qui changent continuellement et de manière contextuelle.

Pew (2000) définit trois niveaux de Situation Awareness.

La conception de nouveaux systèmes doit prendre en compte ces différences et faire en sorte que les informations disponibles à l'opérateur à un instant donné (SA atteignable) correspondent à celles dont il a besoin (SA idéale).

Enfin, pour certains auteurs, la Situation Awareness est vue comme une combinaison des deux approches. Par exemple, Smith & Hancock (1995) la décrivent comme « une conscience adaptative et dirigée vers l'extérieur ». Dans cette définition, la conscience est définie par les auteurs comme « la partie du comportement d'un agent basé sur la connaissance correspondant à la manipulation intentionnelle ».

L'approche de Smith et Hancock (1995) est celle d'un couplage entre l'opérateur et son environnement. L'opérateur est guidé par un but inscrit dans son environnement. Ses actions sont influencées par les contraintes de l'environnement et la Situation Awareness est vue

comme l'invariant du système {opérateur-environnement} générant la connaissance et le comportement nécessaires à la réalisation des buts (ces buts se traduisant par un niveau pré-spécifié de performance dans l'environnement).

Cette idée correspond à celles du courant « écologique », rappelant la notion d'affordance des systèmes introduite par Gibson (1982), et utilisée dans certains modèles de SA, modèle d'objectif étendu de Kirlik & Strauss (2006).

Un état de l'art plus récent (Salmon et al., 2008) compare neuf théories de la Situation Awareness parmi les plus citées de la littérature et indique que cette double approche processus / résultat est adoptée quasi-systématiquement (pour 8 théories sur 9).

La multitude des définitions existantes, et dont nous n'avons présenté qu'un extrait, ne remet pas en cause le concept de Situation Awareness en soi. Mais cette diversité de définitions a donné lieu à la création de différents modèles décrivant les états et/ou les processus (selon les cas) mis en place dans la détermination des connaissances nécessaires aux pilotes pour exécuter de manière optimale leur mission.

Le modèle de Bolstad & Endsley (2005) est le plus complet de la littérature. Il est présenté Figure 13. Il s'agit d'un modèle de Situation Awareness appliqué aux fantassins de l'US Army. On y retrouve les quatre groupes de facteurs impactant la SA :

- le monde extérieur (external world),
- les facteurs environnementaux et liés aux tâches (Task & environmental factors),
- les facteurs individuels (individual factors),
- les facteurs du domaine (relatif à la mission, aux amis / ennemis...).

Différentes versions du modèle linéaire à 3 niveaux ont été « opérationnalisées » à plusieurs reprises. Endsley propose notamment une méthodologie d'extraction de connaissances, et des exigences en matière de SA permettant d'appuyer la construction de ce modèle. Cette méthodologie consiste à définir les buts et sous-buts de l'activité étudiée puis de définir les exigences pour chacun des 3 niveaux du modèle de SA. Endsley (1993) appelle cette analyse « Goal Directed Task Analysis » (GDTA). Elle a été appliquée, entre autres, à l'analyse de l'activité de pilotes de ligne (Strater & Endsley, 2000), de pilotes militaires en situation de combat aérien (Endsley, 1993) et de contrôleurs aériens (Endsley, Sollenberger & Stein, 1999).

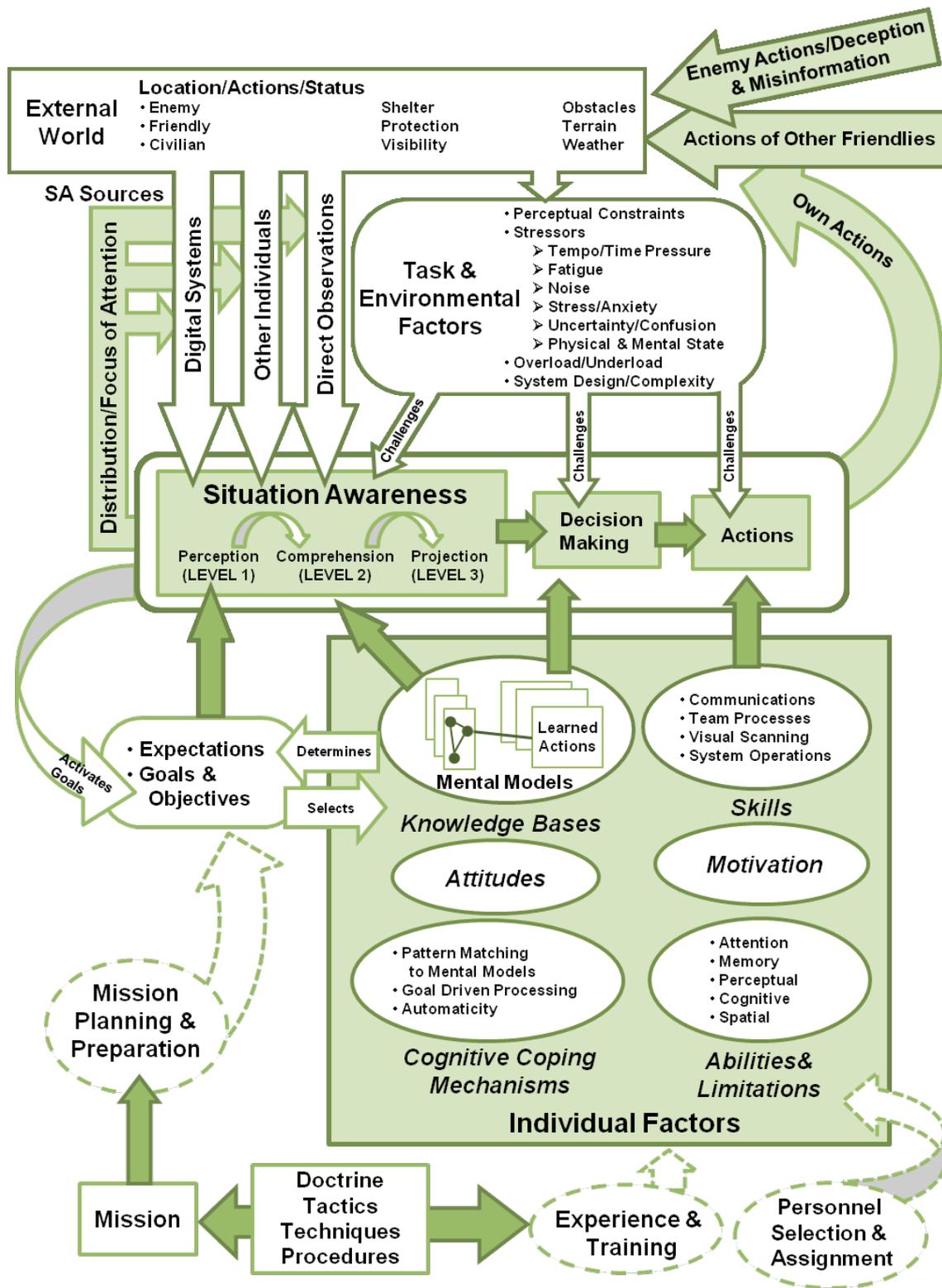


Figure 13. Modèle de Endsley et al. (2000) appliqué au fantassin US.

VII. C. Modèle combiné de Klein

Klein, Orasanu, Calderwood, & Zsombok (1993), identifie 3 modes d'évaluation du modèle Recognition Primed Decision.

- 1) Reconnaissance simple (Figure 14, à gauche) : l'expert reconnaît la situation et enclenche le cours d'action adéquat pour répondre à la problématique identifiée. Aucune autre alternative n'est évaluée.
- 2) Développement d'un cours d'action (Figure 14, au centre) : l'expert reconnaît la situation et effectue un diagnostic interne des différentes étapes du schéma associé habituellement à cette situation. Si la simulation interne donne un résultat jugé probant, le schéma est enclenché, sinon il peut être adapté.
- 3) Stratégie complexe (Figure 14, à droite) : lorsque la situation n'est pas reconnue ou que le niveau 2 a échoué (les cours d'action connus n'ont pu être adaptés à la situation), deux cas de figure se présentent. Dans le premier cas, la situation est réévaluée (bloc "Reassess Situation") et dans le deuxième cas, un autre cours d'action est sélectionné.

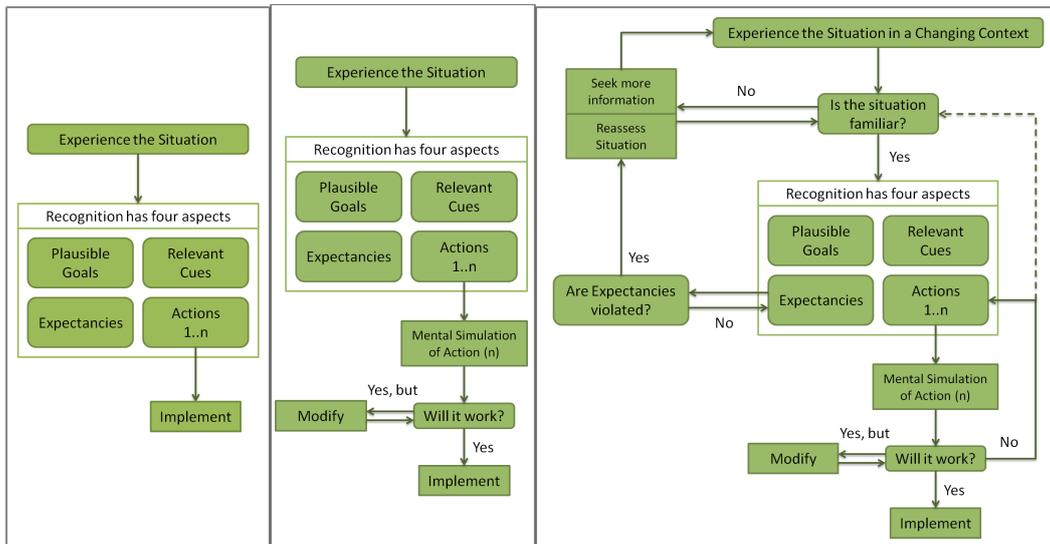


Figure 14. Les trois modes d'évaluation du modèle Recognition Primed decision de Klein (1993) : Stratégie simple (à gauche), développement d'un cours d'action (au centre) et stratégie complexe (à droite.)

La Situation Awareness est « centrale aux trois versions du modèle RPD » (Klein et al., 1993). Elle constitue la clef de la première étape du processus décisionnel décrit dans ce modèle. En effet, quelle que soit la stratégie adoptée par l'opérateur (parmi les 3 identifiées), le cours d'action est activé, après avoir éventuellement été adapté, après la phase de reconnaissance de

la situation. Les quatre aspects de la reconnaissance de situation peuvent se projeter sur deux des trois niveaux du modèle de Endsley (1995).

VIII. COMPREHENSION DE LA SITUATION

Comprendre la situation c'est entrer dans un processus dynamique de réactualisation mais également de raffinements successifs de sa représentation : détecter les insuffisances de cette dernière et rechercher les éléments d'enrichissement pertinents, tout en acceptant qu'à chaque instant des pans entiers de la situation demeurent incompris. C'est le modèle multi-fils (Amalberti, 1996) : l'opérateur gère ces zones comme des préoccupations pour lesquelles il libérera du temps afin de les traiter. Deux solutions pour les limiter s'offrent à lui : un contrôle en largeur visant à ouvrir le moins de « fils » possibles ou à les traiter le plus vite possible, et un contrôle en profondeur laissant le temps agir sur ces préoccupations « secondaires », comme l'illustre la Figure 15.

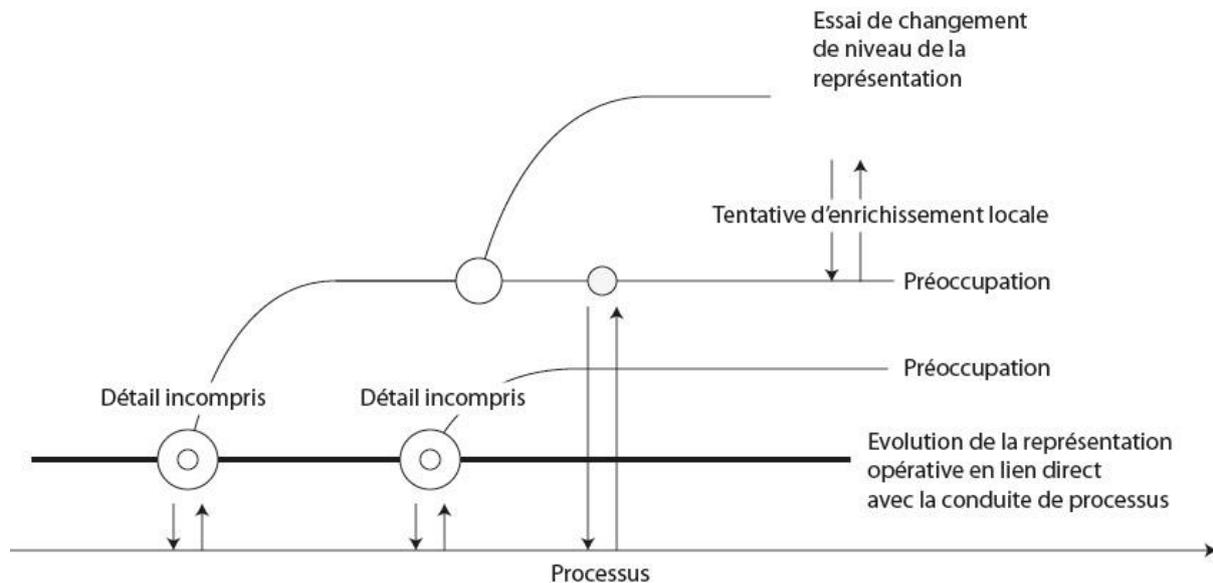


Figure 15. Modèle multi-fils, d'après Amalberti (1996)

Il apparaît au final un ensemble de liens entre compréhension, décision et action : si les contraintes temporelles portant sur la décision sont très fortes, l'opérateur préférera l'automatiser, quitte à ce que cette décision ne soit pas pleinement prise à bon escient, et ce d'autant plus qu'elle reste compatible avec d'autres diagnostics à plus long terme.

IX. CONSCIENCE DE LA SITUATION ET CHARGE COGNITIVE

Dans l'optique qu'est celle d'une meilleure gestion des ressources cognitives, il apparaît fondamental de maintenir l'opérateur au centre de la boucle d'action/décision. Si le mécanisme de conscience de la situation est coûteux cognitivement, Wickens (2008) illustre en Figure 16 l'importance de maintenir un compromis entre conscience de la situation et charge de travail : toute diminution de la charge de travail par une prise en charge automatique de certains aspects de la tâche diminue également la conscience de la situation.

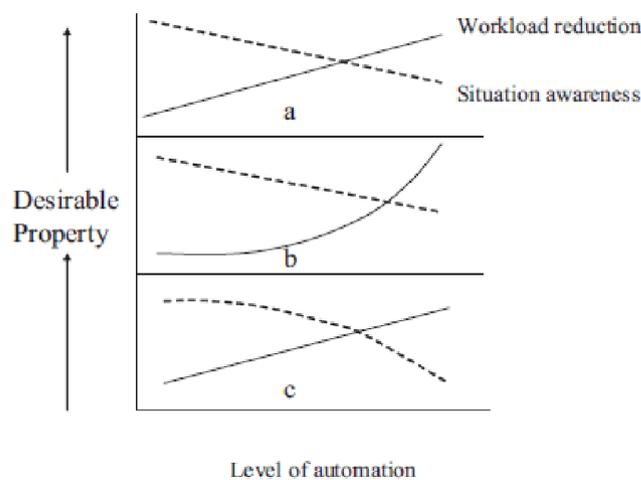


Figure 16. Corrélation diminution de la charge/conscience de la situation, Wickens (2008)

Dans l'optique qu'est celle d'une meilleure gestion des ressources cognitives, il nous apparaît fondamental de maintenir l'opérateur au centre de la boucle d'action/décision.

X. MEMOIRE

En se positionnant dans le cadre d'une dynamique temporelle, les concepts traités plus haut mènent naturellement à la problématique de la mémoire. Quelle soit court terme ou long terme, elle est le lien fondamental au passé du sujet? Elle est trace du vécu. Il s'agit d'outil de conscience et de compréhension de la situation, mais aussi un moyen d'émettre des hypothèses sur le devenir de cette situation.

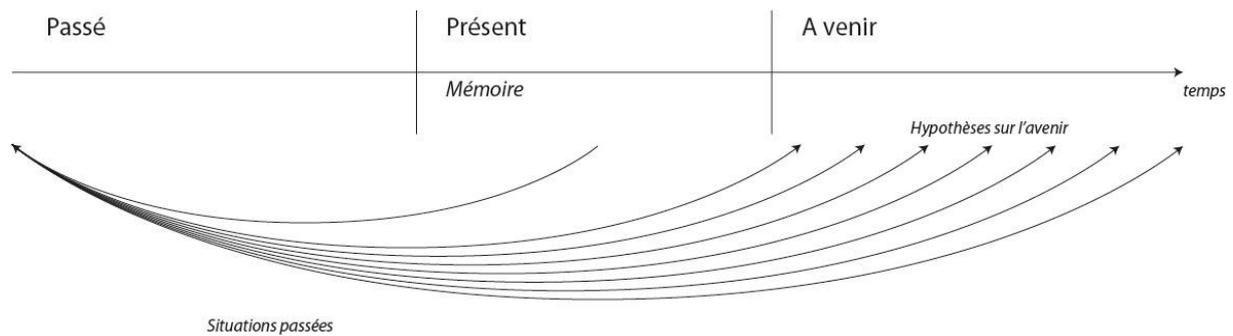


Figure 17. Positionnement de la mémoire dans un perspective de dynamique temporelle

X. A. Mémoire de travail

La mémoire de travail est définie par Baddeley (1986) de la manière suivante : « un système de maintien temporaire et de manipulation de l'information, nécessaire pour réaliser des activités cognitives complexes, telles que la compréhension, l'apprentissage, le raisonnement ». Le modèle présenté est un système hiérarchisé comprenant plusieurs sous-modules :

- Un administrateur central
- Des systèmes esclaves :
 - boucle phonologique pour le stockage des informations verbales,
 - calepin visuo-spatial pour le stockage des informations visuelles et spatiales.

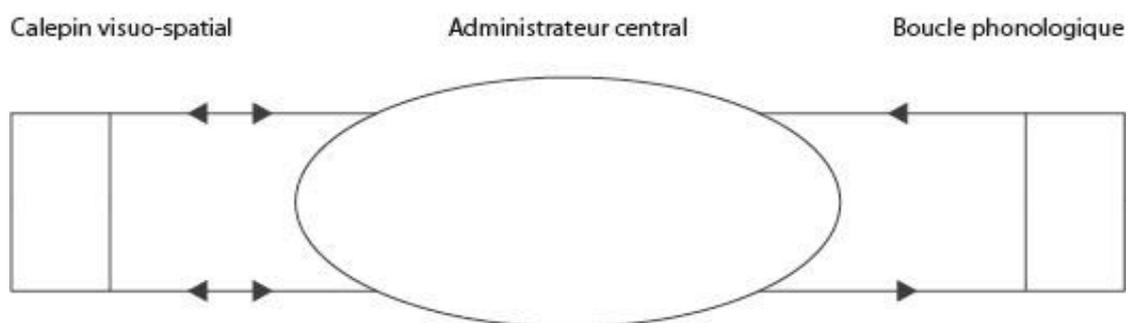


Figure 18. Mémoire de travail, Baddeley (1986), présenté dans (Gaonac'h & Larigauderie, 2000)

Les systèmes esclaves sont destinés à stocker l'information. Nous retiendrons qu'il y a une décomposition des structures de stockage selon la modalité de présentation de l'information. Le modèle s'intéresse à l'administrateur central, concept destiné à expliciter l'existence d'une structure de contrôle des caractéristiques attentionnelles de la mémoire de travail. En

s'inspirant des travaux de Norman & Shallice (1980), Baddeley (1986) élabore un modèle prenant en compte le rôle de l'attention dans le contrôle de l'action (Figure 19).

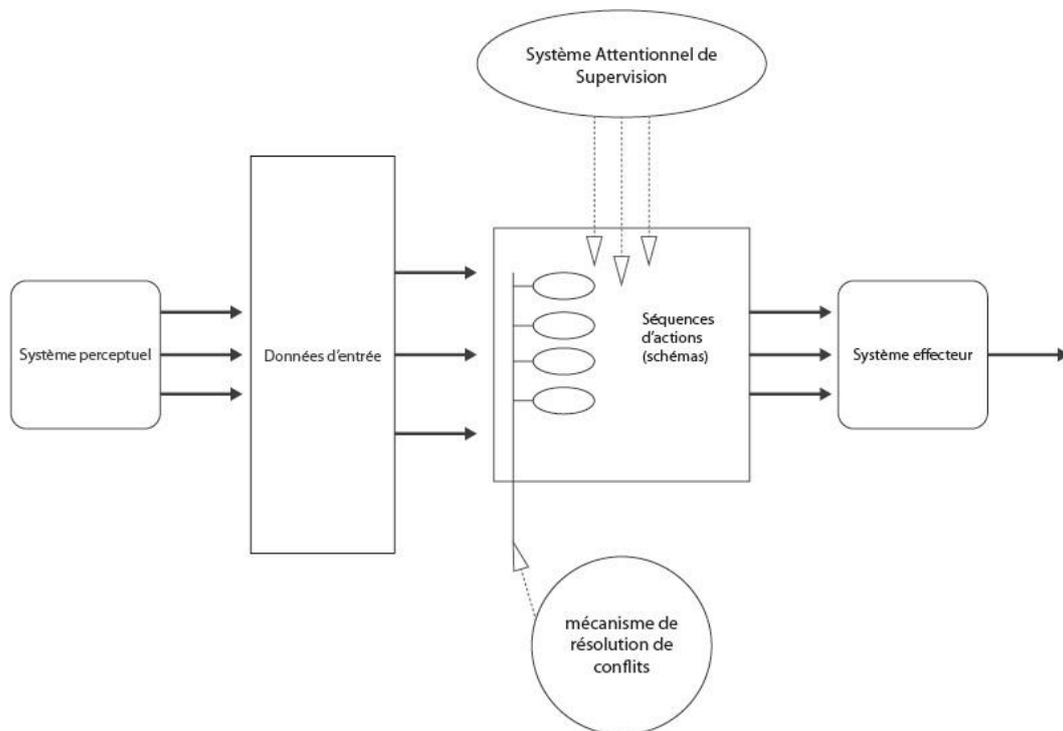


Figure 19. Modèle de Norman & Shallice (1980), simplifié par Baddeley (1986)

La plupart des comportements sont contrôlés automatiquement sans nécessité d'un contrôle attentionnel. Cependant, en certaines circonstances l'action doit être contrôlée par l'attention : lorsque les processus automatiques rencontrent des difficultés ; en cas de risque ou de tâche difficile, de situation inconnue ou peu connue ; si le plan d'action défini doit être modifié, ou que des réponses habituellement fortes doivent être contrariées ou empêchées. Deux axes sont alors développés par ce modèle :

- le mécanisme de résolution de conflits sélectionne parmi les actions en cours la plus pertinente et évite les actions non appropriées ; il est particulièrement valable dans le cas de compétences bien rodées, permettant à l'activité un déroulement relativement automatique,
- le système attentionnel de supervision (SAS) interrompt les comportements en cours ou inhibe les comportements habituels, il permet alors un choix dans les comportements valides pour la situation en cours. Il intervient particulièrement dans les activités de planification et dans les situations évoquées plus haut.

Ce modèle fait émerger l'existence de différents types de comportements et d'une autorité de régulation de ces comportements permettant la gestion adéquate de situations sortant de l'ordinaire ou nécessitant plus de ressources cognitives. On en retiendra qu'il est possible de naviguer entre ces différents états attentionnels selon la demande de l'environnement sous le contrôle d'une supervision de plus haut niveau.

X. B. Mémoire à long terme et mémoire de travail à long terme

La problématique des tâches complexes soulève des questions concernant leur gestion mnésique. En effet, celles-ci requièrent de maintenir de grandes quantités d'information en mémoire. Cependant, il est constaté empiriquement qu'il est tout à fait possible pour l'opérateur d'effectuer des interruptions et des reprises d'activité dans de bonnes conditions. La mémoire de travail telle que la définit Baddeley (1986) n'est pas censée tant supporter.

C'est en mémoire à long terme que l'opérateur stocke l'ensemble de ses connaissances permanentes. Sans limite de taille ou de durée de rétention des informations, les informations stockées sont difficiles d'accès et peuvent être distinguées en deux catégories principales : les connaissances déclaratives et les procédurales. La première catégorie renvoie à du savoir explicitable : il décrit le monde, les lois qui le régissent, les objets. Associé à d'autres connaissances déclaratives, il permet des inférences. Cette seconde catégorie consiste en des connaissances guidant l'action et permettant d'agir sur le monde. Elles sont difficilement verbalisables. En matière de restitution de connaissances, les performances sont bien inférieures quand il s'agit d'un rappel faisant appel à la mémoire à long terme qu'à la mémoire de travail.

Ericsson & Kintsch (1995) introduisent un nouveau concept : la mémoire de travail à long terme ne serait active que dans des conditions bien délimitées. Il s'agirait d'un élargissement de la mémoire de travail au moyen d'un accès par indices aux informations stockées en mémoire à long terme. Il est usuellement accepté que les mécanismes de stockage et de récupération de la mémoire à long terme s'appuient sur des principes d'association, ce qu'illustrent les modèles de Tulving (1972) et Craik & Lockhart (1972).

Dans la mémoire de travail à long terme, une structure de type « schéma de récupération » encapsule à la fois les informations rencontrées par le sujet et les indices appropriés de récupération. Lors du rappel, seul le nœud correspondant à cette structure est en mémoire de

travail ce qui permet de « tirer » le fil des informations correspondant en mémoire à long terme, à une vitesse comparable à la récupération en mémoire de travail.

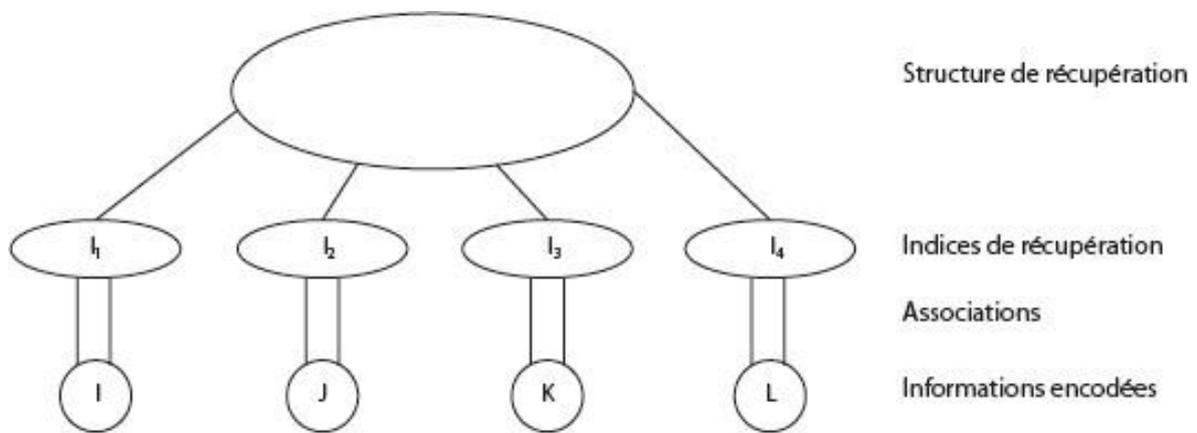


Figure 20. Modèle de la mémoire de travail long terme, Ericsson & Kintsch (1995)

Une hypothèse est posée : la mémoire de travail à long terme est corrélée à l'expertise : l'expérience des exigences de la tâche et l'existence de procédures stables permettent d'inférer sur les exigences futures de récupération et de développer des habiletés pour attribuer des indices aux informations pertinentes dans les structures de récupération.

Ce modèle recoupe ainsi diverses idées mises en exergues plus tôt quant à la relation entre perception et rappel de structures mentales d'action : nous retenons que la perception de motifs informationnels dans l'environnement permet le rappel en mémoire à long terme de structures d'actions associées avec un niveau de performance satisfaisant.

XI. PRISE DE DECISION

Pas d'action sans prise de décision, cette question est longuement traitée dans la littérature et ne fera pas l'objet d'un développement important dans le cadre de ce mémoire. Wickens, Gordon, & Liu (2004), présentent un modèle qui va dans la direction que nous poursuivons (Figure 21). L'attention sélective appliquée aux indices environnementaux permet un stockage en mémoire de travail de patterns informationnels. Les plans en mémoire à long terme contiennent deux composantes : une composante d'hypothèse, activée par ces patterns informationnels, et permettant un filtrage orienté des informations sensorielles, et une composante téléonomique permettant un choix d'action, à la lumière des hypothèses réalisées, tant sur l'environnement lui-même que sur les conséquences de cette action. La décision prise,

l'impact concret sur la situation est ajouté à la liste des indices environnementaux, en entrée de la boucle fermée, alimentant au passage la base de connaissances de l'opérateur.

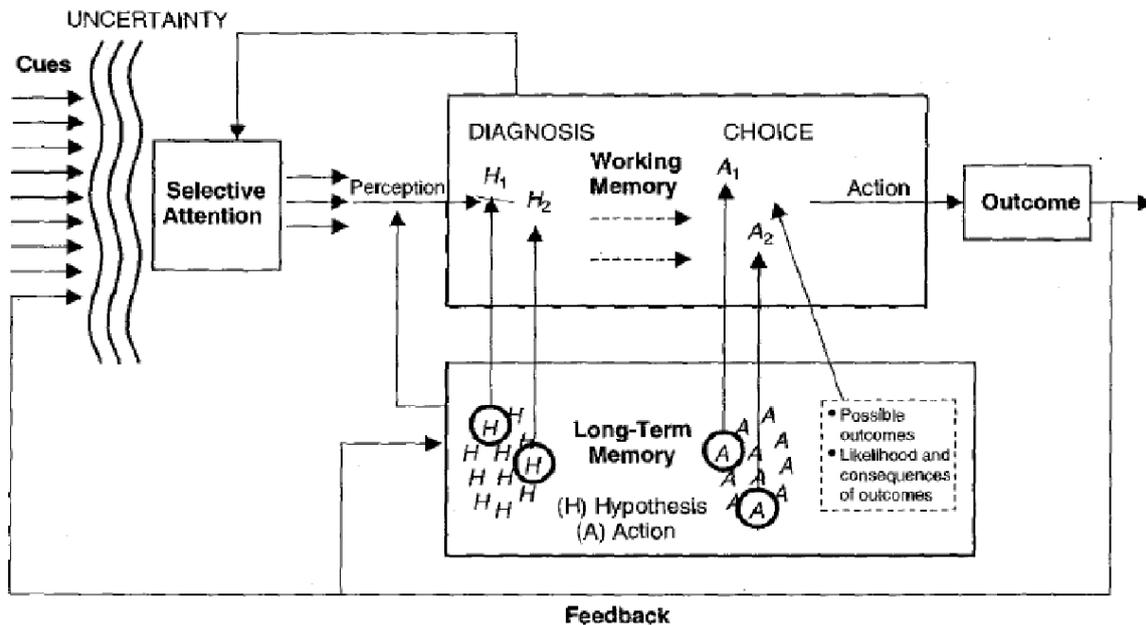


Figure 3 Information-processing model of decision making. (Adapted from Wickens et al., 2004.)

Figure 21. Modèle de prise de décision, d'après Wickens et al. (2004)

Les mécanismes de l'anticipation reposent sur un principe similaire, tout en étant ancrés dans une temporalité plus large.

XII. GESTION DU TEMPS

Depuis le début de ce travail bibliographique, l'accent a été mis sur le rapport des différents concepts à la dynamique temporelle. La question qui se pose nécessairement à présent est celle de la gestion cognitive du temps : représentation, positionnement temporel relatif, affectation de butées, de délais, logique d'interaction temporelle, évaluation...

Au sein des environnements dynamiques, deux types de stratégie de gestion temporelle s'opposent : stratégies réactive et anticipative. Nous illustrons les conséquences de cette dichotomie sur la gestion des ressources cognitives, en nous interrogeant sur le lien entre charge et distance perçue à l'objectif. Enfin, nous mettons en avant les moyens d'inscrire projet d'action et action dans le temps avec les concepts de planification et d'anticipation.

XIII. PSYCHOLOGIE DU TEMPS

XIII. A. Représentation temporelle

Michon (1985, 1990, 1993) définit le temps comme le « produit expérimental conscient des processus permettant à l'organisme (humain) de s'organiser de manière adaptative de sorte à ce que son comportement demeure syntonisé aux relations séquentielles (c'est-à-dire l'ordre) de l'environnement ». Sous cet angle, le temps n'est plus un concept auquel il convient de définir des attributs, ni même peut-on encore le considérer comme une propriété intrinsèque de notre monde, mais comme une cooccurrence de processus permettant une synchronisation à l'évolution de l'environnement. Cela implique que la cognition temporelle appartient au domaine des connaissances déclaratives, les représentations temporelles étant alors une forme de cognition de haut niveau. Friedman (1990) montre que le temps repose sur des habiletés :

- **capacité d'évaluation de son évolution** : simultanéité et succession, durée perçue et estimée, durée de l'intervalle, interaction temps/espace/vitesse ;
- **capacité à positionner des événements** : datation directe, ordre chronologique, distance au présent, localisation à partir de repères.⁵

Ces habiletés permettent la construction de structures de représentations temporelles permettant une « manipulation mentale » du temps. La littérature de la psychologie du temps a donné naissance à pléthore de concepts visant à définir ces structures : scripts temporels, (Huttenlocher, Hedges, & Prohaska, 1992), systèmes de références temporelles (Robinson, 1986), ou encore cadre temporel (Valax, 1986).

Nous en retiendrons deux idées principales. La première concerne l'articulation autour d'événements récurrents. Chez les cultivateurs-éleveurs, Valax (1986) définit que le plan est déterminé autour de tâches pivots répétées quotidiennement et de butées temporelles, Ces dernières apparaissent comme des points avant et au-delà desquels la mise en œuvre du plan n'est plus pertinente. Deux systèmes permettent cependant de procurer des marges de tolérance : 1) les tâches sont toujours planifiées avec un peu de flexibilité pour absorber le retard éventuel d'un prédécesseur ; 2) des tâches libres, peuvent être insérées dans des moments de calme.

⁵ D'après Valax (1996)

Nous l'avons brièvement évoqué plus tôt, le processus d'anticipation joue un rôle prépondérant dans la situation évoquée ici : en simulant l'évolution de sa charge cognitive à venir, l'opérateur joue de la temporalité pour lisser et éviter tout pic de charge, dit autrement toute surcharge cognitive. Nous qualifions ce cas de figure d'anticipation par pro-action, par opposition à l'anticipation par préparation à l'action évoquée en précédemment. Bien évidemment une combinaison de ces deux formes d'anticipation est possible : pro-agir dans la préparation à l'action.

XIII. B. Temps et contrôle cognitif

Hollnagel (1998) apporte une nouvelle dimension à la réflexion sur la schématisation et le contrôle cognitif, abordée précédemment. La Figure 22 illustre la définition de quatre types de contrôle, fonction de la perception du temps disponible, et de la familiarité de la situation :

- La perception d'un temps disponible élevé, quelle que soit la familiarité de la situation, mène à un contrôle **stratégique** de la situation : il s'agit de cas de planification à long terme;
- Une familiarité élevée de la situation et/ou une perception du temps disponible relativement important mènent à un contrôle **tactique** de la situation : il s'agit de cas d'exécutions procédurales, basées sur une planification à moyen terme ;
- La perception d'un temps disponible moyen ou d'une familiarité relativement élevée mènent à un contrôle de la situation **réactif** : il s'agit d'exécutions réactives, à court terme, en fonction des événements de l'environnement ;
- Le cas le plus critique, perception d'un temps disponible faible et situation inconnue, mène à un contrôle de la situation dit désorganisé, on se rapproche d'un état de panique.

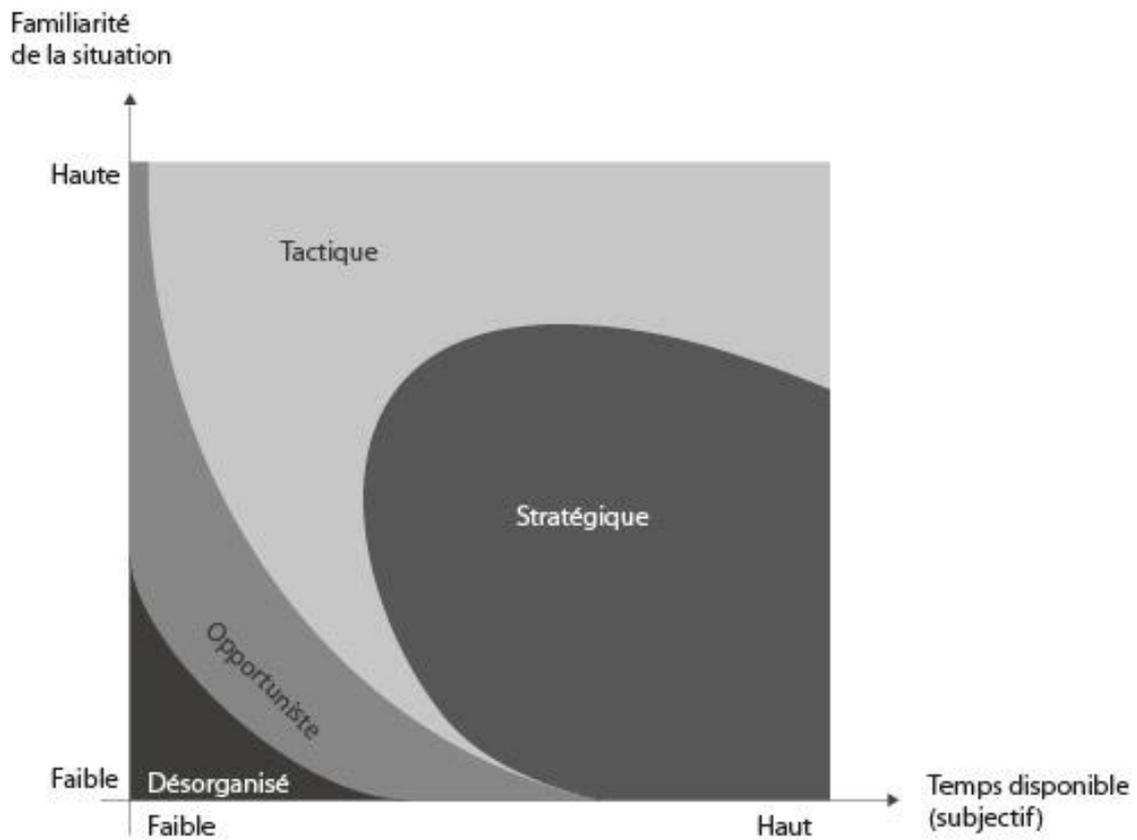


Figure 22. Temps et contrôle cognitif, d'après Hollnagel (1998)

Cela met en évidence le lien entre contrôle de la situation et distance temporelle à l'action. Hollnagel (2003) reformule (Figure 24) le modèle en y apportant une dimension dynamique. Quatre boucles de contrôle coexistent et poursuivent des objectifs distincts. Le ciblage (tracking) est une boucle comportementale court terme visant à éliminer les éléments parasites de l'environnement. Les boucles de régulation, surveillance et suivi permettent l'introduction d'objectifs de plus en plus haut niveau aux boucles précédentes.

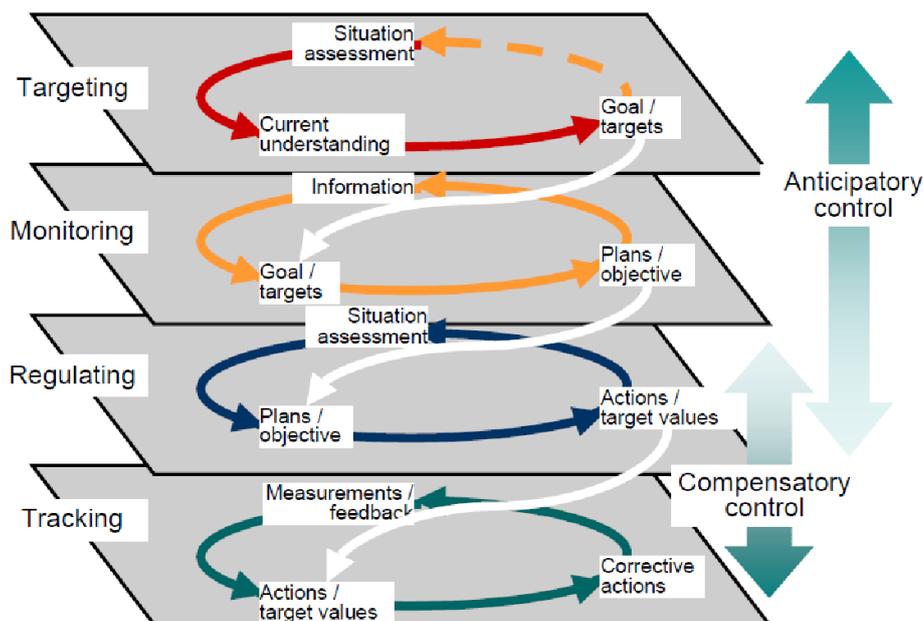


Figure 23. Modèle ECOM (Hollnagel, 2003)

Nous retenons l'idée de boucles parallèles de différents niveaux de contrôle, s'alimentant mutuellement et permettant l'équilibre entre comportement réactif et anticipatoire.

L'idée d'un fonctionnement parallèle et d'un équilibre est également centrale au modèle de contrôle dynamique de situation de Hoc & Amalberti (2007) présenté en Figure 29. Le croisement de deux dimensions dichotomiques permet la définition de quatre types de contrôle

XIII. C. Distance de projection au but

Le rapport de ce qui pourrait être qualifié de « distance de projection au but », à savoir l'estimation du temps disponible avant l'occurrence de l'événement, du temps disponible pour agir, et de la charge cognitive, est fondamental dans une réflexion sur un gain à anticiper.

Hancock & Caird (1993) émettent l'hypothèse que la charge cognitive est inversement proportionnelle à l'estimation du temps disponible pour réaliser l'action, mais proportionnelle à la distance estimée au but. En d'autres termes, la charge est minimale si on pense avoir beaucoup de temps pour réaliser l'action et que la distance au but paraît faible. Inversement, un but éloigné et une estimation du temps disponible pour réaliser l'action faible mènent à un maximum de charge, ce qu'illustre la Figure 24.

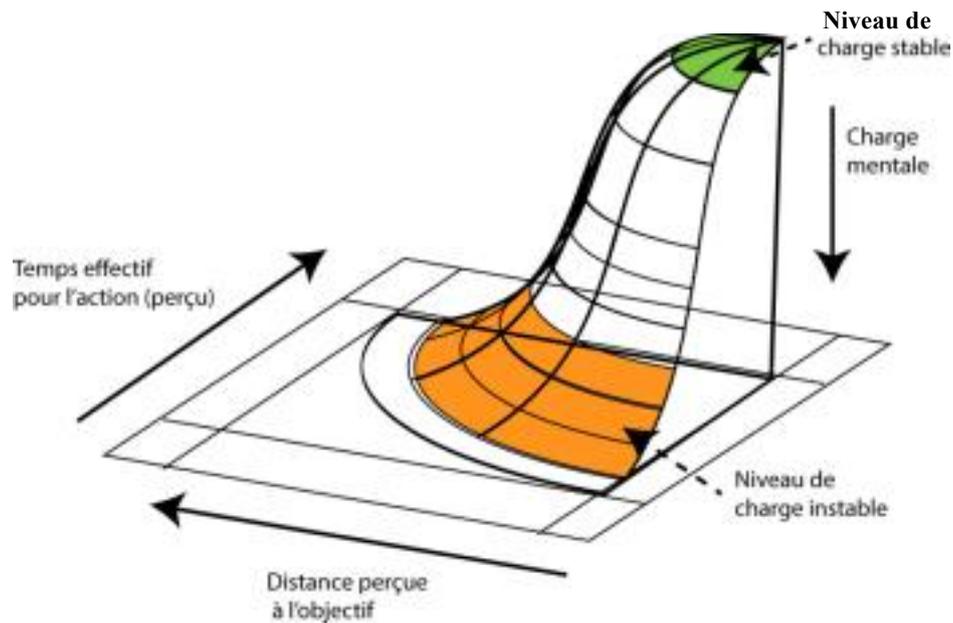


Figure 24. Charge mentale fonction de la distance perçue au but et de l'estimation du temps disponible, d'après Hancock & Caird (1993)

Ce résultat est à mettre en regard de problématiques d'évaluation d'incertitude et d'explosion combinatoire, ce que met en évidence Reynolds (2006) dans le milieu aéronautique. Tout en prenant en compte le fait que l'échelle de temps est exclusivement dépendante des circonstances, on considère qu'à court terme on se positionne dans une région persistante, l'environnement évoluera peu (je ne comprends pas cette fin de phrase). Dans le cas d'une projection peu plus loin dans l'avenir, si des règles, telles que des lois physiques, peuvent être appliquées pour avoir une idée relativement précise de l'évolution de la situation, on se positionne dans une région dite déterministe. Au-delà d'une certaine distance temporelle, les règles permettant l'évaluation de l'évolution de la situation sont soumises à une explosion combinatoire liée à l'ensemble des variables à prendre en compte. On est alors dans une région probabiliste, dans laquelle la pente de la courbe d'incertitude augmente exponentiellement, ce qu'illustre la Figure 25.

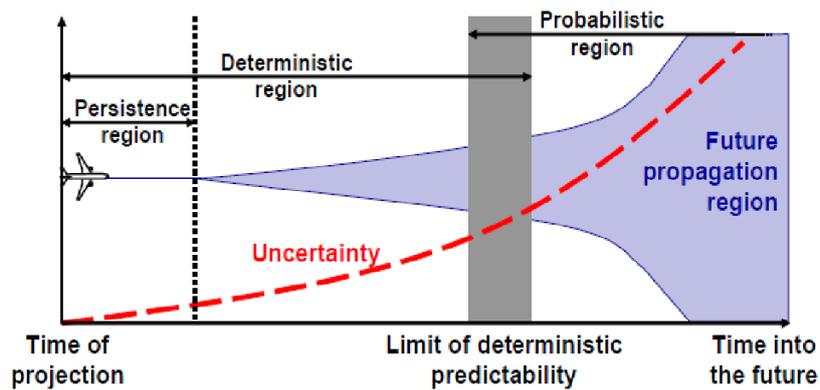


Figure 25. Incertitude des projections en fonction du temps, d'après Reynolds (2006)

Dans le souci de concevoir une aide à l'anticipation efficiente, une question est ouverte à ce stade : quels liens y a-t-il entre empan d'anticipation, charge cognitive et performance ?

XIV. PLANIFICATION

XIV. A. Concepts

Hoc (1987) définit la planification comme « l'élaboration et (ou) la mise en œuvre de plans ». Le concept de plan se définit comme « une représentation schématique et (ou) hiérarchisée susceptible de guider l'activité ». Il fait le lien avec le thème abordé plus tôt de schématisation.

Une analyse plus fine des termes employés révèle la subjectivité sous-jacente à l'idée de représentation. Ce terme est ici employé en opposition au terme de traitement, qui sous-entend l'emploi de procédures. Il s'agit donc de représenter l'information, pas de la traiter effectivement. La définition nous indique également que le plan ne guide pas forcément l'activité, il n'est que « susceptible de la guider ». L'activité pourra donc suivre la structure du plan mais également s'en affranchir.

