



**HAL**  
open science

# Élaboration de méthodes de prise en compte et l'étude des représentations des opérateurs pour la conception et l'amélioration d'Interfaces Homme Système (IHS).

Théodore Letouze

## ► To cite this version:

Théodore Letouze. Élaboration de méthodes de prise en compte et l'étude des représentations des opérateurs pour la conception et l'amélioration d'Interfaces Homme Système (IHS).. Psychologie. Université de Bordeaux, 2021. Français. NNT : 2021BORD0142 . tel-03282453

**HAL Id: tel-03282453**

**<https://theses.hal.science/tel-03282453>**

Submitted on 9 Jul 2021

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

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

**DOCTEUR DE  
L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX**

ÉCOLE DOCTORALE DES SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGÉNIEUR  
SPÉCIALITÉ INGÉNIERIE COGNITIVE

Par Théodore Letouzé

**Élaboration de méthodes de prise en compte des  
représentations des opérateurs pour la conception et  
l'amélioration d'Interfaces Homme Système (IHS)**

Sous la direction de : Jean-Marc ANDRE

Soutenance le 07/05/2021

Membres du jury :

Mme. SEMAL, Catherine

Professeure – Bordeaux INP-ENSC, Talence

Présidente du jury

M. CEGARRA, Julien

Professeur – Université Champollion, Albi

Rapporteur

M. FERRARI, Vincent

Chargé de recherche (HDR) – CREA, Salon de Provence

Rapporteur

Mme. LESPINET-NAJIB, Véronique

Maitre de conférences (HDR) – Bordeaux INP-ENSC, Talence

Examinatrice

Mme. CRENO, Lisa

Docteure – Ersya, Mérignac

Examinatrice

M. ANDRE, Jean-Marc

Professeur – Bordeaux INP-ENSC, Talence

Directeur



# RÉSUMÉ

## **Élaboration de méthodes de prise en compte des représentations des opérateurs pour la conception et l'amélioration d'Interfaces Homme Système (IHS)**

L'objectif de cette thèse est une étude des processus de prise de décision en environnement dynamique complexe et temps contraint, appliquée à l'aéronautique (pilotes d'aviation civile).

Nous avons débuté notre approche par une analyse élargie de la littérature. Ce travail nous a permis de : préciser les spécificités liées aux conditions environnementales (incertitude, risque, résilience) ; étudier les capacités cognitives mises en jeu dans le cadre d'une situation dynamique (attention, mémoire, ressources cognitives et modélisation, planification) ; définir les processus de prise de décision (conscience de la situation, représentation mentale, théorie de l'esprit).

Nous avons abouti à la conclusion que la prise de décision s'appuie sur une représentation mentale intériorisée du monde. Cette représentation repose sur des expériences passées et leur structuration dans la mémoire, de manière explicitée mais aussi inconsciente.

À partir de ces résultats, nous avons donc cherché à mettre en œuvre une méthode permettant d'analyser à la fois ces éléments conscients de la représentation mentale de la situation pour les pilotes d'aéronefs, mais également d'en explorer les aspects tacites.

L'étude de la littérature, ainsi que notre expérience issue d'études antérieures ou connexes, nous ont dirigés vers les méthodes issues de la psychologie, comme les entretiens d'auto-confrontation. C'est sur cette base que nous avons conçu une méthode d'analyse de la représentation mentale dédiée aux problématiques de l'interaction homme-système. Cette méthode baptisée MERIA, pour Mental Representation Impact Analysis, permet de réaliser une chronique de l'activité décisionnelle donnant notamment accès aux aspects implicites de la prise de décision.

Cette méthode a été éprouvée sur un panel de 30 pilotes de ligne et 3 types d'interfaces de cockpit d'avion de ligne (base A320). Ces expérimentations ont été réalisées en deux séries expérimentales dans le cadre du projet européen Horizon 2020 « Future Sky Safety – Human Performance Envelope », et se poursuivent dans le cadre du projet CO2TEAM (Cleansky2). Le but

de ces projets est de réaliser une évaluation et une modélisation des différents paramètres qui entrent en compte dans la mesure de la performance d'un opérateur en interaction avec un système.

Grâce à la méthodologie MERIA, nous avons pu valider que certaines interfaces ou modalités d'interaction favorisaient des représentations mentales plus pertinentes/performantes au regard des situations d'usage.