Dans un second temps, les termes schématique et hiérarchisée indiquent que : 1) si la représentation est à un bas niveau de détails, il y a mise en place d'une stratégie de raffinements successifs ; 2) si la représentation est située suffisamment haut dans la hiérarchie de raffinement de Rasmussen (1986), alors elle mettra en évidence des relations entre parties d'un objet ne pouvant être exprimées à un niveau plus microscopique. Hoc (1987) donne ainsi l'exemple du rapport d'expérience structuré en parties (problématique, méthode, résultats, interprétation) dont les relations relatives ne pourraient être traitées si elles n'étaient pas

distinguées. Au sens de la hiérarchie d'abstraction, elle fait apparaître des relations entre éléments qui ne peuvent être traitées qu'au niveau de l'architecture fonctionnelle d'un système et non au niveau de sa mise en œuvre.

De la même façon, si le plan est défini à un niveau plus élevé que celui de la mise en œuvre de l'activité, il est souvent lui-même hiérarchisé : il met alors en évidence différents niveaux dans sa structure et leurs interrelations, ce qui sera utile lorsque les modalités d'exécution d'une procédure seront liées à celles d'une autre sous-procédure exécutée ultérieurement. La planification est donc également une activité de séquençage d'opérations précédant leur exécution, ce qu'illustre la Figure 26.

Pour définir l'activité de planification à la manière de Hoc (1987), nous confondrons ainsi le principe d'élaboration abordé plus haut avec la mise en action de plans.

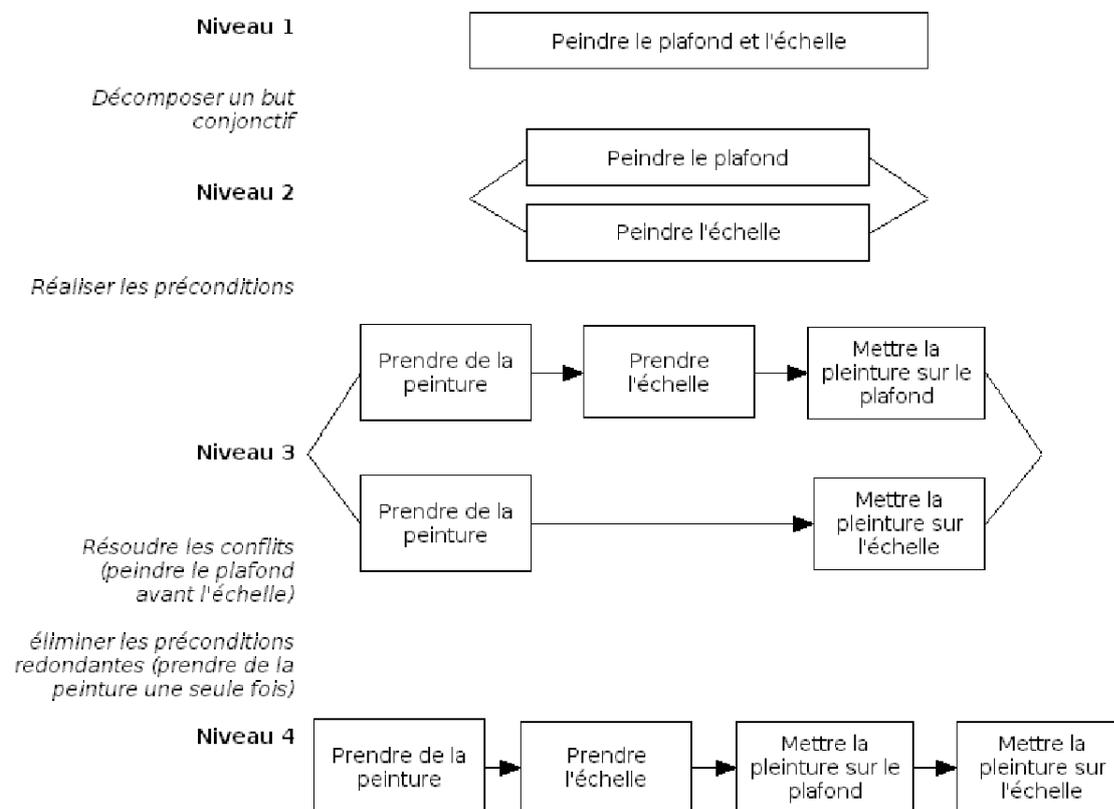


Figure 26. Exemple de hiérarchisation dans la planification d'après (Sacerdoti, 1977, Hoc & Nguyen-Xuan, 1987)

En situation dynamique, Amalberti (2001) souligne une limite fondamentale : la planification tout comme l'enrichissement de la représentation ne doivent durer que tant que la solution n'est pas crédible ou que son coût de mise en jeu est trop important. Le critère d'arrêt est évoqué par O'Hara & Payne (1998, (1999) sous le nom de « coût cognitif utile » : l'essentiel est de définir un métaplan reposant sur le critère de suffisance de l'opérateur (minimum

acceptable, objectifs, à quel coût) définissant les difficultés à éviter ou à traiter, il n'est pas nécessaire d'enrichir indéfiniment la représentation d'éléments pouvant se périmer ou si la solution définie est suffisamment robuste par rapport à l'exigence acceptable.

XIV. B. Plans

En cognition humaine, trois rôles principaux sont attribués au plan : un rôle heuristique, un rôle de diminution de la charge cognitive et enfin un rôle d'élévation du niveau de contrôle.

Dans le cadre de la résolution de problèmes, Lindsay, Norman, & Jobin (1980) nous donnent la définition suivante de la stratégie heuristique : « ***une technique de résolution incertaine dont l'usage n'est justifié que par le constat d'une efficacité antérieure dans des problèmes analogues*** ». Ainsi, l'utilisation d'un plan permet d'éviter une analyse trop microscopique de la situation. Pour autant il ne s'agit que d'une simplification du problème en cours, laquelle sera spécifiée, voire invalidée, dans le pire des cas, par un recueil d'indices environnementaux au cours de l'activité guidée par ce même plan. Face à des situations nouvelles, une stratégie de résolution de problème va consister en la translation de plans existants par transfert ou analogie : le plan est alors simplement adapté à la nouvelle situation, ce qui peut présenter un coût cognitif inférieur à la création d'une nouvelle solution ***ad hoc*** (Amalberti (1996)).

En s'appuyant sur la hiérarchie d'abstraction, l'activité de planification permet également une diminution de la charge cognitive suivant deux axes. Chase & Simon (1973) illustrent l'économie de stockage en mémoire liée à l'utilisation de plans, par la mise en place de configuration optimale d'informations stockées : au jeu des échecs, ils mettent en évidence de meilleures performances mnésiques chez l'expert pour reconstituer des configurations réalistes que face à des configurations aléatoires, ce qui n'apparaît pas chez le novice. Cela met en évidence l'existence de relations stratégiques entre les pièces, et donc de configurations mnésiques de haut niveau dans la hiérarchie d'abstraction. Les relations entre parties mises en avant dans la hiérarchie d'abstraction permettent également une économie sur le traitement des informations : l'aspect modulaire de cette hiérarchisation permet de ne prendre en compte que les relations entre éléments ayant été conçus de proche en proche, et de ne traiter que les relations entre modules pour les éléments éloignés.

La hiérarchie de raffinement est le support du dernier rôle attribué aux plans : l'élévation du niveau de contrôle de l'activité. Par une représentation de niveau supérieur, on détermine les

raisons des relations qui apparaissent au niveau inférieur, en l'occurrence entre fonction et mise en œuvre. L'exemple qu'en donne Hoc (1987) est la gestion d'incident durant laquelle on agira au niveau d'abstraction le plus élevé afin de gérer la situation au niveau global avant d'affiner sa vision de la situation et de se pencher sur l'élément physique déficient.

XIV. C. Plans et anticipation

La première caractéristique des plans, nous l'aurons souligné, est leur aspect fondamentalement schématique, la seconde est leur caractère anticipateur. Plusieurs concepts de psychologie cognitive expriment cette caractéristique. La notion de schème introduite par Piaget (1952), définie par Piaget & Buscaglia (1967) comme étant « ***ce qui, dans une action, est ainsi transposable, généralisable ou différentiable d'une situation à la suivante, autrement dit ce qu'il y a de commun aux diverses répétitions ou applications de la même action*** ». Ce qui peut se traduire par: toute action sur le réel se ferait en regard d'un schème antérieurement constitué et adapté pour la situation actuelle.

La conséquence directe de ce postulat est qu'il est nécessaire d'adjoindre à la conception que nous avons jusque-là du plan, l'idée d'attentes de ce que sera le réel. Le phénomène de « résistance du réel » fait opposition à ces attentes : des infirmations portées par la situation sur les anticipations du schème évoqué. Piaget (1975) note cependant le primat des informations confirmant le schème sélectionné sur les informations l'infirmant, ces dernières n'étant perçues qu'en cas de résistance de l'objet de l'action.

Vergnaud (1985) insiste sur la relation du schème au réel en soulignant le fait que « ***l'adaptation au réel ne peut pas avoir d'autres critères que celui de la conformité entre les attentes du sujet et les effets qui se produisent, et celui de l'action efficace*** ». Ainsi « ***La représentation ne peut pas être fonctionnelle si elle ne joue pas de rôle dans le réglage de l'action et des attentes du sujet*** ». Cela souligne la nécessité d'un isomorphisme entre le plan et la réalité, validé par une mise en action de ce plan. Denecker (1999) postule que le schème organise le comportement d'un sujet en découpant le réel en objets. La représentation ainsi constituée pourra faire l'objet d'opérations, d'inférences, de règles d'action ou encore de prédictions et d'attentes.

Dans le cadre du plan, le concept de schéma apporte un élément supplémentaire. Bartlett (1932), présenté plus tôt, le définit ainsi : « ***une organisation active de réactions passées ou d'expériences passées, que l'on doit toujours supposer à l'œuvre dans toute***

réponse organique bien adaptée. Ceci veut dire que, à chaque fois que le comportement se révèle ordonné et régulier, une réponse particulière n'est rendue possible que par sa relation à d'autres réponses similaires qui ont été organisées séquentiellement, mais qui opèrent néanmoins comme une masse unitaire et non comme des éléments individuels venant l'un après l'autre ». Denecker (1999) distingue ainsi trois aspects fondamentaux :

- 1) le fait qu'il s'agit d'une structure mentale inconsciente ;
- 2) qu'il est constitué d'expériences passées ;
- 3) qu'il constitue en mémoire à long terme un ensemble de structures de connaissances actives plutôt que d'images passives.

Il s'agit d'une reconstruction du passé, et non d'une reproduction. Reason (1990) souligne un phénomène à rapprocher de la résistance du réel piagétienne, à savoir une déviation des perceptions, souvenirs, pensées et actions vers le familier et l'attendu.

Hoc (1987), citant Bobrow & Norman (1975), définit les propriétés suivantes pour le schéma : il n'est pas entièrement spécifié et représente des relations entre variables et des contraintes sur ces variables. Celles-ci seront particularisées lors de la mise en œuvre du schéma grâce à des indices de l'environnement qui en conditionnent la mise en application. C'est ce qui pourrait être qualifié de composante circonstancielle. Les schémas sont en relation les uns avec les autres selon diverses dimensions telles qu'analogie, métaphore ou encore généralisation. Pour illustrer ce propos, Hoc & Nguyen-Xuan (1987) proposent l'exemple du restaurant : les sujets disposent de connaissances génériques sur les restaurants comme : « SI pile de plateaux ALORS self-service », « SI comptoir plastique ALORS fast food ».

Comme ce travail l'aura illustré, une composante majeure du plan concerne les attentes à l'égard de l'environnement et de son évolution. Liées tant à l'expérience, au vécu, à l'expertise, qu'à des stéréotypes, elles sont fondatrices dans le caractère anticipateur des plans.

XV. GLOBALISATION

Afin d'avoir une vision plus globale pour notre étude, il nous faut monter en abstraction et envisager une forme d'agrégation des différents concepts et modèles dans le cadre d'un environnement dynamique par des opérateurs experts.

En ce sens, le modèle de l'Architecture Cognitive de Contrôle Dynamique de Hoc & Amalberti (1994), présenté en Figure 28, illustre la possibilité pour l'opérateur d'ouvrir en parallèle plusieurs boucles cognitives projetant à différents niveaux de profondeur temporelle (croisement des plans et des temporalités). Le modèle repose sur une base de connaissances partiellement activée à travers la représentation occurrente, et partiellement mobilisée au niveau inconscient (en gris foncé) par un treillis d'activation sous contrôle de la représentation occurrente. A chaque instant, la cognition se construit des auto-évaluations sur sa performance, ses modèles, et ses projections. Les limites cognitives de l'opérateur l'amènent à un compromis sur les corrections possibles, selon le critère de suffisance défini par l'opérateur.

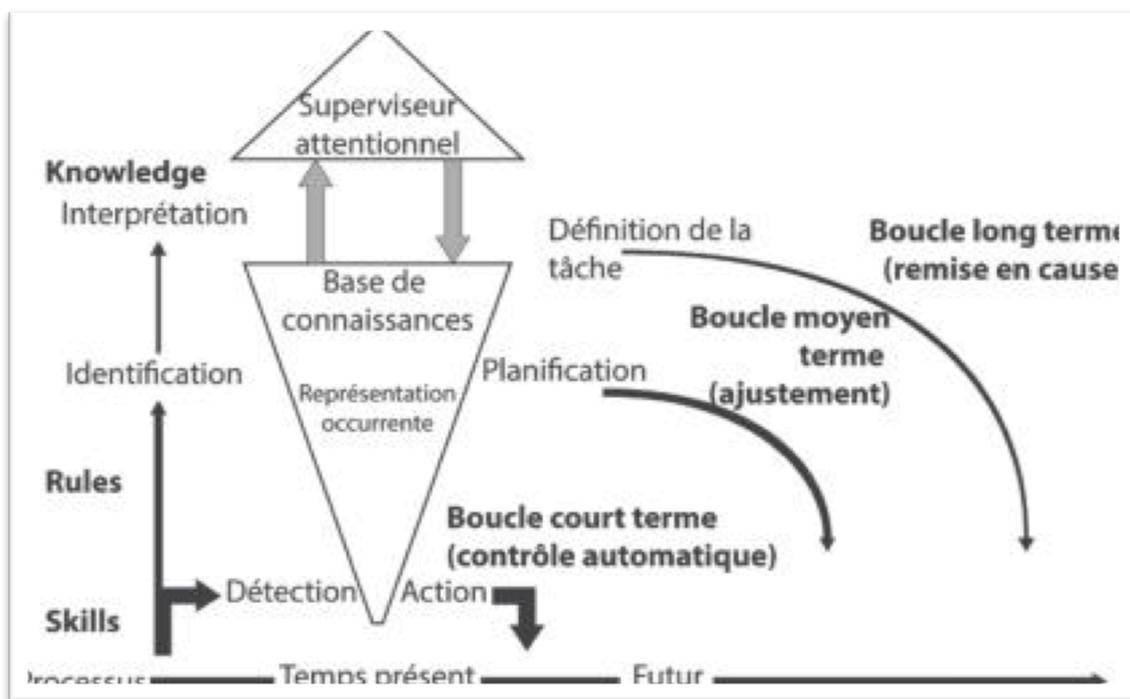


Figure 27 : Modèle de l'Architecture Cognitive de Contrôle Dynamique (Hoc & Amalberti, 1994)

Les trois boucles s'inscrivent dans trois temporalités différentes, trois ambitions de corrections distinctes, du contrôle automatique à la remise en cause totale de la représentation occurrente. Comme présenté plus tôt, le superviseur attentionnel est chargé tant du filtrage et de la pondération des inputs sensoriels que d'un potentiel changement local de niveau de contrôle de l'action, suivant le modèle SRK de Rasmussen présenté supra.

Ainsi l'idée d'un fonctionnement parallèle et d'un équilibre entre réaction et projection est également centrale au modèle de contrôle dynamique de situation (Figure 29) de Hoc & Amalberti (2007). Le croisement de deux dimensions dichotomiques permet la définition de quatre types de contrôle cognitif.

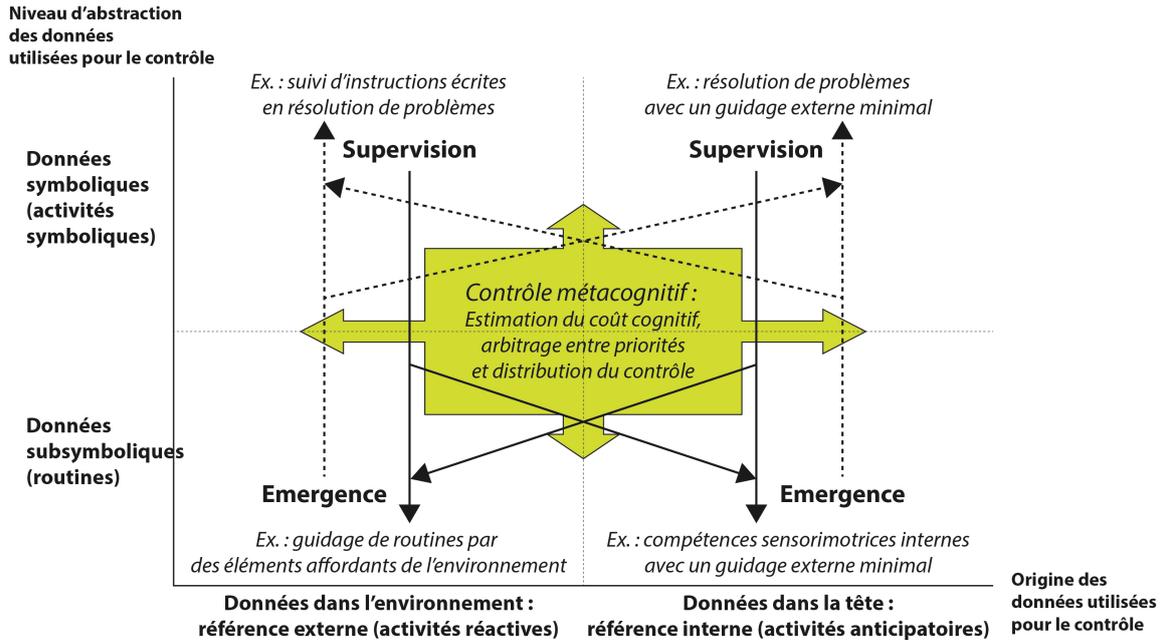


Figure 28 : Dimension cognitive du modèle de contrôle dynamique de la situation (Hoc & Amalberti, 2007)

Le niveau de contrôle que nécessitent les données de l'activité définit la première dimension : contrôle subsymbolique (routines « automatisées ») ou contrôle symbolique (connaissances). L'origine de ces données définit la seconde dimension : données externes, c'est-à-dire provenant de l'environnement, ou données internes, provenant d'un modèle mental de la situation. Le premier type de données induit un comportement de type réactif à l'émergence des données quand le second permet des comportements anticipatoires. Une structure supérieure de contrôle (contrôle métacognitif) distribue le contrôle cognitif pour une activité donnée entre les quatre types de contrôle définis par ces deux dimensions afin de parvenir à un compromis cognitif : un compromis entre investissement de ressources cognitives et niveau satisfaisant de performance.

Les dimensions s'alimentent mutuellement en données : quand une routine n'est pas à même de fournir des données sur la situation (problème d'accessibilité des données), la dimension symbolique peut compenser pendant une durée limitée avec des données provenant de modèles mentaux. Inversement, la supervision de données externes permet également une alimentation des modèles mentaux.

De ce modèle, nous retenons enfin deux points fondamentaux. Le premier est que les données externes présentées peuvent alimenter les capacités d'anticipation à des niveaux tant symboliques que subsymboliques. Une information pertinente sur la situation en permet donc un meilleur contrôle anticipatoire. Le second point est que l'ensemble du contrôle cognitif est

mené en regard d'un contrôle cognitif : quel est l'investissement acceptable pour atteindre un niveau de performance satisfaisant ?

Dans la démarche de conception de notre outil d'aide à la gestion des ressources cognitives, la prise en compte de ce compromis cognitif sera centrale.

XVI. CONCLUSION

En abordant la question de la gestion des ressources cognitives, nous avons enfin mis en regard les modèles de la littérature abordant les questions de la conscience de la situation, des niveaux de contrôle cognitifs, de l'origine et de la qualité des données utiles à l'action, de la profondeur temporelle d'action et du compromis cognitif entre niveau de performance souhaité et investissement cognitif. Ces derniers modèles agrégatifs, fondamentaux pour notre étude, nous ont permis de réaliser que seul un modèle agrégeant les différents concepts afférant, pourrait nous fournir la base théorique pour la conception d'un outil permettant une meilleure gestion de la charge cognitive. Cette question fera ainsi l'objet d'un chapitre suivant. Sur la base de concepts et de modèles existants, nous proposerons un modèle de la gestion des ressources cognitives pour les systèmes complexes en situation dynamique.

Chapitre 1.2

Problématique et question de recherche

L'analyse du contexte théorique nous a permis de comprendre l'importance des ressources cognitives pour la mise en œuvre des stratégies de prise d'information, pour la construction de la conscience de situation et donc pour la prise de décision finale. Ainsi, la charge de travail est un élément clé dans le contrôle des systèmes dynamiques à risque car elle dimensionne directement la qualité des prises de décision.

Les systèmes complexes dynamiques qui font l'objet de notre étude obligent les opérateurs à gérer un ensemble de tâches qui se trouvent être en constante évolution. Ces changements s'opèrent aussi bien de façon quantitative (plus de tâches à réaliser), que qualitative (changement d'état des tâches en cours). Le contexte évolutif de la mission en cours, impose constamment à l'opérateur de mettre à jour son image mentale de la situation tactique ainsi que de réactualiser la pertinence de ses objectifs finaux tout en économisant ses ressources cognitives à un juste niveau pour atteindre la performance poursuivie tout en contrôlant les risques induits. Cette reconstruction continue du modèle mental de la situation tactique ne peut se faire sans une gestion adaptée de la charge de travail. De fait, l'apparition d'événements non attendus impose d'être en situation de développer des stratégies adaptatives dans la gestion de leurs ressources cognitives et cela en temps réel.

Des solutions anticipatives ont été mises en place. Elles se font au travers de la préparation de mission (planification), du briefing via la verbalisation des enjeux et prises de risque associées (gameplan), ainsi que de la gestion anticipée des imprévus potentiels (what-if). Cependant, seule la prise en compte des événements « envisageables » peuvent rendre efficace ce type de stratégie. Il est donc nécessaire de préserver un capital de ressources pour faire face aux imprévus, c'est ce que font les pilotes dans la gestion économique de leurs ressources cognitives. En particulier, ils doivent pouvoir très rapidement réorganiser leur plan d'action en fonction des événements et redistribuer leurs ressources cognitives de façon adaptée aux nouvelles priorités.

La problématique de notre travail de thèse concerne l'évaluation de la charge de travail et l'étude des stratégies cognitives adaptatives court terme chez les pilotes tactiques.

- *Existe-t-il une gestion des ressources cognitives et des stratégies d'adaptation court terme chez les pilotes d'aéronefs sous forte contrainte temporelle ?*
- *Existe-t-il de telles stratégies ?*
- *Pouvons-nous identifier et comprendre les mécanismes qui permettent leurs mises en place ?*
- *Est-il possible d'envisager des entraînements ou des interfaces spécifiques stimulant la mise en place de ces stratégies adaptatives ?*

Nous cherchons plus précisément à identifier les inducteurs de la mise en place de ces stratégies adaptatives et à comprendre le rôle qu'elles jouent dans la résolution de problème. Nous essayons également de produire des recommandations pour la conception d'interfaces permettant aux pilotes de mieux gérer en mode réactif leurs ressources tout en gardant une conscience suffisante de la situation, permettant ainsi d'obtenir un ratio performance/risques adapté à la criticité de la situation. Notre recherche se base sur une approche croisée, à la fois « bottom-up » mais également « top-down ».

En premier lieu, nous décrirons la méthode générale qui nous permettra de mettre en oeuvre notre démarche.

Dans un second temps, nous tenterons de répondre à la question du modèle théorique contextualisé en proposant l'élaboration d'un modèle de gestion des ressources cognitives en contexte aéronautique et ce sur la base de concepts et de modèles existants et étudiés dans notre état de l'art.

Puis dans une troisième phase, nous nous intéresserons aux différents retours d'expérience que nous pourrions solliciter chez des pilotes de l'armée de l'air.

Lors d'entretiens, nous rencontrerons des opérationnels du Centre d'Expériences Aériennes Militaires (CEAM) afin de comprendre les mécanismes qui prévalent lors de la mise en place de ces stratégies et grâce à cette démarche, nous construisons un protocole expérimental permettant la mise en évidence de ces stratégies.

Dans une quatrième phase, nous évaluerons quels sont les critères ou paramètres les plus adaptés en termes de charge de travail ou de mesure de la performance afin de pouvoir mener à bien les passations que nous aurons à réaliser au simulateur de vol. Nous essayerons de répondre à la question du choix de la méthode d'évaluation parmi les différentes mesures physiologiques de la charge cognitive en les comparant.

Nous effectuerons ensuite notre expérimentation principale afin d'étudier les stratégies adaptatives mises en place par des pilotes d'airbus A400M en situation critique et sous de forte temporelle.

Lorsque nous aurons identifié et analysé les stratégies adaptatives et leurs mécanismes, nous proposerons des recommandations pour la conception d'interfaces. Celles-ci pourraient permettre la mise en place dans certaines situations imprévues d'un retour aux bases même de l'aéronautique, l'« airmanship », qui dans bien des situations est le seul garant d'une possibilité de réussite face à des pannes complexes et critiques.

PARTIE 2 – APPROCHE EMPIRIQUE

Chapitre 2.1

Méthodologie générale

I. ORGANISATION GENERALE ET METHODOLOGIE DE LA PARTIE EMPIRIQUE DE LA DEMARCHE DE THESE

La démarche de recherche en général et celle d'une thèse en particulier amènent nécessairement à conduire les travaux en un processus itératif. Ce chemin se construit donc pas à pas, avec essais, fausses routes, petits ou grands succès, retards et déconvenues. Dans notre cas, cette approche s'est vue complexifiée par la nature du terrain de nos investigations. Bien que disposant d'une bonne connaissance du milieu de l'aéronautique de défense en tant qu'ancien officier en escadron de chasse, il c'est avéré assez contraignant d'organiser nos travaux en harmonie avec les obligations de service des structures et des personnels qui nous ont très aimablement et très professionnellement accueillis.

Ainsi, nous avons dû composer et adapter notre planning et notre progression à la disponibilité des ressources de l'armée de l'air. La chose fut compliquée par deux éléments de contexte. 1) La particularité du modèle retenu, celui de l'A400M. Ce programme d'avion de transport militaire polyvalent a connu de nombreux retard pour être mis en service fin 2013, soit au tout début de notre thèse. Nous avons également connu une période difficile à la suite de l'accident de Séville le 9 mai 2015. 2) Le contexte géopolitique international et l'engagement très important des forces aériennes françaises sur plusieurs théâtres opérationnels simultanément. Ainsi, certaines missions et exercices grandeur nature auxquels nous devons participer ont été plusieurs fois repoussés, puis finalement annulés.

L'organisation de notre démarche de thèse a par conséquent été revue à plusieurs reprises. Nous avons dû nous adapter aux circonstances et aux imprévus tout conservant une approche cohérente et la plus fidèle possible à nos objectifs initiaux.

Afin de répondre à la problématique de thèse et aux questions de recherche présentées en chapitre 1.2., nous avons progressé en 5 étapes regroupées en 3 grandes phases (Figure 28).

La première phase repose sur deux étapes : une réflexion contextuelle et théorique, complétée par une approche des enjeux de notre démarche.

Étape 1 : Proposition d'un modèle de gestion des ressources cognitives en contexte aéronautique.

Dans le contexte aéronautique, la question de la gestion des ressources cognitives et des processus d'économie associés demeure un axe majeur de l'amélioration de la sécurité aérienne. Une gestion adaptée des ressources cognitives est un des points déterminants pour augmenter le niveau de sécurité des opérations. Afin d'aider les pilotes dans leur activité, il est indispensable de les aider à mieux gérer leurs ressources. Une telle assistance doit pouvoir se baser sur un ou des modèles de la gestion des ressources cognitives orientée vers la prise de décision. C'est pourquoi dans le cadre de ce travail de thèse nous proposerons, une vision agrégative des modèles issus de la littérature concernant cette problématique. Celle-ci constituera la base de nos réflexions pour la suite de nos travaux. Ce travail est le résultat de collaboration entre chercheurs en psychologie cognitive et professionnels du monde aéronautique. Nous y avons participé non seulement en tant que chercheur, mais aussi comme aviateur. Nous avons été confrontés à la nécessité de construire un modèle qui embrasse les concepts pertinents de champs théoriques différents, puis d'effectuer une re-contextualisation dans le cadre de situations dynamiques propres à l'aéronautique. Ainsi, notre recherche adresse inévitablement la problématique de la gestion du temps, à court et long terme.

Étape 2 : Les enjeux de notre démarche illustrés par l'analyse d'un évènement aéronautique critique et exceptionnel. Prise en compte de la redistribution dynamique de priorités.

Au cours de cette seconde étape, nous avons souhaité confronter notre modèle à des cas concrets issus de l'aviation de combat et de l'aéronautique civile et l'illustrer par des observations de terrain. Pour se faire, nous conduisons de multiples entretiens avec des pilotes de chasse. Ces entretiens qui ont pour objectif premier de valider notre modèle mais aussi de le raffiner dans le cadre d'une stratégie adaptative liée à la délégation : la redistribution dynamique des priorités. Il nous est rapporté un incident critique intervenu au cours d'un convoi transatlantique retour (ouest vers est) vers la France, avec escale aux îles Açores. Un évènement tout à fait exceptionnel se produit au cours de ce convoi. L'apparition d'une même panne simultanée sur 2 avions de même type, alors qu'ils sont dans les mêmes

conditions d'environnement et de mission. Une divergence profonde entre les deux équipages apparaît dans le mode de gestion de crise. Cette divergence s'exprime tant par leur analyse de la situation, leurs réactions et les actions qu'ils mènent face à une panne complexe, exceptionnelle et extrêmement critique compte tenu des contraintes liées au vol transatlantique. Les deux stratégies mises en place s'avèrent efficaces ; mais cette différence nous permet de nous intéresser aux conditions qui ont prévalu à la mise en place de ces différentes stratégies.

La seconde phase repose sur deux étapes également : une comparaison des différentes techniques objectives permettant d'évaluer la charge cognitive et la validation du choix des techniques retenus dans le cadre d'une étude préliminaire en simulateur.

Etape 3 : Évaluation comparée de données méthode de mesure de l'état de l'opérateur.

Afin de répondre à notre problématique de recherche, nous allons être amenés à évaluer la capacité des opérateurs à effectuer des prises de décision en temps contraint et environnement complexe. Dans ce cadre, le concept de charge cognitive est particulièrement intéressant pour qualifier l'état de l'opérateur (Cegarra et Chevalier, 2008). En effet, les situations de surcharge peuvent avoir des conséquences tragiques tant sur la performance de l'opérateur que sur le système auquel il appartient (Wickens 1992). Ainsi, disposer d'outils appropriés et fiables en conditions opérationnelles pour évaluer son état cognitif constitue donc un enjeu crucial. Les moyens d'études psychophysologiques tels que l'électro-encéphalographie (EEG), électrocardiographie (ECG) ou l'oculométrie sont de plus en plus employés à cette fin dans des conditions expérimentales en laboratoire. Une difficulté pour l'expert facteurs humains est alors de sortir ces moyens de laboratoire pour les amener sur le terrain opérationnel, au plus proche de la réalité de l'activité. Notre objectif dans le cadre de cette étude est d'évaluer la pertinence de l'utilisation de l'EEG B-Alert pour mesurer la charge de travail en condition opérationnelle. Pour cela nous le comparons à deux autres techniques utilisant des métriques physiologiques (ECG et Pupillométrie), ainsi qu'à une technique de mesure subjective reconnue par la littérature, le NASA-TLX.

Etape 4 : Validation de la pertinence des mises en situation et comparaison des apports techniques NASA-TLX et Eye Tracking. Une étude sur élaboration des procédures d'emploi dans le cas d'une interruption du décollage sur A400M.

Dans le cadre de cette étape, notre objectif est surtout méthodologique : nous souhaitons 1) valider de la capacité à mener une étude en condition de simulateur et identifier les contraintes et 2) Comparer les techniques de NASA TLX et Eye Tracking en conditions opérationnelles. Pour cela, nous profitons d'une étude concernant l'élaboration des procédures opérationnelles de l'A400M. En effet, il est constaté que dans les cas de pannes critiques, en raison d'une forte sollicitation du « pilot monitoring » (PM), une délégation de certaines tâches qu'il assurait en mode nominal est opérée vers le pilote en fonction (PF) qui doit alors avoir à gérer : le pilotage de l'avion, la navigation et les communications radio. Avec le souci de prévenir la recrudescence des tâches dévolues au PM générées par les futures capacités de l'avion, il apparaît évident aux expérimentateurs de s'inspirer de cette méthode de travail en mode dégradé pour définir une méthode de travail en mode nominal ne dépassant pas la charge de travail maximale admissible par le PF (surcharge). Plus généralement, la démarche d'ergonomie cognitive à laquelle nous participons, permet : d'observer et d'analyser le comportement des membres d'équipage ; d'interpréter et de comprendre les modes opératoires mis en œuvre par les équipages au cours de leur activité (écart entre tâches réalisées et tâches prescrites) à l'aide de connaissances et de méthodes scientifiques ; de proposer des recommandations et d'accompagner leur mise en application.

La troisième phase consiste en la mise en œuvre d'un scénario original, spécifiquement dédié à notre travail de thèse.

Etape 5 : Etude des stratégies adaptatives des pilotes d'airbus A400M en situation sous forte pression temporelle.

Rappelons que notre problématique vise à déterminer les modalités de gestion des ressources cognitives, et plus particulièrement la redistribution dynamique des priorités. Ainsi, nous exposons des opérateurs volontaires à une situation simulée de type accidentogène, nécessitant une analyse de la situation et une prise de décision en temps contraint. Nous avons créé un scénario sur la base d'un événement sporadique correspondant à une panne électrique totale consécutive à un foudroiement en vol. Ce type de panne met l'équipage en situation particulièrement critique. Cela doit nous permettre de vérifier le positionnement des équipages selon 4 axes inspirés des de l'analyse de la littérature et des résultats obtenus au cours chapitres/ expérimentations précédents (es) :

1. Se donner du temps (délégation à soi, dans le temps et ré-ordonnancement des priorités)

2. Augmenter ses ressources (délégation à d'autres humains ou technos)
3. Réduire les exigences de la situation (abandon ou relâcher certaines contraintes)
4. Changer les objectifs (et ainsi le rapport exigences/ressources correspondant)

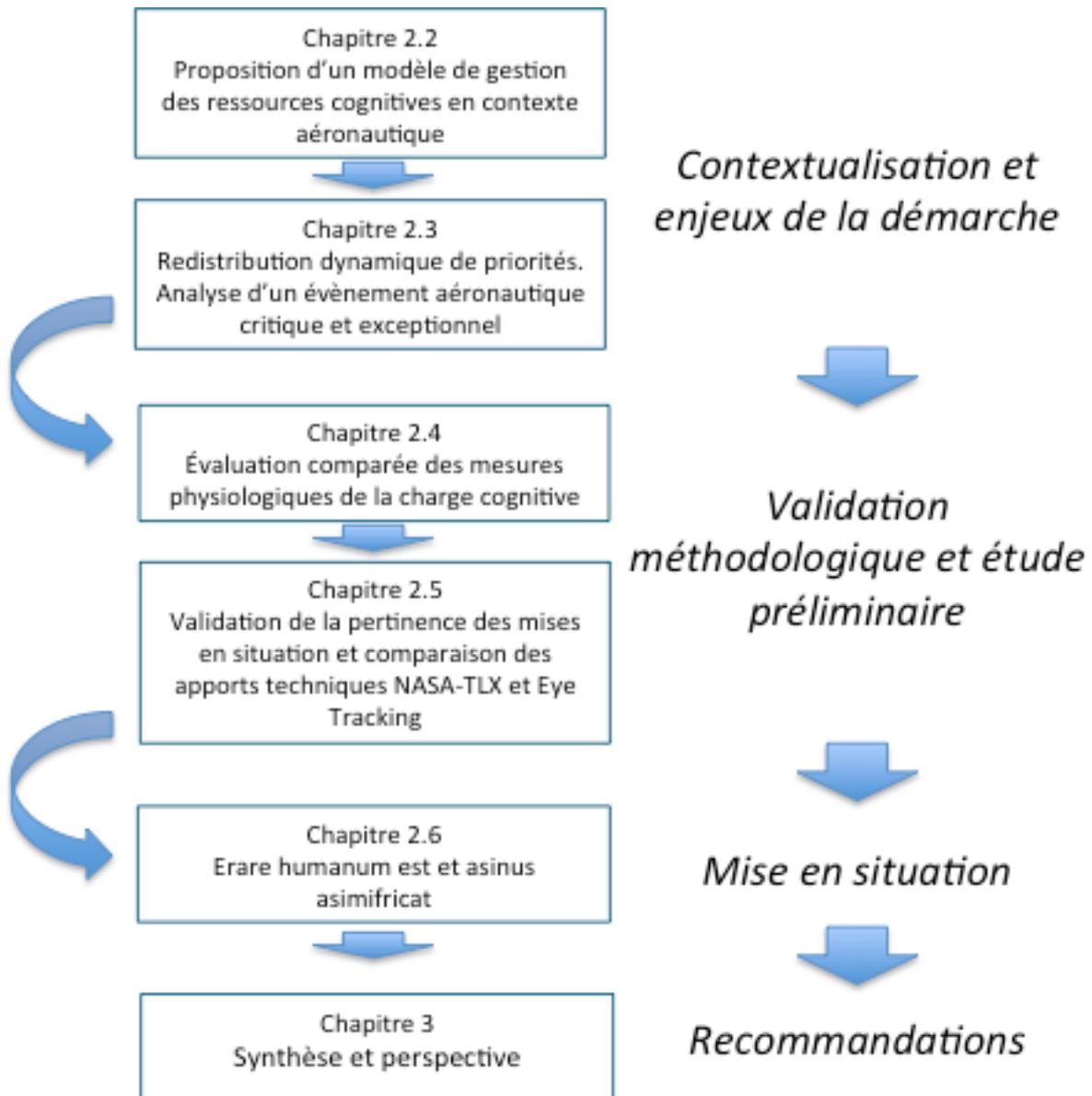


Figure 29. Représentation de l'organisation générale et méthodologie de la partie empirique de la démarche de thèse, en 3 phases et 5 étapes.

II. LES METHODES D'EVALUATION MISES EN OEUVRE DE FAÇON RECURRENTTE AU COURS DU TRAVAIL DE THESE.

Les différentes théories et problématiques liées à l'évaluation des opérateurs en situation d'usage ont été largement abordées dans le premier chapitre 1.1 de notre travail consacré au contexte théorique de cette étude. Certaines méthodes seront mentionnées ou utilisées de façon récurrente pendant les différentes étapes de notre travail de thèse. C'est pourquoi, afin d'éviter les redites, nous avons choisi les exposer au sein de ce chapitre dédié à la méthodologie générale.

Les évaluations auxquelles nous avons recourt comprennent 3 composantes distinctes : une **composante subjective**, qui correspond à l'évaluation que le sujet fait de son propre état cognitif ; une **composante physiologique**, principalement liée à l'activation des systèmes endocriniens et nerveux autonome ; et une **composante liée à l'évaluation de la performance** qui est dépendante du type de tâche et des objectifs poursuivis ou assignés à l'opérateur. Le processus d'évaluation et doit être apprécié selon des indicateurs ou critères experts.

Cegarra & Chevalier (2008) soulignent enfin l'intérêt de croiser les types de mesure, notamment subjectives et physiologiques, afin de s'affranchir des limites de chaque méthode. Dans le contexte d'un travail visant à concevoir, et évaluer, un moyen de mieux gérer la charge cognitive, ce principe est celui que nous suivons pour toute démarche de mesure de la charge cognitive : l'emploi de mesures indépendantes et croisées et la vérification systématique qu'elles évoluent dans le même sens.

Notons que les indications fournies par ces méthodes d'évaluation permettent d'adapter les tâches. Ainsi, pour pallier une augmentation trop importante de la charge, deux axes sont généralement empruntés dans la conception d'aide à l'opérateur : le délester de sa charge en prenant en charge automatiquement certaines tâches qui lui étaient attribuées, ou l'aider à mieux répartir sa charge.

II. A. Mesure subjective

Dans le cas de mesures subjectives, il s'agit de demander au sujet d'évaluer l'effort cognitif qui lui a été demandé pour réaliser la tâche. La démarche peut se faire a posteriori ou durant la tâche elle-même. L'intérêt de cette démarche est qu'elle n'est pas intrusive et facile à

implémenter. Par ailleurs la littérature souligne que les sujets sont relativement consistants dans leur auto-évaluation. L'objection principale concerne le fait que cette méthode repose sur l'hypothèse que le sujet est capable d'évaluer sa propre charge cognitive.

De nombreuses échelles existent, les plus utilisées sont la MCH (*Modified Cooper-Harper scale*, Wierwille & Casali, 1983) et le NASA-TLX (*National Aeronautics and Space Administration Task Load index*, Hart & Staveland, 1988).

Pour notre étude nous avons choisis d'utiliser le NASA-TLX. Le principe repose sur une évaluation à posteriori. A la fin de chaque passation, il est demandé au sujet d'évaluer subjectivement sa charge par le biais d'un questionnaire, le NASA-TLX, en version francophone (Cegarra & Morgado, 2009).

Le NASA Task Load Index est un outil d'évaluation subjective de la charge cognitive. Il s'agit d'un outil multidimensionnel qui permet le calcul d'un score de charge cognitive global sur la base d'une pondération des scores obtenus à six sous-dimensions. Les sous-scores sont obtenus par évaluation sur six échelles de Likert des dimensions suivantes : demande mentale, demande physique, demande temporelle, effort, performance et niveau de frustration.

Les dimensions sont présentées comme suit :

1. Exigence mentale : Dans quelle mesure des opérations mentales et perceptives ont-elles été requises (par ex. : penser, décider, calculer, se rappeler, regarder, chercher, etc.) ? La tâche était-elle plutôt facile ou difficile, simple ou complexe, abordable ou exigeante ?
2. Exigence physique : Dans quelle mesure des opérations physiques ont-elles été requises (par ex. : pousser, tirer, tourner, superviser, activer, etc.) ? Avez-vous trouvé la tâche plutôt facile ou difficile, lente ou rapide, lâche ou vigoureuse, reposante ou ardue ?
3. Exigence temporelle : Quelle quantité de pression liée au temps à cause du rythme ou de l'allure des tâches ou de l'apparition des éléments de la tâche avez-vous ressenti ?
4. Effort : Quelle a été la difficulté d'accomplir (mentalement et physiquement) la tâche avec un niveau de performance tel que le vôtre ?
5. Performance : Quelle réussite vous attribuez-vous en ce qui concerne l'atteinte des buts de la tâche fixés par l'expérimentateur (ou par vous-même) ? Dans quelle mesure êtes-vous satisfait de votre performance dans l'accomplissement de ces buts ?
6. Frustration : Au cours de la tâche, quel sentiment d'être peu sûr de vous, découragé, irrité, stressé et agacé avez-vous ressenti contrairement au fait d'être sûr de vous, satisfait, content, détendu et complaisant ?

Les sous-dimensions sont présentées au participant après chaque modalité et il est demandé aux sujets de les évaluer sur un intervalle de valeurs entre 0 (faible) et 100 (haut).

Une phase de pondération par comparaison de paires est ensuite réalisée. Quinze paires de dimensions sont présentées successivement au sujet et il lui est demandé de choisir celle qu'il estime prépondérante dans sa charge cognitive

Le NASA-TLX est soumis au sujet en utilisant l'interface Tholos (Cegarra & Chevalier, 2008) et est analysé en version pondérée pour chacun des sujets.

II. B. Mesure physiologique : pupillométrie

Reposant sur l'hypothèse que des variations de la charge cognitive impliquent des variations physiologiques, le diamètre pupillaire, l'arythmie cardiaque ou encore le rythme respiratoire peuvent être considéré comme des « indicateurs » nous renseignant sur de la charge cognitive du sujet. Cependant, les contraintes liées à l'aspect physiologique des mesures, contraintes temporelles, caractère invasif, limitent leur utilisation à certains types de tâches. Les différentes approches méthodologiques auxquelles nous nous sommes confrontés (chapitres 2.4 et 2.5) mettent clairement en évidence les difficultés de mise en œuvre et les limites de certaines mesures physiologiques dans le contexte aéronautique de défense. Parmi les possibilités envisagées, la pupillométrie apparaît comme la plus adaptée à notre cas.

L'étude du diamètre pupillaire comme indicateur du niveau d'attention et de traitement de l'information repose sur un historique de plusieurs siècles chez les marchands qui évaluaient l'intérêt de leurs clients à la dilatation de leur pupille (Hess, 1975). Dès le milieu des années 1960, des études scientifiques font apparaître des corrélations entre dilatation pupillaire et intérêt des sujets pour un objet, une personne ou un lieu (Hess, 1965). De même, un lien est établi entre dilatation pupillaire et charge cognitive durant une tâche de mémorisation (Kahneman & Beatty, 1966).

La neurologie clinique s'est également penchée sur la dilatation pupillaire comme symptôme d'altération du système nerveux (Beatty & Lucero-Wagoner, 2000) : la constriction pupillaire chronique est indicative d'une altération du système nerveux sympathique quand la dilatation pupillaire chronique est symptomatique d'une altération du système nerveux parasympathique (Bickerstaff, 1976). Ainsi, comme présenté plus haut dans le cas de l'arythmie cardiaque, l'étude de la dilatation pupillaire peut être considérée comme une

approche de la balance entre influence des systèmes nerveux sympathique et parasymphatique.

Si l'intérêt que nous portons à l'étude du diamètre pupillaire concerne les indications indirectes sur la cognition, les changements les plus importants observés répondent à des facteurs extrinsèques d'autres natures (Tryon, 1975). Le rôle principal de la pupille est de protéger la rétine en contrôlant la luminosité qui entre dans l'œil par constriction rapide de la pupille, c'est le réflexe photomoteur. Le réflexe pupillaire quant à lui correspond à une constriction de la pupille résultant d'un changement de plan d'accommodation, d'un objet lointain à un objet proche. Les structures neuronales et voies contrôlant le diamètre pupillaire sont décrites en Figure 30.

Les travaux mettant en relation dilatation pupillaire et charge cognitive (Kahneman & Beatty, 1966) font apparaître que la dilatation pupillaire est sensible aux tâches perceptuelles (Beatty, 1988; Qiyuan, Richer, Wagoner, & Beatty, 1985) et cognitives (Beatty, 1982) : l'augmentation de la charge cognitive induite par la réalisation d'une tâche est corrélée à une augmentation rapide du diamètre pupillaire. Il s'agit ainsi d'un indicateur indirect de la charge cognitive.