*Le présent travail s'appuie sur les travaux réalisés dans le cadre du programme Future Sky Safety, financé par le programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union Européenne au titre de l'accord de subvention n° 640597.*

**Mots clés :** Représentation mentale ; Conscience de situation ; Sécurité aérienne ; Représentation structurées ; Interaction Hommes-Machines.

---

# ABSTRACT

## **Development of methods designed to investigate operator representations for the conception and optimization of Human-System Interfaces (HSI).**

The objective of this thesis is a study of decision-making processes in complex dynamic and time-constrained environments, applied to aeronautics (civil aviation pilots).

We started our approach with a broad analysis of the literature. This work allowed us to: specify the specificities linked to environmental conditions (uncertainty, risk, resilience); study the cognitive capacities brought into play in a dynamic situation (attention, memory, cognitive resources and modelling, planning); define the decision-making processes (situation awareness, mental representation, theory of mind).

We have concluded that decision-making is based on an internalized mental representation of the world. This representation is based both on past experiences and their structuring in the memory in an explicit but also unconscious way.

On the basis of these results, we therefore sought to implement a method that would allow us to analyse both these conscious elements of the mental representation of the situation for aircraft pilots, but also to explore its tacit aspects.

The study of the literature, as well as our experience from previous or related studies, directed us towards methods derived from psychology such as self-confrontation interviews. It is on this basis that we have designed a method of mental representation analysis dedicated to the problems of human-system interaction. This method, called MERIA for Mental Representation Impact Analysis, allows us to create a chronicle of the decision-making activity giving access to the implicit aspects of decision-making.

This method has been tested on a panel of 30 airline pilots and 3 types of airliner cockpit interfaces (based on the A320). These experiments were carried out in two experimental series as part of the European Horizon 2020 "Future Sky Safety - Human Performance Envelope" project and are continuing as part of the CO2TEAM (Cleansky2) project. The aim of these projects is to

carry out an evaluation and modelling of the various parameters that are considered in measuring the performance of an operator in interaction with a system.

Thanks to the MERIA methodology, we were able to validate that certain interfaces or interaction modalities favoured more relevant/performing mental representations with regard to the situations of use.

*The results presented here are based on the work carried out under the Future Sky Safety program, funded by the Horizon 2020 research and innovation program of the European Union under Grant Agreement No 640597.*

**Keywords:** Mental representation ; Structured representation ; Air safety ; Situation awareness ; Human-System Interface; Human Factor.

## **Equipe Cognitive & Ingénierie Humaine**

Laboratoire de l'Intégration du Matériau au Système

IMS – UMR CNRS 5218

Université de Bordeaux

109 Avenue Roul, 33405 Talence.

# REMERCIEMENTS

Je souhaite commencer par remercier mon directeur de thèse, Jean-Marc André pour son soutien. Merci également pour les opportunités qu'il m'a offertes.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance au professeur Julien Cegarra et Vincent Ferrari pour avoir accepté d'être rapporteurs de mon travail et d'avoir participé à mon jury de thèse.

À Catherine Sémal, Véronique Lespinet-Najib et Jérôme Saracco, merci pour votre aide le moment venu.

À ceux qui m'ont convaincu de commencer cette thèse en me disant que c'était facile, qu'en 2 ans ce serait fini, et que j'ai eu la naïveté de croire, Sylvain Houliers et Jaime Diaz-Pineda. Mais leur soutien gastronomique a été indéniable.

À ceux qui étaient présents dès le début quand je me suis lancé dans cette aventure, Aurélie, Marie, Charles-A, Amanda, Florent, Florian et celui à qui je voudrais adresser un remerciement sincère, Pierre.

À Gilles Desclaux pour le vin, Damien Marion, le rhum et Baptiste Prebot, le gin.

Aux étudiants de l'ENSC, Vincent Bernard, Marie Sille, Élise Thiolier et Léa Le Moal, merci pour le sérieux de votre investissement dans les stages et projets. Vous avez fait du beau travail.

À tous ceux passés par le bureau des doctorants, mais principalement Marie, Fanny, Hélène, Floriane et Delphine.

À Elsa, pour ses relectures assidues.

À Marwin et Paul mes compères, pour leurs conseils, plus (Marwin) ou moins (Paul) pertinents.

À mes amis de toujours Marion, Charline, Manon, Nicolas et Damien.

À tous ceux qui ont toujours été ici pour me soutenir, Sylvie, Aurélien, Coline, Patrice, et aussi Agnès, Didier et Corentin. Et ceux qui étaient là-bas, Arnaud, Maxime, Denyse.

À Lisa qui a toujours été là pour moi, du premier jour (presque) au dernier, dans les moments de doute, quand j'étais en difficulté, pour me remotiver et me rassurer. Maintenant que j'ai terminé, ta tâche est accomplie, tu peux continuer ta route vers des horizons pluvieux.

À Morgane qui a été tous les jours à mes côtés pendant ces 13 dernières années, pour partager toutes mes peurs, mes doutes, mais aussi mes bonheurs et succès dont je peux dire qu'elle en est, en partie, l'architecte.

Merci.

Pour finir, à toi, cher lecteur, merci de prendre le temps d'ouvrir ce document, même si ce n'est que pour y récupérer une source (Prebot, 2020) ...

Je tiens à remercier une nouvelle fois Jean-Marc André pour l'énergie qu'il a investie au cours de ces 5 dernières années, pour m'empêcher de flancher lors de mes moments de faiblesse, pour me guider lorsque j'avais des doutes et me ramener à chaque instant sur le droit chemin : celui de la salade verte.

Théodore Letouzé

p. 8

# TABLE DES MATIÈRES

Résumé .....	3
Abstract .....	5
Remerciements .....	8
Table des matières .....	9
Table des figures .....	14
Table des tableaux.....	18
Glossaire.....	20
Introduction .....	22
I Revue De Littérature.....	33
CHAPITRE 1 L'environnement.....	34
1.1 Un environnement dynamique .....	34
1.2 Incertitude.....	37
1.3 Le risque.....	41
1.4 La résilience des systèmes sociotechniques .....	45
1.5 Conclusion sur l'environnement .....	50
CHAPITRE 2 La prise de décision en ingénierie cognitive .....	52
2.1 Définition de l'activité décisionnelle .....	52
2.2 Évolution des modèles pour l'analyse de l'activité décisionnelle.....	53
2.3 La conscience de situation .....	54
2.3.1 Les différentes approches de la conscience de situation.....	56
2.3.2 Tentative d'unification .....	65
2.4 La mesure de la conscience de la situation.....	66
2.5 Conclusion sur la prise de décision en ingénierie cognitive .....	70

CHAPITRE 3 Les Fonctions Exécutives.....	71
3.1 L'attention .....	72
3.1.1 Modes opératoires de l'attention.....	74
3.1.2 Processus pré-attentifs.....	74
3.1.3 L'attention sélective.....	75
3.1.4 L'attention divisée .....	75
3.1.5 L'attention soutenue.....	80
3.1.6 Conclusion sur l'attention .....	80
3.2 La mémoire.....	80
3.2.1 Modèle MNESIS.....	80
3.2.2 Conclusion sur la mémoire .....	86
3.3 La planification.....	86
3.4 Conclusion sur les fonctions exécutives.....	87
CHAPITRE 4 Les représentations mentales .....	89
4.1 Qu'est-ce qu'une représentation mentale ? .....	89
4.2 Représentations occurrentes, modèles mentaux, modèles de situations.....	90
4.3 Les schémas et les schèmes .....	92
4.4 Conclusion sur la représentation mentale : la théorie de l'esprit.....	95
CONCLUSION DE LA REVUE DE LITTÉRATURE.....	98
II Partie Empirique.....	99
CHAPITRE 5 approche méthodologique.....	100
5.1 Question de recherche .....	100
5.2 Notre approche de la prise de décision.....	101
5.2.1 Proposition d'une vision intégrative d'un modèle de prise de décision....	102
5.2.2 Analyse comparative des méthodes d'analyse des IHMs .....	104
5.3 Contexte et démarche expérimentale .....	106