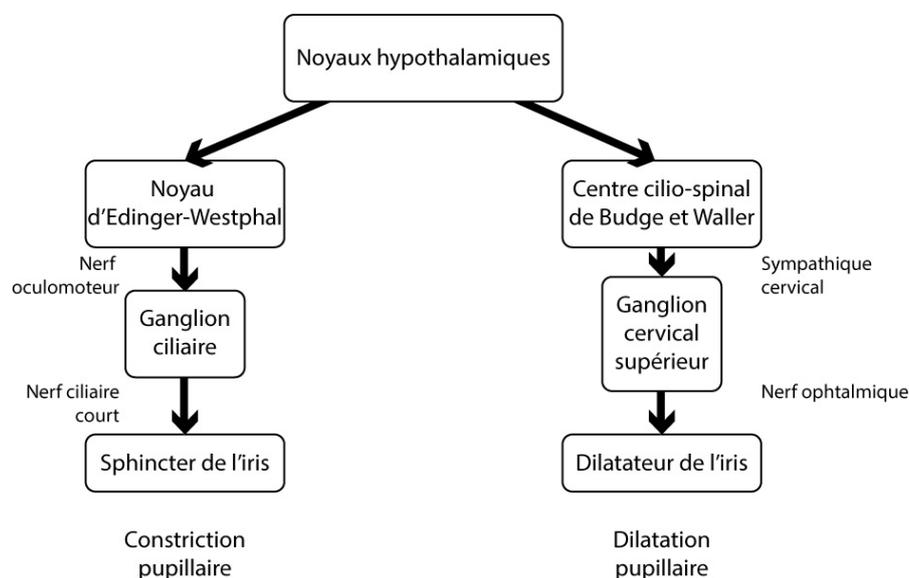


Figure 30. Structures neuronales et voies contrôlant le diamètre pupillaire

Dans le cadre de notre étude, les participants sont équipés d'un oculomètre portatif, les **Tobii Glasses** (Figure 31).



Figure 31. Oculomètre portatif Tobii Glasses, son boîtier d'acquisition et les marqueurs infrarouges (d'après Tobii Glasses Eye Tracker User Manual)

Cet oculomètre monoculaire enregistre à une fréquence de 30Hz un champ visuel de 56° x 40°. Il est composé de plusieurs éléments :

- une paire de lunettes équipée : d'un micro ; de deux caméras frontales dont une filmant dans le domaine infrarouge ; d'illuminateurs infrarouges venant illuminer la pupille ; et d'une caméra filmant dans le domaine infrarouge la pupille illuminée, en déterminant ainsi la position et le diamètre ;
- un boîtier d'enregistrement ;
- des marqueurs infrarouges, positionnés dans l'environnement étudié, permettant une interpolation des données égocentrées obtenues par l'oculomètre à un référentiel allocentré présentant l'ensemble du dispositif et la définition de zones d'intérêt (voir ci-après).

Avant l'enregistrement des données oculométriques, les sujets sont soumis à une phase de calibration. Il leur est demandé de suivre du regard un marqueur infrarouge que l'expérimentateur déplace dans un plan vertical situé à un mètre d'eux suivant une matrice

affichée sur le boîtier d'enregistrement. Cette étape permet de déterminer les points extrêmes du référentiel de l'oculomètre. (Figure 32)

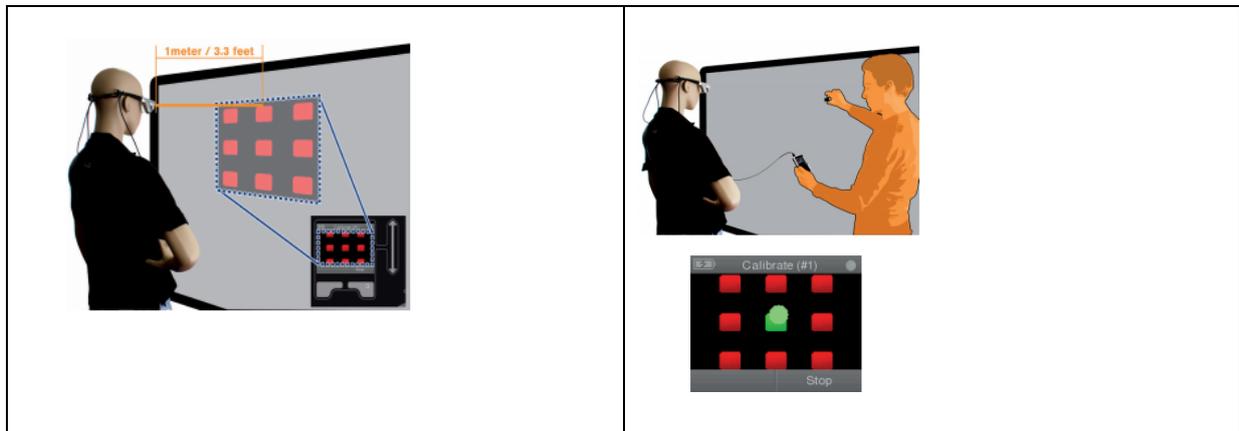


Figure 32. Procédure de calibration (d'après Tobii Glasses Eye Tracker User Manual)

Avec le type de matériel utilisé et dans le cadre de toute étude en pupillométrie, cette phase de calibration doit être exécutée précautionneusement. En effet, les données fournies par l'oculomètre reposent sur une mesure (sans unité) du rapport entre le diamètre pupillaire enregistré à un instant t et la moyenne du diamètre pupillaire enregistré lors de la phase de la calibration.

Comment s'effectue l'exploitation des données pupillométriques ?

Comme signalé précédemment, dans des conditions de luminosité contrôlées, des études antérieures ont illustré la corrélation entre dilatation pupillaire et cognition : une augmentation de la dilatation pupillaire est fortement corrélée à un effort cognitif (Beatty, 1988; Kahneman & Beatty, 1966). Deux dimensions sont usuellement considérées : 1) Ce qui relève de l'émotion, c'est-à-dire de l'excitation ressentie et de la valence émotionnelle : attraction ou distanciation pour un phénomène ; 2) Ce qui relève de la charge de travail.

La dynamique de dilatation pupillaire liée à la charge cognitive est considérée comme prévalant sur les émotions (Stanners, Coulter, Sweet, & Murphy, 1979). Par ailleurs, cette évolution est moins importante en amplitude que les mouvements de dilatation/constriction liés à l'accommodation à la luminosité ambiante (Jackson Beatty, 1982). Par des méthodes de filtrage et de centrage/réduction, il est ainsi possible, en théorie, d'obtenir l'évolution de la charge de travail lors de la réalisation de certaines tâches par l'étude du diamètre pupillaire. Par exemple, le Task Evoked Pupillary Response (TEPRs, réponse pupillaire dépendante de la tâche) (Szulewski, Roth, & Howes, 2015) est un indicateur qui trouve toute son utilité dans

le cadre de cette étude. Ainsi, la mise en corrélation de faits de situation avec l'évolution de la dilatation pupillaire doit permettre d'en évaluer l'impact sur l'activité cognitive des pilotes.

Pour pouvoir être exploitées, les données, très bruitées, doivent être « nettoyées ». L'application d'un lissage par régression locale (LOWESS, locally weighted scatter plot, Cleveland, 1979) est usuellement utilisée par la communauté (Buchanan, Etzel, Adolphs, & Tranel, 2006; Schulz et al., 2011). Cette méthode permet à la fois de réduire le bruit et d'appliquer une régression sur les données pour combler les trous. En fonction du lissage appliqué, les graphes générés permettent d'avoir une vision globale de l'évolution du diamètre pupillaire ou au contraire une vision plus locale (Figure 33 et 34).

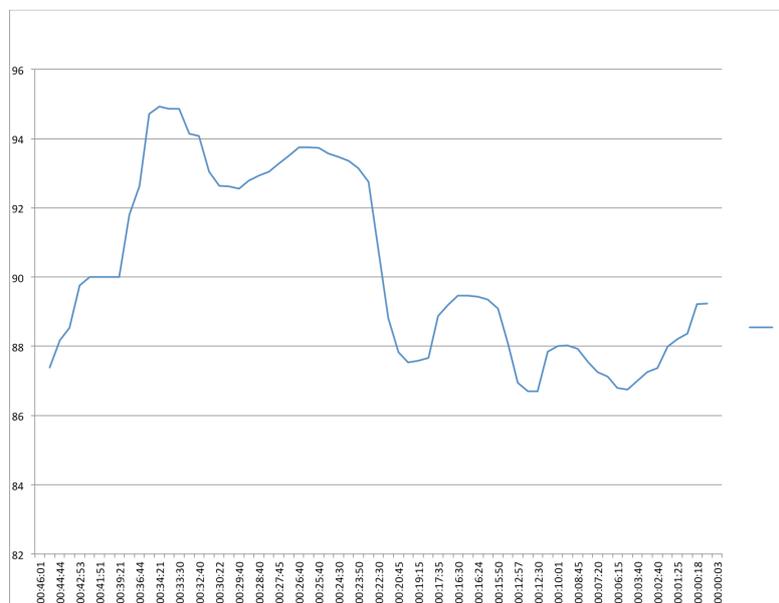


Figure 33 : Tendence générale de l'évolution du diamètre pupillaire après LOESS (span = 0.25)

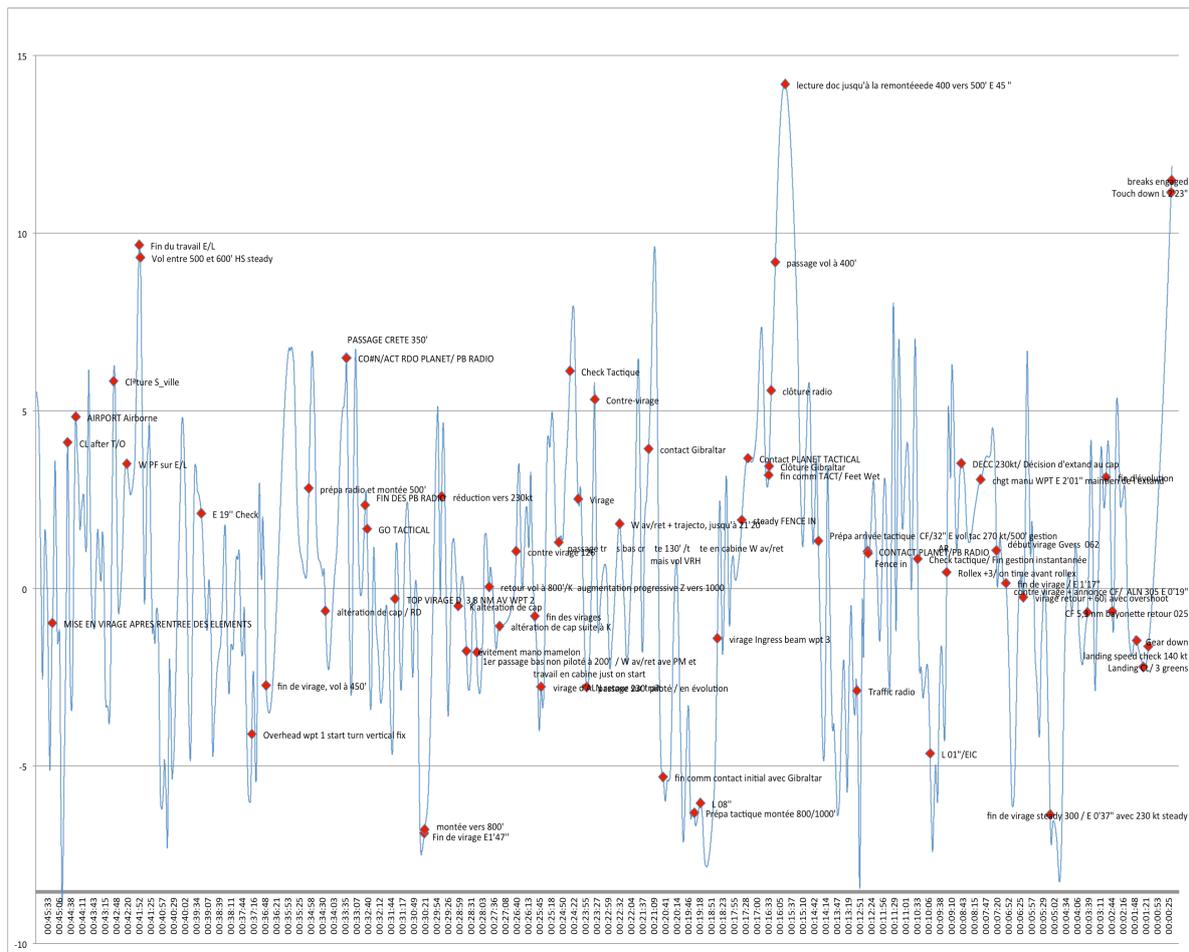


Figure 34 : Signal débruité (après LOESS, span = 0,011) et mise en regard des événements du vol (pastilles rouges)

En venant mettre en regard les réponses pupillaires avec les événements, on fait apparaître l'impact de la situation sur la cognition des pilotes, les périodes de calme et la relation de cause à effet entre surcharge cognitive et erreurs humaines.

Les techniques d'eye-tracking sont couramment utilisées à des fins d'exploitation de données descriptives de la position du regard. Bien qu'ayant testé cette éventualité en situation expérimentale (simulateur A400M) et in situ, nous n'avons pas exploité ces données dans le cadre de notre travail de thèse. Les adaptations méthodologiques et techniques afférentes à ce type de mesure ne seront donc pas présentées ici.

Les informations de pupillométrie, ne dépendent que de la capture d'une image de la pupille et du calcul de son diamètre. Elles sont bien moins contraignantes que celles concernant la position du regard (eye-tracking). Elles sont cependant contraintes par les éléments extérieurs se positionnant entre la caméra et l'œil du sujet. Les lunettes et lentilles sont par exemple des facteurs compliquant l'enregistrement de données. Les difficultés potentielles sont généralement identifiées dès la phase de calibration, mais des surprises peuvent arriver.

L'autre principale source de perte de signal est, elle, incontrôlable : il s'agit des clignements des yeux. La donnée de diamètre pupillaire est donc bien moins sujette au bruit expérimental que celles de position du regard que nous avons testée lors de nos premiers protocoles.

II. C. Mesures de performance

Dans le cas de mesures de performances, divers indices peuvent être mesurés, dépendant de la tâche effectuée : temps de réaction, rapidité, ou encore nombre d'erreurs par exemple.

Selon Wickens & Hollands (2000) : une bonne performance ne peut être atteinte que si suffisamment de ressources cognitives sont mobilisables. Ainsi une dégradation du niveau de performance serait révélatrice d'une augmentation de la charge cognitive (Figure 35).

Une objection à ce type de mesure concerne le fait qu'une mauvaise performance peut refléter tant une surcharge cognitive qu'une sous-charge, ce qu'indique la loi de Yerkes & Dodson (1908). Il faut alors s'assurer que le niveau de charge demandé au sujet permet bien d'évaluer l'augmentation de la charge cognitive et non une forme d'ennui.

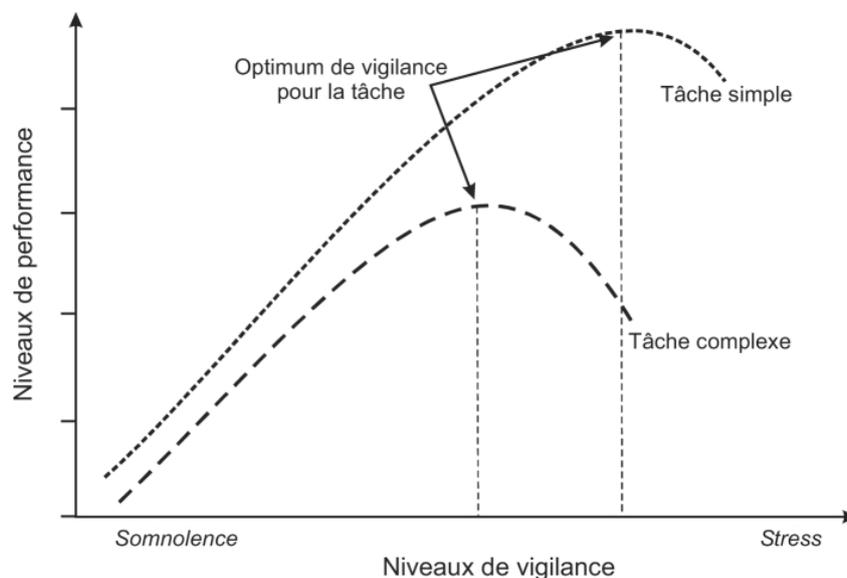


Figure 35. Loi de Yerkes-Dodson concernant le lien entre niveaux de performance et niveaux de vigilance (d'après Wickens et Hollands, 2000)

Dans notre cas, la qualité de la solution retenue est évaluée a posteriori par un jury constitué d'un expert en facteur humain et d'un ancien pilote. Cette note constitue un second index de performance pour chacun des scénarios retenus

Chapitre 2.2 - Résultats

Elaboration d'un modèle de gestion des ressources cognitives en contexte aéronautique : Sur la base de concepts et de modèles existants

I. INTRODUCTION

Dans le contexte aéronautique, la question de la gestion des ressources cognitives et des processus d'économie associés demeure un axe majeur de l'amélioration de la sécurité aérienne. Une gestion adaptée des ressources cognitives est un des points déterminants pour augmenter le niveau de sécurité des opérations. Afin d'aider les pilotes dans leur activité, il est indispensable de les aider à mieux gérer leurs ressources. Une telle assistance doit pouvoir se baser sur un ou des modèles de la gestion des ressources cognitives orientée vers la prise de décision. C'est pourquoi dans le cadre de ce travail de thèse nous proposons, une vision agrégative des modèles issus de la littérature concernant cette problématique. Celle-ci constituera la base de nos réflexions pour la suite de nos travaux.

Ce travail est le résultat de collaboration entre chercheurs en psychologie cognitive et professionnels du monde aéronautique. Nous y avons participé non seulement en tant que chercheur, mais aussi comme aviateur. Nous avons été confrontés à la nécessité de construire un modèle qui embrasse les concepts pertinents de champs théoriques différents, puis de les re-contextualiser dans le cadre de situations dynamiques propres à l'aéronautique. Ainsi, notre

recherche adresse inévitablement la problématique de la gestion du temps, à court et long terme.

Dans une première partie, nous présentons les concepts retenus et nous proposons une articulation adaptée. Dans un deuxième temps, nous introduirons notre modèle agrégatif.

II. LES MODELES DE REFERENCES : INTERETS ET LIMITES

La SA constitue la base du processus de prise de décision. En la matière, nous pouvons considérer que le modèle de référence est celui d'Endsley (1995). Selon cet auteur (Figure 36), la SA est constituée d'une première phase de perception des éléments caractérisant la situation, puis d'une seconde qui représente la compréhension de ces éléments. La troisième phase est celle dans laquelle ces éléments sont projetés dans le temps afin d'évaluer leurs états futurs. Il s'agit de la phase de projection et anticipation. Le postulat sur lequel repose cette proposition est d'une part que le temps nécessaire pour la mise en oeuvre d'une action est suffisant, et d'autre part l'opérateur dispose d'une capacité d'abstraction adaptée afin de pouvoir anticiper correctement.

Dans une recherche précédente (Lini et al., 2012), sur la base du modèle d'Endsley, nous avons ajouté l'idée, implicite dans la littérature, de la relation avec la charge de travail cognitive. Nous avons établi qu'à un niveau de contrôle donné (compétences), une augmentation de la profondeur temporelle d'anticipation est corrélée à une augmentation de la charge de travail cognitive. Ainsi la charge de travail aura une influence sur la capacité à anticiper et à décider.

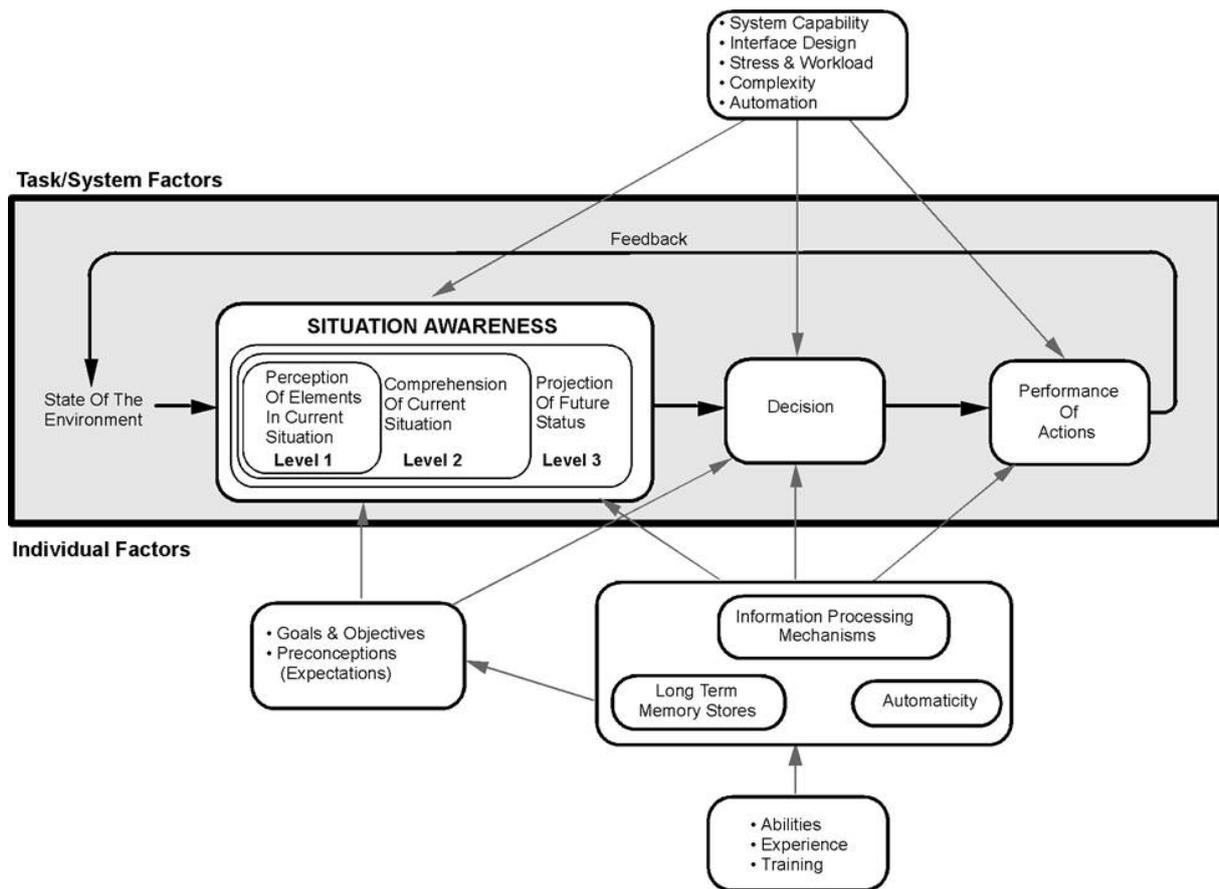


Figure 36. La SA d'après le modèle d'Endsley (1995)

La littérature en psychologie cognitive sur la résolution de problèmes ainsi que la planification et l'attente (Hoc, 1987) souligne le lien de proximité entre la capacité d'abstraction et l'expertise. Ainsi, ce qui distingue les experts des sujets naïfs c'est précisément la capacité d'extraire des données d'un problème et les adapter ensuite dans un cadre générique qu'ils spécifieront. Ce résultat conforte l'hypothèse selon laquelle la capacité à anticiper et à la prise de décision est une capacité qui définit les experts. Dans notre contexte, un tel concept justifie la raison de vouloir fournir aux pilotes les moins expérimentés un moyen pour compenser leur manque potentiel de capacité d'anticipation.

Remarquons cependant que les travaux de Hoc (1987) correspondent à des situations statiques ou à des situations à dynamique lente. Mais ils ne peuvent pas s'appliquer aux situations soumises à une forte dynamique comme l'aéronautique. Par ailleurs, Denecker et Hoc (1997) font la distinction entre l'anticipation à court terme d'une part, subsymbolique, basée sur des boucles réflexes, un contrôle d'action de bas niveau et d'autre part l'anticipation à long terme, symbolique, basée sur la construction de solutions reposant sur les règles ou la connaissance.

L'architecture cognitive du contrôle dynamique (Hoc et Amalberti, 1994) fait un pont entre ces deux idées : sur la base des niveaux de contrôle de Rasmussen (modèle SRK, cf. p76), la profondeur temporelle est pondérée par des niveaux hiérarchiques. Ainsi, la mise en œuvre de la connaissance permet la projection à long terme tandis que de l'autre côté du spectre, la mise en œuvre des compétences permet la projection à court terme.

Dans le domaine aéronautique, (Reynolds, 2006) introduit l'idée d'incertitude (figure 37). Pour cela, définit 3 « régions » qui sont fonction de la profondeur temporelle (court, moyen long terme) et de la dynamique de situation. 1) Sur le court terme, la région de **persistance** est celle dans lequel la situation changera peu. 2) Sur le moyen terme, la région **déterminée** est gouvernée par des modèles tels que les lois physiques qui permettent d'avoir une représentation précise de l'évolution de la situation. 3) Sur le long terme, **l'incertitude** est trop haute et on doit faire face à une explosion combinatoire. Il est seulement possible d'envisager la probabilité de survenue d'un événement. Notre travail concernant des situations dynamiques en environnement complexe l'incertitude devra donc être adressée dans notre modèle.

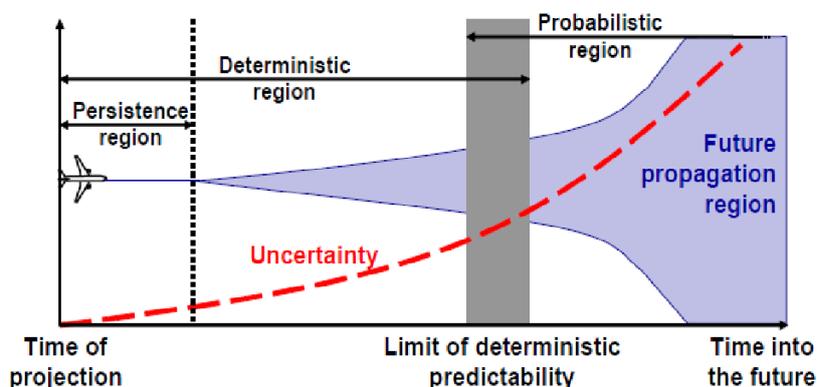


Figure 37. Incertitude des projections en fonction du temps, d'après Reynolds (2006)

Sur des intervalles de temps plus courts, la littérature (Mundutéguy & Darses, 2007), (Crognier & Fery, 2007) avance l'idée d'une expertise perceptive et motrice, proche du principe « ré-afférence », selon lequel l'anticipation reposerait sur une stratégie double, ascendante et descendante. Une structure mentale axée sur l'action serait pré-activée par la perception de schéma d'indices connus. Remarquons que l'opérateur aurait alors tendance à chercher dans l'environnement les indices correspondants. Ce principe doit être rapproché des concepts de biais cognitifs (Kahneman & Tversky, 1973) et de la résistance à la réalité (Piaget, 1952). De

façon plus explicite, l'opérateur aura tendance à chercher dans l'environnement des schémas révélateurs d'indices qu'il connaît et pour lesquels il maîtrise les solutions.

Ainsi, il faut gérer un "paradoxe" : Les biais offrent une efficacité améliorée dans la plupart des situations permettant une prise de décision plus rapide : cependant c'est au prix d'une résistance plus faible, qui peut conduire à un phénomène de « tunnelling » cognitif, enfermant l'opérateur dans une représentation erronée de la situation le rendant incapable d'identifier des indices discriminants différenciant la situation en cours de celles dont il a l'habitude.

L'idée d'activation d'une structure mentale poussant à agir, prêt à être mis en œuvre dans un processus de préparation pour l'action, est commune à toute la littérature citée ci-dessus. L'activation de ces structures mentales est déjà présentée dans le modèle de conscience de la situation d'Endsley (1995). Dans ce modèle, un filtrage de l'attention permet la sélection d'indices de perception adéquats. Le modèle de mémoire de travail à long terme (Ericsson et Kintsch, 1995) prend en compte la performance de rappel lors de la survenue de circonstances inhabituelles.

Les travaux de Hollnagel (2003) et Tanida & Pöppel (2006) traitent de l'articulation entre l'anticipation et les niveaux de contrôle (SRK Rasmussen). Ces auteurs introduisent l'idée d'une interaction entre ces niveaux et d'un fonctionnement parallèle. Selon ces auteurs, le plus haut niveau fonctionne en parallèle avec le niveau le plus bas (boucle de détection) dans un processus d'enrichissement mutuel.

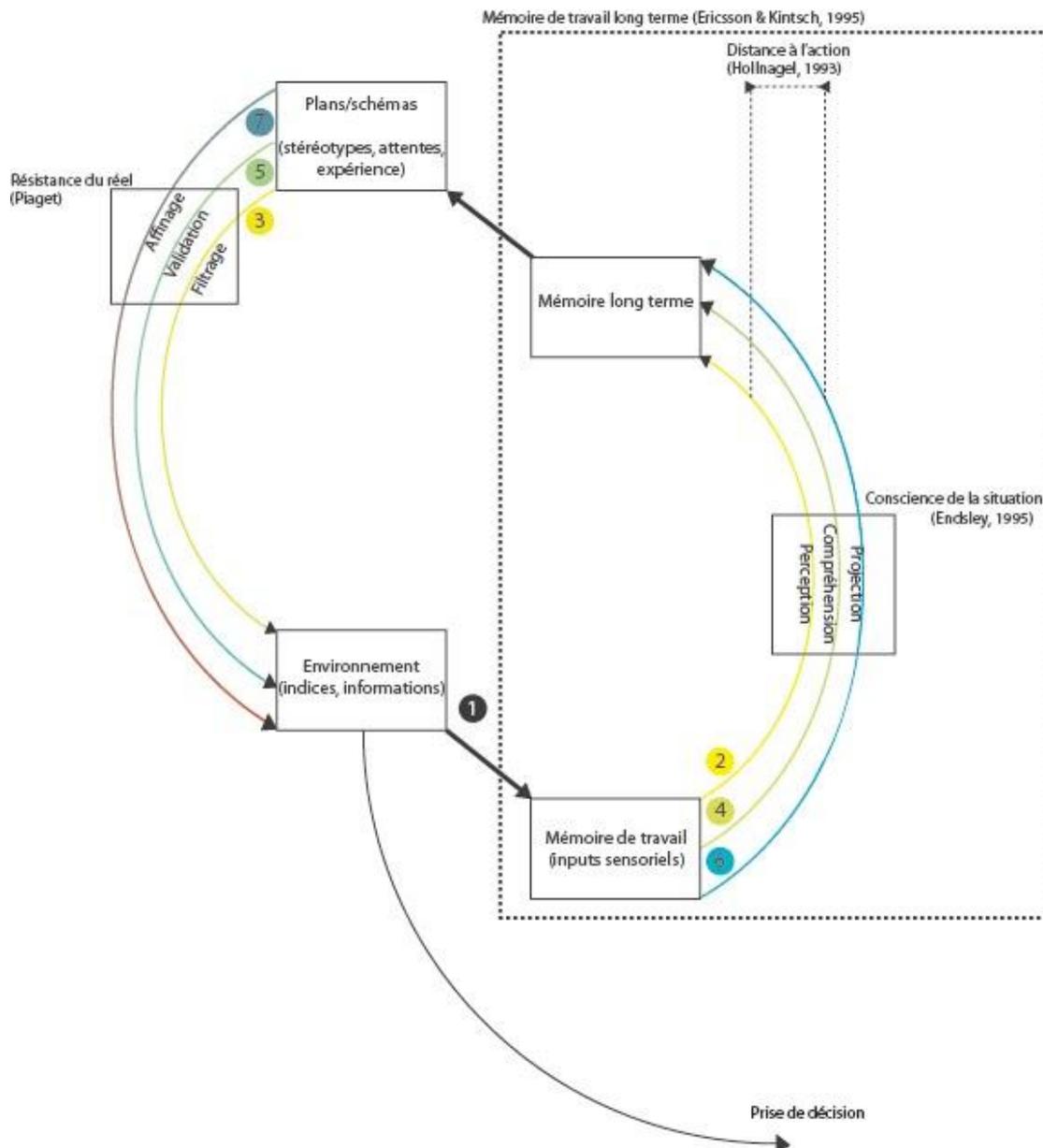


Figure 38. Représentation synthétique des différents apports des modèles retenus.

Cette approche de la littérature met en évidence les éléments sur lesquels notre modèle devrait mettre l'accent (figure 38). La capacité à recruter les structures mentales adéquates nous apparaît comme un point fondamental. Ainsi, l'école de pensée d'énaction préconise l'idée d'une connaissance incarnée dans l'action elle-même (Varela, Thompson, & Rosch, 1992). Cette hypothèse soutient l'idée d'une concurrence entre des structures mentales selon les informations perçues. Un haut niveau de contrôle influence la perception et la priorisation aussi bien que le raffinement, l'évaluation, la construction des solutions ainsi que leur mise en œuvre. Notre modèle devra donc intégrer l'existence d'une telle structure de contrôle de haut niveau. De même que les aspects de parallélisation du processus de contrôle.

III. LES BASES DE NOTRE MODELE

Basé sur notre modèle d'anticipation (Lini et al., 2012), nous construisons trois couches qui correspondent à trois niveaux de contrôle. Selon une approche descendante (top-down), les couches les plus hautes définissent des objectifs que les niveaux les plus bas tentent à réaliser. Dans une approche ascendante (bottom-up), les niveaux les plus élevés suivent l'action amorcée par les niveaux inférieurs : ainsi, si les finalités sont définies aux plus hauts niveaux, les moyens à mettre en œuvre sont définis aux plus bas. Un système d'activation/inhibition mutuelle entre ces couches ainsi qu'un processus de "récompense" (renforcement des solutions qui fonctionnent) seront les éléments clés de notre approche de la gestion des ressources cognitives.

III. A. Couche haute : la métapolitique

La métapolitique est le plus haut niveau de notre modèle. Il correspond à la couche la plus stratégique. Elle définit à la fois l'objectif et la performance par rapport aux risques. Ainsi, l'anticipation et capacité de prise de décision ne peuvent se concevoir que par rapport à un objectif déterminé. La métapolitique oriente alors l'attention vers des modèles de prise d'information et d'indices perceptifs adaptés pour atteindre l'objectif. Ce processus correspond à la phase de perception du modèle de la conscience situationnelle d'Endsley (1995). La Figure 39 illustre cette idée : un filtrage attentionnel est appliqué aux informations d'environnement qui rappellent un ensemble de plans stockés dans la mémoire à long terme par défaut, éventuellement mobilisé au préalable dans la mémoire de travail.

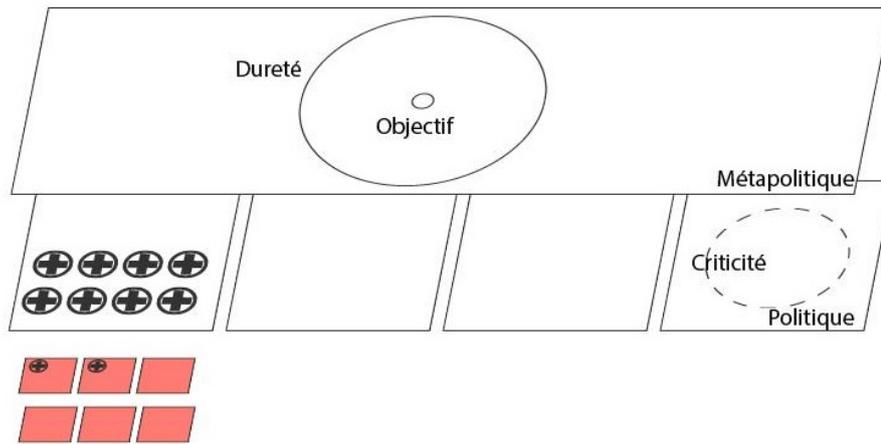


Figure 39. Représentation de la structure en 3 couches du modèle de gestion des ressources cognitives

III. B. Couche intermédiaire : la politique

La politique se situe à au niveau intermédiaire. Elle organise et gère la façon d'atteindre le but global. Celle-ci peut se décliner en différents processus :

- Evaluation du ratio entre exploration de nouvelles solutions et exploitation de celles existantes. Par exemple, selon le contexte et l'expertise, l'exploration sera préférée sur l'exploitation et vice versa.
- Détermination de la criticité des sous-objectifs. Quel niveau de performance pour chaque sous objectif en regard de l'objectif global ?
- Distribution de ressources vers les niveaux couche basse. En accord avec la validité des solutions, la politique distribue "les jetons" ou « tokens » de ressources disponibles.

III. C. Couche basse : La mise en œuvre

La couche la plus basse est le niveau de mise en œuvre. Les plans sont rappelés en même temps que de nouvelles solutions sont construites. Chacune de ces solutions est liée à un modèle de l'évolution de la situation. Ce modèle de mise en œuvre repose sur une représentation de l'action, des hypothèses sur l'évolution de l'environnement et des conséquences éventuelles associées. Les hypothèses sont pondérées en fonction de la dynamique de situation, deux types paramètres interviennent : 1) le niveau de sensibilité face à l'incertitude (la probabilité d'apparition de quelque chose l'inattendu (« what-if »)); 2) comment

les durées de mise en œuvre des hypothèses correspondent aux contraintes temporelles. Le temps pour exécuter, « time to action », est une représentation subjective du temps objectif (grande variabilité inter et intra individuelle).

L'hypothèse retenue conduira à la mise en œuvre d'un plan d'action. La première étape de ce plan vise à valider la représentation de la situation en cherchant des informations concordantes. Si les modèles d'indices attendus sont rencontrés dans l'environnement, le plan est activé et recevra de fait des ressources pour atteindre les objectifs. Dans ce cas, toutes les variantes éventuelles du plan sont également activées. A contrario, les plans concurrents sont inhibés et ne seront pas crédités de jeton de ressources supplémentaires. Ce processus est décrit en Figure 40.

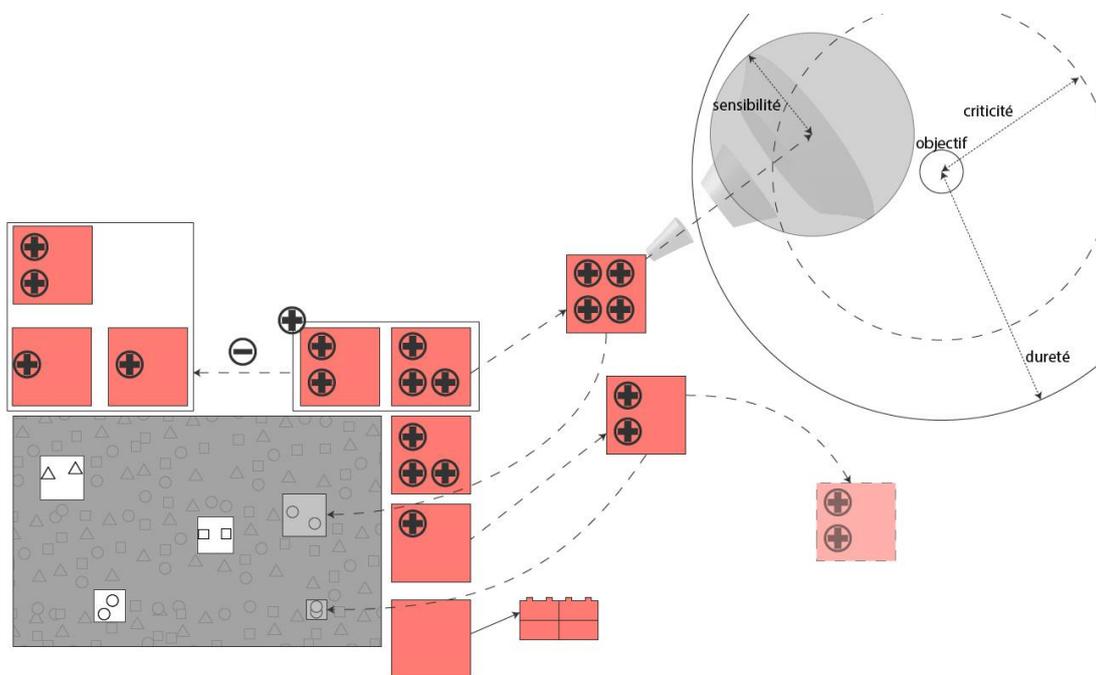


Figure 40. Processus d'activation et inhibition; les schémas d'action sont représentés en rouge

Ainsi, dans un processus parallèle, des schémas d'actions (rassemblés éventuellement en plan) sont simultanément activés et/ou inhibés selon les indications perçues dans l'environnement. Ils réalisent progressivement leur action sur l'environnement vers le but à atteindre, en prenant toujours en compte toutes les contraintes des différentes couches. La figure 40 montre la représentation d'un plan d'action en regard de l'incertitude de la situation. Agir longtemps avant le temps objectif rend probablement difficile l'atteinte de l'objectif selon la performance poursuivie et le niveau de risque admis. A l'inverse, la projection à court terme garantie la criticité des sous-objectifs, mais a peu de chance de garantir la complétude de l'objectif

principal. De fait, la difficulté sera de trouver l'adéquation optimale entre l'empan temporel et le raffinement des solutions permettant d'assurer la criticité des sous-objectifs et la complétude de l'objectif principal.

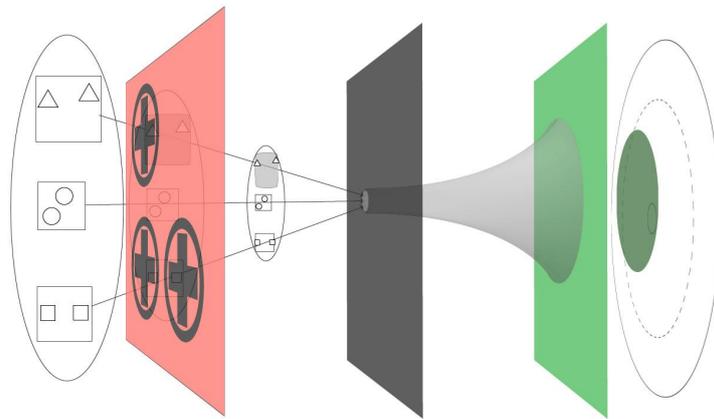


Figure 41. Projection en fonction de la sensibilité et de la distance objective

Le processus de redistribution des ressources (jetons) encourage la validation des plans fortement activés qui rassemblent les informations apparemment les plus pertinentes. Ainsi un biais apparaît : les plans mobilisant le plus de ressources sont ceux qui ont le plus de chances d'être retenus, et inversement pour les autres (figure 41). Ces solutions « faibles » ne sont pas plus mauvaises que les autres, mais elles n'ont tout simplement pas été assez éprouvées pour se renforcer. Les plans « préférés » obtiennent donc le plus de jetons de ressources. Par ailleurs, la mise en œuvre d'un plan par rapport à un autre est également fonction du temps disponible pour l'exécuter, de la pertinence de la représentation du plan pour l'opérateur, et de son niveau d'activation ou de pré-activation.

IV. CONCLUSION

L'objectif de notre travail est d'aider les opérateurs (pilotes) à gérer au mieux leurs ressources cognitives dans des contextes d'usage de systèmes complexes, en conditions dynamiques et sous environnement contraint.

Afin de fournir une telle assistance nous devons disposer de modèles de la gestion des ressources cognitives orientée vers la prise de décision. Cette connaissance modélise de la gestion des ressources cognitives nous permettra alors de spécifier les systèmes d'aide et interface du futur.

Le modèle que nous proposons résulte d'une vision agrégative des modèles issus de la littérature complétés de notre propre analyse et expérience du milieu aéronautique.

De façon originale, nous associons la problématique de la gestion de la performance et de l'atteinte des objectifs à l'évaluation des risques associés. De façon incrémentales, cette préoccupation est déclinée sur les sous-objectifs dont on détermine la criticité en fonction de la contrainte temporelle.

Ainsi, le modèle de gestion dynamique des ressources cognitives que nous proposons est un préalable à l'étude de la redistribution dynamique des priorités qui sera l'objet de la suite de notre travail et des expérimentations menées en simulateur ou en vol.

Chapitre 2.3 - Résultats

Analyse d'un évènement aéronautique exceptionnel critique simultané

Redistribution dynamique des priorités

I. INTRODUCTION ET CONTEXTE D'ETUDE

A cours du chapitre précédent nous nous sommes confrontés à la nécessité de construire un modèle qui embrasse les concepts pertinents de champs théoriques différents, puis de les re-contextualiser dans le cadre de situations dynamiques adapté aux environnements aéronautiques.

Dans ce chapitre nous souhaitons confronter notre modèle à des cas concrets issus de l'aviation de combat et de l'aéronautique civile et l'illustrer par des observations de terrain.

Pour se faire, nous avons conduit de multiples entretiens avec des pilotes de chasse, localisés principalement sur la base aérienne 118 de Mont de Marsan. Ces entretiens qui avait pour objectif premier de valider notre modèle mais aussi de le raffiner dans le cadre d'une stratégie adaptative liée à la délégation : la redistribution dynamique des priorités.

Suite à une mission d'exercice aux Etats-Unis, 2 avions de chasse de type Mirage 2000D, effectuent un convoiage transatlantique retour (ouest vers est) vers la France, avec escale prévue aux îles Açores. Ils sont accompagnés d'un ravitailleur allemand de type Airbus ainsi

qu'un Falcon de la marine nationale qui assure la sécurité en mer. Ce type de mission est bien connu des équipages et ne posent pas de problème particulier.

Les avions participant à ce convoiage sont tous intègres, ils ne présentent pas de panne ni de réserve de vol. En ce qui concerne plus particulièrement les deux chasseurs, ils se présentent selon une configuration identique : masse, armement et pétrole, équipages qualifiés pour la mission, et 2 pilotes ayant une expertise équivalente en termes de qualification et du nombre d'heures de vol.

Un événement tout à fait exceptionnel se produit au cours de ce convoiage. L'apparition d'une même panne simultanée sur les 2 avions, alors qu'ils sont dans les mêmes conditions d'environnement et de mission.

Une divergence profonde entre les deux équipages va apparaître dans le mode de gestion de crise. Cette divergence va s'exprimer tant par leur analyse de la situation, leurs réactions et les actions qu'ils vont mener face à une panne complexe, exceptionnelle et extrêmement critique compte tenu des contraintes liées au vol transatlantique.

Les deux stratégies mises en place s'avèrent efficaces et nous ne porterons pas de jugement quant au bien-fondé de la mise en application de l'une ou de l'autre. Nous allons plus particulièrement nous intéresser aux conditions qui ont prévalu à la mise en place de ces différentes stratégies.

II. SITUATION D'ETUDE

La situation dans laquelle se déroule cet incident est un vol retour depuis les Etats-Unis. Le vol part de Fort Wayne dans l'Indiana à destination des Iles Acores (Portugal).

Il implique donc un survol de l'atlantique nord, sur environ 3650 Kilomètres ou 1970 Miles Nautiques (nm). Le temps de vol set approximativement de 4 heures 45 minutes (Figure 42).

Quelques spécificités sont à noter dans le cadre de ce convoiage :

- La première est que l'avion ravitailleur est allemand. Or, il n'y a pas de directeur des vols « chasse » en cabine de l'airbus de la German Air Force (Lutftwaffe). En effet, dans l'Armée de l'air française, il y a la présence systématique d'un chef de patrouille « chasse » avec l'équipage du ravitailleur. Celui-ci assure les liaisons avec les chasseurs et est en charge de la sécurité du vol, notamment en cas de panne ou de décision

impactant la conduite de mission du dispositif. Les allemands ne pratiquant pas couramment ce type de vol, ils n'en voient pas l'intérêt.

- Deuxièmement, la limitation en vitesse de l'Airbus par rapport aux chasseurs se révèle être un point critique lors de cet incident. Effectivement, les avions de chasse ne disposent pas d'équipement permettant le dégivrage des aéronefs comme les avions de transport. C'est pourquoi ils utilisent des vitesses de déplacement élevées dans le but d'augmenter la température d'impact avec l'air afin d'obtenir un dégivrage. Dans ce cadre précis, l'Airbus ne peut voler à des vitesses compatibles au dégivrage dynamique.
- Enfin, coté personnel naviguant, il est à noter que l'un des équipages est atypique car hybride, c'est à dire composé d'un pilote opérationnel et d'un ingénieur d'essais du CEV.