5.3.1 Le projet H2020 Future Sky Safety P6 – Human Performance Envelope .	106
5.3.2 Organisation de notre démarche de recherche .....	108
CHAPITRE 6 Méthodes d'évaluation des processus cognitifs impliqués dans la prise de décision (MERIA) .....	110
6.1 Le contexte d'étude .....	110
6.1.1 Le rôle du co-pilote dans l'avion .....	110
6.1.2 Rappel du contexte.....	111
6.2 Méthodes .....	112
6.2.1 Description des expérimentations menées .....	112
6.2.2 Approche générale de la triangulation des méthodes et des points de vue de l'activité.....	115
6.3 Recueil et analyse des données .....	117
6.3.1 Observations de l'activité à travers le déroulement du scénario. ....	117
6.3.2 Entretiens d'auto-confrontation et explicitation .....	121
6.4 Description de l'outil MERIA et étude de cas.....	122
6.4.1 Les Trois Colonnes d'analyse De l'outil MERIA .....	122
6.4.2 Résumé du processus de traitement des données .....	126
6.4.3 Étude de cas : Co-pilote 8 .....	129
6.5 Discussion .....	137
6.6 Conclusion.....	140
CHAPITRE 7 Proposition de modifications d'interfaces pour l'amélioration de la représentation mentale.....	141
7.1 Limites et contraintes .....	141
7.2 La conception des interfaces.....	142
7.2.1 Identification des interfaces problématiques.....	142
7.2.2 Méthode d'idéation .....	143

7.2.3 L'implémentation et l'interprétation .....	152
7.3 Les nouvelles interfaces .....	155
7.3.1 Description d'un cockpit <i>legacy</i> .....	156
7.3.2 Interfaces communes aux Step 2 et 3.....	158
7.3.3 Step2 Description de l'interface .....	160
7.3.4 Step 3 Description de l'interface .....	168
CHAPITRE 8 Expérimentations de Bordeaux Step2 – Step3.....	177
8.1 Analyse comparative des modalités Step 1 / Step 2 / Step 3 .....	177
8.1.1 Step 1.....	177
8.1.2 Step 2.....	177
8.1.3 Step 3.....	178
8.2 Présentations du panel de copilotes.....	178
8.3 Données récoltées.....	180
8.4 Résultats préliminaires .....	182
CHAPITRE 9 Approche statistique de l'analyse des données des trois expériences ; step1, 2 et 3 .....	187
9.1 Rappel des objectifs de l'étude.....	187
9.2 Présentation des données collectées sur les trois panels .....	188
9.3 Contextualisation des variables dans le scénario .....	188
9.4 Formatage des données .....	189
9.5 Comparabilité des populations des trois Steps.....	190
9.5.1 Données démographiques :.....	191
9.5.2 Validation des distributions des données démographiques.....	192
9.5.3 Conclusion sur les trois populations.....	197
9.6 Analyse comparative des différents Step. ....	197
9.6.1 Phase : AP is off, electrical problem, fly the plane (APoff) .....	199

9.6.2 Phase : Close to emergency (CloseEm).....	200
9.6.3 La compréhension de la criticité de la situation.....	201
9.6.4 Phase : Landing in Bremen (LandBremen) et Tail wind RWY27 - RWY09 Only (TailWind).....	202
9.6.5 Phase : Captain cannot land (CaptNoLand).....	203
9.7 Conclusions sur les IHM par rapport aux améliorations de RM.....	204
Conclusion.....	206
Perspectives .....	209
Bibliographies .....	211
Annexe 1 – Grilles MERIA Step 1.....	230
Annexe 2 – Grilles MERIA Step 2 et 3.....	242