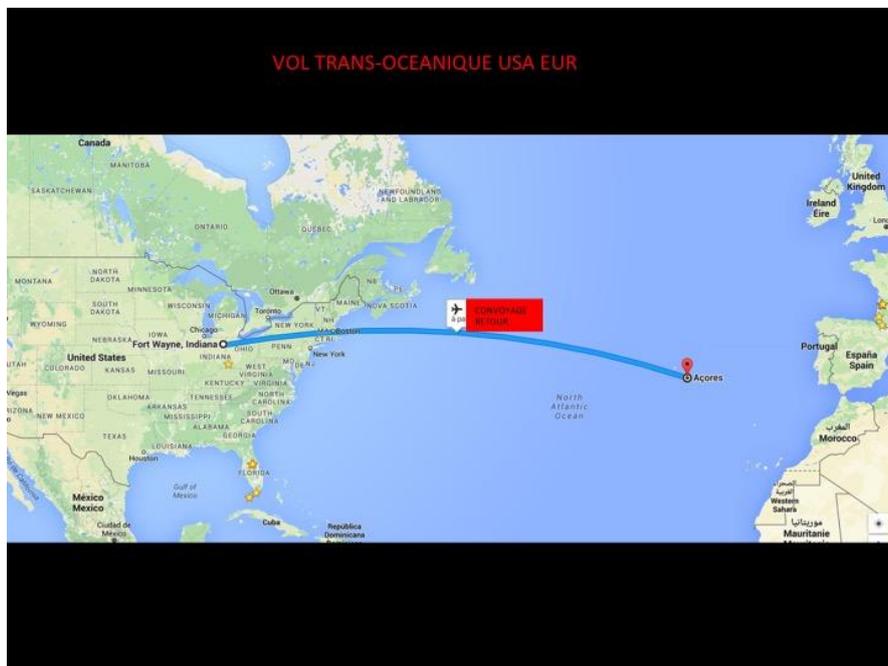


Figure 42. Représentation géographique de l'itinéraire transatlantique du vol depuis Fort Wayne (USA) jusqu'au Iles acores

III. DESCRIPTION DU DISPOSITIF DE CONVOYAGE ET CADRE DE LA MISSION

Le dispositif de convoyage est composé de 2 chasseurs (Mirage 2000-D), un avion ravitailleur Airbus A320 GAF, et un avion assurant la sécurité du vol (Falcon Marine national).

III. A. Les avions

Le **mirage 2000-D** (figure 43). C'est un avion de combat multi-rôles de l'armée de l'air française, spécialisé dans l'attaque de précision au sol. Le Mirage 2000D a une vingtaine d'années de service, il a été engagé sur tous les théâtres d'opération des armées. C'est un avion éprouvé, fiable, qui participe régulièrement à des exercices alliés et qui est coutumier de traversée transocéanique, sans problème particulier malgré sa spécificité monomoteur.

L'**Airbus A310 Multi-Role Tanker Transport (MRTT)** est un modèle d'avion militaire de transport et de ravitaillement à large fuselage construit par Airbus Military et dérivé du modèle civil, l'Airbus A310. C'est un avion ravitailleur multi-rôle, en service dans la Luftwaffe qui fut le premier client. Il est doté de quatre réservoirs de carburant supplémentaires (28 Tonnes chacun), ce qui donne une capacité totale de près de 78 Tonnes, pour 36 Tonnes de ravitaillement.

Le **Falcon 50 Marine Nationale**. C'est un avion dédié à la surveillance maritime et sauvetage en mer longue distance. Huit conteneurs SAR (ensemble de survie contenu dans un radeau gonflable) peuvent être embarqués et largués en vol via une trappe qui s'ouvre dans le plancher L'avion est éprouvé et fiable. Il est en service depuis de nombreuses années au sein de l'Aéronavale.



Figure 43. Les avions concernés par notre étude : Mirage 2000-D (en haut à gauche), Airbus A310 MRTT (en haut à droite), Falcon Marine (en bas)

III. B. Organisation de la patrouille

Le ravitailleur et les deux chasseurs volent ensemble en formation plus ou moins lâche en fonction des différentes contraintes environnementales ou techniques (figure 44). Le Falcon de la marine nationale reste nécessairement en arrière afin d'assurer un sauvetage éventuel en cas d'incident. Cette distance lui permet d'assurer la sécurité directement sans avoir la nécessité de revenir en arrière avant de commencer sa phase de sauvetage en mer.

Le sauvetage longue distance en mer, consiste à larguer une chaîne comportant des éléments de survie notamment un canot multiplaces. Toute la difficulté de cet exercice est la rapidité d'action et sa précision de réalisation. La rapidité d'action afin d'avoir les rescapés encore groupés et sa précision afin de larguer au plus près la chaîne de survie maritime de ces derniers et ce quelque soit l'état de la mer et les conditions météorologiques. Les équipages de l'Aéronavale sont particulièrement entraînés à cette mission et ont toute la confiance des équipages qu'ils assistent lors de grandes traversées maritimes. Ils ont démontré ce savoir-faire à de nombreuses reprises confirmant leur efficacité opérationnelle.

Formation du dispositif de convoyage

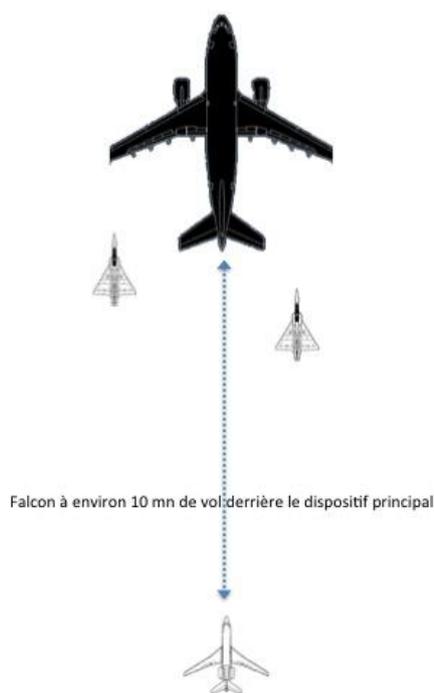


Figure 44. Représentation du dispositif de convoyage, organisation de la patrouille et positionnement relatif des aéronefs

III. C. Cadre de la mission

- La préparation de cette mission a été effectuée de façon complète par les intéressés, elle est nominale
- Et ne pose pas de problème technique ou opérationnel particulier. La mission est parfaitement connue de l'ensemble des équipages. L'actualisation météorologique et le plan de vol sont validés le matin avant le départ.
- La météorologie est favorable à la mission, avec cependant quelques risques d'orages continentaux.
- La configuration, ainsi que le pétrole embarqué, sont conformes à la planification. Deux phases de ravitaillements sont prévues. En cas d'échec à la réalisation des ravitaillements en vol, un terrain de sécurité joignable en toute sécurité.
- Il n'y a pas d'enjeu particulier à la réalisation de cette mission, même si pour l'un des membres d'équipages, l'INE (Ingénieur Navigant d'Essais) de l'avion 2, c'est une première. Le reste des équipages sont routiniers de ce type de mission. Elle ne présente donc pas de difficultés particulières, même si une traversée transocéanique en mono-réacteur demeure un exercice délicat.

III. D. Contexte humain, les équipages

- Un équipage opérationnel (FAF)
- Un équipage atypique avec INE
- Les 2 pilotes sont de qualification identique (CP), et partagent la même expérience (heures de vol & type d'aéronef)

IV. METHODES DE RECUEIL DES OBSERVATIONS

Les entretiens sont menés au Centre d'Expériences Aériennes Militaires avec de nombreux pilotes. Parmi ceux-ci, nous avons été amené à recueillir le récit d'un incident en vol qui illustre parfaitement le principe de notre modèle de redistribution dynamique des priorités. (cf. chapitre 2.2). C'est pourquoi nous avons choisi de le retenir pour ce travail de thèse.

Les entretiens sont effectués par le Dr Sylvain Hourlier et moi-même. Ils sont menés sur le mode de la balade cognitive ou « Cognitive Walkthrough » (CW). Cette méthode permet de replonger les personnes dans leur vécu des événements.

La CW se concentre notamment sur les activités cognitives de l'opérateur. Plus particulièrement sur le but et les connaissances de l'opérateur exécutant une tâche spécifique. Elle a été proposée par Lewis 1986, mais les modifications ont été faites ensuite et des extensions ont été aussi proposées par d'autres auteurs (Lewis et al. 1997; Vermersch 1994; Balas-Chanel 2002, Wallace et al, 2014).

Dans notre cas, les entretiens doivent être conduits par des experts afin d'accompagner les pilotes dans leurs représentations mentales, les différents états de leur mission (avion et environnement), ainsi que leur évolution au cours du temps.

Les entretiens de l'ensemble des participants ont été menés la même journée, ils ont été enregistrés. Les durées varient entre 1h30 de 2h.

Ces entretiens ont été recontextualisés dans la globalité de l'action à l'issue des interviews afin d'avoir une vue d'ensemble agrégée du fil des événements.

Au cours de ces entretiens menés par le Dr Sylvain Hourlier et moi-même, nous avons rapporté le cas extrêmement rare et grave d'un incident simultané sur deux avions lors d'un voyage quelques semaines auparavant. Il est à noter que le fait de revivre de façon très

réaliste cet incident à eu des effets quasi-thérapeutiques pour certains de ces participants, ce qui tenterait à démontrer la profondeur et le réalisme de ces récits au moins au niveau émotionnel.

V. RESULTATS D'OBSERVATIONS, VERBATIM EXPLICITES ET COMPARES POUR LES DEUX EQUIPAGES EN TEMPS REEL

V. A. Phase 1 : Dégradation météorologique soudaine et non prévue

Après environ 1 heure de survol maritime au départ des USA, le dispositif rencontre des conditions météorologiques qui se dégradent très brutalement, en quelques minutes. Cette dégradation soudaine n'était pas prévue sur cette partie du vol. Les équipages sont surpris, mais pas particulièrement inquiets. Le ravitailleur décide de monter en altitude pour essayer de passer au-dessus du mauvais temps (montée au F1290).

Cependant ce changement inattendu des conditions environnementales va nécessairement affecter la formation et la charge de travail des équipages, notamment du fait du passage en patrouille serrée.

Il est à noter à la vue des verbatim (**Figure 45**) que l'équipage 1 est plus dans la difficulté, cela va nécessairement orienter sa conduite de la mission. L'équipage 2 se projette vers la complexification potentielle de la situation c'est-à-dire la probabilité de l'apparition de givrage, qui est effectivement une possibilité d'évolution dans ces conditions marginales.

L'équipage 1 anticipe la perte de visuel alors que l'équipage 2 se focalise sur l'éventualité du givrage, qui on le rappelle ne peut se régler que par une accélération forte des chasseurs au détriment de la tenue de formation du dispositif.

Il est à noter que les 2 représentations sont cohérentes mais à des échelles temporelles probablement différentes, la perte visuelle est la plus probable dans l'immédiat même si le givrage peut survenir rapidement.

Les deux hypothèses amèneront une dislocation du dispositif, les chasseurs ne pouvant pas maintenir la formation.

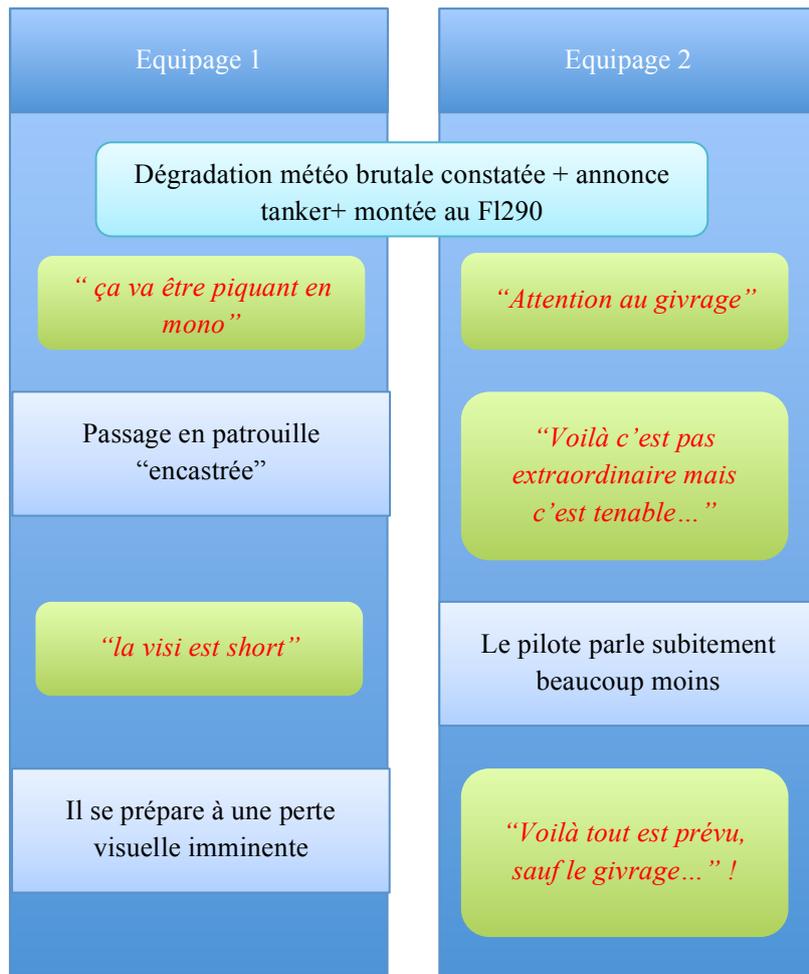


Figure 45. Synthèse des verbatim de la phase dégradation météorologique soudaine et non prévue

V. B. Phase 2 : Apparition simultanée de la panne sur les deux mirages (figure 46)

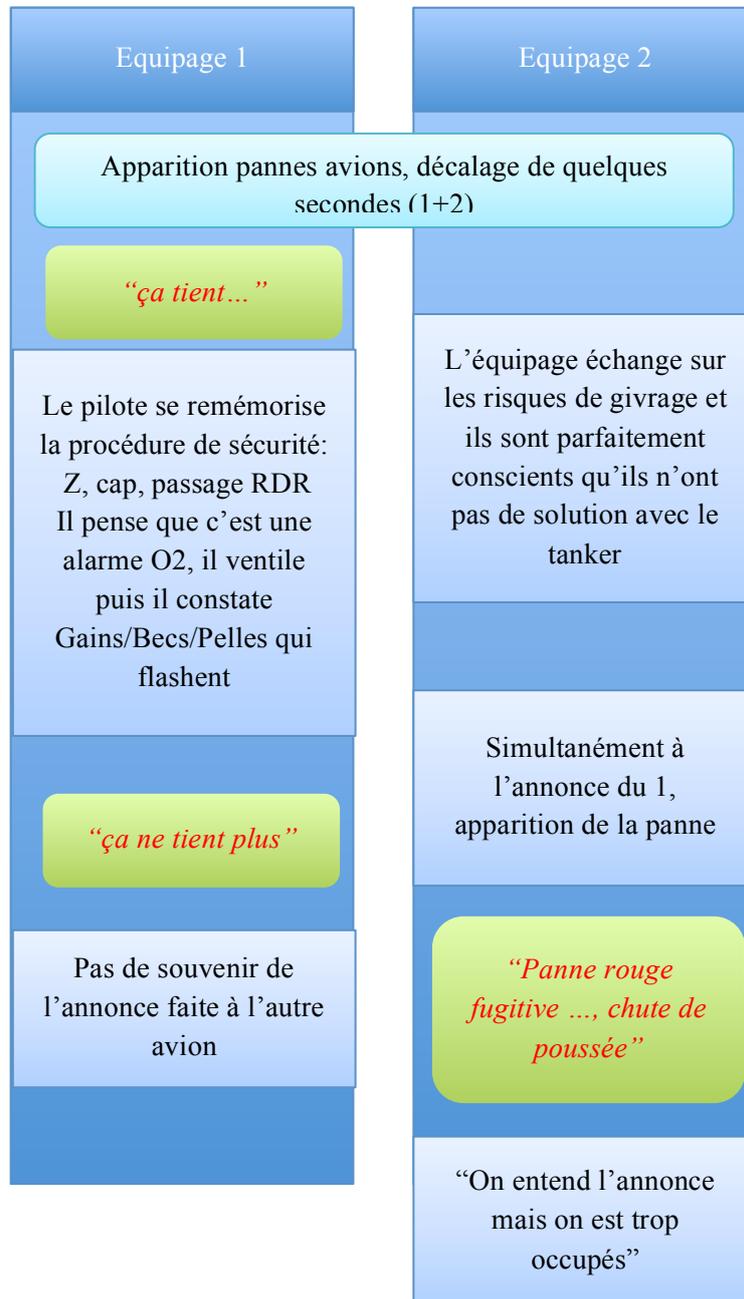


Figure 46. Synthèse des verbatim de la phase d'apparition simultanée de la panne sur les deux Mirages

V. C. Phase 3 : Dislocation du dispositif

Cette phase va avoir pour résultat essentiel une rupture des communications interne au sein des deux chasseurs (Figure 47).

L'équipage avion 1, se concentre sur son l'attitude de son avion afin de mieux appréhender la situation exacte dans laquelle il se trouve. Ce choix va leur permettre d'analyser au mieux les comportements de l'avion et ainsi éviter d'aggraver potentiellement la situation par une action inappropriée. La transposition de la situation antérieure de quelques secondes va alors leur éviter de se retrouver dans une situation encore plus périlleuse.

Durant cette phase, le pilote de l'avion 1 ne tente pas de traiter la panne. Il préfère se contenter de garder les repères visuels qui lui reste pour assurer la sécurité immédiate de l'aéronef durant la séparation, c'est à dire la mise en sécurité de son avion par rapport au dispositif. En effet, il y a un fort risque de collision avec l'autre chasseur ou le ravitailleur.. Les communications internes (dans l'avion) cessent à ce moment précis.

Pendant ce temps dans l'avion 2, une panne « gain » est constatée ainsi qu'une incohérence dans les informations délivrées par les instruments le pilotage. Le pilote 2 se sépare du dispositif par une mise en descente, durant laquelle un enchaînement de séquences de pannes apparait de façon répétitive. Le constat effectué au sein de l'équipage est que l'avion 2 subi la même panne que son leader. C'est à ce moment que les communications internes sont rompues au sein de l'aéronef.

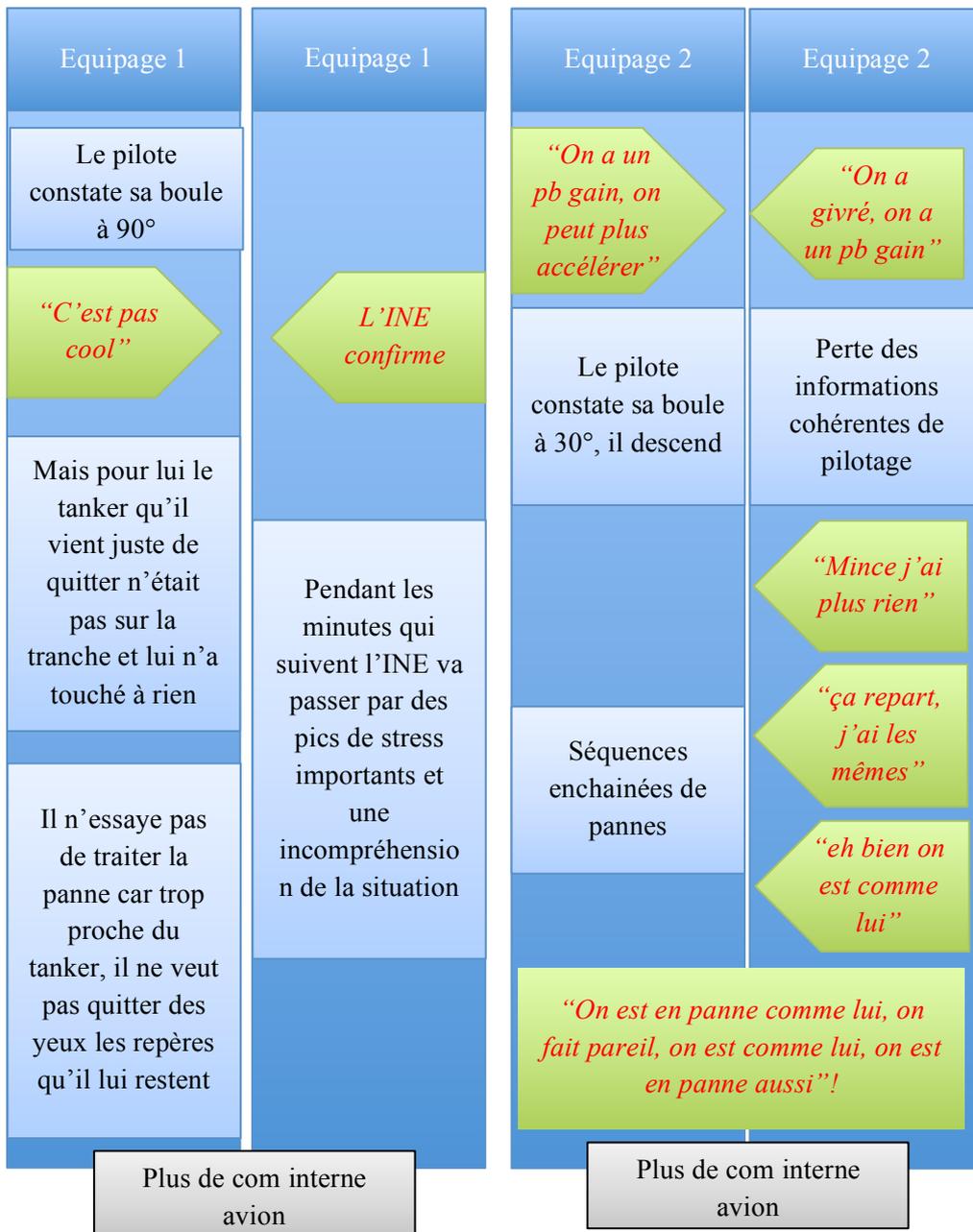


Figure 47. Synthèse des verbatim de la phase de dislocation du dispositif

V. D. Phase 4 : Divergence de stratégie entre les deux chasseurs

Dans cette phase nous voyons la mise en place de deux stratégies différentes par chacun des pilotes (Figure 48). Alors que le pilote de l’avion 2 décide d’appliquer la seule procédure qui lui semble pertinente, typiquement la résolution d’une panne « gain », le pilote de l’avion 1 adopte une attitude d’évaluation de la dynamique de la situation. De plus, face à cet

enchaînement de problèmes en cascade, il pense subitement à l'accident d'Air France 447 ainsi qu'au crash d'un autre chasseur de son escadron survenu dans des conditions similaires. Il est convaincu qu'une intervention malheureuse, c'est à dire inadéquate, ne peut que dégrader une situation déjà précaire et amener un crash de son avion (à l'instar des deux autres accidents cités supra). Cette pensée va le poursuivre pendant les minutes qui vont suivre et orienter ses décisions.

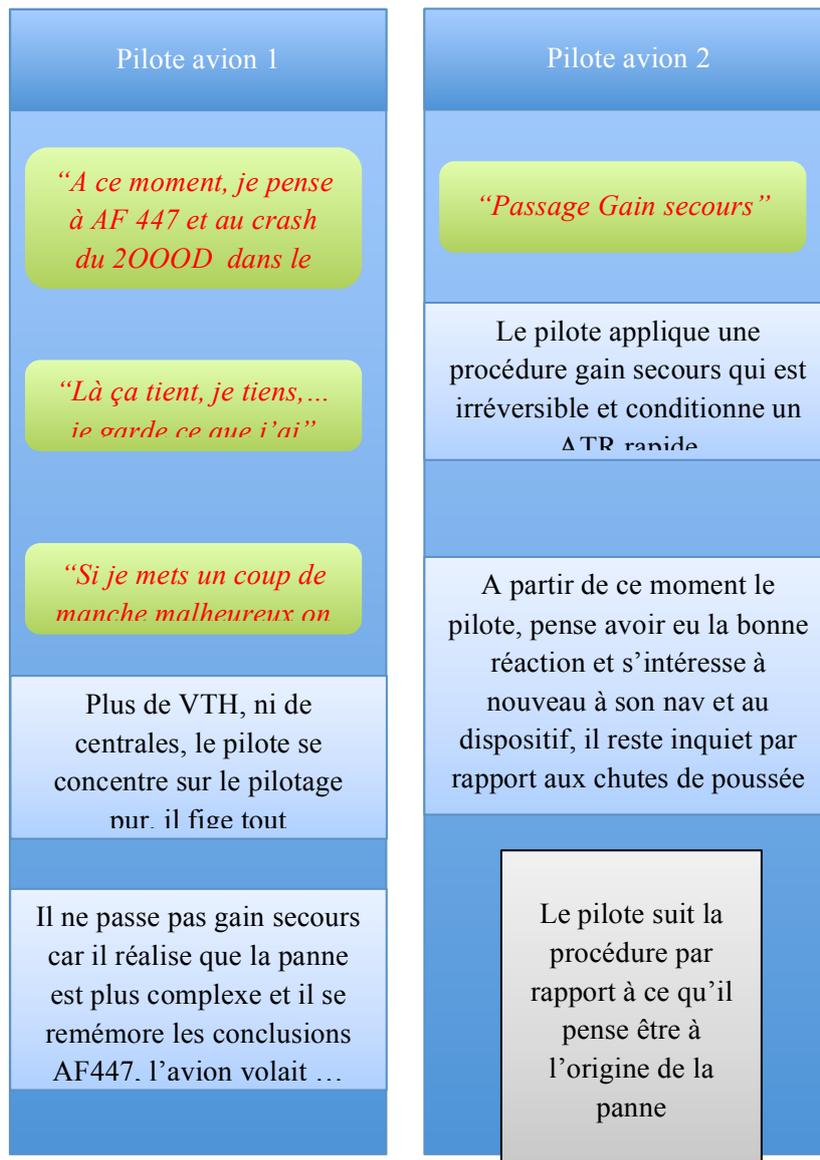


Figure 48. Synthèse des verbatim de la phase de divergence de stratégies

V. E. Phase 5 : Observation de l'évolution de la situation

A ce stade, les deux avions entrent dans une phase d'observation des suites de leurs stratégies réciproques (Figure 49).

Le pilote de l'avion numéro 2, après avoir appliqué la procédure, recontacte le ravitailleur.

Le pilote de l'avion 1 continue sa phase d'observation de la situation. Afin d'être en mesure d'éviter toute intervention malencontreuse, il décide de reposer ses mains sur les poignées de son cockpit. Cette action lui permet de prendre une distance avec l'action immédiate. Sa décision est de conserver un maximum d'énergie de façon à maintenir son niveau de vol même si sa poussée n'est pas optimale. Durant tout le maintien de ce statu quo, maximum de 6 à 7 minutes, la constante de temps lui semble distordue avec un rallongement des durées perçues.



Figure 49. Synthèse des verbatim de la phase d’observation de l’évolution des stratégies

V. F. Phase 6 : Evaluation des possibles

Bien que restant concentré sur son avion, le pilote 1 envisage l’éjection car il est passé dans les nuages et c’est ce que prévoit la procédure (**Erreur ! Source du renvoi introuvable..**). À aucun moment il n’envisage les conséquences de cette éjection à savoir comment survivre au milieu de l’Atlantique Nord en hiver avec une température de l’océan inférieure à 8°. A priori cette temporalité est trop éloignée de sa représentation temporelle immédiate. Le pilote est convaincu que si la situation se maintient ainsi, il devrait pouvoir surmonter l’incident. Pour se

faire, il réduit son empan temporel à des cycles successifs d'une dizaine de secondes. Dans cette séquence sa vision de l'avenir se limite à une poignée de secondes. Il se refuse à imaginer le champ des possibles au-delà de ces projections. Ce mécanisme mental a pour effet notable de réduire sa charge de travail instantanée, ainsi que son niveau de stress. Le cas envisagé de l'éjection illustre parfaitement sa représentation temporelle et la diminution de stress associé. Nous n'observons pas d'évolution dans l'avion 2.

V. G. Phase 7 : Evolution de l'empan temporel du pilote 1

Au bout de quelques minutes, le pilote 1 augmente progressivement les cycles de projections précédents. Considérant la pérennité de la situation, il ajuste alors son empan temporel de projection jusqu'à un terme normal de planification. Le souci de son environnement immédiat n'intervient qu'après la validation de la maîtrise de son avion. C'est avec l'augmentation de sa projection de planification temporelle qu'il va prendre en compte la sécurité liée au dispositif dans son ensemble. À partir de ce moment-là, le pilote va pouvoir élargir sa prise en compte des informations en les entrant dans la construction de sa conscience de situation (figure 51).

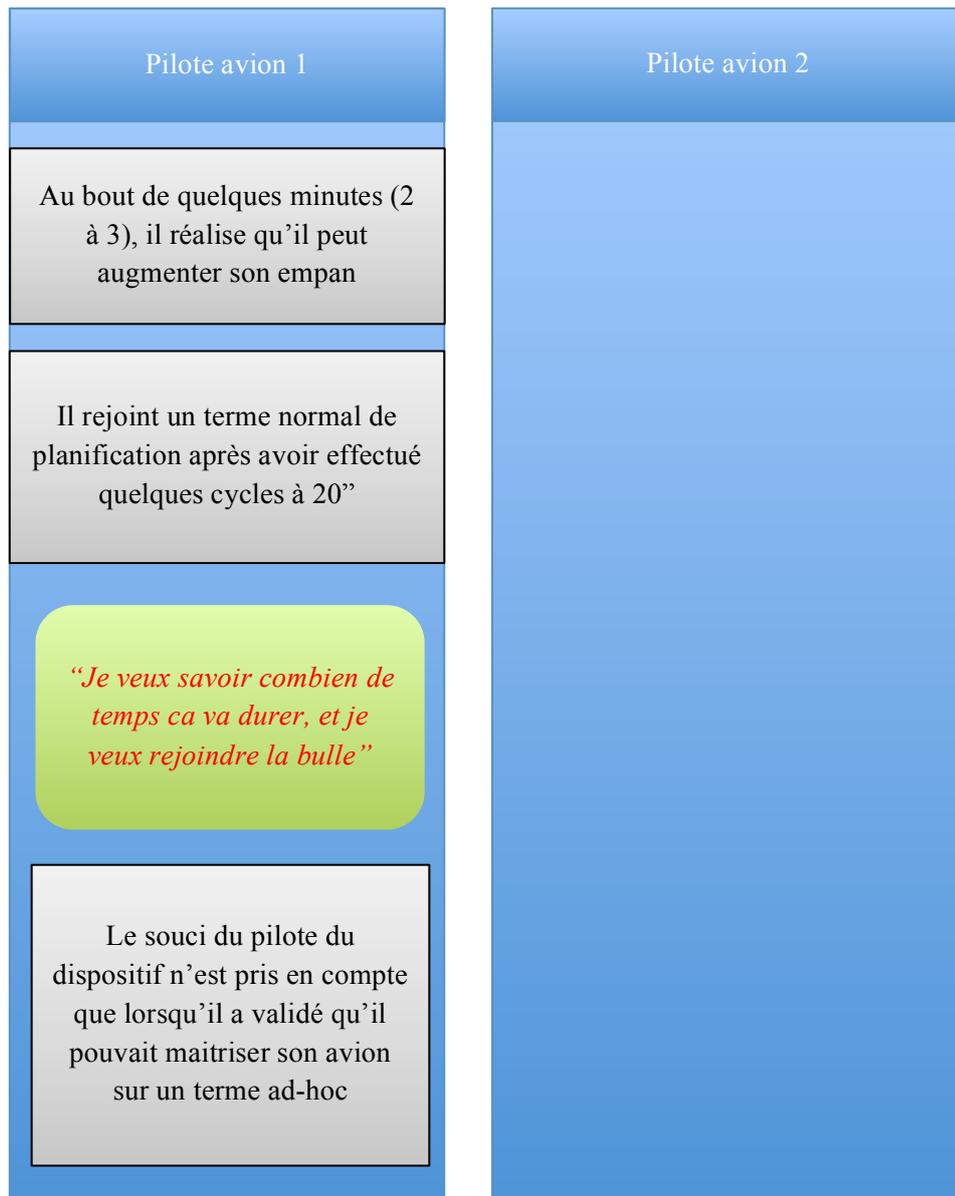


Figure 50. Synthèse des verbatim de la phase d'évolution de l'empan temporel du pilote 1

V. H. Phase 8 : Retour à la normale

Le retour à un état stable, identifié comme normal, correspond à un retour des communications internes de l'équipage 1, puis au sein de la patrouille et enfin du dispositif dans son ensemble. Il est à noter que le fait de se créditer des ressources cognitives à ce moment-là coïncide avec le rétablissement de communications normales. (Figure 51

Cette phase se termine par la sortie des nuages des avions qui se retrouvent en ciel clair. Ils ont alors un visuel sur l'ensemble du dispositif. La panne se conclue par un déroutement une heure plus tard. L'avion 1 se posera avec à priori une panne résorbée, alors que l'avion 2 se

déroutera avec les gains figés en secours ce qui impliquera un atterrissage de précautions à l'arrivée.

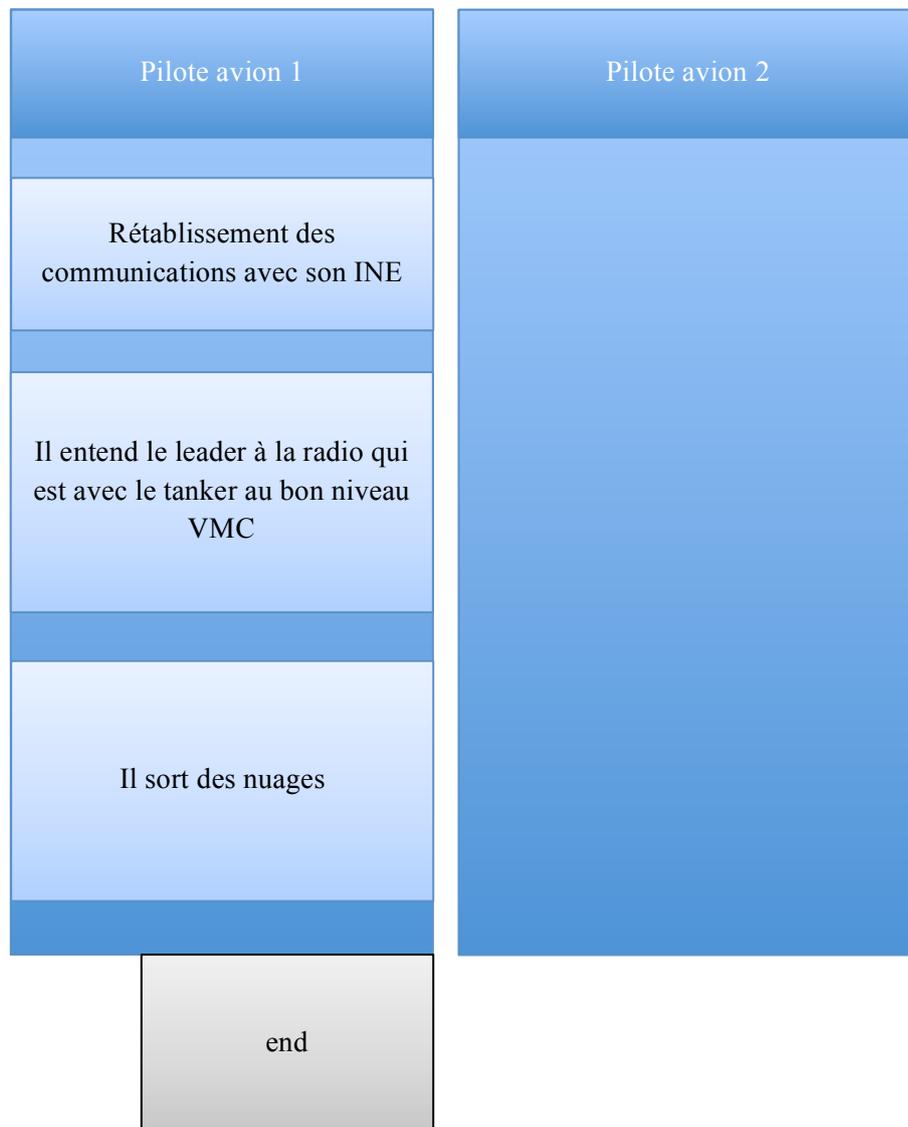


Figure 51. Synthèse des verbatim de la phase de retour à la normale

VI. ANALYSE SYNTHETIQUE DES COMPORTEMENTS OBSERVES.

VI. A. Equipage n° 2

Au cours du déroulement de l'incident, l'équipage 2 se retrouve dans une situation simple en termes de gestion même si la panne reste complexe.

Le constat que l'on peut faire au niveau métacognitif correspond à une prise de décision sous forte contrainte temporelle, le problème est connu et compris, et la solution est clairement identifiée. La prise d'information et la dynamique dans laquelle ils s'inscrivent ont dirigé la représentation collective de l'équipage et ont conduit à cette prise de décision.

Ce qui a pour conséquence, l'application stricte et sans retard de la procédure retenue.

Il est probable que les échanges liés au fort risque de givrage aient dirigé la représentation collective de l'équipage et conduit à cette prise de décision.

Dans cette représentation, les ressources cognitives sont suffisantes pour gérer la situation et le repli sur une procédure connue permet une gestion convenable du stress associé à l'apparition de la panne.

Cependant, suite à l'application de la procédure, nous pouvons penser que la latence sur l'efficacité de la solution tend à augmenter fortement la charge cognitive dans l'attente des résultats espérés. Mais la recherche d'indices informels sur les conditions de vol vont permettre de rapidement recréer des ressources et retrouver un niveau de communication interne normal.

De fait, il semble que le problème n'a jamais été vraiment identifié dans sa globalité et sa complexité. L'application d'une procédure a permis une gestion favorable des ressources cognitives, mais le facteur chance reste déterminant dans la résolution du problème (figure 52).

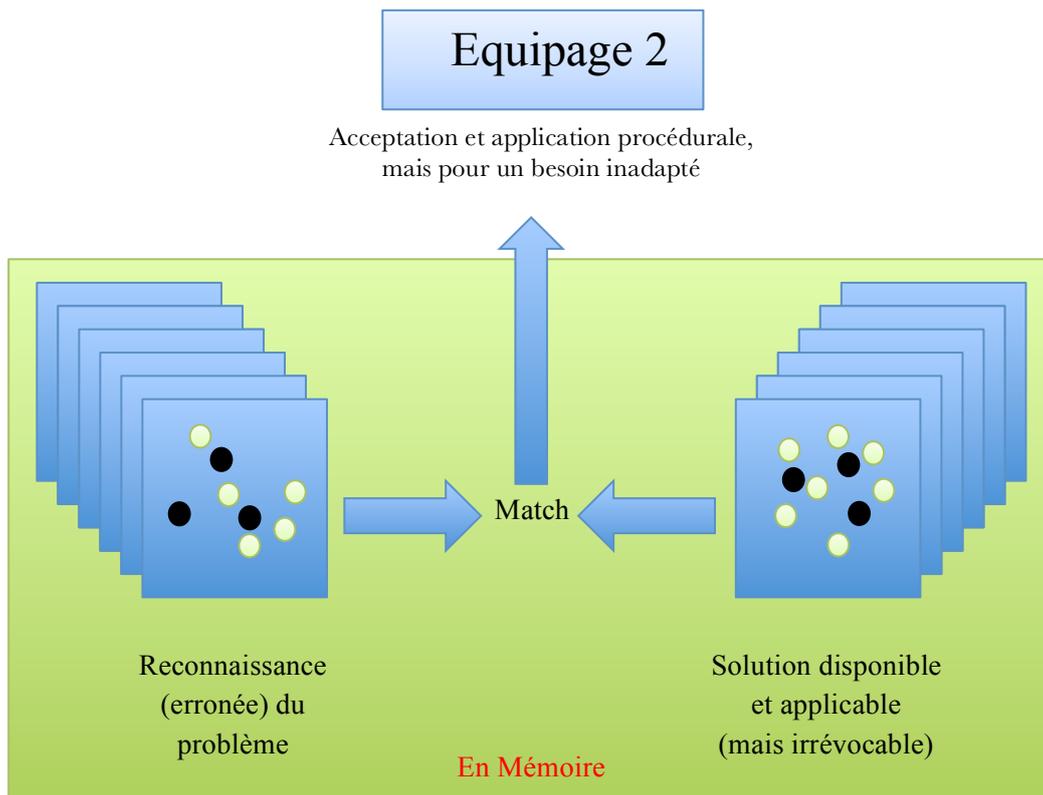


Figure 52. Représentation synthétique du comportement de l'équipage 2 au cours de l'incident

VI. B. Equipage n°1

Dans le cas de l'équipage 1, la gestion de la panne s'avère radicalement différente (Figure 53). Dès le début, le constat métacognitif que nous pouvons faire repose sur l'absence de l'identification du problème. A partir de cette constatation, le seul but poursuivi est de minimiser l'évolution du risque tout en essayant de conserver une performance acceptable. Rapidement, il apparaît la nécessité de disposer de suffisamment de ressources afin d'être capable de trouver des solutions dans la gestion de l'incident. Ainsi, la stratégie mise en place a pour seul but de recrediter des ressources. La solution utilisée consiste à réduire l'empan temporel à une temporalité plus courte (quelques secondes), adaptée à la criticité, afin de pouvoir contrôler le risque immédiat le plus critique et ce au détriment de ceux de plus long terme.

Au fur et à mesure du déroulé de l'incident cette solution démontre son efficacité. La situation ne s'aggrave plus. Le pilote va augmenter son empan temporel de gestion jusqu'à revenir à une représentation globale de l'action.

Cette stratégie va lui permettre tout au long de la résolution du problème de conserver des ressources suffisantes pour faire face à l'imprévu immédiat et pouvoir « rester devant l'avion »,

et ce quitte à limiter cette avance à une poignée de secondes. L'absence temporaire de communication apparaît dans son cas comme un délestage de charge cognitive, elles ne reviendront à la normale que lorsque la situation sera à nouveau stabilisée.

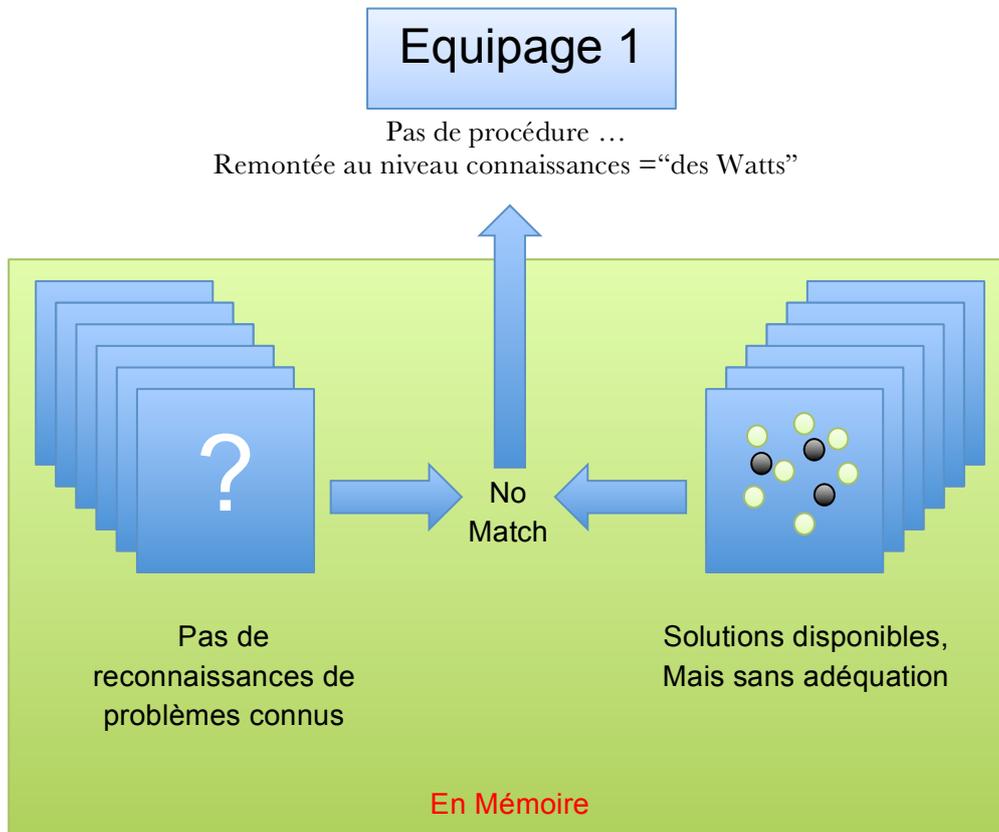


Figure 53. Représentation synthétique du comportement de l'équipage 1 au cours de l'incident

VI. C. Renégociation dynamique du terme du plan d'action

L'élément clé de la stratégie du pilote 1 est la renégociation dynamique du plan d'action permettant de recrediter les ressources cognitives manquantes tout en faisant face à la situation instantanée (Figure 54). La gestion du risque immédiat est adaptée aux échéances de la situation en évolution constante, mais elle est fragmentée en créneaux compatibles avec les ressources à disposition instantanément. Cette adaptation semble très efficace même si elle induit un passage extrêmement dégradé dans la gestion des éventualités à moyen et long terme et qu'elle privilégie la sécurité immédiate au détriment de la performance globale.

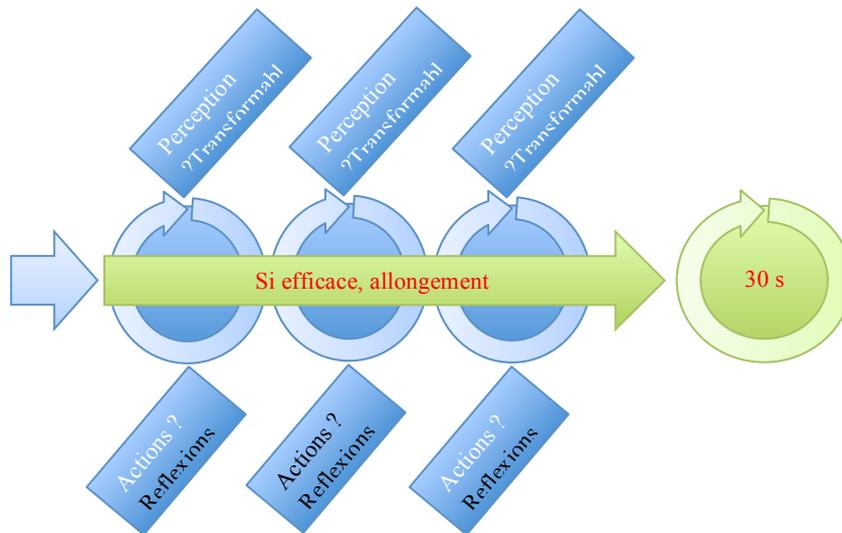


Figure 54. Représentation de la renégociation dynamique du terme du plan d'action

VI. D. Contrôle permanent du stress par adaptation du plan d'action

Les modalités de gestion du stress sont également un point intéressant à adresser au regard de la stratégie initiale. Pour l'équipage 1, il reste sous contrôle car la projection temporelle est très limitée. A cet égard, le fait que l'éjection soit envisagée comme « possible », sans en intégrer les conséquences, est extrêmement révélateur. En effet, l'éjection si loin des côtes au milieu d'icebergs dérivants, ne garantit pas la survie et ce malgré la présence du Falcon de sécurité. Cependant, les conséquences de cette éventualité ne sont envisagées à aucun moment car elles relèvent d'une temporalité trop élevée. Ainsi, en réduisant l'empan, on augmente les ressources rapportées au besoin tout en diminuant le stress par absence de projection trop lointaine (figure 55).