# TABLE DES FIGURES

Figure 1 – Les domaines d'études de l'ingénierie cognitive.....	24
Figure 2 – Représentation des trois concepts UX, KX, HX (Blanc, 2018).....	26
Figure 3 – Illustrations des activités de conception centrées sur les utilisateurs finaux (ISO 13407, 1999) .....	28
Figure 4 – IHS Avionique 2020 et sa « time line » .....	30
Figure 5 – Exemples de risques et leur caractérisation d'après les deux dimensions du risque selon Neyns (2011).....	45
Figure 6 – Systèmes de premier type.....	47
Figure 7 – Systèmes du second type.....	47
Figure 8 – Systèmes du troisième type.....	47
Figure 9 – Systèmes du quatrième type.....	47
Figure 10 – La Conscience de la Situation selon Endlsey (1995).....	57
Figure 11 – Cycle perceptuel d'après Neisser (1976) (à gauche) et sa version étendue d'après Adams et al (1995) (à droite).....	59
Figure 12 – Traduction du Modèle <i>Recognized Primed Decision</i> de Klein (1989). .....	61
Figure 13 – Une approche centrée sur la régulation : La résolution de problème en situation dynamique (Hoc, 1996).....	62
Figure 14 – Unification du modèle de contrôle dynamique et du modèle SRK de Rasmussen (1983) d'après Amalberti (2001) .....	63
Figure 15 – fonctions exécutives et termes associés. Traduit de Diamond (2013). .....	72
Figure 16 – Une ressource cognitive séquentielle et sélective, la sélection des stimuli se produit à sa perception (A et B), ou à son analyse (C).....	76
Figure 17 – Evolution du concept de ressource cognitive, du principe de canal unique (Welford, 1952) aux multiples ressources (C. Wickens et al., 1980). .....	77
Figure 18 – Modèle de ressources cognitives uniques, traduit d'après Kahneman (1973). .....	78
Figure 19 – Modèle 4-D de Wickens (1980).....	79

Figure 20 – Modèle Mnésis (F. Eustache & Desgranges, 2003) .....	81
Figure 21 – Les relations entre Environnement, schémas, représentation et décision (Lipshitz & Shaul, 1997). .....	91
Figure 22 – Représentation de Architecture cognitive du modèle du conducteur selon Bellet (1998). .....	102
Figure 23 – Vision intégrative des concepts de « RM – attendue et réelle », « conscience de la situation » et « prise de décision » de l'opérateur en relation avec les IHS, inspirée de Bellet & al. (2009) et Endsley (1995) (ATC : Control du Traffic Aérien). .....	103
Figure 24 – Concept d'enveloppe de la performance humaine (HPE).....	107
Figure 25 – Démarche expérimentale mise en œuvre pour notre travail.....	109
Figure 26 – Succession des différentes phases remarquables du scénario.....	113
Figure 27 – Représentation schématique des étapes de vol du scénario ("Nœuds" et autres événements important). .....	114
Figure 28 – Position des caméras dans le cockpit (vue de dessous du cockpit, les rectangles noir représentent les caméras avec en pointillé leur champs de prise de vue). .....	117
Figure 29 – Exemple d'image obtenue avec les caméras (extrait de l'expérience de bordeaux - Step2) .....	118
Figure 30 - Vue de la salle de contrôle, commentaires en temps réel de l'expert aéronautique.....	119
Figure 31 – Modélisation de l'activité prescrite (les colonnes sont expliquées en 6.4.1). .....	120
Figure 32 – Modèle MERIA correspondant à l'activité du copilote 8.....	124
Figure 33 – Grille d'analyse Finale après consolidation entre les deux experts. ....	125
Figure 34 – Résumé du processus de traitement des données dans MERIA .....	127
Figure 35 – Extrait des phases 2 & 3 du modèle MERIA du pilote 8. ....	132
Figure 36 – Interface avionique EASy développée par dassault et honeywell. ....	146
Figure 37 – Interface de Rockwell-Collins avec une interaction directe avec la cartographie.....	147
Figure 38 – Représentation d'un trajet optimisé en fonction du vent et des courants..	148
Figure 39 – Concept de représentation des pistes et aéroports.....	153
Figure 40 – Ellipse représentant un aéroport de détournement (alternate) accessible après avoir atteint l'aéroport principal.....	154