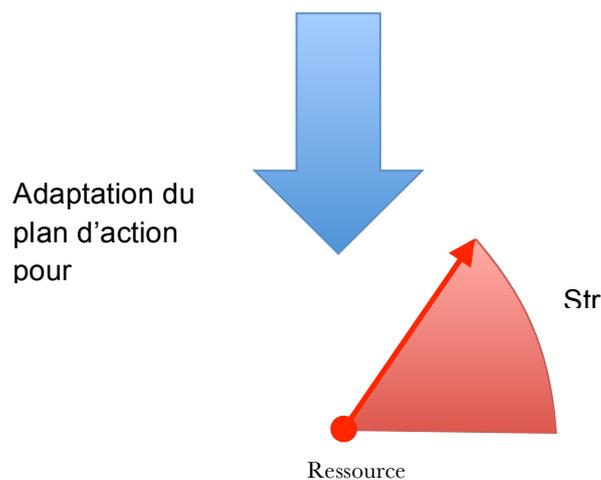


Figure 55. Représentation du contrôle permanent du stress par adaptation du Plan d'action

VII. CONCLUSION

Les entretiens que nous avons menés, auprès de deux équipages de chasseurs en convoi transatlantique, nous permettent de corroborer le modèle de gestion des ressources cognitives en environnement contraint proposé au chapitre 1.1 Partie IV.

Ce retour d'expérience exceptionnel illustre les liens vraisemblables entre la renégociation itérative du terme du plan d'action et la redistribution dynamique des priorités. Il est probable que cette délégation au temps soit finalement le mécanisme mis en place qui précède la redistribution dynamique des priorités, cette dernière n'étant peut-être que la conséquence visible d'un mode de délégation de la gestion des ressources cognitives.

Chapitre 2.4 - Résultats

Evaluation comparée des mesures physiologiques de la charge cognitive. Cas d'application : environnement opérationnel de jeu vidéo

I. INTRODUCTION

Dans le cadre de nos travaux de thèse, nous allons être amenés à évaluer la capacité des opérateurs à effectuer des prises de décision en temps contraint et environnement complexe. Dans le cadre de cette démarche, le concept de charge cognitive est particulièrement intéressant pour qualifier l'état de l'opérateur. D'après Cegarra et Chevalier (2008), l'idée de charge cognitive présuppose que les processus cognitifs ont un coût puisé dans un réservoir limité de ressources. En conséquence, la charge cognitive est définie comme le rapport entre la demande de la tâche et la capacité de l'Humain à y répondre.

Les situations de surcharge peuvent avoir des conséquences tragiques tant sur la performance de l'opérateur que sur le système auquel il appartient (Wickens 1992). Disposer d'outils appropriés et fiables en conditions opérationnelles pour évaluer son état cognitif constitue donc un enjeu crucial.

Les moyens d'études psychophysologiques tels que l'électro-encéphalographie (EEG), électrocardiographie (ECG) ou l'oculométrie sont de plus en plus employés à cette fin dans des

conditions expérimentales en laboratoire. Une difficulté pour l'expert facteurs humains est alors de sortir ces moyens de laboratoire pour les amener sur le terrain opérationnel, au plus proche de la réalité de l'activité.

L'EEG offre des perspectives intéressantes puisqu'elle dispose d'une résolution temporelle fine (inférieure à la seconde) et d'autre part ses signaux, liés à la charge cognitive, sont de mieux en mieux caractérisés. Cet outil est donc un bon candidat pour l'évaluation de la charge cognitive en temps réel.

Le système EEG B-Alert (Advance Brain Monitoring, Inc.) a retenu notre attention par son adéquation à l'évaluation de la charge cognitive en condition opérationnelle. C'est un système sans fil qui peut donc être embarqué et qui permet à l'opérateur de se mouvoir dans son environnement. Il dispose d'une autonomie de 8h et une procédure de décontamination des artefacts en temps réel est intégrée au système. De plus, il est livré avec un algorithme de classification déjà implémenté et calibré, ce qui permet un gain de temps non négligeable pour l'analyse des données et ouvre son utilisation à des utilisateurs non spécialistes de l'EEG.

Notre objectif dans le cadre de cette étude est d'évaluer la pertinence de l'utilisation de l'EEG B-Alert pour mesurer la charge de travail en condition opérationnelle. Pour cela nous le comparerons à deux autres techniques utilisant des métriques physiologiques (ECG et Pupillométrie), ainsi qu'à une technique de mesure subjective reconnue par la littérature, le NASA-TLX.

Nous avons donc choisi d'évaluer cet outil B-Alert selon une approche « boîte noire » : nous ne cherchons pas à évaluer le fonctionnement interne de l'algorithme de classification mais à apporter des éléments de réponse quant à la fiabilité des résultats obtenus par rapport à d'autres mesures couramment utilisées dans l'évaluation de la charge cognitive.

Berka et al. (2007) font état de deux métriques qui nous intéressent dans cette étude : la métrique de charge de travail et la métrique d'engagement fort. La métrique de charge de travail de leur « classifieur » évalue plus les « processus cognitifs généralement considérés comme relevant du domaine des fonctions exécutives ». La métrique d'engagement « évalue la demande des processus sensoriels et des ressources attentionnelles ». Cette seconde métrique est basée sur un modèle individuel alors que la métrique de charge de travail est basée sur un groupe d'individus testés par Berka et al. (2007) dans le cadre de leur étude. Les deux métriques sont étudiées.

Nous avons choisis de mettre en œuvre une expérimentation dans le domaine du jeu vidéo. En effet, cet environnement permet de se rapprocher de conditions opérationnelles. Les sujets sont confortablement assis dans une chaise de bureau face à une télévision à écran plat, une manette de PlayStation 3 dans les mains. Nous avons utilisé le jeu Rayman Origins (Figure 56) sur PlayStation 3 pour ses caractéristiques de “jeu de plateforme” :

- Il s’agit d’un jeu en deux dimensions, ce qui limite le degré de liberté (par rapport à un environnement tridimensionnel) et contraint les scénarios ;
- Ce jeu propose un objectif de performance à atteindre (des éléments à collecter le long d’un niveau) ce qui nous a permis de définir deux conditions de charge de travail (collecte d’éléments suivant l’objectif poursuivi, nombre d’échecs à finir le niveau) ;
- Certains niveaux proposent un déroulement automatique du niveau, ce qui impose le rythme d’évolution et contribue à assurer la reproductibilité des scénarios malgré le caractère écologique de l’étude.

Souhaitant nous rapprocher des contraintes rencontrées opérationnellement, nous avons fait le choix d’un recrutement très contraint : peu de sujets, sélectionnés sans autre critère que leur disponibilité pendant une très courte période.



Figure 56. Capture d’écran d’un des deux niveaux choisis pour l’expérience

Suivant les recommandations de (Cegarra & Chevalier, 2008), nous avons croisé les sources de données pour évaluer la charge de travail et éprouver la fiabilité des métriques du B-Alert:

- mesure subjective : il est demandé aux utilisateurs de répondre au NASA Task Load index (NASA-TLX, Hart & Staveland, 1988). Cette mesure constitue une mesure de contrôle servant de base de comparaison pour les autres mesures;
- mesures comportementales : la littérature établit une dégradation de la performance en situation de surcharge de travail ; ainsi, les indices de performance (collecte d'éléments suivant l'objectif poursuivi, nombre d'échecs à finir le niveau) constituent une mesure dérivée de la charge de travail ;
- mesures physiologiques :
 - la pupillométrie est un indicateur indirect de la charge de travail. Validé lors d'une étude précédente (Lini et al., 2013). Il constitue une mesure contrôle vis à vis de l'EEG et ECG. La variation du diamètre pupillaire moyen est positivement corrélée avec la variation de la charge de travail;
 - L'arythmie cardiaque (Heart Rate Variability, HRV) est un autre indicateur dérivé de la charge de travail. Elle est inversement corrélée avec la charge de travail et est calculée à partir d'une mesure continue du rythme cardiaque ;
 - Les métriques d'engagement et de charge cognitive du B-Alert (EEG).

Les métriques du B-Alert sont évalués selon deux axes : leur sensibilité à la mesure expérimentale de la charge de travail et leurs corrélations avec nos autres mesures contrôles.

Pour cette expérimentation, nos hypothèses sont les suivantes :

- (H1) Les mesures de contrôle (NASA-TLX, ECG, pupillométrie) sont sensibles à la manipulation expérimentale de la charge de travail ;
- (H2) Elles sont cohérentes les unes avec les autres ;
- (H3) Les métriques du B-Alert sont pertinentes pour l'évaluation expérimentale de la charge de travail ;
- (H4) Elles sont cohérentes avec les autres mesures de contrôle.

III. METHODE

III. A. Participants

8 sujets (âge moyen: 22.1 ± 2 ans, 7 hommes et 1 femme) ont pris part à l'expérimentation. Ils ont été informés du but de l'étude et ont signé un formulaire de consentement.

III. B. Mesures

III. B. 1. Mesure subjective

Les participants jouent à deux niveaux du jeu dans deux conditions différentes. Un niveau du jeu pour une condition de difficulté donnée constitue un run (passé quatre fois, cf. procédure). Il était demandé aux sujets d'évaluer leur charge cognitive après chacun des quatre runs de l'expérience à l'aide d'une version française du questionnaire NASA-TLX (Cegarra & Morgado 2009).

III. B. 2. Mesures comportementales

Les participants ont rempli en début d'expérience un court questionnaire à propos de leur consommation de nicotine et de caféine, de leur manque de sommeil (ces éléments pouvant moduler les signaux cérébraux) et leur familiarité avec les jeux vidéos. Nous avons relevé comme mesure de performance le nombre d'items collectés pour chaque run ainsi que le nombre de fois où le participant "meurt" par run.

III. B. 3. Mesures physiologiques

III. B. 3. i. EEG

Nous avons utilisé le système B-Alert X10, un système EEG portable pour mesurer les données de 9 sites (Fz, F3, F4, Cz, C3, C4, POZ, P3, P4 - Figure 57), avec les mastoïdes gauche et droite comme référence. L'électrocardiogramme était enregistré grâce à deux

électrodes reliées au système. Les données étaient échantillonnées à 256 Hz et un filtre à encoche (50 Hz) leur était appliqué.

La procédure de décontamination et l'algorithme de classification sont déjà implémentés dans le système du B-Alert. Nous nous sommes intéressés à deux mesures particulières : les probabilités d'être dans un état de charge cognitive (Berka et al. 2007) et d'engagement élevé (Johnson et al., 2011).

Pour la charge cognitive, le modèle est ajusté par rapport à un groupe de participants testés dans étude de Berka et al. (2007). La mesure d'engagement est quant à elle basée sur un modèle individuel ajusté sur chaque sujet en début d'expérience à l'aide de trois tâches de référence incluses dans la suite logiciel du B-Alert (tâche de vigilance à trois choix, tâche de réponse à un stimulus visuel, tâche de réponse à un stimulus auditif effectuée les yeux fermés).

Quatre états cognitifs sont catégorisés grâce à une analyse discriminante quadratique : somnolence, arrivée du sommeil, engagement faible et engagement fort (réglage en usine des appareils de mesure). Pour cette étude, nous sommes intéressés uniquement par la mesure d'engagement fort.

Comme conseillé par le fabricant, nous avons exclu de l'étude les échantillons erronés avant de moyenniser les données pour ainsi obtenir un indice moyen de charge cognitive et d'engagement pour chaque run.

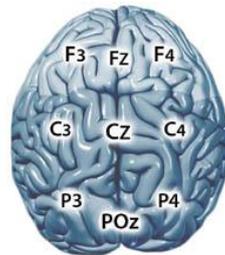


Figure 57. Position des électrodes EEG (Advanced Brain Monitoring, 2013)

III. B. 3. ii. HRV

Nous avons utilisé le canal ECG du système B-Alert pour en dériver une mesure de variabilité du rythme cardiaque (HRV). Nous avons pour cela calculé la densité spectrale de puissance de la transformée de Fourier rapide du tachogramme de chaque run. La HRV retenue est le rapport de la densité spectrale de puissance dans les basses fréquences (0,05 Hz à 0,15 Hz) sur

la densité spectrale de puissance dans les hautes fréquences (0,15 Hz à 0,3 Hz). La HRV varie dans le sens opposé à la charge cognitive.

III. B. 3. iii. *Données pupillométriques*

Les sujets étaient équipés de lunettes Tobii (Tobii Technology), un système d'eye-tracking portatif. Le capteur est monoculaire (œil droit) et échantillonne à 30 Hz avec un angle visuel de 56° x 40°. Le logiciel de traitement de données, Tobii studio, permet de gérer la dilatation pupillaire moyenne, i.e. le pourcentage de dilatation de la pupille comparée à la dilatation de la pupille mesurée pendant la phase de calibration.

III. C. 2.4.2.3. Procédure

Après avoir installé l'EEG, les participants ont passé les trois tâches de référence implémentées dans la suite logiciel B-Alert et servant de base au modèle individuel pour l'engagement. Ces trois tâches duraient 5 minutes chacune. L'eye tracker était ensuite calibré.

Les participants devaient jouer sur deux niveaux du jeu, choisis pour leur durée et difficulté similaires. Ces niveaux défilent automatiquement, forçant ainsi le joueur à avancer et ils sont scénarisés, de sorte que les évènements surviennent toujours aux mêmes moments, indépendamment des actions du joueur. Ceci permet donc d'assurer des scénarios reproductibles d'une condition à l'autre et d'un participant à l'autre.

Chaque niveau était joué deux fois : une fois dans la condition *facile* (collecter au moins 150 éléments sur 350) et une fois dans la condition *difficile* (collecter au moins 300 éléments sur 350). Un niveau donné (niveaux du jeu choisis pour l'expérience, niveau 1 ou niveau 2) pour une condition de difficulté donnée (*facile* ou *difficile*) constitue un run. Nous disposions ainsi de quatre runs différents. Pour limiter les effets d'apprentissage au niveau des analyses de groupe, l'ordre de présentation des runs suivait un carré latin (Tableau 1).

Sujets 1 & 5	Sujets 2 & 6	Sujets 3 & 7	Sujets 4 & 8
<i>facile 1</i>	<i>difficile 1</i>	<i>facile 2</i>	<i>difficile 2</i>
<i>difficile 1</i>	<i>facile 2</i>	<i>difficile 2</i>	<i>facile 1</i>
<i>difficile 2</i>	<i>facile 1</i>	<i>difficile 1</i>	<i>facile 2</i>
<i>facile 2</i>	<i>difficile 2</i>	<i>facile 1</i>	<i>difficile 1</i>

Tableau 1. Ordre de présentation des runs pour chaque sujet.

Dans le jeu utilisé pour l'expérience, le joueur doit recommencer au dernier checkpoint lorsqu'il meurt (en cas de contact avec un ennemi ou en étant rattrapé par le défilement automatique du jeu). Nous avons comptabilisé le nombre de fois où le participant mourrait pour notre mesure de performance. Les sessions étaient enregistrées pour aider à la synchronisation de l'ensemble des mesures.

IV. RESULTATS

IV. A. Sensibilité des mesures

Nous avons testé premièrement la sensibilité de chaque mesure à la variation de charge cognitive. Nous avons séparé les données en deux groupes selon la condition *facile* ou *difficile*, indépendamment du niveau joué, et analysé la variabilité interindividuelle à l'aide de tests de Wilcoxon appariés unilatéraux. Le seuil de significativité est fixé à 5%.

Le score de NASA-TLX ($V=17$, $p=0,025$) et la dilatation pupillaire ($V=5$, $p=0,022$) sont significativement sensibles à notre manipulation expérimentale de la charge cognitive, confirmant ainsi leur validité en tant que mesure de contrôle (Figure 58). La mesure de HRV ($V=78$, $p=0,058$) et le nombre d'items collectés ($V=74,5$, $p=0,088$) suivent une tendance dans la direction de nos 4 hypothèses de départ (H1, H2, H3 et H4). Les autres mesures n'apparaissent pas significatives.

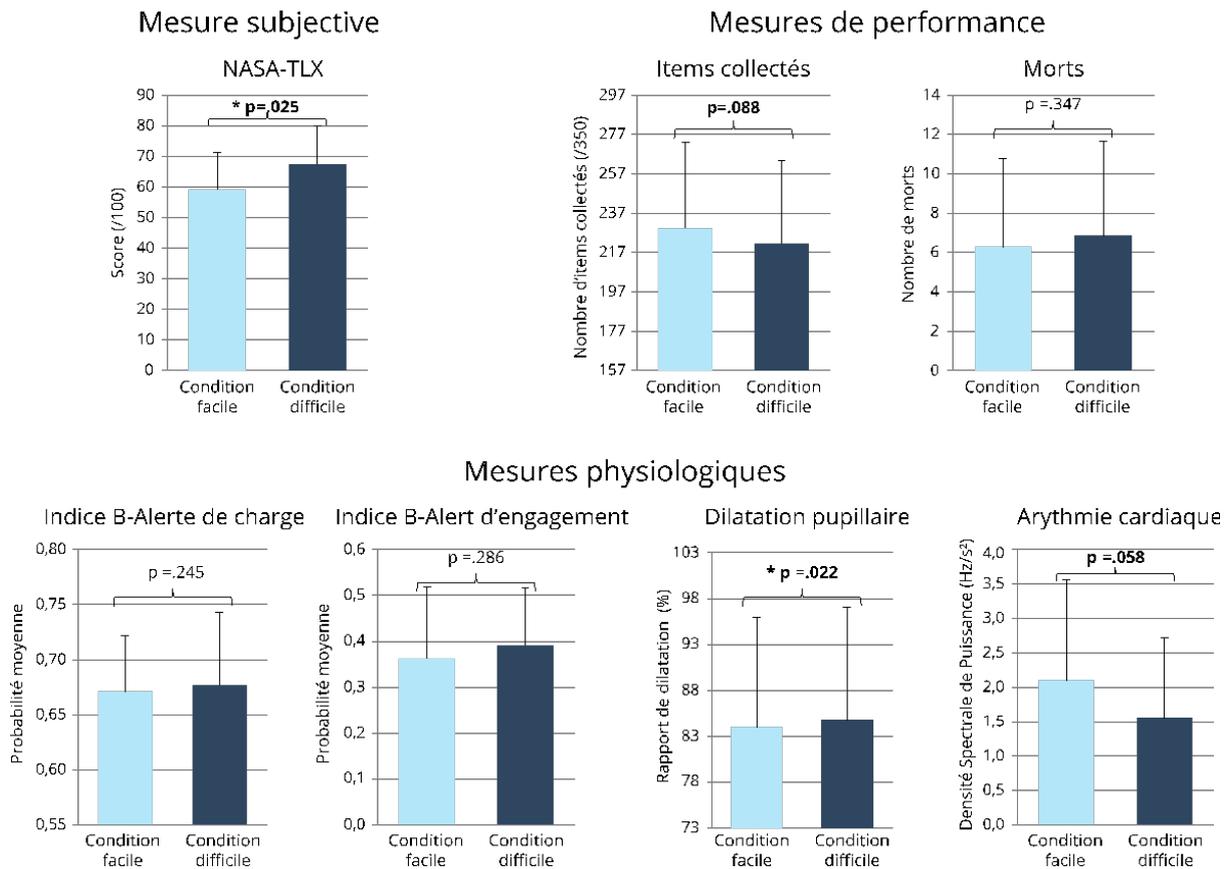


Figure 58. Moyenne de chaque mesure à travers les sujets pour les conditions facile et difficile. Les barres d'erreur représentent un écart-type à la moyenne. Les valeurs de p affichées résultent des tests de Wilcoxon.

IV. B. Cohérence des mesures

Nous avons ensuite analysé les relations entre les résultats liés aux différentes techniques d'évaluation de la charge cognitive par calcul de corrélations de Spearman. Seules les valeurs significatives sont rapportées dans le tableau 2.

Le score de NASA-TLX est corrélé avec les deux mesures de performances. Plus le score de NASA-TLX est élevé, plus le nombre d'items collectés est faible ($r_s = -0,432$, $p = 0,025$), et plus le nombre de morts est élevé ($r_s = 0,461$, $p = 0,016$).

La mesure de dilatation pupillaire est corrélée à la fois avec le score de NASA-TLX ($r_s = 0,486$, $p = 0,042$) et avec les deux mesures de performances (nombre d'items collectés : $r_s = -0,663$, $p = 0,004$; nombre de morts : $r_s = 0,609$, $p = 0,007$), ce qui confirme le rôle de contrôle de cette mesure. La dilatation pupillaire est aussi corrélée avec l'indice EEG de charge cognitive ($r_s = 0,623$, $p = 0,005$), mais pas avec l'indice EEG d'engagement.

L'indice EEG de charge cognitive est aussi corrélé avec le score de NASA-TLX ($r_s = 0,430$, $p = 0,026$) et avec l'indice EEG d'engagement ($r_s = 0,442$, $p = 0,019$), bien que l'indice EEG

d'engagement ne soit corrélé ni avec le NASA-TLX, ni avec la mesure de dilatation pupillaire. La mesure de HRV n'est corrélée avec aucune des autres mesures.

Mesure		NASA-TLX	Items collectés	Nombre de mort	Charge cognitive EEG	Engagement EEG	Dilatation pupillaire	HRV
NASA-TLX	r_s	1	-0,432	0,461	0,430	0,317	0,486	0,263
	p	.	0,025	0,016	0,026	0,107	0,042	0,184
Items collectés	r_s	-0,432	1	-0,536	-0,106	0,041	-0,633	-0,048
	p	0,025	.	0,004	0,590	0,836	0,004	0,807
Nombre de mort	r_s	0,461	-0,536	1	0,246	-0,075	0,609	0,133
	p	0,016	0,004	.	0,205	0,702	0,007	0,497
Charge cognitive EEG	r_s	0,430	-0,106	0,246	1	0,442	0,623	-0,153
	p	0,026	0,590	0,205	.	0,019	0,005	0,435
Engagement EEG	r_s	0,317	0,041	-0,075	0,442	1	0,111	0,325
	p	0,107	0,836	0,702	0,019	.	0,649	0,091
Dilatation pupillaire	r_s	0,486	-0,633	0,609	0,623	0,111	1	-0,114
	p	0,042	0,004	0,007	0,005	0,649	.	0,641
HRV	r_s	0,263	-0,048	0,133	-0,153	0,325	-0,114	1
	p	0,184	0,807	0,497	0,435	0,091	0,641	.

Tableau 2. Matrice de corrélation de Spearman.

V. DISCUSSION

Cette expérience a été conçue pour évaluer la fiabilité du B-Alert dans un contexte opérationnel : petit nombre de sujets, conditions expérimentales difficilement reproductibles. Nous avons fait l'hypothèse que nos mesures de contrôle reflèteraient la manipulation expérimentale de la charge cognitive : on attend une différence significative entre les conditions *facile* et *difficile* (**H1**), ainsi qu'une corrélation entre les mesures de contrôle (**H2**). De plus, si le système B-Alert est effectivement sensible aux variations de charge cognitive, ses indices devraient être affectés par notre manipulation expérimentale de la charge cognitive (**H3**) et être corrélées avec les mesures de contrôle (**H4**).

V. A. Sensibilité des mesures de contrôle

L'indice subjectif du NASA-TLX et la mesure de dilatation pupillaire sont tous les deux significativement influencés par notre manipulation expérimentale de la charge cognitive, comme cela a été rapporté précédemment dans la littérature (Beatty 1982 ; Klinger 2010).

La HRV présente des résultats non significatifs ($p=0,58$), mais dont la tendance constitue un résultat intéressant compte tenu des contraintes opérationnelles de notre expérimentation et du faible nombre de sujets considérés.

De la même façon, en ce qui concerne les mesures de performance, seul le nombre d'items collectés montre une tendance favorable à notre hypothèse H1.

Dans l'ensemble, nous avons donc réussi à effectuer des mesures discriminantes des conditions différentes de charge cognitive à l'aide des différentes techniques mise en œuvre (**H1** validée).

La mesure de dilatation pupillaire est corrélée avec le score de NASA-TLX, montrant que cet indice est sensible aux variations objectives et subjectives de la charge cognitive, comme rapporté précédemment (Palinko, Kun, Shyrov, & Heeman, 2010).

La dilatation pupillaire et le score de NASA-TLX sont tous les deux corrélés avec les mesures de performance. Elles sont corrélées négativement avec le nombre d'items collectés et positivement avec le nombre de morts.

La cohérence entre les mesures de contrôle (NASA-TLX, Pupillométrie et les 2 indices de performance) confirme donc que les participants étaient bien dans une situation de surcharge, détériorant leurs performances (**H2** validée).

V. B. Evaluation des indices EEG

Les indices EEG de charge cognitive et d'engagement ne sont pas suffisamment sensibles à notre manipulation de la charge cognitive, comme montré par les tests de Wilcoxon (tableau 2). Il est possible que ce manque de résultats soit dû à une importante variabilité interindividuelle (consommation de caféine et/ou nicotine avant l'expérience, nombre d'heures de sommeil), d'autant plus que nous n'avons recruté qu'un petit nombre de participants. Rappelons toutefois que cette situation est largement rencontrée lors d'études opérationnelles et nous cherchons ici à tester la robustesse du système B-Alert à ces conditions contraignantes.

Pour l'indice de charge cognitive, le modèle est basé sur un groupe d'individus, indépendamment de notre étude, et n'est pas ajusté à chaque participant. Il est donc possible que cet indice soit plus sensible aux facteurs interindividuels (la consommation de caféine par exemple), menant potentiellement à des effets de seuil et masquant la sensibilité de la métrique du B-Alert. Pour la mesure d'engagement, nous interprétons l'absence de différence entre les conditions *facile* et *difficile* par le fait que les deux conditions requièrent un niveau de traitements perceptuel et attentionnel similaire (Berka et al, 2007, relèvent que leur mesure d'engagement « évalue la demande des processus sensoriels et des ressources attentionnelles »). (**H3** non validée)

Cependant lorsque l'on confronte l'indice B-Alert de charge cognitive aux mesures de contrôle, on observe que l'indice EEG de charge cognitive est corrélé avec la mesure de dilatation pupillaire et le score de NASA-TLX. Cela suggère que malgré son manque de finesse, cet indice est bien sensible au même phénomène sous-jacent (**H4** partiellement validée).

Une étude récente, menée par un groupe de recherche indépendant d'Advanced Brain Monitoring, a étudié la sensibilité des mesures de charge de travail et d'engagement du B-Alert lors d'une tâche de Stroop (Sciarini, Grubb, & Fatolitis, 2014). Leurs résultats concernant la métrique d'engagement correspondent aux nôtres puisqu'ils ne relèvent pas de sensibilité de la mesure d'engagement à leur manipulation expérimentale.

En revanche, ils mettent en évidence une différence significative de l'indice de charge de travail entre les conditions congrue et incongrue. La non-concordance de nos résultats peut s'expliquer premièrement par le fait que les tâches mises en œuvre dans leur étude et dans la nôtre ont des caractéristiques sensiblement différentes. Notre tâche est basée sur la poursuite d'un objectif au cours d'un parcours. Il s'agit donc d'une tâche s'inscrivant dans la durée, (chaque run durant 4 à 5 minutes), où le joueur doit maintenir un certain niveau d'alerte. La tâche utilisée par Sciarini et al (2014) est basée au contraire sur la répétition d'essais ponctuels (chaque essai dure 2 secondes et il y a 20 essais par condition). Il est possible que cela ait pour effet d'augmenter la robustesse des données.

Deuxièmement, dans leur étude, les auteurs notent une différence significative essentiellement entre les conditions extrêmes de la tâche de Stroop. Ils comparent une condition conflictuelle (mot et couleur incongrus) à une condition facilitatrice pour la tâche (mot et couleur congrus). Leur résultat permet de confirmer la sensibilité du B-Alert à des manipulations grossières de la

charge de travail dans des conditions contrôlées en laboratoire, et ce de manière indépendante.

Notre approche prend le contrepied de ce travail puisque nous avons choisi de nous rapprocher au maximum de conditions écologiques. Nos résultats ne sont donc pas forcément contradictoires avec ceux de Sciarini et al (2014), et ne sont peut être que le reflet de contextes expérimentaux très différents. En ce sens, notre procédure se rapproche des conditions que l'on peut rencontrer par exemple dans la conduite de véhicule. Notre étude apporte un résultat pertinent pour l'étude de la charge de travail en condition opérationnelle. À l'heure actuelle, il existe encore des difficultés à sortir les outils du laboratoire pour les amener sur le terrain.

V. C. Conclusion

Nous avons conduit une expérience basée sur une situation de jeu écologique et un faible nombre de sujets pour reproduire des contraintes d'études Facteurs Humains opérationnelles. Nos analyses indiquent que le système B-Alert ne capture pas les variations de charge cognitive comme on peut l'observer avec la mesure subjective et/ou la dilatation pupillaire. Cependant, l'indice de charge cognitive du B-Alert est corrélé avec ces deux mesures, suggérant qu'il varie de manière cohérente avec nos hypothèses, mais n'est pas suffisamment sensible pour être retenu dans le cadre de la suite de notre travail de thèse.

A l'inverse du B-Alert, la pupillométrie montre des résultats encourageants, mais elle est très sensible au "bruit" environnemental, particulièrement les changements de luminosité. Dans la suite de notre travail de thèse, cet inconvénient sera traité par l'application d'un filtre (traitement algorithmique sur les données fournies par l'eye-tracker).

Chapitre 2.5 - Résultats

Validation de la pertinence
des mises en situation et
comparaison des apports des
techniques NASA TLX et Eye
Tracking.

Cas d'application : les vols
effectués dans le cadre d'une
étude sur élaboration des
procédures d'emploi dans le
cas d'une interruption du
décollage sur A400M

I. INTRODUCTION

Dans le cadre de l'armée de l'air, la Multinational Entry into Service Team (MEST_A400M) est chargée du suivi de programme de l'A400M, ainsi que de ses mises en service opérationnel (MSO) successives. A ce titre elle prépare le plan d'expérimentation, effectue une évaluation opérationnelle, accomplit le Plan Commun d'Essai et d'Expérimentations et rédige les procédures opérationnelles.

Dans ce contexte, la cellule Facteurs Humains du CEAM/DMAO a été sollicitée afin d'optimiser les choix de la MEST quant à l'élaboration des fiches de poste équipage et des procédures d'emploi opérationnel. Ce travail est réalisé en prenant en considération à la fois les méthodes fournies par Airbus Military, les expertises opérationnelles variées des membres de la MEST mais aussi les recommandations en termes d'ergonomie que nous avons proposées.

Dans le cadre de notre travail de thèse, l'IMS-Cognitique / ENSC, la société Akiani, spin-off de l'ENSC⁶ et la cellule facteur humain du DMAO ont collaboré⁷. Akiani est notamment spécialisée dans l'analyse outillée des comportements des opérateurs, en particulier à l'aide de la technique « eye-tracking ». Cet outil de capture physiologique est précieux pour objectiver la charge de travail et les émotions ressenties. Mais il permet également, lorsque les 2 membres d'équipage en sont équipés, d'observer les stratégies visuelles collectives de prise d'informations et de les confronter aux procédures d'emploi expérimentées par les experts de la MEST.

Plus généralement, la démarche d'ergonomie cognitive entreprise nous permet :

- d'observer et d'analyser le comportement des membres d'équipage,
- d'interpréter et de comprendre les modes opératoires mis en œuvre par les équipages au cours de leur activité (écart entre tâches réalisées et tâches prescrites) à l'aide de connaissances et de méthodes scientifiques,

⁶ Ecole Nationale Supérieure de Cognitique de Bordeaux

⁷ Un protocole a été signé le 24 janvier 2014 entre les parties (cf. référence XXXX)

- de proposer des recommandations et d'accompagner la MEST dans leur mise en application.

II. OBJET DE L'ETUDE

La longue expérience acquise par AIRBUS en matière de pannes sur avions civils, mais aussi compte tenu du « design » du cockpit conçu en conséquence (ex. cas de la panne électrique totale), est une source d'inspiration pour les expérimentateurs de la MEST chargés de concevoir les procédures opérationnelles de l'A400M. Ils constatent que dans les cas de pannes critiques, en raison d'une forte sollicitation du « pilot monitoring » (PM), une **délégation** de certaines tâches qu'il assurait en mode nominal est opérée vers le pilote en fonction (PF) qui doit alors avoir à gérer :

- le pilotage de l'avion,
- la navigation ;
- les communications radio.

Avec le souci de prévenir la recrudescence des tâches dévolues au PM générées par les futures capacités de l'avion, il apparaît évident aux expérimentateurs de la MEST de s'inspirer de cette méthode de travail en mode dégradé pour définir une méthode de travail en mode nominal ne dépassant pas la charge de travail maximale admissible par le PF (surcharge).

Dans ce cadre, en ce qui concerne l'étude cognitive notre objectif est :

- Evaluer la charge de travail du pilote en fonction (PF) lorsqu'il réalise seul les tâches de pilotage, de sélection de la vitesse via l'AFSCP⁸ (auto-manette enclenchée) et de communication radio (FLY/NAV/COM). L'objectif recherché consiste à ôter certaines des tâches (NAV/COM) actuellement réalisées par le pilote PM, conformément aux méthodes Airbus, pour les attribuer au PF. Le PM devrait ainsi à l'avenir gérer plus facilement les communications avec le « loadmaster » en soute, les pannes, améliorer la compréhension de la situation tactique (menaces sol/air et

⁸ Auto flight system control panel

air/air, autoprotection, liaison de données tactique) ou encore mieux anticiper tout événement en mode nominal ou dégradé.

- Effectuer des recommandations sur les l'élaboration des procédures d'emploi dans le cas d'une interruption du décollage sur A400M.

Dans le cadre de cette expérimentation, notre objectif est aussi méthodologique :

- Validation de la capacité à mener une étude en condition de simulateur et identifier les contraintes
- Comparer les techniques de NASA TLX et Eye-Trackinhg en conditions opérationnelles

III. METHODOLOGIE

Le premier déplacement de l'équipe facteurs humains IMS_Cognitique-ENSC/Akiani/DMAO a eu lieu les 28 et 29 janvier 2014 sur la BA 123 d'Orléans au sein de la MEST, notamment sur le simulateur A400M.

III. A. Moyens

III. A. 1. Ressources humaines de la MEST A400M impliquées dans l'évaluation

Précision sur l'organisation du pilotage en équipage des appareils de transport. En situation opérationnelle un avion de transport est piloté par deux personnes. Celles-ci travaillent selon une double organisation : hiérarchique et fonctionnelle.

Hiérarchique : un commandant de bord, qui est le supérieur hiérarchique, et un copilote.

Fonctionnelle : un pilote en fonction (PF) et un pilote surveillant (PM, pilote monitoring). Le pilote en fonction et celui qui gère la trajectoire de l'avion, tandis que le PM prends compte toutes les tâches support (Radio, Check-lits, et.). Le PM est donc en charge de la sécurité du vol et contrôle tout ce que fait le PF.

Les deux modes d'organisation sont indépendants l'un de l'autre. Le commandant de bord et le copilote passent alternativement d'un rôle à l'autre PF ou PM.

Dans le cadre de notre expérimentation nous disposons de :

- 2 moniteurs de simulateur (responsable de la mise en œuvre du simulateur 400 M)

- 1 officier Pilote préparateur A400M (PN, personnel navigant), responsable de la préparation de mission.
- 1 officier PN coordinateur de l'expérimentation occupant également le poste de pilote PM à chaque scénario (puisque le pilote testé est le PF).
- 4 officiers pilotes qui sont les sujets évalués en tant que PF dont les profils sont décrits Tableau 2.

PF	PF 1	PF 2	PF 3	PF 4
Age	36	33	39	47
Total HdV	3380	3300	3400	9700
HdVTransall	2920	2700	3000	nil
HdVHercules	nil	nil	nil	6700
HdVA340	nil	nil	nil	2700
HdV réel A400 M	32	80	50	80
Hsimu A 400 M	104	120	116	50

Tableau 2. Description des profils des 4 pilotes en fonction (PF). (Hdv : heures de vol).

III. A. 2. Matériel de la MEST A400M

La MEST a fourni 3 créneaux de 3 heures sur simulateur. Lors de chaque vol, nous étions embarqués pour participer à la mission (prises de notes) et intervenir pour la passation en direct de questionnaires (NASATLX toutes les 10 minutes).

Dans sa version actuelle, **le simulateur A400M ne permet pas le « rejeu »** des missions. Ce point est préjudiciable à l'entraînement des équipages mais aussi à notre travail puisque il ne peut pas être utilisé à des fins d'autoconfrontation⁹. De plus, la recopie des informations cabine sur le pupitre est limitée au CTH seulement (collimateur tête haute), ce qui rend impossible le suivi de la mission pour les personnes non embarquées.

⁹ L'opérateur est replacé devant les images de la mission et il essaie de verbaliser ses actions sous le guidage de l'ergonome

III. B. Méthodes

III. B. 1. Méthodologie de l'évaluation de la charge de travail

L'évaluation de la charge cognitive est réalisée par des mesures objectives de la performance et physiologiques, ainsi que par des mesures subjectives. L'hypothèse de travail est que la combinaison des différentes approches permet de d'améliorer l'évaluation de la charge cognitive en en limitant les biais de mesure.

En ce qui concerne les **mesures objectives** de la charge de travail : 2 moyens de métrologie sont retenus.

Le premier consiste à mesurer l'augmentation de la charge de travail par inférence à partir de la dégradation de la performance attendue. Le choix des métriques retenues doit être caché aux opérateurs évalués. Deux indicateurs de la performance sont retenus : le respect des heures de points de passage et la tenue d'altitude ($450 \text{ ft} < \text{hauteur de vol} < 800 \text{ ft}$).

Le second outil, l'eye-tracker est un indicateur psycho-physiologique de la charge de travail cognitive. Il permet d'étudier les modifications de la dilatation pupillaire, dont l'augmentation est corrélée avec un effort cognitif. Cet outil a déjà été décrit chapitre 2.3, méthodologie. Nous ne précisons donc ici que les éléments de contexte propre à nos conditions expérimentales.

L'eye-tracker permet aussi d'étudier la position du regard. Toutefois, dans le cadre de cette étude cette information n'a pas été utilisée.

Un maillage de la cabine composé de plusieurs capteurs IR (20 environ) est effectué. Il permet de géo-référencer la position du regard.

La paire de lunettes « eye-tracker », Figure 59, est portée par le pilote de manière autonome (boîtier enregistreur sur batterie et porté dans la poche de la combinaison de vol). Une calibration est effectuée pendant 1 mn avec le pilote dans le simulateur juste avant le lancement de la mission.



Figure 59. Dispositif de Eye Tracker, les pods (a), les lunettes (b) et l'enregistreur (c)

Par ailleurs, pour les besoins de notre expérimentation, l'armée de l'air a équipé la cabine simulateur d'un câblage spécifique permettant d'intégrer les communications radio aux images récoltées par une caméra panoramique de type GOPRO.

L'ensemble du dispositif mis en place dans le cockpit de simulation A400 M est représenté Figure 60



Figure 60. Représentation du dispositif expérimental dans le cockpit du simulateur A400M. Positionnement des 2 GOPROs, eye-tracker, capteurs Pod-IR

En ce qui concerne les **mesures subjectives** de la charge de travail, 2 outils sont utilisés : le NASA TLX et les entretiens semi-dirigé

NASA TLX :

Le premier outil fait appel à l'appréciation subjective du PF. Il s'agit du questionnaire NASA TLX. Le NASA Task Load Index (NASA TLX) est un questionnaire d'évaluation de la charge de travail ressentie qui explore 6 dimensions : pression mentale, pression physique, pression temporelle, performance, effort, frustration. Il est ajouté une 7^e donnée à valeur globale, la **difficulté générale ressentie**. Le NASA-TLX a été développé par Hart & Staveland (1988)¹⁰. Ce test est celui avec lequel la NASA réalise les évaluations de la charge mentale. Il est notamment utilisé depuis de nombreuses années dans les milieux aéronautiques civils ou militaires pour évaluer la variation de charge de travail induite par des tâches différentes ou réalisées dans une ambiance différente. La validation scientifique du Nasa-TLX n'existe qu'en langue anglaise (Figure 61). La moyenne des 6 échelles définit le score NASA-TLX utilisé comme index de la charge de travail (Otmami, 2005). Le score de NASA-TLX étant individuel, les comparaisons sont basées sur les différences observées pour une même mission et pour un même opérateur.

¹⁰ Hart SG, Staveland LE. Development of NASA-TLX (Task Load Index): results of empirical and theoretical research. En: Hancock PA, Meshkati N, eds. Human Mental Workload. Amsterdam: Elsevier, 1988, 139-183.

NASA Task Load Index

Hart and Staveland's NASA Task Load Index (TLX) method assesses work load on five 7-point scales. Increments of high, medium and low estimates for each point result in 21 gradations on the scales.

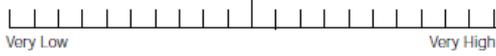
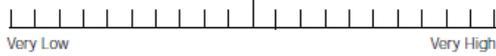
Name	Task	Date
Mental Demand How mentally demanding was the task?		
		
Physical Demand How physically demanding was the task?		
		
Temporal Demand How hurried or rushed was the pace of the task?		
		
Performance How successful were you in accomplishing what you were asked to do?		
		
Effort How hard did you have to work to accomplish your level of performance?		
		
Frustration How insecure, discouraged, irritated, stressed, and annoyed were you?		
		

Figure 61. Représentation de la maquette d'un questionnaire NASA-TLX en langue anglaise

Dans notre cadre expérimental, le PF est appelé à renseigner un questionnaire NASA-TLX à 3 reprises au cours du scénario, après des moments pré-identifiés par les concepteurs comme étant représentatifs d'une charge de travail élevée (à T1 -9mn-, T4 -27mn-, et T7 -42mn- ; cf. Figure 62).

La conception de la mise en situation simulée (scénario) est basée sur le choix d'un modèle de la performance. Ici (Figure 62), nous nous appuyons sur le modèle de Brookhuis & de Waard (2001).

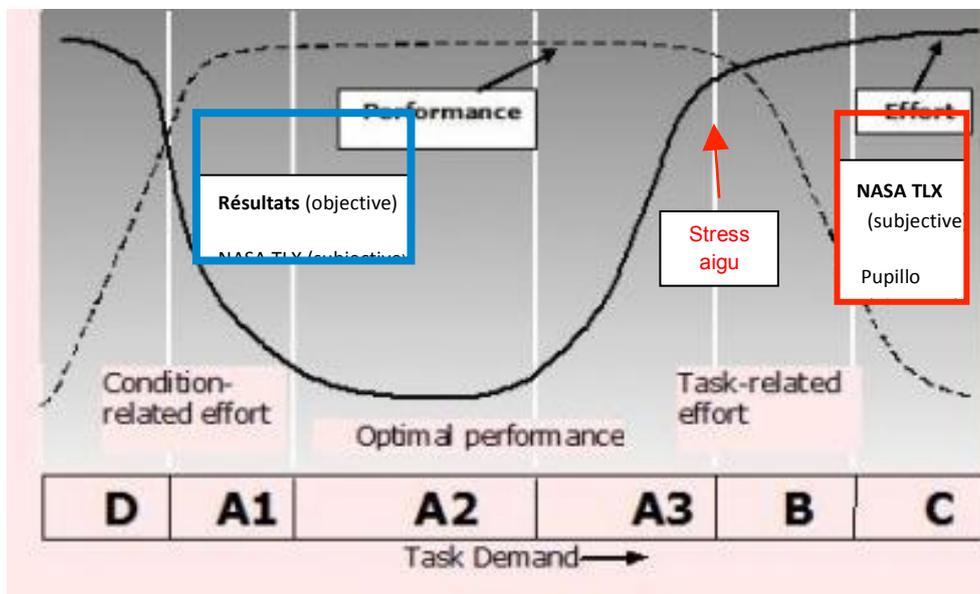
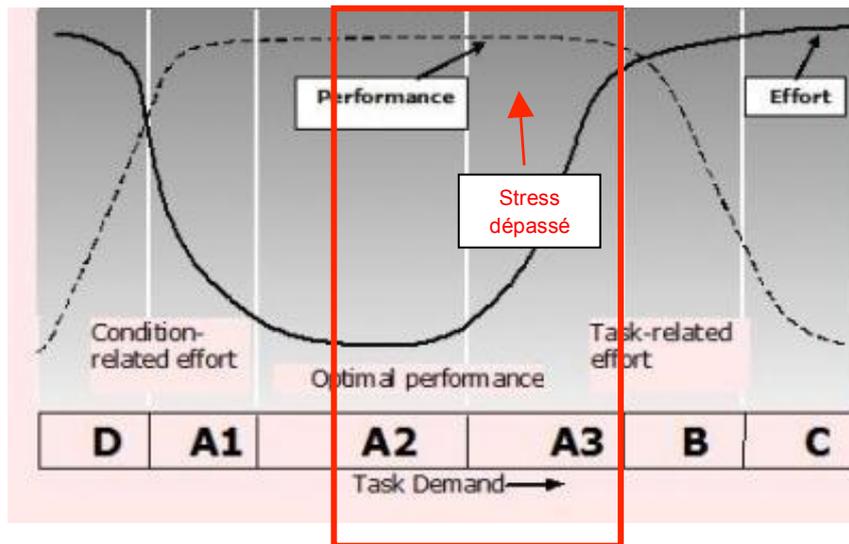


Figure 62. Représentation graphique du modèle de De Waard (selon De Waard, 1996, p24)

A l'aide de tâches spécifiques demandées au PF, nous cherchons à l'amener autour des zones A3 et B. En zone A3, le modèle démontre l'effort croissant fourni par un opérateur pour maintenir une performance élevée. L'enjeu pour l'opérateur consiste à ne pas atteindre la zone B qui correspond à une surcharge entraînant une chute de la performance, même si l'effort consenti est maximal (situation de stress).

Dans le cadre de l'analyse des résultats réalisée à partir du modèle de performance de De Waard, la première dimension à caractériser concerne l'**effort consenti** par l'opérateur et l'affect de **frustration** ressenti. Ces notions sont liées et leur évaluation subjective. Elles sont

directement accessibles par le questionnaire NASA TLX. La combinaison de ces 2 notions, “effort” et “frustration”, donne une bonne appréciation de la **difficulté ressentie** (difficulté = effort + frustration). En effet, un opérateur peut fournir un effort soutenu mais sans ressentir de frustration. Par exemple, lorsque la tâche qu’il réalise est coûteuse mais « maîtrisée », c’est-à-dire comprise et bien exécutée. Il n’éprouve pas de difficulté. A contrario, un opérateur qui ne fournit pas d’effort et n’éprouve pas de frustration se trouve dans un des 2 cas suivants :

- soit la tâche à réaliser est trop facile compte tenu de son niveau d’expertise,
- soit il ne s’investit pas dans la tâche mais dans ce cas la performance ne sera pas atteinte.

L’appréciation subjective de la charge de travail fournie par le questionnaire NASA TLX est donc d’interprétation aisée, ce qui en fait tout l’intérêt. Toutefois, il existe des biais : l’opérateur peut chercher à masquer ou à amplifier ces notions (frustration/effort). C’est à dire qu’il peut être tenté d’influencer le résultat du test en augmentant ou diminuant son déclaratif sur la difficulté de la tâche. On parle alors de censure cognitive ou censure sociale plus ou moins conscientisée. C’est pourquoi il est intéressant de disposer d’un second indicateur, objectif celui-ci, qu’est la **dilatation pupillaire fournie par l’eye-tracker**. Cependant, la dilatation pupillaire n’est pas uniquement illustrative de la charge mentale, elle retranscrit aussi les émotions (peur, colère, etc.). Cette mesure doit donc être exploitée en complément de l’autoévaluation par le NASA TLX.

La seconde dimension à caractériser concerne la **performance réalisée**. C’est une notion objective, qui consiste à définir si l’action réalisée par un opérateur est conforme à la tâche prescrite. Cette performance peut être évaluée :

- soit par le résultat global obtenu (évaluation opérationnelle),
- soit par rapport à des critères préalablement retenus dont la dégradation est révélatrice d’une augmentation de la charge de travail, à l’instar de la méthode de double tâche (voir 4.2 méthode de la double tâche),
- soit par autoévaluation de sa propre performance (NASA TLX). En effet, bien que subjective, l’appréciation d’un opérateur expert peut donner lieu à une pondération de l’évaluation de la performance. A contrario, l’autoévaluation d’un novice n’aura que très peu de poids sur la performance atteinte. La performance réalisée ne doit pas être assimilée à la performance ressentie.

Le second outil fait appel à un entretien semi-dirigé réalisé avec le PF à l'issue de la mission, dès sa sortie du simulateur. Il s'agit d'obtenir, a posteriori, des éléments de contexte complémentaires et une pondération des résultats précédents. L'entretien repose sur une reformulation des événements intervenus lors du vol simulé, plus particulièrement sur les difficultés rencontrées.

III. B. 2. Construction d'un scénario

Un scénario de mission opérationnelle sert de mise en situation des équipages. La conception du scénario a été réalisée dès la première demi-journée de l'intervention par travail collaboratif entre l'armée de l'air et nous. Afin de ne pas introduire de biais lors de la réalisation des missions, aucun membre d'équipage PF et PM n'a eu accès à son élaboration.

Dans les conditions opérationnelles réelles, les avions de transport de type A400 M sont utilisés pour exfiltrer ou infiltrer des troupes spéciales au sol. Il doivent effectuer un atterrissage dans des conditions de fortune (très court, terrains sommaire, etc.), ce qui constitue un « posé d'assaut ».

Le scénario choisi repose sur un vol basse altitude, de jour, dans un cadre tactique simple entre les terrains de Séville (décollage) et de Malaga (posé d'assaut). Au cours de cette mission, un survol montagneux et la traversée d'une ROZ¹¹ à Gibraltar doivent être réalisés moyennant une coordination radio avec le contrôle aérien, l'avion radar AWACS et les forces spéciales au sol (figure 63). Aucune menace air/air ou sol/air n'est simulée. La visibilité est réduite.

¹¹ Restricted Operating Zone

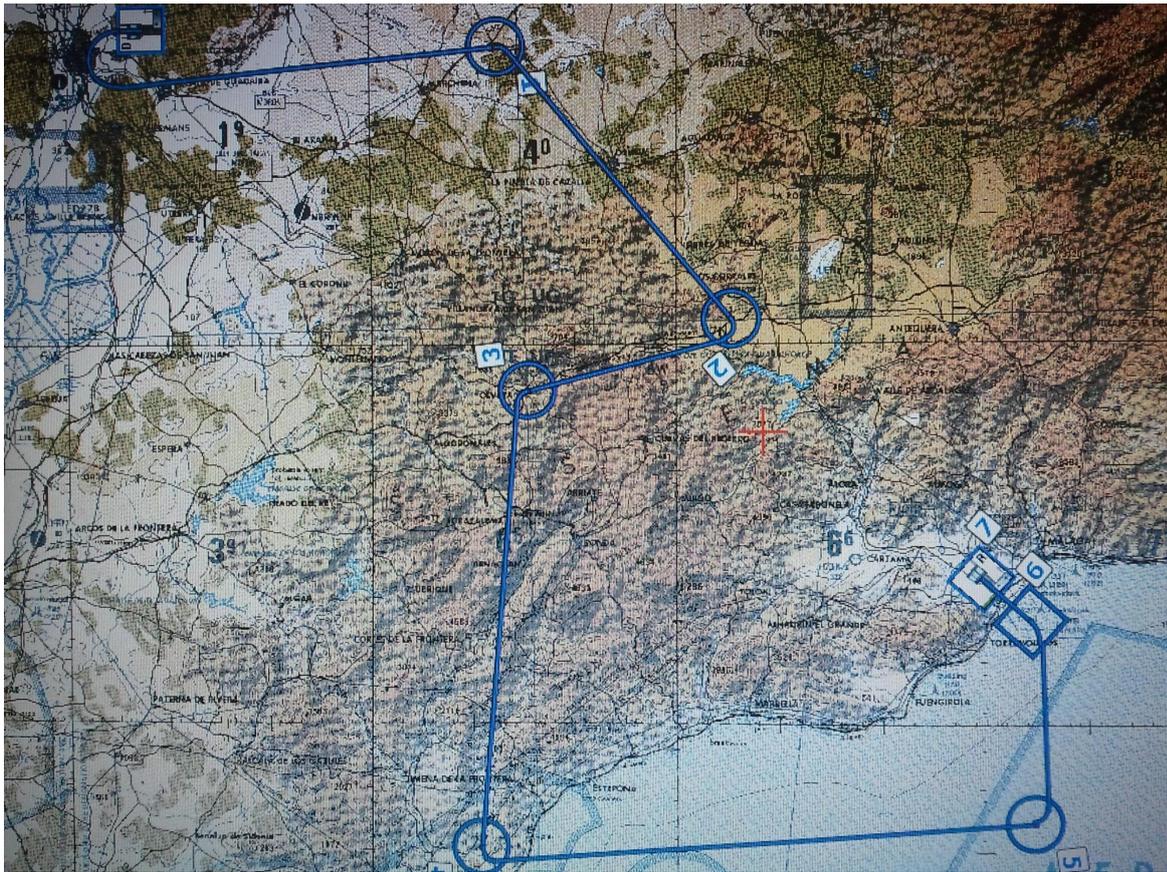


Figure 63. Représentation cartographique du tracé de mission. Chronologie de la mission :

- T0-T1 : Vol de sortie de zone de contrôle (pas de difficulté particulière, mais gestion du temps à respecter).
- T1-T4 : Vol tactique dans le relief. Basse altitude, gestion critique du temps, gestion de conditions météorologiques dégradées, coordination obligatoire avec le contrôle aérien de Gibraltar (ROZ)
- T1 : Passation 1 du Nasa TLX après point tournant numéro 1 (environ 9 mn de vol)
- T4 : Passation 2 du Nasa TLX après point tournant numéro 4 (environ 27 mn de vol)
- T4-T7 : Vol maritime. Gestion du temps critique à la demande des forces spéciales au sol.
- T7 : Passation 3 du Nasa TLX après le poser d'assaut (environ 42 mn de vol)

Un événement impromptu est planifié. Il s'agit d'annoncer un retard obligé de 3 minutes au T5, moment où le pilote arrive sur son dernier point de navigation et va entreprendre sa procédure d'arrivée. L'objectif visé par le scénario est d'augmenter la difficulté de la tâche en imposant une adaptation de la gestion du temps à un moment clé, voire critique, ne laissant que très peu de marges temporelles et spatiales pour réagir et prendre une décision de trajectoire.

- Remarque 1 : Des moments clés au cours desquels l'activité du PF est attendue comme faible sont prédéterminés au cours du scénario afin d'effectuer la passation du questionnaire NASA TLX. A ce moment, le PM reprend les commandes pendant environ 1 mn. Il s'agit des phases de vol situées après 2 points tournants (point 1 et point 4). Une 3^{ème} passation étant réalisée après le posé.

- Remarque 2 : La méthode de la double tâche présentée précédemment a été retenue en demandant d'effectuer un « check fuel » à chaque point tournant. Il s'est avéré que ce calcul, inattendu par l'équipage, a été réalisé dès la première mission par le PM et non par le PF comme nous l'avions envisagé. Il a été décidé de ne plus reproduire cette double tâche pour les 3 missions restantes par soucis d'homogénéité entre candidats.
- Remarque 3 : Les 4 équipages évalués étaient constitués de 4 PF différents et toujours du même PM

Le scénario élaboré initialement en collaboration avec la MEST était destiné à évaluer la charge de travail de l'équipage lors des interruptions de décollage, notamment lors du partage de la conscience de situation et de la prise de décision associée entre les deux pilotes.

Le scénario original était donc centrée sur la phase de décollage. Cette mise en situation comprend de multiples itérations avec décollage, vol et atterrissage. Il a également été abordé la question de la distribution des rôles attribués à chaque pilotes durant les différents types de phase de vol : (1) décollage, (2) basse altitude et (3) haute altitude. La problématique étant de déterminer si la distribution des rôles devait être constante entre les différentes phases ou adaptées à chaque situation.

Bien que pour notre étude nous ayons utilisé les phases de vol de cette expérimentation (basse et haute altitude), les résultats du scénario originel (interruption du décollage) seront présentés en partie 6 car les résultats nous semble pertinents et confortent nos hypothèses quant à l'utilisation des eye-tracker pour l'évaluation de la charge de travail.

La pertinence du scénario opérationnel n'est réellement avérée qu'à l'issue de l'analyse des résultats. Néanmoins, on s'appuie sur l'expertise opérationnelle des membres de la MEST et de l'équipe FH concepteurs du scénario pour faire le pari de sa pertinence. A la lumière des résultats convergents obtenus par nos outils de mesure (NASA TLX et eye-tracker) dès les premiers candidats, le scénario retenu correspond à nos hypothèses issues du modèle de Waard.

V. RESULTATS ET ANALYSE

V. A. Analyse critiques des mises en place méthodologiques

Les résultats de Pupillométrie obtenus par eye-tracker ne sont que partiels. Pour des raisons techniques, seulement 2 opérateurs sur 4 ont pu être enregistrés intégralement.

Les métriques de performance initialement choisies se sont successivement avérées complexes à traiter et donc inexploitable :

- Le premier critère de performance s'était porté sur la gestion du temps. Or, il se trouve que ce point reste la plus grosse difficulté rencontrée par les PF en raison de leur incompréhension du système de gestion du temps proposé par l'A400M. Ce critère de mesure de la performance a donc été abandonné suite à la première mission.
- Le second critère de tenue d'altitude imposée entre 450 et 800 pieds s'est révélé plus adapté car indépendant des aléas du système avionique. Cependant, bien que utile pour générer de la difficulté de pilotage, le choix d'un relief accidenté ne s'est pas révélé pertinent en ce qui concerne cette mesure,. En effet, le pilotage de la trajectoire en zone montagneuse donne lieu à des compromis entre hauteur de consigne et souplesse de pilotage ce qui génère parfois des hauteurs de passage en dessous de la limite basse (450 pieds) ou bien parfois au-dessus de la limite haute (800 pieds) sans que cela soit révélateur de surcharge ou d'inattention.

Les informations du viseur tête haute (VTH) ne sont pas totalement filmées par la caméra de scène de la lunette eye-tracker. En effet, sa position décentrée à hauteur de la branche droite ne permet pas de couvrir l'intégralité du viseur situé à une distance faible du regard (hors de la boîte à œil).

Ces informations n'étaient pas utiles pour répondre aux objectifs fixés pour cette première expérience. Cependant, cette information pouvant être pertinente pour la suite de notre travail de thèse nous avons recherché une solution. Celle-ci consiste à appliquer la méthode d'interpolation des données de l'eye-tracker à un enregistrement externe. C'est à dire que connaissant la position relative des marqueurs IR par rapport à la VTH, il est possible de venir y incruster la position du regard. La qualité de l'interpolation des données dépendra à la fois de l'erreur produite par le fait que les éléments considérés ne sont pas dans les mêmes plans et de la capacité à capter 4 marqueurs à chaque instant.

V. B. Résultats CEAM

Les ressources cognitives du PF mobilisées dans le cadre de ce scénario étaient essentiellement celles correspondantes à l'activité de conduite de système dynamique en mode mental automatique : actions sensori-motrices par application d'habiletés, de procédures ou de schémas mentaux déjà connus sur A400M et avions antérieurs. Le contexte du scénario d'interruption au décollage est simple : les pilotes sont confrontés à la nécessité d'engager des actions supposées séquencées et rarement simultanées. Ils peuvent donc se concentrer et se focaliser sur chacune d'entre elles successivement (réduction de la poussée, maintien de l'axe de piste avec palonniers et manches, annonce radio, freinage et inversion de poussée, etc.).

La procédure initialement retenue par l'exploitant impose une répartition stricte des rôles entre pilotes, notamment en ce qui concerne la prise de décision d'interrompre le décollage qui est dévolue au commandant de bord. Cette façon de procéder implique notamment un partage de la SA efficace et rapide entre les deux pilotes, la confiance du commandant en son pilote. Les tests effectués dans le cadre de notre étude démontrent que cette procédure ne permet une bonne réactivité de l'équipage, ni la nécessaire pertinence dans la prise de décision.

Une seconde série de test effectués en laissant la responsabilité de la décision et de la gestion de la procédure d'interruption de décollage au PF a été testé. Elle démontre que le PF est en mesure de gérer l'ensemble de la procédure sans être apparemment en surcharge cognitive. Toutes les actions sont engagées de façon efficiente par le PF qui effectue parfaitement la séquence requise. Ce résultat a donné lieu à la mise en oeuvre d'une nouvelle procédure par l'exploitant.

La question se pose alors d'un maintien de cette nouvelle répartition des rôles pour la phase de vol en basse et haute altitude. Les procédures issues des vols commerciaux imposent une séparation permanente des rôles, quelle que soit la phase de vol. Dans le cas des vols tactiques nous observons plusieurs situations de vols : une distinction forte entre les vols de basse altitudes (rares en aviation commerciale) et ceux de haute altitude; la nécessité de prendre en compte un très grand nombre d'activité spécifique des interventions militaires (guerre électronique, gestion du temps, coordination avec les troupes au sol, etc.); la contraintes de la diminution du nombre de membre d'équipage (2 en A400M contre 4 en Transall ou en Hercules C130). Dans notre cas la problématique abordée doit établir s'il est judicieux de maintenir la distribution des charges telle que prévue initialement : le PF assure la conduite du vol, le PM assure les restes des missions. Dans ce cas, la charge dévolue au PM apparaît

excessivement forte. Nous testons donc la capacité du PF à prendre en charge 3 fonctions (FLY, NAV et COM), en basse et haute altitude. La question est particulièrement prégnante pour le vol en basse altitude où la charge de pilotage du PF peut être très contraignante en mission tactique (suivi de relief, évitement de menaces, etc.). Nos observations établissent que les PF évalués n'ont pas été mis en situation de surcharge de travail lorsqu'ils ont réalisé leur activité selon les nouvelles méthodes expérimentées.

Le contexte expérimental impose certaines limites : nombre limité de participants : 4 PF avec une expertise élevée et simulateur ne permettant pas d'auto-confrontation complète. De même pour le contexte opérationnel : vol basse altitude dans un cadre tactique simple et en conditions météorologique favorables. Cependant, nos résultats On peut aussi supposer que cette absence de surcharge de travail, en pleine période d'appropriation du système A400M, sera confirmée avec l'expérience acquise. Cependant, on ne peut pas préjuger de la charge de travail que cette nouvelle répartition des tâches au sein de l'équipage générera sur une population de PF moins aguerrie ou avec des PF aguerris mais dans contexte plus dense. D'autres expérimentations seront sans doute nécessaires pour affiner ces résultats. Le tableau 3 expose les situations pour lesquelles l'expérimentation a été conduite (vert), reste à faire (ambre) ou bien ne sera pas abordée dans le cadre de l'expérimentation de l'A400M.

CONTEXTE (facteurs externes)	SIMPLE	COMPLEXE
EXPERTISE PF (facteurs internes)		
Pilote Novice	Sans objet	Sans objet
Expérimenté A400M	Sans objet	Sans objet
Expérimenté autre avion mais novice A400M	Testé	A tester
Expérimenté autre avion et sur A400M	Testé	A tester

Tableau 3. Exposé des situations pour lesquelles l'expérimentation a été conduite (vert), reste à faire (ambre) ou bien ne sera pas abordée dans le cadre de l'expérimentation de l'A400M.

Dans l'avenir, même si les méthodes de travail envisagées par la MEST ne prévoient pas de rajouter de tâches au PF, la complexité des missions réelles viendra inévitablement augmenter sa charge de travail. Impliqué dans la mission opérationnelle, le PF cherchera des ajustements et se donnera des marges pour libérer des ressources attentionnelles qu'il investira dans des tâches plus coûteuses. Il s'agit d'activités cognitives dites de « résolution de problème » qui concernent tout particulièrement la construction d'une représentation mentale de la situation

dans un environnement hostile. En effet, même s'il n'en a pas la gestion, le PF va capter les informations accessibles dans son environnement (L16 data link, RWR, radio tactique, ...) pour construire sa propre représentation de la situation.

De plus, les enjeux et les contraintes de ces futures missions viendront influencer la charge physique (astreinte) et mentale (quantité et complexité des informations, interférences sonores, visuelles, émotionnelles ou encore due au stress, effort consenti, résolution de problèmes.

Il conviendra donc, au fil des nouvelles capacités et des nouvelles missions de l'A400M, de se questionner régulièrement sur le niveau de charge de travail du PF.

La qualification de type (QT) Airbus impose une répartition des tâches PF/PM adaptée au travail en haute altitude. Les résultats de notre expérimentation tendent à montrer que les PF sont capables, en mission basse altitude simple, d'absorber les tâches supplémentaires normalement dévolues au PM (Gestion radio/AFCU, Aircraft Flight Control Unit). Ainsi, le développement de routines de travail par les pilotes est un axe d'amélioration de la sécurité des vols. Dans ce cas, le modèle du contrôle de l'activité développé par Rasmussen (modèle SRK, cf. Annexe 4), montre qu'en développant les comportements basés sur les habiletés et sur les règles dans les tâches rendues familières par l'entraînement (routinisation), des ressources cognitives ainsi libérées peuvent être attribuées aux comportements basés sur les connaissances nécessaires à la gestion des événements imprévus inhérents aux missions opérationnelles.

En conclusion, nous recommandons que la réalisation des tâches par le PF (FLY/NAV/COM) soit toujours identique pour des missions que la mission soit réalisées en haute ou en basse altitude. Cette recommandation s'appuie sur le maintien d'une homogénéité de répartition des rôles pour : 1) favoriser un apprentissage adaptés aux conditions les plus défavorables, 2) augmenter la synergie entre membres d'équipage.

Les actions en cabine conduites par le PF sont des facteurs de complexité interne au cockpit contributifs à sa charge de travail. L'environnement dans lequel il évolue comporte les facteurs de complexité externes au cockpit. Tout en agissant, le PF devra tenir compte du relief, de la météo, de la menace, des informations L16, des objectifs de la mission, etc. Ce travail cognitif de construction de « situation awareness » qui peut s'avérer très gourmand en ressources (percevoir, se remémorer, raisonner) pourrait également réduire les marges dégagées par le PF lors de ses actions de pilotage. A travers une démarche incrémentale axée sur la complexité croissante des missions, il sera ultérieurement possible de déterminer jusqu'à quel niveau le PF

peut assurer la conduite de la mission en assurant seul et en toute sécurité les actions de pilotage (trajectoire + vitesse) et de trafic radio.

La même démarche sera adoptée pour le PM puis le cas échéant, se posera la question de la nature des tâches restant à réaliser par un potentiel 3^{ème} homme.

Ce travail pourrait apporter un éclairage sur les capacités d'un équipage d'A400M à réaliser une mission en conditions techniques dégradées (*minimum equipment list*), dans un environnement complexe, en tenant compte du niveau de risque (*risk level*) imposé.

V. C. Résultats propres

Nous observons que la performance réalisée par les 4 PF est objectivement satisfaisante car aucun des pilotes en fonction n'a été mis en situation d'échec dans la réalisation du scénario spécifique. Ils ont tous réussi à effectuer le posé d'assaut dans les temps imposés par les contraintes du scénario, et à récupérer les forces au sol.

Les résultats de l'autoévaluation par NASA TLX figurent dans le Tableau 4. Globalement, la performance réalisée est jugée bonne par tous les acteurs (Score de performance tous supérieur à la moyenne, variant de 4.4 à 7.2., moyenne de 6).

PILOTES	Score NASA	Mental Demand	Physical Demand	Temporal Demand	Performance	Effort	Frustration	Session Difficulty
PF1 T1	40.3	3.5	2.8	4.6	5.4	5.7	2.2	3.9
PF1 T4	45.8	4.8	2.8	5.2	6.4	4.1	4.2	4.3
PF1 T7	64	6.5	6	7.3	6	6	6.6	5.6
PF2 T1	27.3	2.6	1.7	3.2	7.2	0	1.7	3.5
PF2 T4	44.1	6.6	3.8	5.2	7.2	1.7	2	3.5
PF2 T7	55.3	7.6	1.8	6.5	6	7.3	4	5.3
PF3 T1	18.9	3.3	1	2	6.1	3	1.4	2.1
PF3 T4	28	4.3	2.6	3.3	4.8	4.5	4	4
PF3 T7	45.5	5.1	2.7	5	6.5	4.6	3.4	4.2
PF4 T1	23.3	1.4	1.4	1.4	6.6	1.4	1.8	6.1
PF4 T4	34.8	3.1	1.8	3.5	5.6	3.3	3.6	6.5
PF4 T7	48.8	4.6	2.8	6	4.4	6.1	5.4	5.8

Tableau 4. Résultats des scores Nasa TLX par PF, par tâche Ti (étape de la mission) et par dimension mesurée (effort mental, effort physique, contrainte temporelle, performance, effort, frustration, difficulté de la passation).

PF1/2/3/4 : pilotes en fonction numéros 1/2/3/4, pour un même scénario réalisé avec le même PM.

T1 : Passation 1 du Nasa TLX après point tournant numéro 1 (environ 9 mn de vol). Difficulté envisagée lors de la construction du scénario : **gestion timing**

T4 : Passation 2 du Nasa TLX après point tournant numéro 4 (environ 27 mn de vol). Difficulté envisagée lors de la construction du scénario : **pilotage BA en survol montagneux et coordination avec la ROZ de Gibraltar**

T7 : Passation 3 du Nasa TLX après le poser d'assaut (environ 42 mn de vol). Difficulté précédente envisagée lors de la construction du scénario : **gestion du timing et de la trajectoire avec peu de marges de manœuvre.**

La charge de travail est croissante (mental demand) pour tous, au fil du scénario (de T1 à T7). Ce point confirme le réalisme du scénario construit.

La gestion du temps est au cœur de l'activité des PF qui éprouvent tout au long du vol des difficultés de compréhension de la logique de calcul de l'avance/retard (Early/Late) proposé par le système avionique. Ce travail se complique lorsque une annonce de délais de 3mn est exigée au dernier point tournant de la navigation (point 5), environ 5mn avant le posé d'assaut. Ceci explique que la pression temporelle ressentie est régulièrement croissante pour chacun des PF (Figure 64). Les valeurs de score NASA-TLX de ce critère sont majoritairement inférieures à la moyenne à T1, et majoritairement supérieures à la moyenne à T7.

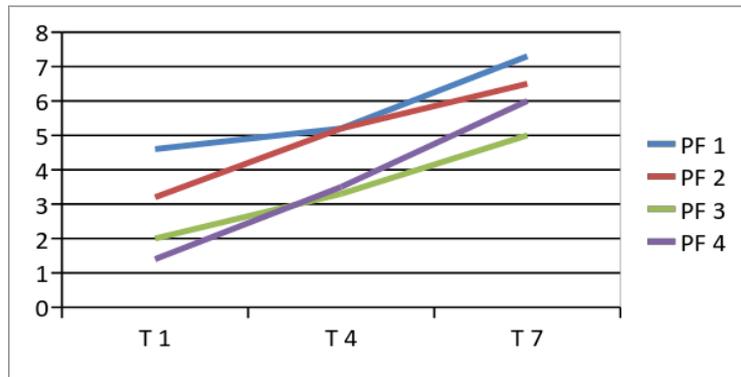


Figure 64. Pression temporelle ressentie (score NASA-TLX).

La contrainte physique ressentie est croissante pour tous les PF, à l'exception du PF 2 qui atteint son score maximal en T4 (score NASA-TLX de 3.8) lors du vol en basse altitude entre les reliefs (Figure 65). Cette particularité observée chez le PF2 est sans doute explicable par une réaction psychologique suite à une erreur de pilotage. En effet, entre T3 et T4 ce pilote a laissé descendre son appareil dans le relief au risque d'une collision. Cette situation fut particulièrement source de stress et de tension pour l'équipage. Bien que très expérimenté, le PF2 a vraisemblablement décompressé à posteriori, ce qui expliquerait la baisse ressentie de contrainte physique en T7 (score NASA-TLX de 1.8).

En ce qui concerne le PF1 la valeur en T7 est particulièrement élevée (score NASA-TLX de 6.0), alors que ses scores étaient stables et peu élevés précédemment (score NASA-TLX de T1-2.8 et T4-2.8). Ceci peut être expliqué par la stratégie mise en place par ce PF pour résorber son avance T5. En effet, ce PF s'est livré à des manœuvres de pilotage assez "rudes" pour "perdre du temps" et respecter les contraintes imposées par l'évolution du scénario. Ces manœuvres ont un impact non négligeable sur l'état physique du pilote (fatigue, environ 3g).

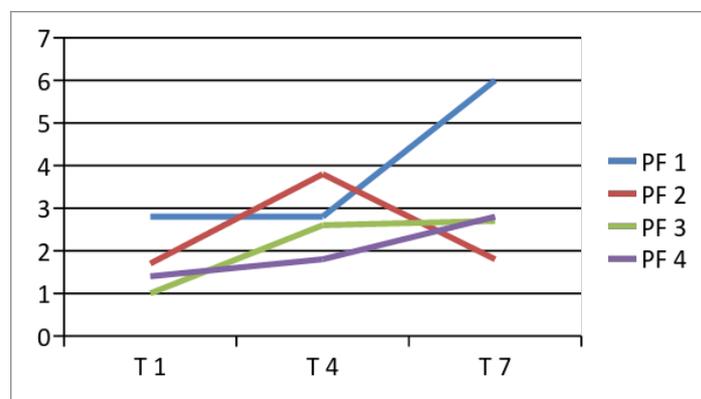


Figure 65. Contrainte physique ressentie (score NASA-TLX).

La difficulté ressentie de la passation apparaissent très différentes selon les PF. Le PF4 se singularise fortement des 3 autres (Figure 66).

Pour les PF1, PF2, et PF3 la difficulté ressentie pour l'ensemble de la passation augmente de valeur en dessous de la médiane (4) en T1 (3.9; 3.5; 2.1 respectivement) vers des valeurs au dessus de la médiane en T7 (5.6; 5.3; et 4.2 respectivement). Pour le PF4 nous observons des valeurs de difficulté ressentie nettement supérieures à celles des autres PF pour tous les Ti. La difficulté ressentie pour le T4 augmente légèrement (6.1 à 6.5, score NASA-TLX), sans doute du fait de son manque d'entraînement au vol en basse altitude. En T7, le difficulté ressentie diminue légèrement, vraisemblablement du fait de la sortie de la phase de vol en basse altitude et relief. Nous pouvons expliquer cet écart de difficulté ressentie par rapport aux 3 autres PF par le fait que le PF4 vole depuis 2500h sur A340 et ne fait plus de missions tactiques en basse altitude depuis plusieurs années (manque d'entraînement et d'expertise pour ce profil de vol). Cette carence a été exprimée par le PF4 à plusieurs reprises avant le vol.

Par conséquent, cette difficulté ressentie serait plutôt liée au pilotage puisque en T7 le PF4 n'a pas exprimé de contrainte physique particulièrement élevée (Figure 65).

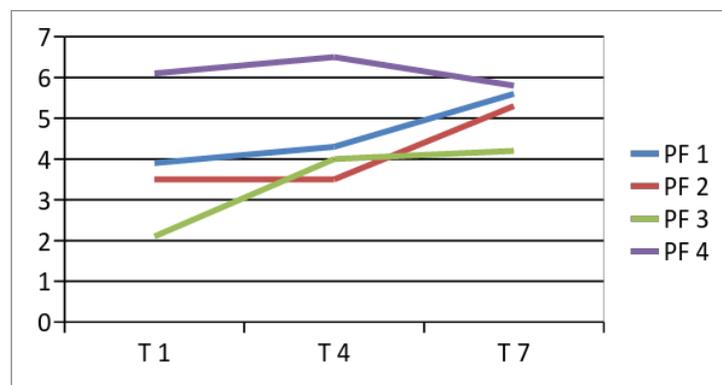


Figure 66. Difficulté ressentie de la passation (en score NASA-TLX).

En ce qui concerne la performance ressentie nous observons une légère diminution en T7 pour les 3 pilotes PF1, PF2, et PF4 (score NASA-TLX de T4 = 6.4, 7.2, et 5.6 respectivement, et T7 = 6; 6; et 4.4 respectivement) . Ce qui semble logique puisque cette phase de vol les oblige inventer une solution adaptative en délais contraint. Le PF3 note légère augmentation de la performance ressentie en T7 (score NASA-TLX de 6.5) par rapport à T4 (score NASA-TLX de 4.8). Ceci peut s'expliquer par le fait que ce pilote est le plus "tactique", c'est à dire le plus habituer à gérer des imprévus de ce type. La phase finale constituant le posé d'assaut faisant partie de ses activités de routine.

De façon générale, l'effort ressenti tend à croître au cours de l'expérimentation. Les valeurs les plus élevées étant observé dans la phase du posé d'assaut (score de NASA TLX en T7 6.0, 7.3, 4.6 et 6.1 respectivement pour les PF1, PF2, PF3 et PF4).

La même tendance est observée pour la frustration (score de NASA TLX en T7 6.6, 4.9, 3.4 et 5.4 respectivement pour les PF1, PF2, PF3 et PF4). Exception pour le PF3, dont la frustration ressentie diminue en T4 (score NASA TLX de 3.4).

Le PF 3 diminue sa performance et augmente logiquement son effort et sa frustration, puis il maintient son effort afin de réussir ré-augmenter sa performance, la frustration diminuant alors. Le but à atteindre pour l'opérateur est l'atteinte de la performance. PF 3 indexe sa frustration sur la performance atteinte, tout en augmentant progressivement son effort.

Le PF 4 ressent sa performance se dégrader tout au long du vol, maîtrisant la logique Airbus, le décollage puis le premier point tournant sont vécus comme très faciles à gérer, avec un haut niveau de performance, puis les gestions de la basse altitude et du temps, verbalisées comme difficiles, l'effort et la frustration positivement corrélés entre eux augmentent alors, en stricte opposition avec la performance ressentie.

Pour les pilotes PF1 et PF2 nous avons pu recueillir les données d'eyetracker. Après T4, la performance est jugée constante par le PF1 (Figure 67). Cependant, on constate une augmentation de l'effort (NASA TLX) et de la frustration corrélée avec l'eyetracker.

La difficulté ressentie est bien croissante de T1 (1^{er} point tournant) à T7 (poser)

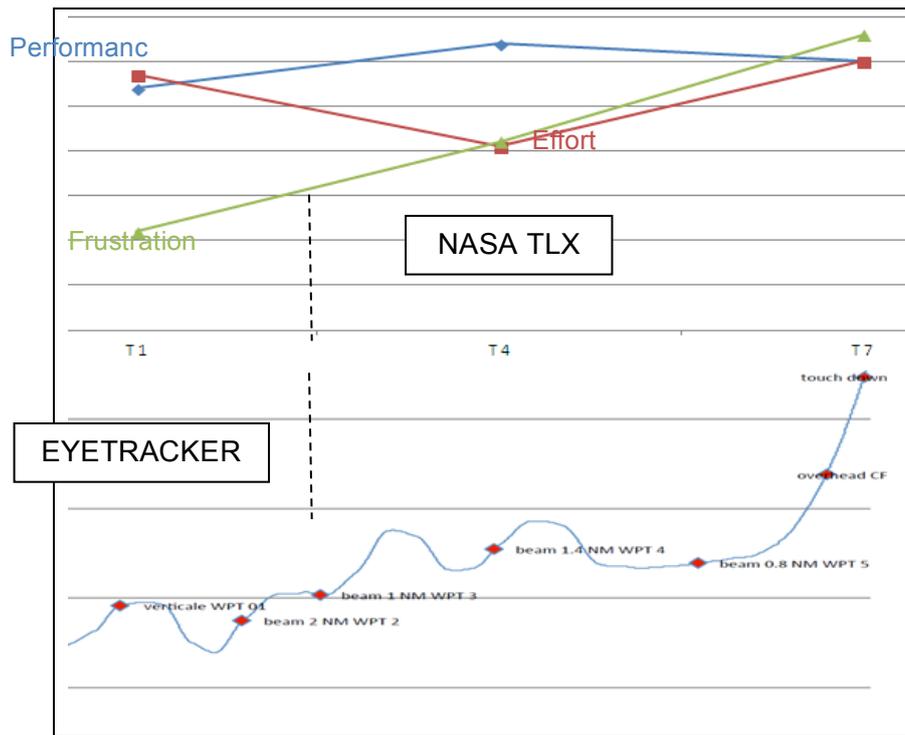


Figure 67. Résultats comparés de NASA-TLX et eyetracker pour le pilote PF1

Figure 68, les résultats de pupillométrie éclairée sur un événement qui s'est produit avant le T4. Comme précisé précédemment, bien que PF2 ne s'estime pas frustré ou stressé, un passage bas, très près du relief pourrait être la cause du pic émotionnel détecté par l'eyetracker.

Après T4 (zone montagneuse), on retrouve la corrélation attendue entre NASA TLX et eyetracker d'une performance jugée en légère dégradation et d'un effort croissant.

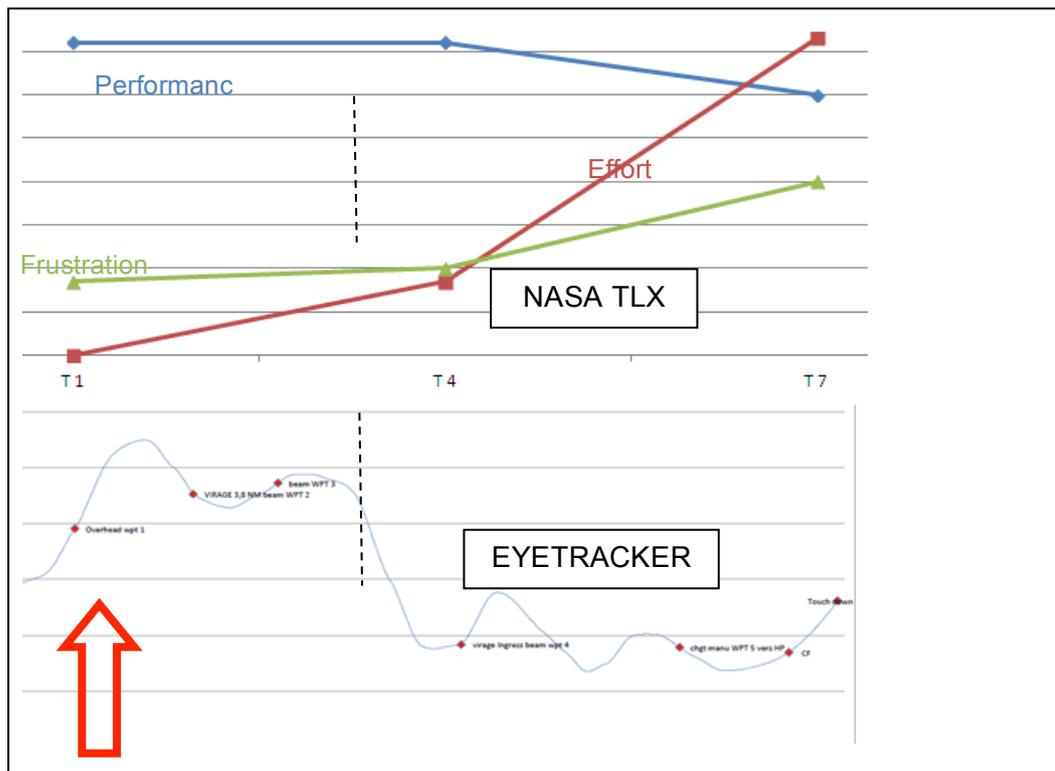


Figure 68. Résultats comparés de NASA-TLX et eyetracker pour le pilote PF2

Au bilan les 4 PF testés arrivent tous au bout de la mission sans atteindre des plafonds de charge de travail intolérables (maxima de score Nasa allant de 45.5 à 64, toujours après le posé). On peut donc considérer que les tâches supplémentaires et nouvelles intégrées dans ce scénario sont acceptables et n'impliquent pas une charge trop élevée. La réalité du terrain, sans ajout de tâches supplémentaires, mènera nécessairement à une augmentation de la charge de travail du PF (trafic plus dense, reliefs/environnement peu connus, retasking multiples, menaces sol/air...). On devra alors surveiller dans les scénarios futurs la charge de travail du PF pour mesurer les potentiels niveaux de saturation de ce poste.

VI. CONCLUSION

L'objectif suivi dans le cadre de cette expérimentation était d'ordre méthodologique, portant notamment sur : la validation de la capacité à mener une étude en condition de simulateur et identifier les contraintes, la comparaison les techniques de NASA TLX et EyeTrackinhg en conditions opérationnelles.

Après différents essais, la mise en oeuvre des matériels expérimentaux (caméra, pod IR, etc.) a pu se faire dans de bonnes conditions et démontre la faisabilité du processus expérimental imaginé pour des conditions opérationnelles. Plusieurs limites matérielles ont néanmoins été

mise en évidence : le positionnement (branche latérale droite des lunettes) de la caméra d'eye-tracker ne permet pas de filmer les écrans de visualisation tête haute utilisés par les pilotes. Une solution a été trouvée en incrustant les données eye-tracker sur la visualisation tête haute récupérée par une autre caméra. Ce point ne s'est pas avéré contraignant pour la suite des expérimentations.

Dans leur état natif, les caméras utilisées disposaient d'une autonomie qui s'est révélée insuffisante. Il a été possible d'augmenter cette autonomie par l'adjonction de nouveau "pack-batterie" de capacité satisfaisante.

Les pilotes engagés dans l'expérimentation sont apparus très motivés et participatifs à notre problématique. Nous n'avons observé aucune réticence sur le sujet, au contraire ils étaient particulièrement intéressés au résultats des observations touchant à leur activité quotidienne.

Nous avons pu observer que l'usage des eye-tracker est parfaitement adapté à l'évaluation de la charge de travail des nos conditions d'expérimentation, y compris dans les conditions plus complexes (environnement lumineux, points d'intérêt multiple, etc.).

L'ensemble de ces résultats nous permettent d'envisager la réalisation de l'étude de la redistribution dynamique des priorités en situation contraintes que sera menée en partie 2.6/

Par ailleurs, notre expérimentation s'effectuant dans le cadre d'une étude MEST, nous avons pu contribuer à l'élaboration de nouvelles procédures d'emploi dans le cas d'une interruption du décollage sur A400M en apportant des recommandations. Celles-ci ont également concernés les vols en basses et hautes altitudes.

Nous remarquons également que la surcharge de travail n'a pas été atteinte dans le scénario de navigation en basse altitude dans un environnement simple, avec des PF assurant les tâches supplémentaires et ayant une forte expérience sur d'autres avions (Hercules, Transall, A340) mais peu d'expertise sur A400M. Nous proposons donc de nous orienter, toujours avec la même population test, vers la construction de scénarios proposant un contexte opérationnel complexe. C'est que nous mettons en oeuvre dans la partie 2.7.

Chapitre 2.6 - Résultats

Etude des stratégies adaptatives des pilotes d'airbus A400M en situation sous forte pression temporelle

I. INTRODUCTION

Au cours des précédents chapitres, nous avons pu proposer un nouveau modèle de gestion des ressources cognitives adapté à notre problématique facteur humain en aéronautique. Cette proposition a été validée dans le cadre d'une campagne d'observation terrain, plus particulièrement à l'occasion d'un retour d'expérience concernant un incident au cours d'un vol transatlantique. Nous avons pu ensuite tester la mise en oeuvre d'un protocole expérimental "facteur humain" dans le cadre d'une expérimentation "A 400M", en simulateur de vol, avec des équipages opérationnels. Dans ce dernier cas, la mise en oeuvre d'un scénario original de 'posé d'assaut" à permis de vérifier l'opérationnalité des moyens d'observation et d'évaluation de la charge de travail. Rappelons que notre sujet de thèse vise à déterminer les modalités de gestion des ressources cognitives, et plus particulièrement la redistribution dynamique des priorités. Dans ce cadre, nous nous proposons maintenant de mettre des opérateurs en situation simulée de type accidentogène, nécessitant une analyse de la situation et une prise de décision en temps contraint. Cela doit nous permettre de vérifier le positionnement des équipages selon 4 axes inspirés des de l'analyse de la littérature et des résultats obtenus au cours chapitres/ expérimentations précédents (es) :

1. Se donner du temps 'délégation à soi, dans le temps et ré-ordonnancement des priorités)
2. Augmenter ses ressources (délégation à d'autres humains ou technos)

3. Réduire les exigences de la situation (abandon ou relâcher certaines contraintes)
4. Changer les objectifs (et ainsi le rapport exigences/ressources correspondant)

Ainsi, nous avons créé un scénario sur la base d'un événement sporadique correspondant à une panne électrique totale consécutive à un foudroiement en vol. Ce type de panne fait partie des incidents les plus graves rencontrés sur ce type d'aéronef. Il met donc l'équipage en situation particulièrement critique.

La mise en situation a été menée sur le simulateur A400M de l'armée de l'air situé à Orléans. Une dizaine d'équipages opérationnels de l'Armée de l'air ainsi que de la « Royal Air force » y ont pris part.

Nous présentons dans ce chapitre nos objectifs et hypothèses sous-jacentes, la méthode et le protocole expérimental, et les résultats de cette évaluation. Les conclusions ainsi que les recommandations pour les développements futurs viendront clore ce chapitre.

II. OBJECTIFS ET HYPOTHESES

Notre objectif est de comprendre le fonctionnement et les stratégies adaptatives face aux montées brutales d'exigence de la tâche. Le premier objectif étant de s'assurer de l'existence même de ces stratégies adaptatives, le second étant de les analyser et de d'identifier les conditions de leur mise en place. Ainsi, nous pourrions déterminer leur intérêt pour une implémentation dans l'entraînement opérationnel, voire pour formaliser des recommandations de conception des futures IHM.

Les hypothèses

- H1 : il existe des stratégies adaptatives face aux montées brutales d'exigence de la tâche, d'abaissement des ressources disponibles et donc d'augmentation de la charge de travail ressentie.
- H2 : Il existe des inducteurs pour déclencher ces stratégies d'adaptation.
- H3 : Il est possible d'envisager des entraînements cognitifs à la mise en oeuvre de stratégies adaptatives.

IV. METHODE ET PLAN D'EXPERIMENTATION

Dans le cadre de ce protocole, la phase de vol choisie est la percée et l'approche. L'aéronef est un Airbus A400M. Le contexte est celui d'un atterrissage sur le terrain de Clermont-Ferrand par mauvaises conditions météorologiques.

IV. A. Description de la tâche et scenario

Les expérimentations sont réalisées dans le simulateur A400M de l'armée de l'air (BA 123, Orléans-Bricy) en coopération avec le CEAM (Figure 69).

Il est demandé aux pilotes participant d'interagir avec le cockpit comme ils en ont l'habitude dans l'exercice de leur activité. Ils doivent suivre la trajectoire d'approche et de se poser de façon adaptée à leur mission et qualification.

Les pilotes, sujets de l'étude, sont installés en place gauche (du fait de la perte de la partie droite du cockpit lors de la survenue de la panne électrique totale - délestage automatique irréversible, comme décrit ultérieurement). En place droite un second pilote joue le rôle de pilote en fonction. Un expérimentateur surveille le déroulement de l'expérimentation au sein du simulateur et assure le bon déroulement de la passation.

Dans une situation normale, le pilotage s'effectue en place droite indépendamment de la qualification des pilotes. La totalité des pilotes sont qualifiés commandant de bord.



Figure 69. Vue intérieure du Simulateur A400M (BA 123, Orléans-Bricy).

Les cartes d'approche (figure 70) et de percée (figure 71) leur ont été fournies au préalable lors du briefing mission. Lors de l'approche finale, ils sont autorisés à utiliser le guidage ILS.

Le début de percée s'effectue en conditions IMC, vol aux instruments sans visibilité, dans un front météorologique particulièrement actif avec des turbulences importantes et de très nombreux impacts de foudre.

L'avion est « juste » en pétrole, c'est à dire qu'il a le strict minimum pour pouvoir réaliser la percée et l'atterrissage directement sans possibilité de remise de gaz ou d'attente (figure 72).

L'incident intervient en début de descente en route vers le VOR de TIS qui est le futur point tournant pour s'aligner sur l'axe de piste (26) de Clermont Ferrand. A ce moment, l'équipage a fini ses procédures de début de percée à environ 15 minutes de l'atterrissage.

L'incident correspond à un foudroiement. Il a pour conséquence une panne électrique totale (EMER ELEC), seul les automatismes de plus bas niveau sont encore efficaces.

- Cet incident conduit à plusieurs conséquences d'importance diverse en fonction de la réaction de l'équipage et de ses choix de stratégie. Une des conséquences les plus importantes pour l'équipage est le demi-cockpit puisque seul le pilote place gauche (sujets de l'étude) conserve ses instruments, il y a un black-out complet sur la partie droite du tableau de bord de l'avion.
- Une autre conséquence notable est la perte du pilote automatique et l'obligation de reprendre à la main les commandes ainsi que les trims (compensateurs d'effort).
- Enfin, dernier point crucial, l'obligation d'effectuer une sortie de train en secours avant de pouvoir se poser.

LFLC/CFE **JEPPESEN** CLERMONT-FERRAND/AUVERGNE, FRANCE
 CLERMONT-FERRAND/AUVERGNE 15 AUG 14 (11-1) ILS Z or LOC Z Rwy 26

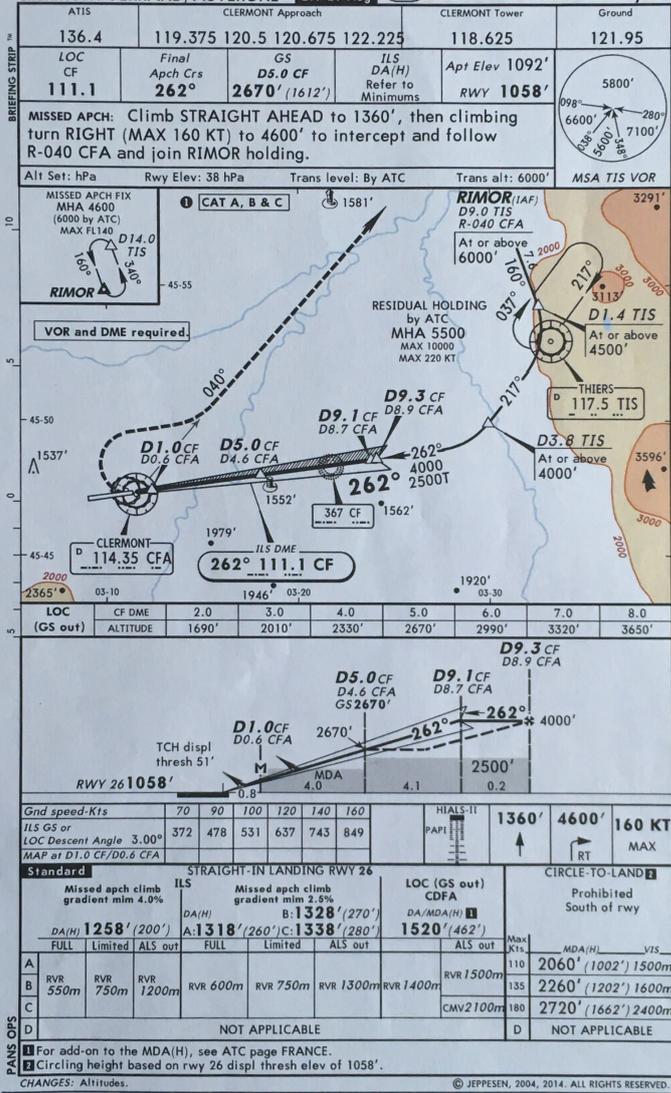


Figure 70. Carte d'approche pour un atterrissage à Clermont Ferrand piste 26.

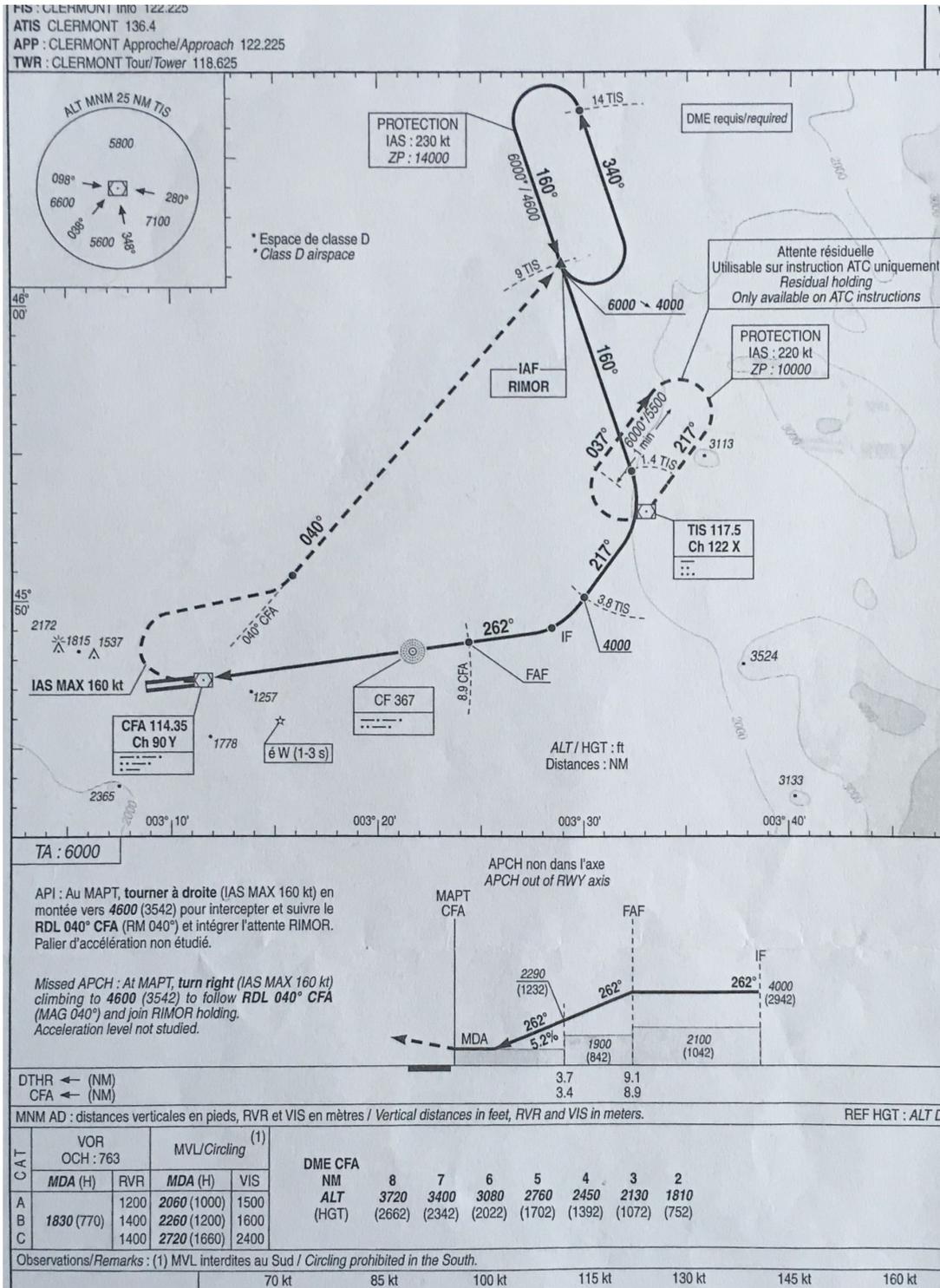


Figure 71. Fiche de percée sur Clermont Ferrand (CLF).

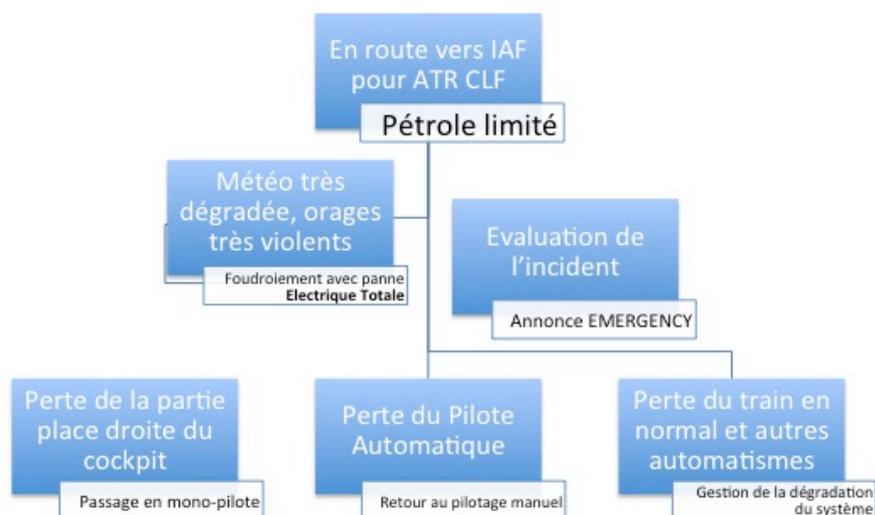


Figure 72. Scénario et principales conséquences sur le système.

Rappelons que le niveau de carburant ne permet pas une stabilisation du vol, voire une remontée en sécurité, afin de pouvoir traiter la panne. Il y a d'ailleurs un rappel « minimum fuel », au début de la percée.

Les attendus invariables de l'équipage devraient être (figure 72) :

- La déclaration de l' « EMERGENCY », procédure d'annonce d'une panne grave qui est censée donner la priorité à l'avion et l'allègement d'une partie des procédures.
- Le rappel du niveau pétrole pour la prise en compte des solutions disponibles.
- Le retour à la priorité de faire voler l'avion de façon sécurisée, FLY
- La gestion de la navigation sur la trajectoire d'approche et des conséquences de la panne et des choix associés, NAV
- Le maintien des communications avec le sol et au sein de l'équipage. Cependant, du fait des orages extrêmement violents du scénario, les communications extérieures vont être coupées, COMM.
- La gestion de toutes les conséquences secondaires de la panne sur l'action en cours, MANAGE.

Notre objectif n'est pas l'évaluation des automatismes de l'aéronef ni même de leur compréhension par les pilotes mais bien la conscience de la situation de ces derniers, la charge cognitive induite par l'activité et les éléments de prise de décision contextualisée.

Afin de maintenir les pilotes dans une boucle perception/action, favorisant l'accès aux processus cognitifs mis en jeu nous avons fait le choix d'une dégradation graduelle de la situation avec reprise en main dans le cas de la panne.

Le scénario retenu a été conçu en collaboration avec le pilote d'essai de l'armée de l'air, en charge de l'expérimentation A400M. Il repose sur une descente nominale sur l'aérodrome de Clermont-Ferrand en provenance de la haute altitude en retour de mission, pour un atterrissage en piste 26. Le scénario commence en début de descente. Il dure approximativement une quinzaine de minutes (figure 73).

- 16.00 TOP début scénario, départ IAF, 10000 ft et 230 kt
- 15.25 DESC 6000ft 1020 QHN
- 14.55 APP Check List
- 14.40 APP Check list completed
- 13.35 Dégradation météorologique
- 13.20 Minimum Fuel Announce
- 12.35 Calcul pétrole
- 11.35 Passage du point « ARSOM »
- 10.05 DESC 4000ft
- 08.35 En Route VOR TIS, apparition de la Panne (EMERELEC)
- 08.20 LOAD MASTER annonce de la boule de feu
- 07.50 Check List Panne rapide
- 07.25 Message de détresses : MAYDAY MAYDAY MAYDAY
- 07.10 Vitesse et axe en priorité, décision de prioriser Fly puis NAV
- 06.05 Arrivée sur le loc , ECAM informations
- 05.35 Calcul de la vitesse APP/ATR
- 04.35 Train ne sort pas, passage en gravité
- 04.15 Train sorti et verrouillé, 3 green
- 03.40 Trajectoire d'ATR OK
- 01.25 APP Finale+ Vi OK
- 00.00 Atterrissage CLF 26

Figure 73. Déroulement chronologique du scénario théorique.

1. Le début d'expérimentation s'effectue en route vers l'IAF (Initial Approach Fix) RIMOR, et ce à une altitude de 10000 pieds et une vitesse de 230 nœuds.
Les conditions de vol se font aux instruments dans des conditions météorologiques très dégradées, orages violents avec présence de turbulences importantes et foudroiements possibles tout le long de la trajectoire.
2. L'incident intervient en début de descente en route vers le VOR de TIS qui est le futur point tournant pour s'aligner sur l'axe de piste (26) de Clermont Ferrand.
L'incident se produit lorsque l'équipage a fini ses procédures de début de percée à environ 8 minutes approximativement de l'atterrissage.
Cette durée est compatible des actions à mener pour garantir l'atterrissage avec ce type de panne, mais avec des marges réduites et sans option de mise en attente ou de remise des gaz possibles.
3. Le scénario se conclut lorsque l'aéronef est au sol, contrôlé sur la piste 26 de l'aéroport de Clermont-Ferrand.

NB1 : Les informations sur la position de l'aéronef sont vérifiées et données avant le démarrage ainsi que le pétrole restant. Le kérosène disponible est prévu pour ne laisser aucune possibilité d'attente, ni même envisager une éventuelle remise de gaz liée à cette situation météorologique particulière.

NB2 : Suite au foudroiement et de façon concomitante avec la panne électrique totale, il y a une perte des communications avec le contrôle au sol.

NB3 : Les pilotes ont la liberté de gérer l'incident comme ils le souhaitent.

Précision sur le déroulement de la passation :

- Avant la passation, les participants sont informés verbalement, suivant un script, de la situation actuelle. La position, l'altitude, la vitesse indiquée et le cap sont donnés ainsi que le pétrole disponible de même que les conditions météorologiques sur le terrain de recueil.
- Les cartes d'approche et de percée leur ont été communiquées avant les vols et les pilotes ont pris le temps de les préparer.
- On les informe du type d'approche et de finale qu'ils doivent effectuer.
- Il leur est ensuite demandé de réaliser un briefing d'avant-descente tel qu'effectué habituellement.

Nous avons procédé à l'entretien de confrontation à l'issue immédiate de la séance en présence des 2 pilotes constituant l'équipage.

Ces entretiens ont été menés par nous-même, en présence du pilote d'essai responsable.

NB : Du fait de l'articulation et de la répartition des rôles entre le pilote en fonction (sujet qui reprend les commandes) et le pilote non en fonction (celui qui perd sa partie de cockpit) et en regard des différents binômes constitués aucune conclusion ne peut être formellement tirée des interactions entre les deux pilotes.

IV. B. Description du panel des participants

Pour cette expérimentation, 16 pilotes issus de l'Armée de l'air Air et de la Royal Air Force sont recrutés sur la base du volontariat (tableau 7). Ils ont tous de sexe masculin.

Les résultats de deux sujets sont exclus de l'analyse en raison de multiples difficultés techniques rencontrées lors des passations et ne sont pas présentés dans les résultats.

Par conséquent, le groupe final est constitué de 14 pilotes tactiques, âgés de 26 à 48 ans, cumulant entre 500 et 10 000 heures de vol ($M = x, \sigma = y$).

Deux d'entre eux sont des pilotes issus des Forces Spéciales, particulièrement le sujet britannique qui a effectué un nombre important de mission de guerre en Irak et Afghanistan, ce sont les pilotes qui présentent l'expérience la plus forte.

3 pilotes présentent une expérience faible, mais contre balancée par une expertise de terrain.

Pilote	Age (an)	Ancienneté dans la qualification (années)	Nb total d'heures de vol (h/vol)	Qualité de l'expérience de terrain (forte / moy. / faible)	Type d'expérience de terrain (variée / moy. / peu variée)	Récurrence de l'expérience de terrain (récente, peu récente, ancienne)	Nb heure de vol sur A400M (h/vol)
1	39	11,0	400	Moyenne	variée	peu récente	150
2	34	4,0	2800	Moyenne	variée	peu récente	100
3	37	1,0	3400	Faible	peu variée	peu récente	80
4	35	0,1	3350	Moyenne	variée	peu récente	60
5	38	12,0	4000	Forte	Moyenne	peu récente	30
6	33	0,3	1900	Moyenne	variée	peu récente	4
7	34	0,1	3300	Forte	variée	récente	150
8	x	x	x	x	x	x	x
9	48	20,0	10000	Forte	variée	ancienne	300
10	36	4,0	2200	Faible	peu variée	ancienne	250
11	28	0,3	1000	Forte	peu variée	récente	84
12	36	6,0	2900	Faible	peu variée	récente	250
13	35	0,6	2500	Moyenne	peu variée	ancienne	150
14	36	0,6	2500	Moyenne	Moyenne	peu récente	150
15	26	0,4	450	x	x	x	60

Tableau 5. Descriptif du panel et profils des pilotes ayant participé à l'expérimentation.

Pour des raisons logistiques et en fonction des contraintes de réservation du simulateur, les passations ont été organisées en deux sessions de 7 équipages (donc 7 pilotes sujets), à quelques mois d'intervalle.

IV. C. Méthodes prises en compte dans le suivi expérimental

IV. C. 1. Entretiens de débriefing et d'Auto-confrontation

La notion de confrontation est centrale pour en saisir la spécificité. Elle consiste à présenter aux personnes observées les traces les plus nombreuses possibles de leur comportement et à leur demander de les commenter (Theureau, 1997). La méthode comporte donc deux étapes, le suivi de l'activité (avec prise de notes et/ou enregistrement), puis la confrontation lors d'entretiens ultérieurs.

Dans notre cas, les techniques reposant sur une expression orale à voix haute pendant le déroulé du scénario expérimental ne peuvent pas être utilisés efficacement lors des séances d'essais en raison de la perturbation du participant et, finalement, l'impact qu'ils ont sur le jeu de la tâche (Nielsen & Molich, 1990). En outre, les signaux physiologiques recueillis, comme la pupillométrie, pourraient être influencé en raison de facteurs de confusion (Mandryk, 2008). Ainsi, afin d'éviter les interférences avec les réponses physiologiques et la perturbation dans la réalisation de la tâche expérimentale pendant le test, l'évaluation cognitive liée à la confrontation sera effectuée après les essais de simulation (Vermersch (1994); Balas-Chanel (2002)).

3 webcams non-invasives sont placés sur le poste de pilotage afin d'enregistrer l'état de la tâche, le comportement du pilote, les conditions de l'environnement et des ressources disponibles. En outre, différents marqueurs sont pris en note manuellement par l'expérimentateur (à savoir le comportement ou la tâche pilote des événements spécifiques) afin d'optimiser le processus de débriefing (évaluation des moments spécifiques de l'activité). L'entretien est mené par des experts HCI afin d'accompagner les pilotes à travers leurs représentations mentales de l'état de la mission (avion et l'environnement) et de son évolution au fil du temps.

IV. C. 2. Mesure de la charge cognitive

Comme précédemment dans les protocoles antérieurs, la charge cognitive est évaluée suivant deux méthodes indépendantes et croisées.

IV. C. 2. i. Mesures physiologiques : pupillométrie

L'étude du diamètre pupillaire a déjà été évoqué et présenté au cours du chapitre méthodologique 2.1.

Les modalités générales de mise en oeuvre ne sont pas différentes de celles précédemment décrites.

Dans le cadre de cette étude, nous souhaitons pouvoir effectuer des comparaisons intra-individuelles. A cette fin, il n'est pas problématique d'utiliser une mesure normalisée, à condition que le facteur de normalisation soit le même pour les variables comparées. Au sein

du simulateur où la luminosité est plus faible qu'en l'extérieur, une dilatation initiale est attendue, puis une constriction progressive par adaptation à la luminosité. Cette constriction se stabilise au bout de 40 minutes. Ainsi, contrairement aux préconisations, une seule phase de calibration par sujet servira de référence et permettra la comparaison du diamètre pupillaire lors du déroulé du scénario expérimental.

IV. C. 2. ii. Mesures subjective : NASA-TLX

L'utilisation du NASA Task Load index ayant été satisfaisante lors de l'étude préliminaire, il est de nouveau utilisé comme outil d'évaluation subjective de la charge cognitive. Il est également analysé en version pondérée (cf. chapitre 2.1 et 2.5).

IV. C. 3. Mesure de la performance

Comme indice de performance pour le premier scénario, le respect des contraintes des cartes de percée et d'approche est vérifié (Alexander & Teller, 2013) : trois contraintes d'altitude et trois de vitesse ainsi que trois de cap sont ainsi prises en compte. Le temps nécessaire à la prise de décision de reprise en main est également pris en compte.

La performance s'exprime par une rapide et précoce décision d'action, mise en œuvre selon un bon ordre de priorité. Une bonne performance est donc atteinte quand la décision est prise de se poser directement, quand le très bas niveau de pétrole est pris en compte, et lorsque les priorités entre pilotage, navigation et gestion de la panne sont bien gérées.

Une fois la décision prise, la qualité de la solution retenue est évaluée par un jury constitué d'un expert en facteur humain et d'un ancien pilote. Cette note constitue un second index de performance pour le scénario retenu.

Rappel des données recueillies :

- Les scores pondérés totaux du NASA-TLX (NTLX) ;
- Le ratio de dilatation pupillaire (DilationR) ;
- Les trois indices de performance :
 - Il est demandé aux pilotes de satisfaire l'ensemble des contraintes de la percée, moins il y a de contraintes non satisfaites, meilleure est la performance
 - Une bonne performance est atteinte lorsque l'équipage arrive à poser l'avion sans incident ou prise de risque excessive.
 - La décision et la solution mise en œuvre sont évaluées par un jury composé de deux spécialistes facteurs humains, spécialiste du domaine aéronautique ainsi que du pilote d'essai.

V. RESULTATS

Nous avons mené le traitement des données et des résultats issus de l'observation et de l'analyse de l'activité des pilotes lors de l'apparition de la panne, en collaboration le pilote d'essai, responsable de l'expérimentation coté armée de l'air. De la même façon nous avons conduit des entretiens d'auto confrontation avec les sujets.

Le tableau 8 présente de façon synthétique les comportements observés pour les différents pilotes pendant les principales étapes du scénario. NB : Première session de P1 à P7 et seconde session de P9 à P15.

Le tableau 8 propose une représentation des comportements observés chez chacun des pilotes (P1, P15) et étapes principales du scénario (19 étapes). Pour chaque occurrence un code couleur permet d'évaluer la criticité du comportement/décision du pilote (Adaptatif : bleu ; Nominale : vert ; Dégradé : saumon ; Critique : rouge).

Les 14 pilotes ont été rassemblés en trois groupes selon leur performance dans l'exécution du scénario. Le groupe 1 rassemble les pilotes ayant rempli avec succès les objectifs assignés (P1, P5, P9). Le groupe 2 rassemble les pilotes ayant réussi à finir le scénario dans des conditions dégradées (P1, P4, P7, P10, P12, P13, P14). Et enfin le groupe 3 rassemble les pilotes ayant échoué aux objectifs assignés (P3, P6, P11, P15).

Les 19 étapes du scénario ont été regroupées en 7 phases.

La phase 1(P1), du départ du scénario à la réalisation de la check-list d'approche. La phase 2 (P2), couvre de la dégradation météorologique et de l'annonce de l'alarme "FUEL" aux

calculs des futurs paramètres de vol en liaison avec le fuel restant. La phase 3(P3), couvre la période de pilotage aux instruments pour la percée jusqu'à l'allumage de l'alarme panne électrique. La phase 4 (P4), recouvre l'étape de l'annonce d'un foudroiement et d'application de check-list. La phase 5 (P5), couvre de la déclaration de détresse jusqu'au calcul des nouvelles vitesses. La phase 6 (P6), de la nécessité du passage en gravité pour la sortie du train d'atterrissage et du maintien de la trajectoire de rejointe de la finale. La phase 7 (P7), du maintien de la trajectoire finale, le maintien des bons paramètres de pente et de vitesse conduisant à un atterrissage en sécurité.

Le tableau 6 présente les comportements observés chez tous les pilotes au cours des passations.

	GR1			GR2							GR3				E
	P	P	P	P	P	P	P1	P1	P1	P1	P	P	P1	P1	
	2	5	9	1	4	7	0	2	3	4	3	6	1	5	
1 Top départ															1
2 Vols aux instruments															1
3 APP CHECKLIST COMPLETED															
4 WTH DGRATION/Minimum Fuel															E
5 MINIMUM FUEL ANNOUNCE															2
6 FUEL Calculation															
7 VOLS AUX INSTRUMENTS															E
8 Panne ELEC															3
9 Load Master Feu cargo															E
10 Check-List															4
11 Mayday Mayday Mayday															
12 Pilotage+enveloppes de VOL															E
13 Rejointe loc puis ECAM															5
14 Calcul vitesse															
15 Train sort pas, passage gravité															E
16 Train+traj OK															6
17 Trajectoire Finale OK															E
18 Pente + Vi OK															7
19 ATR															

Adaptatif	
Nominale	
Critique	
Dégradé	

Tableau 6. Représentation des comportements observés chez chacun des pilotes et étapes du scénario

Les résultats du groupe 1.

Pour ces pilotes la gestion des phases de P1 à P3 est nominale, la réponse des pilotes aux sollicitations du scénario est conforme aux comportements attendus. Pendant la phase 4, 2 des 3 pilotes (P5, P9) adoptent des stratégies adaptatives. Ils se désolidarisent des procédures recommandées (Check-list et gestion de la panne suivant l'ECAM) et se concentrent dans un premier temps sur la gestion du pilotage manuel de l'avion. La phase 5 confirme le choix

d'une stratégie adaptative pour ces 2 pilotes, ils continuent à se consacrer au pilotage manuel sans respecter les procédures habituels (déclaration de détresse repoussée et calcul grossier des prévisions des paramètres de finale). Les phases 6 et 7 sont gérées de façon quasi nominale et l'atterrissage est réussi.

Les résultats du groupe 2.

Pour ces pilotes, la gestion des 3 premières phases est nominale et identique à celle du groupe 1. La phase 4 reste nominale, sans apparition de stratégie adaptative, suite à l'apparition de la panne électrique et au foudroiement. En phase 5, le comportement de ces pilotes apparaît majoritairement dégradé voire critique pour certains. L'observation des comportements des pilotes durant cette phase a mis en évidence leurs tentatives de maîtriser un trop grand nombre de tâches simultanément : le pilotage manuel (difficulté à "trimmer" l'avion pour assurer son attitude, difficulté pour garantir l'intégrité de la trajectoire, difficulté pour gérer la panne et ses conséquences, notamment la maîtrise du calcul des vitesses). Les phases 6 et 7, correspondent à des comportements approximatifs dans la gestion de la situation amenant ces pilotes à se poser dans des conditions dégradées voire critiques (soit absence de train d'atterrissage verrouillé soit mauvaise gestion des paramètres de la finale).

Les résultats du groupe 3.

La phase 1 est nominale. Dès la phase 2, ces pilotes ne semblent pas réagir à la dégradation de leur situation (dégradation météorologique sévère et niveau de fuel critique). En phase 3 et 4, ils réagissent à l'apparition des différents incidents en se plongeant dans les procédures établies et en s'y conformant, sans contrôle effectif de l'attitude de l'avion. En phase 5, ils perdent la conscience de la situation et ils n'arrivent pas à hiérarchiser leurs actions (le pilote P3 rentre en collision avec le sol). En phase 6 et 7, les pilotes restants vont produire différentes erreurs (P15 : ne sort pas le train et il remet les gaz, P6 et P11 remettent les gaz. NB : la remise des gaz ne permettra pas une nouvelle approche puisque le fuel n'est pas suffisant).

Nous avons pu constater qu'entre les deux sessions, séparée de plusieurs mois, il y a une augmentation de l'appropriation du système, une amélioration de la conscience de situation. Ceci s'explique par les entraînements successifs en simulateur et en conditions opérationnelles auxquelles les équipages ont été confrontés pendant cette période intermédiaire.

Nous remarquons toutefois que cette meilleure appropriation ne leur permet pas de mieux réussir l'exercice qui reste très exigeant en termes de réactivité et de capacité à prioriser.

Les résultats de nos observations en cours de passation et ceux issus des entretiens font apparaître deux sous populations indépendamment du succès de la mission : ceux qui mettent en place des stratégies adaptatives et ceux qui restent sur un mode de comportement nominal cohérent avec la procédure habituelle. Les tableaux 7 et 8 permettent d'illustrer les comportements de ces deux sous-populations.

Afin de raffiner notre perception des différents types de comportements nous avons choisi de détailler les résultats d'un pilote ayant rempli les objectifs assignés par le scénario (pilote 5) et un pilote ayant échoué (pilote 15).

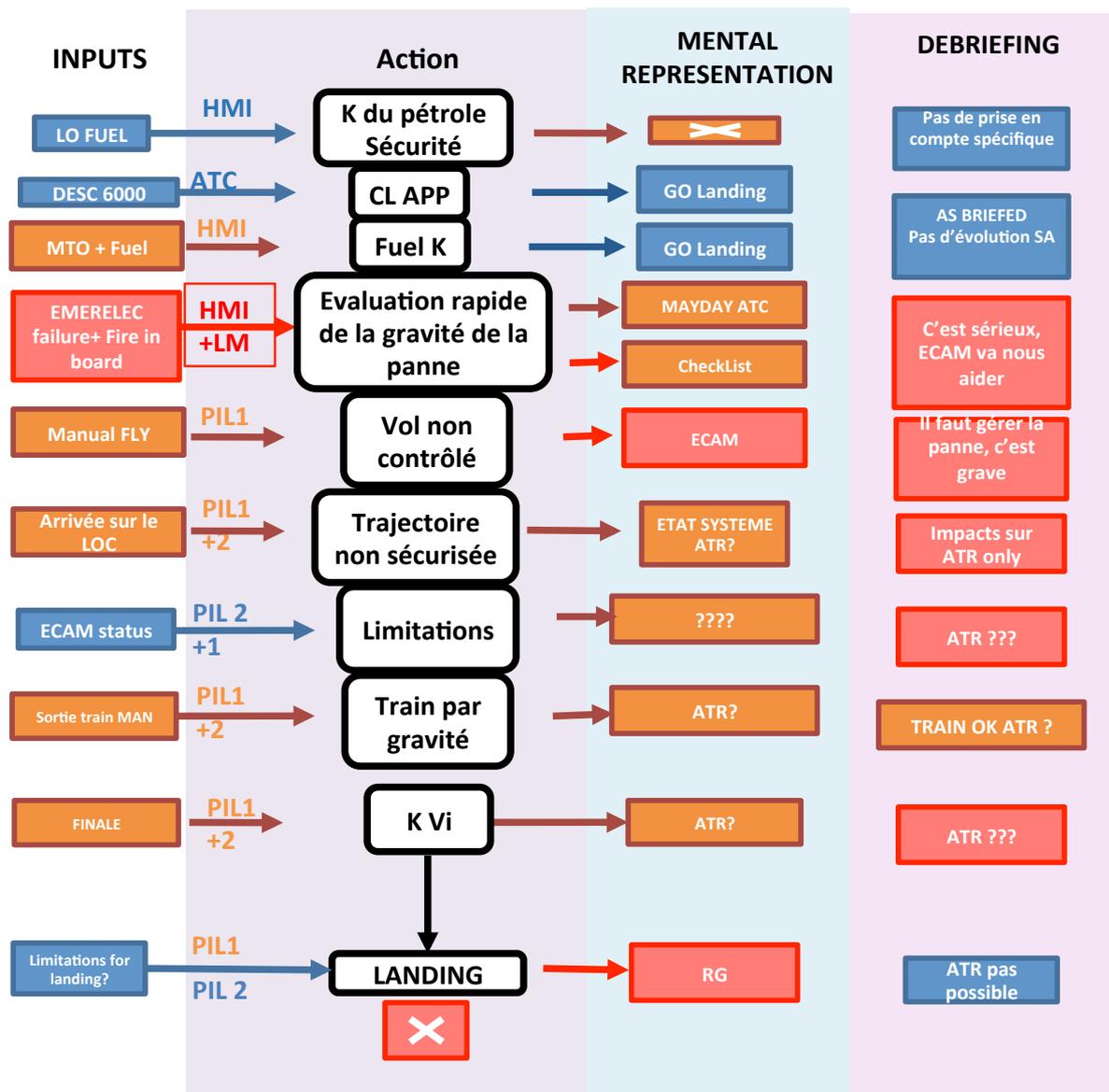


Tableau 7. Représentation des pilotes n'ayant pas de stratégie adaptative, exemple du pilote X (d'après J. Diaz-Pineda et el 2016).

Le tableau 7 permet d'illustrer les comportements de pilotes n'ayant pas développé de stratégie adaptative en prenant pour exemple le pilote 15.

La colonne « inputs » recense les différentes informations que le pilote reçoit et qui nécessiteraient une prise en compte adaptée.

L'origine de ces informations est identifiée : HMI pour information issue du système de bord, ATC pour les informations provenant du contrôle aérien, LM pour les informations provenant du mécanicien en soute, PIL 1 pour les informations en provenance du pilote sujet, PIL 2 pour les informations en provenance du second pilote. Dans ces deux derniers cas (PIL 1/PIL 2), il peut y avoir une attente de traitement associé à l'input tel un calcul, une attention ou une action spécifique.

La colonne « actions » recense les différentes actions mise en œuvre par le pilote en réponse aux « inputs ». La colonne « représentation mentale » recense la conscience de la situation à chaque étape du scénario telle qu'elle observable ou exprimée par le pilote. La colonne « débriefing » recense les explicitations données par le pilote lors de l'entretien d'auto confrontation.

Dans ce tableau nous avons inséré une évaluation de la criticité des informations, des comportements et ces représentations mentales par un code couleur. La couleur bleue exprime la normalité. La couleur orange exprime un état dégradé. La couleur rouge exprime un état critique.

L'examen de cette représentation montre que le comportement du pilote 15 correspond globalement à celui des autres pilotes du groupe 3. La phase 1 reste nominale et ne pose pas de problème de représentation pour ce pilote. Durant la phase 2 malgré des alertes de criticité concernant la météorologie et le fuel, les représentations du pilote ne sont pas affectées et il pense pouvoir se poser sans encombre. Sa conscience de la situation n'est donc pas recontextualisée en fonction de ces inputs critiques. A contrario à partir de la phase 5, la survenue de la panne électrique et du foudroiement va considérablement modifier la représentation mentale du mentale. Les données issues des entretiens d'autoconfrontation montrent une prise de conscience rapide et évolutive de sérieux à grave et pousse le pilote se replier vers les procédures ECAM, espérant que le système va lui donner des solutions pour résoudre les avaries. Ainsi nous constatons que ce pilote hiérarchise ses actions de la façon suivante : 1) comprendre la panne, 2) résoudre la panne à l'aide des indications système (ECAM), 3) revenir à des conditions de vol nominales, 4) gérer l'atterrissage final. Du point de vue expert, ce choix ne paraît pas le plus judicieux, bien qu'il corresponde aux procédures habituelles du constructeur. Dans un cas aussi critique, il faudrait inverser les priorités en revenant aux méta-règles de l'aéronautique et se concentrer en premier lieu sur le pilotage manuel de l'avion. Dans un second temps assurer la navigation : gérer les trajectoires et les

vitesse et pétrole associés. Troisièmement résoudre la panne si possible. Quatrièmement se poser. Pendant les phases 6 et 7, le pilote arrive à gérer la sortie de train mais ne maîtrise pas suffisamment les paramètres de vol pour pouvoir atterrir. Il est contraint à une remise de gaz qui met en échec la réussite de sa mission puisqu'il n'a plus assez de pétrole pour se maintenir en vol et retenter un atterrissage y compris en urgence. On note une focalisation sur la problématique de l'atterrissage dès la phase 5 (rejointe de l'approche finale) et ce jusqu'à la remise de gaz. Remise de gaz qui sera sollicitée effectivement et de façon justifiée par le second pilote (mauvaise présentation pour l'atterrissage). On constate lors des entretiens d'autoconfrontation une certaine incohérence entre la représentation mentale du pilote et les informations qui lui sont distribuées : les stimuli critiques des inputs ne génèrent pas de réaction adaptée. De la même façon, on note une divergence entre la conscience de situation et les actions en découlant : il prend conscience de son incapacité à contrôler les paramètres de vol mais il persiste à interagir avec le système (ECAM). Il n'y a pas de d'objectivation ou de gestion de la criticité ainsi que le démontrent les explications données à posteriori des actions engagées (debriefing).

Remarque générale sur le comportement des pilotes du groupe 3 auquel appartient le P15.

A priori, ils n'ont pas basculé sur un mode alterne et restent conforme à la procédure. Soient qu'ils n'aient pas intégré complètement la SA et sa temporalité (c'est le cas du P15), soit pour rester dans une zone de confort (diminution du stress) en appliquant les procédures à leur disposition.

Dans tous les cas, ils n'imaginent pas qu'il puisse y avoir un autre plan que celui qui consiste à suivre la procédure.

Malgré une forte exposition aux situations à risque pour certains, ils n'ont pas mis en place une stratégie afin de s'affranchir des règles édictées (typiquement gestion ECAM et interactions avec le pilote en place droite). Cette constatation semble mettre en évidence une forte hétérogénéité entre les expériences de missions opérationnelles. Les théâtres d'opération tant sur le plan tactique qu'environnemental génèrent des contraintes extrêmement variées. Ainsi la simple énumération du nombre de mission ne donne pas réellement d'information sur l'expérience du pilote si on n'en précise pas le contexte.

Lors de l'auto confrontation, les pilotes du groupe 3 expriment une difficulté à se détacher des attracteurs IHM pour résoudre la situation. Ces attracteurs semblent donner une certaine illusion de confort suggérant qu'il existe une façon aisée de résoudre l'incident. Il est probable que l'adhésion à cette représentation limite toute bascule sur des stratégies alternatives de type

métarègle : FLY (faire voler l'avion), NAVIGATE (assurer l'attitude et les trajectoires associées), MANAGE (gestion du système et les pannes associées), COMMUNICATE (communiquer).

Il nous faut aussi à prendre en considération la quasi impossibilité à s'extraire du traitement classique une fois qu'il est initié : soit du fait des ressources disponibles restantes ; soit en raison du cout cognitif pour une nouvelle analyse de la situation.

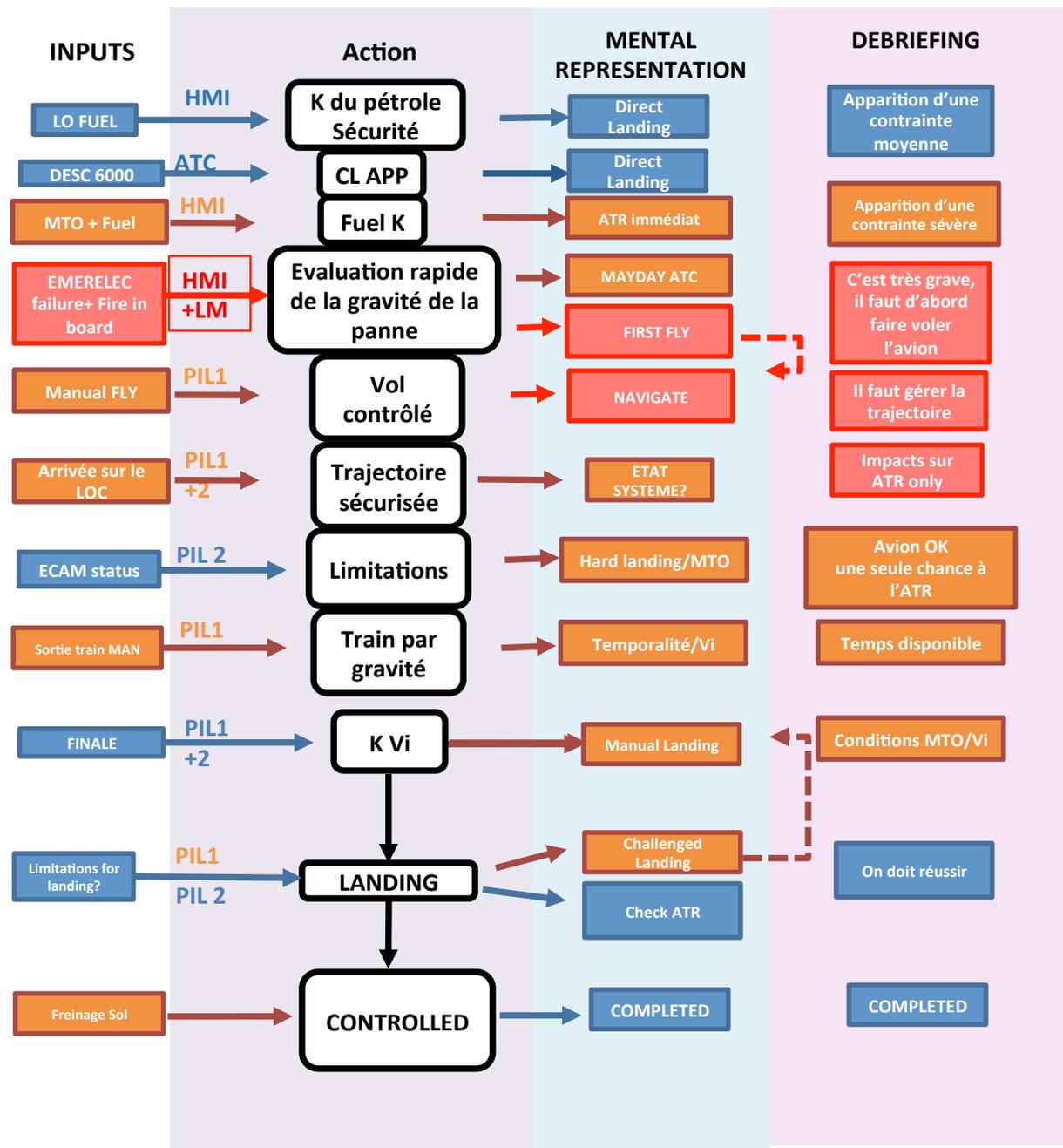


Tableau 8. Représentation des pilotes ayant développé des stratégies adaptatives, exemple du pilote 5 (d'après J. Diaz-Pineda et al 2016)

Le tableau 10 permet d'illustrer les comportements des pilotes ayant développé des stratégies adaptatives en prenant pour exemple le pilote 5. Les codes de représentation sont les mêmes que ceux utilisés pour la précédente analyse (tableau 9).

L'examen de cette représentation montre que le comportement du pilote 5 correspond globalement à celui des autres pilotes du groupe 1. La phase 1 reste nominale et ne pose pas de problème de représentation pour ce pilote bien qu'il tienne compte de l'information donnée pendant le briefing d'approche et confirmé par le système. A l'autoconfrontation il exprime une contrainte modérée à ce sujet. A la déclaration de la panne (EMER-ELEC), il décide de se concentrer sur le pilotage et il remet à plus tard la gestion des procédures et la déclaration de l' « Emergency ». La dégradation progressive des conditions et l'apparition des pannes en phase 2, 3, 4 et 5, prépare le pilote à une stratégie alternative. A l'autoconfrontation, il exprime la criticité ressentie de la situation, en particulier l'importance de la pression temporelle sur sa prise de décision. De fait, il se recentre sur les métarègles : « First Fly then Navigate ». Une fois son avion maîtrisé et sa trajectoire sécurisée, il consulte le système (ECAM). Il est à remarquer, que ce pilote adopte une gestion de l'ECAM particulièrement efficiente : il aide son co-pilote à hiérarchiser et identifier les informations pertinentes dans la procédure à dérouler. A ce stade, il exprime clairement avoir conscience qu'il n'aura droit qu'à une seule tentative pour réussir l'atterrissage. De la même façon, il exprime avoir conscience de la forte pression temporelle qui l'oblige à réussir toutes les étapes à venir du premier coup. Pendant les phases 6 et 7, il revient à une situation nominale, maîtrisée qui lui permet de gérer ses calculs et tenues de paramètre pour réaliser l'atterrissage de façon quasiment normale.

Remarque générale sur le comportement des pilotes du groupe 1 auquel appartient le P5.

- De fait, les pilotes 5 et 9 mettent en œuvre des stratégies adaptatives telles que nous cherchions à les mettre en évidence. Nous observons : que les pilotes identifient la contrainte temporelle forte comme très inductrice de la mise en œuvre d'une stratégie adaptative,
- Que cette stratégie s'appuie sur un changement d'objectif. Suite à l'apparition de la panne, il ne faut pas nécessairement résoudre le problème technique mais survivre dans l'immédiat (changement de paradigme en fonction des connaissances et du temps pour faire face à l'incident). « Je n'avais pas vraiment d'autre choix que celui-ci compte tenu de l'urgence ».

La conséquence de la mise en place de cette stratégie est le recentrage sur une échéance d'abord très courte de 10 à 30 secondes, adaptée à la dynamique de la situation, puis en fonction de son efficacité elle est étendue jusqu'à plusieurs minutes, là encore adaptée à l'état de la situation.

Une fois la décision de changement d'empans prise, les pilotes concernés deviennent beaucoup plus sereins et totalement dédiés à l'action en cours du fait d'une récupération de ressources induite par l'abaissement de leur stress.

Selon les informations obtenues pendant la phase d'autoconfrontation, il est vraisemblable que la confrontation antérieure à des événements critiques similaires a permis de développer une stratégie alternative. La stratégie classique ayant déjà échoué, ou non, dans ce type de cas. Cette expérience sert alors de catalyseur au schéma adaptatif que nous observons. On rencontre effectivement ce type d'adaptation chez des pilotes à très forte expérience aéronautique et à très forte expérience opérationnelle (mission de guerre de haute densité).

VI. CONCLUSION

Rappel des hypothèses

- H1 : il existe des stratégies adaptatives face aux montées brutales d'exigence de la tâche, d'abaissement des ressources disponibles et donc d'augmentation de la charge de travail ressentie.
- H2 : Il existe des inducteurs pour déclencher ces stratégies d'adaptation.
- H3 : Il est possible d'envisager des entraînements cognitifs à la mise en oeuvre de stratégies adaptatives.

H1 est vérifiée. Nous avons démontré qu'il existe des stratégies adaptatives qui permettent de gérer de façon alternative les situations et leurs évolutions possibles.

Les sujets ayant réussi l'exercice dans le cadre de notre expérimentation sont parmi les plus expérimentés, surtout en ce qui concerne les missions opérationnelles à haut risque et haut niveau d'imprévu (what-if). Ainsi, il y a probablement un lien entre les capacités d'adaptation stratégiques et la confrontation récurrente à des futurs possibles non prédictibles et non gérables de façon formelle (procédures, formation et entraînement).

H2 est vérifiée. Nous avons pu identifier l'existence de certains inducteurs de stratégies alternatives (évaluation de la criticité de la situation, pression temporelle, etc.) il semble que leurs actions ne soient pas spécifiques ni forcément reproductibles. De notre point de vue, l'expérience représente un facteur contributif en affinant leur capacité à interpréter les messages exprimés par les inducteurs.

H3 est vérifiée. Les résultats de nos observations démontrent que les sujets les plus entraînés et les plus expérimentés parviennent à développer les stratégies adaptatives attendues. On peut penser que la confrontation répétée à des situations à haut risque induise une capacité à s'extraire du formalisme des entraînements et des procédures afin de créer des solutions adaptées à la représentation de la situation et aux ressources mobilisables et ce par le biais de l'utilisation de métarègles.

Existe-t-il des entraînements plus adaptés pour solliciter l'émergence de ce type de comportements? Peut-être, mais le résultat ne peut être garanti. Il est à noter que la formation qui se reposerait plus sur des métarègles que sur l'application conforme de procédures devrait contribuer à l'émergence de cette adaptation.

PARTIE 3 – SYNTHÈSE & PERSPECTIVES

I. DISCUSION

Cette partie synthétise les enseignements que l'on peut tirer des expériences menées tout au long de ce travail.

Dans le cadre de notre démarche de recherche nous constatons qu'en situation critique et sous pression temporelle forte, le panel de pilote que nous avons analysé se divise en deux catégories : ceux qui mettent en place des stratégies adaptatives assurant systématiquement le succès de la mission; et ceux qui ne mettent pas en place ce type de stratégie et pour lesquels le résultat est beaucoup plus aléatoire (4 échouent, 7 se posent dans des conditions très dégradées, mettant potentiellement en péril l'intégrité du matériel et des équipages, 1 réussi la mission).

Les stratégies adaptatives mises en place s'appuient sur un changement d'objectif. Ceux qui réussissent se concentrent sur (i) le maintien en vol de l'avion sans chercher à résoudre la panne dans un premier temps et, car ils sont conscient de la gravité de la situation, (ii) la mise en place d'une stratégie de survie. La conséquence de cette stratégie est le recentrage sur des échéances d'abord très courtes d'environ 20 secondes (limitée au retour au pilotage manuel, à la compensation et au contrôle de l'avion). Puis, une fois assurée la maîtrise de l'avion, ils augmentent progressivement l'empan temporel de leur contrôle à des séquences plus longues (d'une minute environ : rejointe de l'axe en sécurité, passage en ILS manuel, paramètres de finale). Enfin, ils s'autorisent le contrôle d'un empan temporel beaucoup plus large (de plusieurs minutes) sur lequel ils vont pouvoir se consacrer à la gestion de la panne et ses conséquences en vue de l'atterrissage (consultation de l'ECAM avec forte hiérarchisation dans le choix des données retenues). Ils effectuent alors leur atterrissage dans des conditions nominales.

Ceux qui ne mettent pas en place ce type de stratégie et qui appliquent la procédure n'ont, a priori, pas d'autres plans disponibles (ils n'imaginent pas autre chose). Toutefois, nous observons que les pilotes du second groupe (150 heures de vol de plus et 10 mois plus tard) font preuve d'une meilleure conscience de la situation.

Nous avons identifié la pression temporelle comme principal inducteur de la stratégie adaptative et l'expérience comme un inducteur secondaire. En effet, dans leur grande

majorité les pilotes ayant mis en place ces stratégies sont les plus expérimentés en missions opérationnelles à haut risque et fort niveau d'imprévu. Les autres pilotes, malgré une bonne expérience des situations tactiques à risque, n'ont pas réussi à se détacher des attracteurs IHM et n'ont pu s'affranchir des règles prescrites par le constructeur ou l'exploitant (gestion de l'ECAM et du second pilote). Le suivi des procédures les maintient dans une illusion de confort pour la résolution de la situation. Ils se montrent incapables de s'extraire du traitement classique une fois qu'il est initié (vraisemblablement par persévération, F.Deshais, 2003).

Ces conclusions issues de l'approche expérimentale, montrent qu'il existe une stratégie de délégation/priorisation chez les pilotes pour faire face à la sensation d'augmentation brutale de la charge de travail (soit par augmentation des exigences soit par augmentation du stress). Cette stratégie est efficace, particulièrement chez les pilotes les plus expérimentés, pour lesquels aucun échec n'est observé.

Dans les cas les plus critiques, le maintien du contrôle la situation correspond à un comportement de type survie ("Survival Skills" en anglais) qui seul peut permettre un retour aux métarègles ("back to basics" en anglais).

Cette adaptation est mise en place par l'opérateur qui a l'expérience de l'efficacité de ce type de démarche dans les situations désespérées lorsqu'il réalise qu'il ne peut maîtriser la globalité de la situation sur un champ temporel étendu. Les conditions d'entrée en comportement de survie sont :

- 1) Une gestion métacognitive de la détection de situations exceptionnelles sans solution immédiatement applicable. "Comprendre qu'on ne comprend pas". (CRM). Comme l'illustre la figure XX, la métacognition permet de se replier sur les comportements de survie, de façon à se re-créder des ressources cognitives en les désengageant de niveaux trop hauts, basés sur les règles ou les connaissances (cf. modèle SRK de Rasmussen, (1979)).
- 2) Une acceptation de la transgression comme solution à une situation exceptionnelle. Celle-ci est dimensionnée par la pré-exposition (entraînement) à la transgression « de sauvegarde ».
- 3) Dans notre cas, des habiletés « skills de survie » aéronautiques rodées du type FNCM (entraînement et débriefing).
 - FLY (20 secondes) : tenir et compenser (acquiescement volontaire)
 - NAV for safety (20-30s) : évitement des obstacles

- NAV for Mission (2-3 mn) : rejoindre une trajectoire d'atterrissage
- COMM (3mn) (internal + management)
- MANAGE SYSTEM (4-5mn)

Les conditions de sortie du comportement de survie sont (figure 74) :

- 1) Efficacité des échéances très court terme qui permet d'envisager l'allongement des échéances suivantes.
- 2) Réintroduction progressive de paramètres secondaires permettant d'augmenter la conscience de la situation vers un modèle global plus complexe.
- 3) A terme, reprise des contraintes abandonnées initialement (et déléguées dans le temps à soi-même : communications, prise en compte de l'environnement, interactions avec le copilote, etc.).

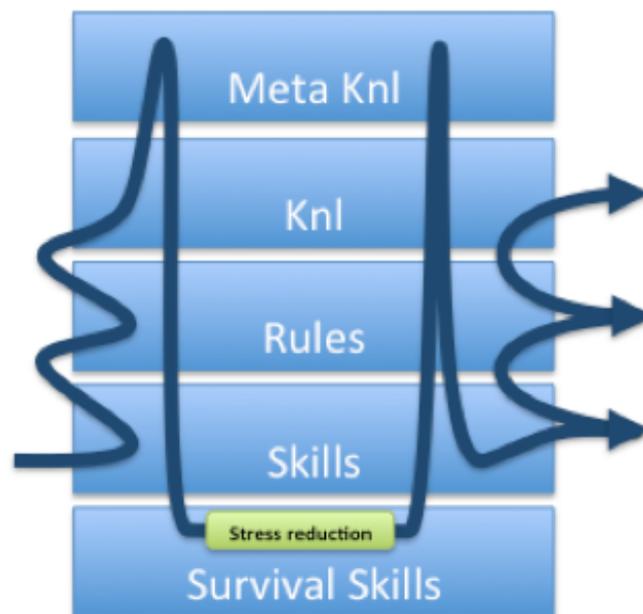


Figure 74. Modèle représentant le passage en fonctionnement "Survival Skills" dans le cas de situations exceptionnelles à partir de la métacognition (d'après le modèle SRK de Rasmussen, 1979)

Notre modèle de gestion alternative doit être générique et doit pouvoir prendre en compte aussi bien les cas critiques que les plus courants. Le modèle stratégique générique pourrait donc être décrit de la façon suivante selon 3 étapes clés (Figure 75):

- Restriction spatio-temporelle des empan de maîtrise

- Maintien en contrôle : passage au traitement des informations et des actions en série plutôt qu'en parallèle ; non pollution d'une situation potentiellement «bonne» par des actions sur un champ non contrôlable (**primum non nocere**).
- Reprise progressive d'une extension spatiale et temporelle du contrôle; reprise de la parallélisations des actions.

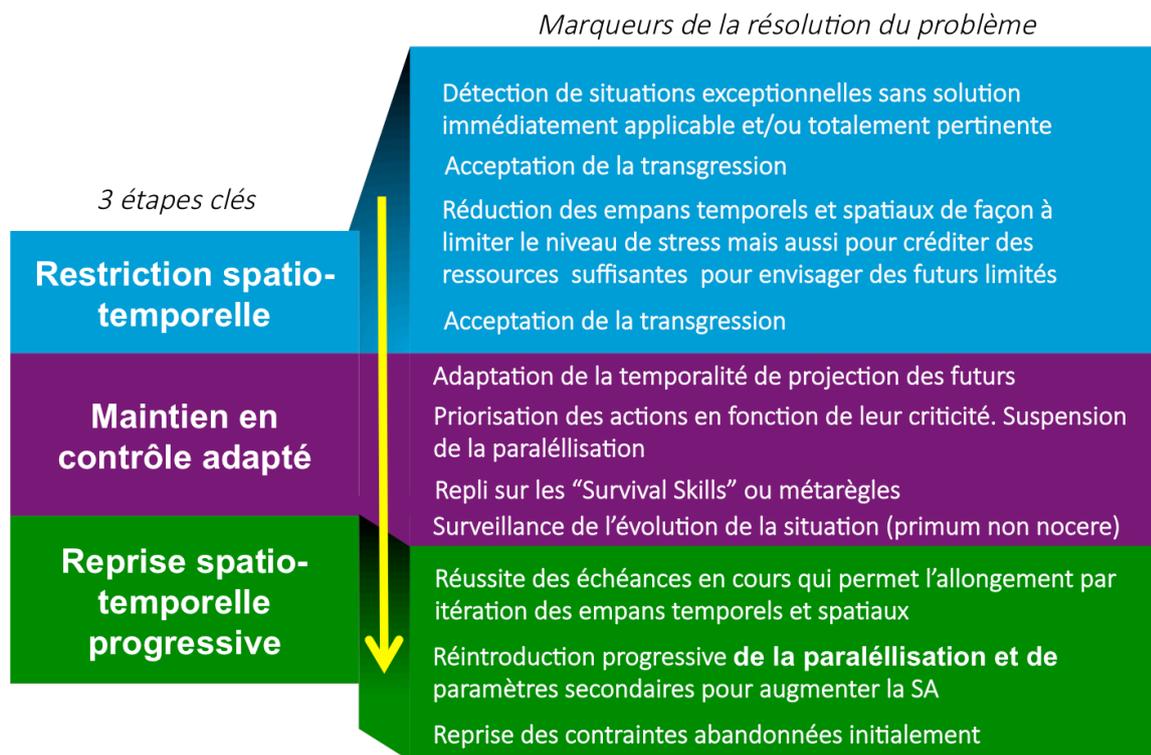


Figure 75. Modèle de mise en place de stratégie de gestion alternative en 3 étapes

L'objectif du modèle apparaît comme :

- 1) Assurer la survie immédiate,
- 2) Assurer la survie, par une limitation des empanns temporels.

Les moyens s'appuient sur la re-créditation des ressources cognitives par:

- 1) l'abaissement du niveau de stress,
- 2) l'abaissement du niveau d'informations traitées (pas de parallélisations, réduction du champ des possibles futurs).

Nous avons pu valider ce modèle auprès des pilotes ayant participé à l'expérimentation, des pilotes d'essais A400M et des pilotes de chasse du CEAM. Ces personnes se sont reconnues

dans la situation expérimentale ainsi que dans le modèle proposé. Tous convergent sur l'intérêt d'exploiter ces résultats pour faire évoluer les IHM voire créer une nouvelle IHM d'aide à la reprise de la conscience de situation et à la prise de décision.

En conclusion, certaines de ces stratégies peuvent être assistées par des technologies IHM. Ces IHM peuvent apporter une aide sur tout ou partie des points suivants.

- créditer du temps au pilote (délégation à lui-même dans le temps, ré-ordonnancement de ses priorités)
- augmenter ses ressources par délégation (incitation à déléguer au co-pilote ou à une intelligence artificielle)
- réduire les exigences de la situation (limiter les contraintes. Exemple ; se contenter d'une gestion approximative de la vitesse, mais suffisante pour assurer la sécurité)
- changer d'objectifs (et agir sur les rapports exigences/ressources qu'ils impliquent).

La section suivante est une analyse des caractéristiques d'une potentielle IHM d'assistance à la gestion de situation de crise ainsi que leur déclinaison dans des propositions de conception. Ces propositions sont des ébauches et ne sont en aucun cas des spécifications, mais elles illustrent le potentiel d'une telle IHM.

II. RECOMMANDATION

Cette IHM doit permettre au pilote de conserver le contrôle de la situation quelle que soit ses capacités. Elle doit permettre une phase de stabilisation par une diminution du stress, puis une phase de reprise « douce » de la maîtrise et du contrôle de la mission sur des dimensions spatio-temporelles plus grandes. Pour ce faire, elle doit traiter hiérarchiquement des points suivants :

- accompagner la réduction des empan temporels et spatiaux,
- prioriser les actions à mener et renforcer le retour aux basics et l'application de « l'airmanship »,
- accompagner la ré-extension des empan de contrôle temporels et spatiaux (permettre l'extension progressive de l'empan temporel de l'anticipation (cf Lini, 2013)). Il faut toutefois prendre en compte le fait que l'élargissement des empan temporels augmente le champ des possibles et par conséquent le coût cognitif de l'anticipation.

Gestion de l'apparition des différents écrans en mode spontané en Option simplification forte.

- 1) PFD simplifié apparaît sur l'écran PFD classique suite à la détection de l'événement (Figure 78)
- 2) La page Navigation Simplifiée apparaît automatiquement, une fois que le système détecte que l'avion est bien sous contrôle ou à la demande du pilote (Figure 79).
- 3) Les Etats Systèmes apparaissent sur le second écran, une fois la trajectoire sécurisée ou à la demande du pilote, sous la forme d'une liste associée à un indice de bon fonctionnement (Figure 80), le PFD est toujours en version simplifiée. Le pilote identifie l'événement et choisi de traiter l'incident.
- 4) Passage en mode résolution du problème avec en page gauche la Do-List (Figure 81). Retour à l'affichage nominal une fois l'incident résolu ou à la demande du pilote (Figure 82).



Figure 77 et 77. État nominal des affichages (PFD et ND).



Figure 78. Entrée dans le mode pilotage en priorité lors de la survenue de l'incident critique (PFD simplifié et ND neutralisé). Réalisation de FLY.



Figure 79. Entrée dans le mode navigation, une fois le pilotage assuré (PFD simplifié et échelle ND adaptée à la temporalité). Réalisation de NAVIGATE.



Figure 80. Entrée dans le mode Etat Systèmes, une fois la trajectoire sécurisée (PFD simplifié et ND en page Etat Systèmes agrégés). Réalisation MANAGE..



Figure 81. Entrée en mode page application de la solution (PFD simplifié et ND en page Do-List). Réalisation de MANAGE & COM.



Figure 82. Retour en mode standard, sortie après résolution de l'évènement (PFD et ND classiques)..

Le mode proposé correspond à une projection du système sur un terme plus lointain. Il correspond à une anticipation par le système de bord d'une criticité potentielle à venir et laisse la prérogative au pilote de choisir ou non une assistance dans le cadre d'une stratégie

alternative. Dans ce cas, la démarche de gestion du vol de type “pilot in the loop” est préservée.

Cette anticipation peut intervenir en cas de détection par le système de monitoring de l’avion d’un manque de performance dans la conduite de l’aéronef. Bien que non utilisées dans ce cadre les données de vol sont déjà disponibles à ce jour, comme par exemple le suivi des actions du pilote sur les interacteurs (détection du taux de production d’erreurs ou de non-actions symptomatiques d’un état de fatigue ou de stress avancé). Elles seront à prendre en compte dans la conception de la nouvelle IHM et de l’IA associée.

Dans d’autre cas, le système monitoring de l’avion analyse les données de vol en temps réel et les projette dans un futur adapté au contexte de la mission (pétrole, météorologie, infrastructures, plan de vol, etc.). Il propose un recentrage sur les objectifs immédiats (maintien de la maîtrise du vol), mais surtout il le complète de propositions stratégiques adaptatives (incluant une gestion des « what-if »).

Gestion de l’apparition des différents écrans en mode proposé.

Ce mode propose une présentation d’écrans adaptée à la situation en cours. La gestion des pages visualisées peut s’inspirer, soit du mode spontané en version forte ou faible soit du mode à la demande, en fonction de la criticité et de l’origine de l’incident envisagé par le système.

Le mode à la demande correspond à une requête du pilote qui demande une assistance au système. Un pilote se sentant dépassé (il se sens « derrière l’avion ») ou s’étant absenté peut demander l’activation de l’IHM pour faciliter sa compréhension de l’état actuel et la reprise de son implication dans le contrôle de l’aéronef. Dans ce cas, on part du principe qu’il n’y a pas de situation critique, ni d’alarme engagée. La réponse du système sera proposée sous forme d’étapes de briefing successives (le pilote validant la progression de l’une à l’autre) :

- une présentation des informations essentielles de contrôle de l’avion (vitesse, altitude, variomètre, horizon artificiel, énergie à disposition - type tours moteurs) à l’instar du mode spontané en version faible (on affiche l’écran simplifié sur l’écran principal (PFD). Les autres écrans sont maintenus dans leur intégrité) (Figure 77 et 77 à Figure 82).
- une présentation de l’état système (intégrité des différents systèmes avec présence ou non de panne), du bilan pétrole, du respect du plan de vol à l’instant - Figure 83.



Figure 83. Représentation de la proposition de présentation de l'état des systèmes.

Une étiquette verte correspond à un état nominal, une étiquette jaune correspond à état dégradé, une étiquette rouge correspond à un système ou sous-système en panne; les étiquettes.

- une présentation des futurs en fonction du contexte de la mission et des vulnérabilités potentielles (« what-if ») – (Figure 84 à 90 : point de situation, solutions matrice, exemple de solution, check-list, briefing, sortie.)

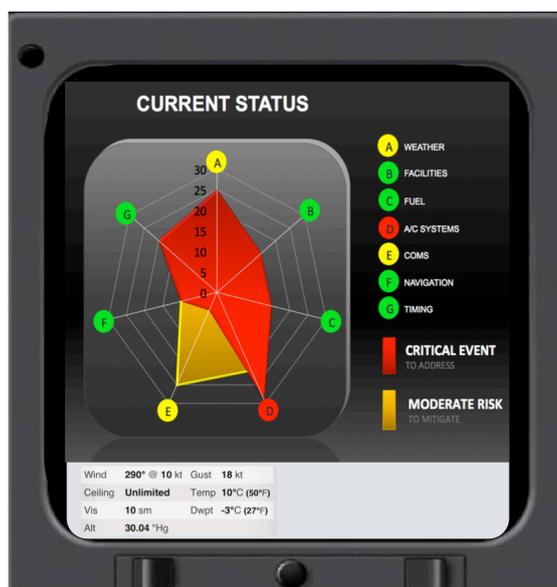


Figure 84. Représentation du point situation sous forme de diagramme radar.

Chaque dimension représente un enjeu de la mission (Rouge - événement critique ; Jaune : événement à risque modéré ; Vert - condition nominale). L'aire déterminée par le diagramme radar

	HUMAN	ENVIRON	SYSTEMS
SOL. A	LOW RISK	MODERATE RISK	CRITICAL RISK
SOL. B	SECURE	LOW RISK	MODERATE RISK
SOL. C	SECURE	SECURE	LOW RISK

Figure 85. Présentation des solutions possibles avec indication de leur criticité selon 3 paramètres : Humain, Environnement, Système.
 Les codes couleurs employés sont : Vert pour en sécurité, Bleu pour risque faible, Orange pour risque modéré et rouge pour critique.

Addressing Pro & Cont's

- Cont's**
 - Depends on the pilot's expertise
 - Weather conditions impact
 - Non Automatic Landing
- Pro**
 - Deadline et arrival compliances
 - Fuel remain adequate for diversion (alternate to plan)
 - Process with reduced holding
- Limits**
 - Additional failure in NAVAID system
 - Individuals aircrew knowledge
 - Handing-over in permanent question according status system

Figure 86. Présentation des avantages, inconvénients et des limites de la solution sélectionnée..

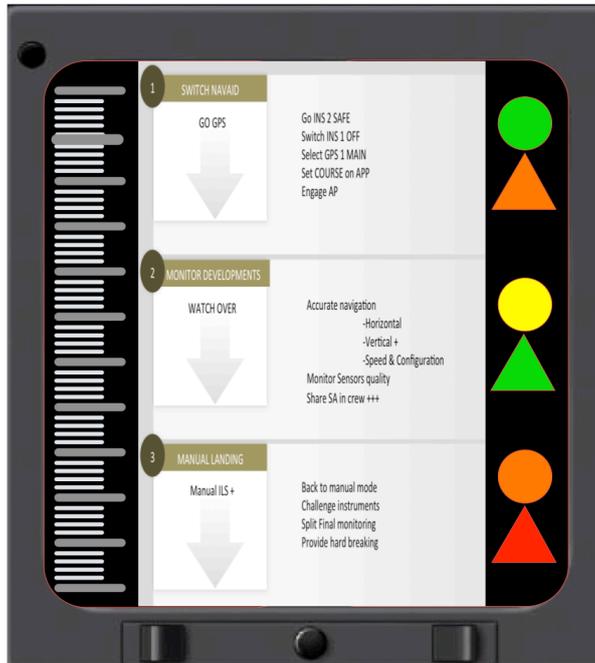


Figure 87. "Do list" avec timeline associée.

Sur le bandeau vertical gauche, l'échelle de temps est représentée de façon chronologique, si possible de façon conforme et cohérente de la temporalité de la réalisation des différentes actions à mener. Sur le bandeau vertical de droite la difficulté à réaliser l'étape de la do-list est matérialisée par les disques, alors que la criticité est représentée par les triangles. Les codes couleurs sont toujours appliqués suivant la même philosophie d'affichage. Rouge pour critique, Orange pour sévère, jaune pour modéré et Vert pour facile.



Figure 88. Briefing, présentation de la mise en action de la solution sélectionnée.

Un fond cartographique permet de visualiser la trajectoire et les alternatives possibles (dégagement et détournements). Un bandeau horizontal, situé juste en dessous représente la coupe verticale de cette trajectoire. Sur le côté gauche, une échelle de temps avec les horaires associés est représentée. Dans la partie la plus basse de l'écran, du côté gauche en version synthétique un briefing est présenté pour rappeler le plan d'action. En partie droite, on visualise sous forme de tableau les points remarquables du plan de vol et la criticité associée à ces marqueurs.

Gestion de l'apparition des différents écrans :

- 1) PFD simplifié apparaît sur l'écran PFD classique (Figure 90).
- 2) Les Etats Systèmes apparaissent sur le second écran sous la forme d'une liste associée à un indice de bon fonctionnement (Figure 91), le PFD est toujours en version simplifiée.
- 3) L'État futur apparaît sur le second écran sous la forme d'alertes textuelles correspondantes aux vulnérabilités potentielles (What-if), par exemple dans un format d'interaction de type ECAM, le PFD est toujours en version simplifiée (Figure 92)
- 4) Résolution du problème (Figure 93 à Figure 97).
- 5) Retour à la normale des différents écrans (Figure 97).



Figure 89. État nominal des affichages (PFD et ND).



Figure 90. Entrée dans le mode pilotage en priorité (PFD simplifié et ND neutralisé)..



Figure 91. Entrée en mode Etat Systèmes (PFD simplifié et ND en page Etat Systèmes agrégés).



Figure 92. Entrée en mode Projection des contraintes sur la mission (PFD simplifié et ND en page Point de Situation).



Figure 93. Entrée en mode Choix des solutions (PFD simplifié et ND en matrice de risque).



Figure 94. Entrée en mode avantages et inconvénients de la solution (PFD simplifié et ND en page avantages / inconvénients)..



Figure 95. Entrée en mode page application de la solution retenue (PFD simplifié et ND en page Do-List)..



Figure 96. Entrée en mode Briefing et réalisation (PFD simplifié et ND en page Briefing)



Figure 97. Retour en mode standard, sortie après résolution de l'évènement (PFD et ND classiques)

III. CONCLUSION

Notre démarche de recherche avait pour objectif d'étudier la gestion des ressources cognitives et la gestion des stratégies adaptatives court terme chez les pilotes tactiques.

Comme déjà précisé, cette recherche s'inscrit dans le cadre de la roadmap scientifique de l'équipe HEAL. Après une étude sur les stratégies d'anticipation (Lini, 2013 et projet ASTUTE), puis sur les stratégies de schématisation (représentation mentale structurée par abstraction/raffinement : Projet FuturSky safety), notre travail est dédié à l'analyse de la délégation et restructuration des priorités. Une dernière étape permettra d'explorer les caractéristiques de l'apprentissage et sa facilitation par la mise en œuvre d'IHM adaptées (routinisation). Cette dernière étape permettra de conclure la démarche d'ensemble sur les stratégies d'économie des ressources cognitives des pilotes et leur application dans la conception d'IHM.

Au cours de notre programme de recherche nous avons pu interagir avec les professionnels du CEAM. Au cours de ces échanges, nous avons pu démontrer l'intérêt de la démarche de recherche et d'ingénierie cognitive pour des applications opérationnelles et tactiques. Nous

avons en plus pu constater que le mode de fonctionnement de l'armée de l'air permet d'élaborer, de tester et de mettre en œuvre des solutions innovantes de façon rapide et réactive. Au-delà de la modification des interactions avec le cockpit (IHM) il apparaît clairement que la sélection et l'entraînement des pilotes sont des facteurs clés de la performance et de la gestion du risque dans l'exécution des missions. Les conclusions de notre recherche montrent la pertinence de l'entraînement à « l'airmanship » et l'intérêt de développer également la capacité des pilotes à adapter leur projection temporelle à la criticité de l'événement (empan temporel).

Comme précisé plus haut, notre démarche s'inscrit dans une démarche de recherche mais aussi d'ingénierie cognitive. Nous démontrons qu'il est possible, sur la base d'une approche théorique et fondamentale, de mettre en œuvre des processus expérimentaux qui aboutissent à des recommandations voire à des spécifications pour la conception des IHS. Contrairement à ce que l'on pourrait penser, il s'agit là d'une démarche innovante pour le milieu industriel aéronautique.

De notre point de vue, ce type de démarche, devrait être généralisée à tous les types de processus de conception et de design. En effet, sans expérimentation il est difficile de détecter les situations non contrôlables par les systèmes en mode classique. Ainsi nous suggérons de procéder en une approche duale, c'est à dire conjointement en bottom-up (de l'expérience vers la conception) et top-down (des modèles scientifiques vers la conception).

Nous avons démontré, au sein de l'équipe HEAL, la pertinence de ce modèle puisque les premiers travaux sur l'anticipation (Lini, 2013) ont validé l'utilité de la time-line par l'évaluation du prototype "ASAP" et soutenu ainsi son introduction dans le prototype de cockpit du futur "Avionics 2020". De la même façon, le résultat de notre travail de thèse pourrait donner lieu à la proposition d'une IHS spécifique d'assistance à la gestion de situation de crise pour aéronef militaire dans un premier temps. A ce jour, la plupart des données nécessaires à la mise en œuvre d'une nouvelle IHS sont déjà disponibles dans le système avion. Les enjeux à venir reposent sur notre capacité à les agréger et à les contextualiser puis en assurer l'acceptabilité et l'utilisabilité par les pilotes.

VALORISATION SCIENTIFIQUE

Conférences internationales à comité de lecture

- Christophe Bey · Sami Lini · Bernard Claverie · Jean-Marc André · Sylvain Hourlier (2015).
A new operational approach as part of Human Factors studies, the French Air Force A400M test flights lessons learned
Proceeding of AsMA Conference. Orlando, Fl pp 182-188
- Lini, S., Favier, P.-A., Hourlier, S., André, JM., Bey, C., Vallespir, B. (2015)
Influence de la profondeur temporelle d'anticipation sur la charge cognitive en environnement
Le travail humain, 78 (3), 239-256.
- Lini, S., Bey, C., Hourlier, S., Dandre, M., Bichon, B. (2015).
Posters scientifiques : Analyse comparative en eye-tracking de support textuels et graphiques
Proceeding of EPIQUE Conference. Aix en Provence. pp 237-249
- Bey, C., Lini, S., André, JM., Hourlier, S., Claverie, B. (2015)
About the added value of digital equipment in a new operational approach as part of Human Factors studies, the French Air Force A400M test flights use case.
18th International Journal of Aviation Psychology pp 377-382.
- Suhir, E., Lini, S., Bey, C., Claverie, B. (2013). Anticipation in aeronautics: probabilistic assessments. International Journal of Human Factors Modelling and Simulation, 16 (1), pp 68-85.
- Claverie, B., Barbier, T., Bey, C., Blouin, J.L. (2013)
Neotechnologies pour l'entreprise numérique « augmentée »
AIM-2012 : 17ème colloque international de l'Association Information et Management, May 2012, Bordeaux, France
- Lini, S., Bey, C., Hourlier, S., Vallespir, B., Johnston, A., Favier, P.-A. (2013).
Evaluating ASAP (Anticipation Support for Aeronautical Planning): a user-

centered case study. Proceedings of the 17th International Symposium on Aviation Psychology. Dayton, OH, pp 378-383

- Lini, S., Bey, C., Hourlier, S., Vallespir, B., Johnston, A., Favier, P.-A. (2012). Anticipation in aeronautics: exploring pathways toward a contextualized aggregative model based on existing concepts. In D. de Waard, K. Brookhuis, F. Dehais, C. Weikert, S. Röttger, D. Manzey, S. Biede, et al. (eds.), *Human Factors: a view from an integrative perspective*. ISBN: 978-0-945289-44-9, pp 157-168.
- Lini, S., Favier, P.-A., Hourlier, S., Vallespir, B., Bey, C., Baracat, B. (2012). Influence of a temporally-customizable HMI on pilots' cognitive load in civil aviation: a comparative study. Proceedings of the HCI Aero conference. Bruxelles, Belgium. pp157-168
- Bey, C., Rossignol, V. (2012). A COTS Approach to Post-WIMP Interactive Display Systems. Proceeding of SAE Conference. Phoenix, AZ. doi:10.4271/2012-01-2119
- Lini, S., Bey, C., Lecoutre, L., Favier, P.-A. (2015)
Compared evaluation of B-Alert's encephalographic workload metrics using a operational video game
Proceeding of PhyCS Conference. Orléans, Fr
- Lecoutre, L., Lini, L., Bey, C., Lebour, Q., Favier, PA. (2015)
- Evaluating EEG Measures as a Workload Assessment in an Operational Video Game Setup.
PhyCS, 112-117
- Lini, S., Bey, C., Hourlier, S., Vallespir, B., Johnston, A., Favier, P.-A. (2014).
Effect of an anticipation support HMI on commercial pilots' cognition in a simulated context
Human Computer Interaction,
- Marion, D., Bey, C., Favier, P.-A., Lini, S., Andre, J.M.,
Etude outillée de l'attention visuelle flottante dans la recherche collaborative d'informations sur grands écrans
EPIQUE 2015, pp261-268
- Taton, P., Daube, S., Wey, P., Boissier, J., Bey, C., Freiemuth, J.P., Mahé, P.

Chapitre d'ouvrage

- Lini, S., Bey, C., Hourlier, S., Vallespir, B., Johnston, A., & Favier, P.-A. (2012). Anticipation in aeronautics: exploring pathways toward a contextualized aggregative model based on existing concepts. In D. de Waard, K. Brookhuis, F. Dehais, C. Weikert, S. Röttger, D. Manzey, S. Biede, et al. (Eds.), *Human Factors: a view from an integrative perspective*.

Posters :

- Bey, C., André, J.-M., Claverie, B., & Hourlier, S. (2013). Gestion des ressources cognitives et stratégies d'adaptation chez les pilotes aéronautiques, Poster présenté aux journées scientifiques de l'IMS Bordeaux
- Bey, C., André, J.-M., Claverie, B., & Hourlier, S. (2014). Stratégies adaptatives court terme sous pression temporelle, Poster, IMS, journée Doctorales 2014.
- Lini, S., Bey, C., Lecoutre, L., Favier, P.-A. (2014)
Evaluating EEG measures as a workload assessment in an operational video game setup
International Conference on Physiological Computing Systems
- Christophe Bey · Sami Lini · Jean-Marc André · Sylvain Hourlier · Bernard Claverie ·
Added Value of Digital Equipment in Operational Human Factors Approaches : A400M Use Cases
18th International Symposium on Aviation Psychology, Dayton, OH; 05/2015

Workshops :

- Workshop Applied Cognitive Systems Engineering in Aviation – ISAP, Dayton, 2013-2015
- Human Factor Workshop – Aerospace Medicine Association (AsMA), Chicago, 2013

- Human Factors Working Group – Aerospace Medicine Association (AsHFA), Orlando, 2015
- Sciences & Technologies Applied Course - Aviation Medicine & Human Factors – NFSC, Ramstein 2013-2014-2015-2016

BIBLIOGRAPHIE

- Alexander, A. L., & Teller, T. L. (2013). Sequential required time of arrival intervals utilizing existing technologies. In *Proceedings of the 17th International Symposium on Aviation Psychology* (pp. 14–19). CONF, Dayton, OH.
- Amalberti, R. (1996). *La conduite de systèmes à risques*. Paris: Presses Universitaires de France.
- Amalberti, R. (2001). La maîtrise des situations dynamiques. *Psychologie Française*, *46*(2), 107–118. Journal Article.
- Baddeley, A. (1986). *Working memory (Vol. 11)*. Book, Oxford: Clarendon Press.
- Balas-Chanel, A. (2002). L'Entretien d'explicitation. Accompagner l'apprenant vers la métacognition explicite. *Recherches & Éducatives*, (1).
- Bartlett, F. C. (1932). *Remembering: A Study in Experimental and Social Psychology*. Cambridge University Press.
- Baumann, M., & Krems, J. F. (2009). A Comprehension Based Cognitive Model of Situation Awareness. In *Proceedings of the 11th HCI Conference: Digital Human Modeling* (pp. 192–201). San Diego, CA, USA.
- Beatty, J. (1982). Phasic Not Tonic Pupillary Responses Vary With Auditory Vigilance Performance. *Psychophysiology*, *19*(2), 167–172.
- Beatty, J. (1988). Pupillometric signs of selective attention in man. In E. Donchin, G. Galbraith, & M. L. Kietzman (Eds.), *Neurophysiology and psychophysiology: Experimental and clinical applications* (pp. 138–143). Chap.
- Beatty, J., & Lucero-Wagoner, B. (2000). The pupillary system. In *Handbook of psychophysiology* (2nd ed., pp. 142–162). Chap, New York, NY, US: Cambridge University Press.
- Berka, C., Levendowski, D. J., Lumicao, M. N., Yau, A., Davis, G., Zivkovic, V. T., Craven, P. L. (2007). EEG correlates of task engagement and mental workload in vigilance, learning, and memory tasks. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, *78*(Supplement 1), B231–B244. Journal Article.
- Bi, S., & Salvendy, G. (1994). Analytical modeling and experimental study of human

- workload in scheduling of advanced manufacturing systems. *International Journal of Human Factors in Manufacturing*, *4*(2), 205–234. Journal Article.
- Bickerstaff, E. R. (1976). *Neurological examination in clinical practice*. BOOK, Oxford: Blackwell.
- Bobrow, D. G., & Norman, D. A. (1975). Some Principles of Memory Schemata. In D. Bobrow (Ed.), *Representation and Understanding: Studies in Cognitive Science* (pp. 131–150). Palo Alto, CA: Xerox Palo Alto Research Center.
- Bolstad, C. A., Ph, D., & Endsley, M. R. (2005). Measurement of Situation Awareness in Military Operations Goals of SA Measurement, (July).
- Breton, R., & Rousseau, R. (2001). Situation Awareness: A review of the concept and its measurement. *DRDC Valcartier TR*, *220*.
- Brookhuis, K. A., & de Waard, D. (2001). Assessment of Driver's Workload: Performance and Subjective and Physiological Indexes. *Stress, Workload and Fatigue*.
- Buchanan, T. W., Etzel, J. A., Adolphs, R., & Tranel, D. (2006). The influence of autonomic arousal and semantic relatedness on memory for emotional words. *International Journal of Psychophysiology*, *61*(1), 26–33.
- 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. Journal Article.
- Cegarra, J., & Morgado, N. (2009). Etude des propriétés de la version francophone de NASA-TLX. In B. Cahour, F. Anceaux, & A. Giboins (Eds.), *EPIQUE 2009: 5ème Colloque de Psychologie Ergonomique* (pp. 233–239). CONF, Nice: France.
- Cellier, J. M. (1996). Exigences et gestion temporelle dans les environnements dynamiques. In Cellier, J.-M., V. De Keyser, & C. Valot (Eds.), *La gestion du temps dans les environnements dynamiques* (pp. 20–48). Book Section, Paris: Presses Universitaires de France.
- Chase, W. G., & Simon, H. A. (1973). The mind's eye in chess. *Visual Information Processing*, 215–281. Journal Article.
- Cleveland, W. S. (1979). Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots. *Journal of the American Statistical Association*, *74*(368), 829–836.
- Craik, F. I., & Lockhart, R. S. (1972). Levels of processing: A framework for memory research. *Journal of Verbal Learning & Verbal Behavior*. Vol, *11*(6), 671–684. Journal Article.
- Crognier, L., & Fery, Y.-A. (2007). *40 ans de recherches sur l'anticipation en tennis :*

- une revue critique*. BOOK, Louvain-la-Neuve, Belgique: De Boeck Université.
- Denecker, P. (1999). Les composantes symboliques et subsymboliques de l'anticipation dans la gestion des situations dynamiques. *Le Travail Humain*, 62(4), 363–385.
- Diaz-Pineda, J., Hourlier S., & Andre J.M. (2016). Pilot's mental representation evolution and the analysis of their impact on decision making: a new approach. Human Engineering & Expertise Network (HE2net) Annual Workshop, 21-22 September, Bordeaux.
- Endsley, M. R. (1993). A survey of situation awareness requirements in air-to-air combat fighters. *The International Journal of Aviation Psychology*, (776112453).
- Endsley, M. R. (1995). Direct measurement of situation awareness in simulations of dynamic systems: Validity and use of SAGAT and Measurement of Situation Awareness.
- Endsley, M. R., Aircraft, N., & Hawthorne, C. A. (1988). Situation awareness global assessment technique (SAGAT) (pp. 789–795). Conference Proceedings.
- Endsley, M. R., Selcon, S. J., Hardiman, T. D., & Croft, D. G. (1998). A comparative analysis of SAGAT and SART for evaluations of situation awareness. In *Proceeding of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 1, pp. 82–86). CONF, SAGE Publications.
- Endsley, M., Sollenberger, R., & Stein, E. (1999). The use of predictive displays for aiding controller situation awareness. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 43, pp. 51–55). Conf, SAGE Publications.
- Ericsson, K., & Kintsch, W. (1995). Long-term working memory. *Psychological Review*.
- Friedman, W. (1990). About time: Inventing the fourth dimension. Journal Article.
- Gaonac'h, D., & Larigauderie, P. (2000). *Mémoire et fonctionnement cognitif: la mémoire de travail*. Book, A. Colin.
- Gibson, E. J. (1982). The concept of affordances in development: The renaissance of functionalism. In *The concept of development: The Minnesota symposia on child psychology* (Vol. 15, pp. 55–81). CONF, Lawrence Erlbaum Associates Inc Hillsdale, NJ.
- Gopher, D. (1986). In defence of resources: On structures, energies, pools and the allocation of attention. *Energetics and Human Information Processing*, 353–371. Journal Article.
- Hancock, P. A., & Caird, J. K. (1993). Experimental evaluation of a model of mental workload. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 35(3), 413–429. Journal Article.
- Hancock, P. A., & Szalma, J. L. (2002). On mental resources and performance under stress.

US Army Research Office, MURI-OPUS. White Paper.

- Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. *Human Mental Workload*, *1*, 139–183. Chap.
- Hess, E. H. (1965). Attitude and Pupil Size. *Scientific American*, *212*(4), 46–54.
- Hess, E. H. (1975). *The Tell-Tale Eye: How Your Eyes Reveal Hidden Thoughts and Emotions*. BOOK, New York: Van Nostrand Reinhold.
- Hoc, J.-M., & Amalberti, R. (2007). Cognitive Control Dynamics for Reaching a Satisficing Performance in Complex Dynamic Situations. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, *1*(1), 22–55.
- Hoc, J.-M. M. (1987). *Psychologie cognitive de la planification*. Book, Presses Universitaires de Grenoble.
- Hoc, J.-M. M., & Nguyen-Xuan, A. (1987). Les modèles informatiques de la résolution de problème. *J. Piaget Mounoud, P., Bronckart, J.-P.(Eds.), Psychologie*, 1712–1756. Journal Article.
- Hoc, J. M., & Amalberti, R. (1994). Diagnostic et prise de décision dans les situations dynamiques. *Psychologie Française*, *39*(2), 177–192. Journal Article.
- Hollnagel, E. (1998). Context, cognition and control. In *Co-operative process management, cognition and information technology* (pp. 27–52). Book Section.
- Hollnagel, E. (2003). Cognition as control: A pragmatic approach to the modelling of joint cognitive systems. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. Journal Article.
- Huttenlocher, J., Hedges, L. V., & Prohaska, V. (1992). Memory for day of the week: A 5+ 2 day cycle. *Journal of Experimental Psychology: General*, *121*(3), 313–325.
- Kahneman, D. (1973). *Attention and effort*. Book, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Kahneman, D., & Beatty, J. (1966). Pupil diameter and load on memory. *Science*, *154*(3756), 1583–1585. Journal Article.
- Kahneman, D., & Tversky, A. (1973). On the Psychology of Prediction. *Psychological Review*, *80*(4), 237–251. Journal Article.
- Kintsch, W. (1998). *Comprehension: A paradigm for cognition*. Cambridge, MA: University Press.
- Kirlik, A., & Strauss, R. (2006). Situation awareness as judgment I: Statistical modeling and quantitative measurement. *International Journal of Industrial Ergonomics*, *36*(5), 463–474.

- Klein, G. A., Orasanu, J., Calderwood, R., & Zsombok, C. E. (1993). *Decision making in action: Models and methods*. BOOK, Norwood, NJ: Ablex Publishing Co.
- Lancry, A. (2007). *Incertitude et stress* (Vol. 70). BOOK, Presses Universitaires de France.
- Larkin, J. H., & Reif, F. (1979). Understanding and Teaching Problem-Solving in Physics. *European Journal of Science Education*, *1*(2), 191–203. Journal Article.
- Leplat, J., & Rocher, M. (1985). Ergonomie du contrôle de processus en marche simultanée : un cas dans l'industrie biochimique. *Psychologie et Education*, *9*(1–2), 5–26. Journal Article.
- Lindsay, P. H., Norman, D. A., & Jobin, R. (1980). *Traitement de l'information et comportement humain: une introduction à la psychologie*. Book, Editions Etudes vivantes.
- Lini, S. (2013). *L'anticipation et sa représentation dans les IHS en aéronautique civile*. Bordeaux 1.
- Lini, S., Favier, P.-A., Hourlier, S., Vallespir, B., Bey, C., & Baracat, B. (2012). Influence of a temporally-customizable HMI on pilots' cognitive load in civil aviation: a comparative study. In *Proceedings of the HCI Aero conference*. CONF, Bruxelles, Belgium.
- Mandryk, R. L. (2008). Physiological measures for game evaluation. *Game Usability: Advice from the Experts for Advancing the Player Experience*, 207–235.
- Michon, J. A. (1985). The complete time experience time experience. In J. A. Michon & J. L. Jackson (Eds.), *Time, mind and behavior* (pp. 20–52). Heidelberg: Springer Verlag.
- Michon, J. A. (1990). Implicit and explicit representations of time. *Cognitive Models of Psychological Time*, 37–58. Journal Article.
- Michon, J. A. (1993). Concerning the time sense: The seven pillars of time psychology. *Psychologica Belgica*, *33*(2), 329–345. Journal Article.
- Monod, H., & Kapitanianak, B. (2003). Ergonomie. 2 éd. *Paris: Editions Masson*.
- Moray, N. (1967). Where is capacity limited? A survey and a model. *Acta Psychologica*, *27*, 84–92. Journal Article.
- Mundutéguy, C., & Darses, F. (2007). Perception et anticipation du comportement d'autrui en situation simulée de conduite automobile. *Le Travail Humain*, *70*(1), 1–32.
- Navon, D., & Gopher, D. (1979). On the economy of the human-processing system. *Psychological Review*, *86*(3), 214–255. Journal Article.
- Nielsen, J., & Molich, R. (1990). Heuristic evaluation of user interfaces. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems: Empowering people* (pp. 249–256). CONF, ACM.

- Norman, D. A., & Bobrow, D. G. (1975). On data-limited and resource-limited processes. *Cognitive Psychology*, 7(1), 44–64.
- Norman, D. A., & Shallice, T. (1980). *Attention to Action: Willed and Automatic Control of Behavior (Technical Report No. 8006)*. California University, La Jolla. Center for Human Information Processing.
- Otmani, S. (2005). Activité électroencéphalographique au cours de la conduite automobile simulée: influence de l'âge du conducteur, du moment de la journée et de la privation préalable de sommeil. DISS, Strasbourg 1.
- Palinko, O., Kun, A. L., Shyrovkov, A., & Heeman, P. (2010). Estimating cognitive load using remote eye tracking in a driving simulator. In *Proceedings of the 2010 symposium on eye-tracking research & applications* (pp. 141–144). CONF, ACM.
- Pew, R. W. (2000). The state of situation awareness measurement: Heading toward the next century. *Situation Awareness Analysis and Measurement*, 33–47.
- Piaget, J. (1952). *Naissance de l'intelligence chez l'enfant*. Book, International Universities Press.
- Piaget, J. (1975). *L'équilibration des structures cognitives: problème central du développement*. Book, Presses Universitaires de France, Paris.
- Piaget, J., & Buscaglia, M. (1967). *Biologie et connaissance: essai sur les relations entre les régulations organiques et les processus cognitifs*. Gallimard Paris.
- Qiyuan, J., Richer, F., Wagoner, B. L., & Beatty, J. (1985). The Pupil and Stimulus Probability. *Psychophysiology*, 22(5), 530–534.
- 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. Journal Article.
- 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*, (3), 257–266.
- Rasmussen, J. (1986). A cognitive engineering approach to the modelling of decision making and its organization. In *Information processing and human-machine interaction*. Conference Proceedings.
- Reason, J. (1990). Human error. Generic, Cambridge University Press.
- René, A. (1996). La conduite des systèmes à risques. *Paris, PUF [2e Édition: 2001]*.
- Reynolds, H. (2006). Modeling the Air Traffic Controller's Cognitive Projection Process. PhD Thesis, Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology.

- Richard, J.-F. (1990). Les activités mentales. Generic, Armand Colin, Paris.
- Robinson, J. A. (1986). Temporal reference systems and autobiographical memory. In D. C. Rubin (Ed.), *Autobiographical memory* (pp. 159–188). New York: US: Cambridge University Press.
- Rousseau, R., Tremblay, S., & Breton, R. (2004). Defining and modeling situation awareness: A critical review. *A Cognitive Approach to Situation Awareness: Theory and Application*, 3–21.
- Sacerdoti, E. D. (1977). *A structure for plans and behavior*. Elsevier Publishing Company.
- Salmon, P. M., Stanton, N. A., Walker, G. H., Baber, C., Jenkins, D. P., McMaster, R., & Young, M. S. (2008). What really is going on? Review of situation awareness models for individuals and teams. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 9(4), 297–323.
- Schulz, C. M., Schneider, E., Fritz, L., Vockeroth, J., Hapfelmeier, A., Wasmaier, M., ... Schneider, G. (2011). Eye tracking for assessment of workload: a pilot study in an anaesthesia simulator environment. *British Journal of Anaesthesia*, 106(1), 44–50.
- Sciarini, L. W., Grubb, J. D., & Fatolitis, P. G. (2014). Cognitive State Assessment Examination of EEG-based Measures on a Stroop Task. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 58, pp. 215–219). CONF, SAGE Publications.
- Simon, H. A. (1982). *Models of bounded rationality: Empirically grounded economic reason* (3rd ed., Vol. 2). Cambridge, MA: MIT press.
- Smith, K., & Hancock, P. A. (1995). Situation awareness is adaptive, externally directed consciousness. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 37(1), 137–148.
- 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(2), 249–256.
- Sperandio, J. C. (1984). La variation des activités opératoires associée aux variations de la charge de travail. In *L'ergonomie du travail mental* (pp. 98–100). Book Section, Masson.
- Stanners, R. F., Coulter, M., Sweet, A. W., & Murphy, P. (1979). The pupillary response as an indicator of arousal and cognition. *Motivation and Emotion*, 3(4), 319–340. Journal Article.
- Strater, L., & Endsley, M. R. (2000). SAGAT-A situation awareness measurement tool for commercial airline pilots. ... *Performance, Situation Awareness, and ...*, (1998), 2000.

- Szulewski, A., Roth, N., & Howes, D. (2015). The Use of Task-Evoked Pupillary Response as an Objective Measure of Cognitive Load in Novices and Trained Physicians: A New Tool for the Assessment of Expertise. *Academic Medicine*, *90*(7), 981–987.
- Tanida, K., & Pöppel, E. (2006). A hierarchical model of operational anticipation windows in driving an automobile. *Cognitive Processing*, *7*(4), 275–287.
- Tricot, A. (n.d.). La régulation de la charge cognitive: un nouveau point de vue.
- Tryon, W. W. (1975). Pupillometry: A Survey of Sources of Variation. *Psychophysiology*, *12*(1), 90–93.
- Tulving, E. (1972). Episodic and semantic memory. In E. Tulving & W. Donaldson (Eds.), *Organization of memory*. Oxford England: Academic Press.
- Valax, M. F. (1986). Cadre temporel et planification des tâches quotidiennes: étude de la structure des plans journaliers chez les agriculteurs. Thèse de Doctorat, Université de Toulouse Le Mirail.
- Varela, F. J., Thompson, E. T., & Rosch, E. (1992). *The Embodied Mind: Cognitive Science and Human Experience*. BOOK, The MIT Press. Retrieved from
- Vergnaud, G. (1985). Concepts et schèmes dans la théorie opératoire de la représentation. *Psychologie Française*, *30*(3–4), 245–251.
- Vermersch, P. (1994). L'entretien d'explicitation.
- Vidulich, M., Dominguez, C., Vogel, E., & McMillan, G. (1994). *Situation awareness: Papers and annotated bibliography* (RPRT). DTIC Document.
- Wickens, C. D. (1984). Processing resources in attention. In R. Parasuraman & R. Davies (Eds.), *Varieties of attention* (pp. 63–102). Book Section, New York: Academic Press.
- Wickens, C. D. (2008). Multiple Resources and Mental Workload. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *50*(3), 449–455. <http://doi.org/10.1518/001872008x288394>
- Wickens, C. D., Gordon, S. E., & Liu, Y. (2004). *An introduction to human factors engineering*. Book, Pearson Prentice Hall Upper Saddle River, NJ.
- Wickens, C. D., & Hollands, J. G. (2000). *Engineering psychology and human performance* (2nd ed.). BOOK, New Jersey: Prentice Hall.
- Wierwille, W. W., & Casali, J. G. (1983). A validated rating scale for global mental workload measurement applications. In *Proceeding of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meetin* (Vol. 1, pp. 129–133). SAGE Publications.
- Yerkes, R. M., & Dodson, J. D. (1908). The relation of strength of stimulus to rapidity of habit-formation. *Journal of Comparative Neurology and Psychology*, *18*(5), 459–

482. Journal Article.