Figure 41 – Ellipse représentant un aéroport de détournement (alternate) non accessible après avoir atteint l'aéroport principal.....	155
Figure 42 – Vue du PFD <i>Legacy</i> .....	156
Figure 43 – Vue du ND <i>Legacy</i> .....	157
Figure 44 – Le Cockpit Du Simulateur D'avionics 2020 (AV2020) .....	158
Figure 45 – Vue du cockpit AV2020.....	159
Figure 46 – Le pedestal virtuel utilisé dans les expérimentations step 2 et step 3 .....	159
Figure 47 – Vue du PFD dans l'expérimentation Step 2 de l'expérimentation. ....	160
Figure 48 – Vue du PFD avec cartouche VHF dans la partie droite.....	161
Figure 49 – Vue du PFD avec un message d'erreur indiquant une panne électrique « AC BUS 1 Fault » (en rouge en haut à droite) pendant l'expérimentation Step 2.....	162
Figure 50 – Vue du PFD après avoir éteint l'alarme de panne.....	162
Figure 51 – Vue du PFD avec le bouton d'ouvrir la procédure ECAM en haut à droite..	163
Figure 52 – Vue du ND pendant l'expérimentation Step 2 .....	164
Figure 53 – ND avec une autre échelle .....	165
Figure 54 – ND avec une autre échelle .....	166
Figure 55 – ECAM AC BUS 1 FAULT écran de résolution de panne (première partie)..	167
Figure 56 – ECAM AC BUS 1 FAULT écran de résolution de panne (deuxième partie)..	167
Figure 57 – Système inopérant sur un A320 <i>legacy</i> .....	168
Figure 58 – Vue du PFD dans la phase Step 3 de l'expérimentation.....	169
FIGURE 59 – VUE DU PFD AVEC UN TEMPS DE VOL RESTANT <30MIN (D'APRÈS CARBURANT) ( <i>Indication du temps de vol en rouge au-dessus de la gauge de carburant</i> ).....	170
Figure 60 – Cercle orange au début du scénario .....	171
Figure 61 – Cercle orange après le Go Around.....	172
Figure 62 – Cercle rouge après le GA .....	173
Figure 63 – Piste accessible en fin de scénario à Breme (EDDW) .....	174
Figure 64 – Vue de l'ECAM lors de la panne AC BUS 1 FAULT .....	175
Figure 65 – Détail de la partie systèmes inopérants de la Figure 64 (partie droite) .....	176
Figure 66 – Processus de validation de la similarité des trois populations .....	191
Figure 67 – Répartitions des populations des trois Steps selon l'âge (en années) et l'expérience en heures de vol (au total, sur A320, sur les 12 derniers mois).....	192

Figure 68 – Distributions de l'âge et du nombre d'heure total sur les trois populations. .....	193
Figure 69 – Distributions de du nombre d'heure total sur A320 et dans les 12 dernier mois pour les trois populations. ....	195
Figure 70 – Nombres d'heure de vol sur les 12 derniers mois pour chaque pilote de chaque Step, on remarque que le premier (1) et le dernier (10) pilote de Step2 (vert) se détachent légèrement du reste des pilotes. ....	197
Figure 71 – Comparaison des trois Steps au travers des RM moyenne des pilotes par phase de vol. ....	198
Figure 72 – Détail de la phase : " <i>AP is off, electrical problem, fly the plane</i> ", comparaison des RM "moyennées" des copilotes pour chacun des Step. Les astérisque indiquent le niveaux de significativité de la valeur propre du test de Wilcoxon pour l'évaluation de l'écart des médianes, * : p-value < 1%, ** : p-value < 0.1%. ....	200
Figure 73 – Détail des phases "Low on fuel" et "Close to emergency ", * : valeur propre < 1%.....	201
Figure 74 – Représentation chronologique du moment où les copilotes considèrent que le carburant est une variable qui nécessite une action immédiate.....	202
Figure 75 – Détail des phases "Landing in Bremen" et "Tail wind RWY27 – RWY09 Only". · : valeur propre <5%.....	202
Figure 76 – Détail de la phase "Captain cannot land", * : p-value < 1%, ** : p-value < 0.1%. .....	204
Figure 77 – Rappel de la vue du ND en début de scénario, l'ellipse orange va disparaître dans quelques minutes et le cercle orange est à peine visible malgré une échelle très grande.....	205

# TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 – Méthodologies d'évaluation des IHS. (Soulignées quand RM accessible)...	105
Tableau 2 – Principales caractéristiques d'expertises du panel des 10 participants de notre expérimentation. SD : Ecart-Type. ....	115
Tableau 3 – Présentation des différents types de méthodes de recueils utilisées et volume des données recueillies. ....	116
Tableau 4 – Accord inter juge calcule sur les différentes grilles. ....	126
Tableau 5 – Synthèse des représentations mentales de copilotes de l'expérience de Braunschweig (Step 1). ....	128
Tableau 6 – Récit réduit de l'expérience vécue du copilote 8. ....	130
Tableau 7 – Définition des catégories d'erreurs (C1, C2, C3) et de succès (C4) - le gras et l'italique correspondent à la codification utilisée en Tableau 6 pour l'identification des erreurs-. ....	134
Tableau 8 – Erreurs et succès observés chez le co-pilote 8, répartis selon les catégories définies au Tableau 7. ....	135
Tableau 9 – Comparaison des différentes catégories d'erreurs (C1, C2, C3) et de succès (C4) (en %), observées chez les 10 copilotes du panel. ....	136
Tableau 10 – Comparaison entre MR (Letouzé et al., 2020) et SA (Jones & Endsley, 1996). ....	137
Tableau 11 – Inventaires des interfaces chez différents équipementiers répondant à nos problématiques. ....	145
Tableau 12 – Différentes aides à apporter au copilote selon les phases du scénario d'après les expérimentations Step1. ....	149
Tableau 13 – Proposition des solutions pour les différentes phases, issu de l'avis de deux experts du consortium questionnés avant la réunion d'idéation. ....	150
Tableau 14 – Classification des aides et résultat de la réunion de travail par phases....	151
Tableau 15 – Principales caractéristiques des 10 participant de l'expérience de Bordeaux Etape 1 (Step 2). SD : Ecart-Type. ....	179
Tableau 16 - Principales caractéristiques des 10 participant de l'expérience de Bordeaux Étape 2 (Step 3). SD : Écart-Type. ....	180

Tableau 17 – Résumé des résultats acquis sur l'évaluation des représentations mentales des copilotes au cours de Step 2.....	181
Tableau 18 – Résumé des résultats acquis sur l'évaluation des représentations mentales des copilotes au cours de Step 3.....	182
Tableau 19 – Calcul du score attribué par pilote, le gradient de couleur sur le score permet une lecture plus rapide (vert meilleur score, rouge le moins bon), La codification des RM reste identique. ....	185
Tableau 20 – Calcul du score attribué pour chaque phase du scenario au cours des Step (2 & 3), le gradient de couleur sur le score permet une lecture plus rapide (vert meilleur score, rouge le moins bon), La codification des RM reste identique. ....	186
Tableau 21 – Valeurs propres du test de Shapiro pour l'âge et le nombre d'heures de vol total.....	193
Tableau 22 – Valeurs propres du test de Wilcoxon pour l'âge et le nombre d'heures de vol total.....	194
Tableau 23 – Valeurs propres du test de Shapiro pour le nombre d'heure sur A320 et le nombre d'heure sur les 12 derniers mois.....	195
Tableau 24 – Valeurs propres du test de Bartlett pour le nombre d'heure sur A320 et le nombre d'heure sur les 12 derniers mois.....	196
Tableau 25 – Valeurs propres du test de Student pour le nombre d'heure sur A320 et le nombre d'heure sur les 12 derniers mois.....	196

# GLOSSAIRE

**AP** : Autopilote

**ATC (Air Traffic Control)** : service de contrôle de la circulation aérienne, communément appelé contrôle aérien, est un service rendu par des contrôleurs aériens aux aéronefs afin d'aider à l'exécution sûre, rapide et efficace des vols

**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

**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

**CW (Cross Wind)** : Vent de travers - En aviation, un atterrissage par vent de travers est l'ensemble des manœuvres exécutées pendant la phase d'atterrissage lorsque la direction du vent au niveau du sol est différente de la direction de l'axe de la piste

**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.

**Déroutement (EN. : Alternate)** : Terrain de secours accessible en route

**ECAM (Electronic Centralized Aircraft Monitoring)** : Écran se trouvant entre les deux pilotes et affichant les paramètres de l'avion (alarmes, messages, régime moteur, carburant, état des systèmes hydraulique, électrique, de pressurisation ...)

**EFB (Electronic Flight Book)** : Manuels et documentations numériques de l'avion mis à la disposition des pilotes par leurs compagnie aérienne. En général c'est une tablette électronique que les pilotes gardent sur eux et amène dans l'avion quand ils pilotent.

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

**IHS : Interface Homme Système**

**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.

**LAPA (Landing Page)** : Outil de calcul des performances d'atterrissage qui est mis à la disposition des pilotes par la compagnie dans l'EFB.

**N/W Steering (Nose Wheel Steering)** : Orientation du train avant, cette roue située à l'avant de l'avion sous de cockpit permet de manœuvrer quand l'avion atterri cela participe au maintien sur la piste de l'appareil

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

**PF (Pilot Flying)** : Nom donné au pilote chargé du pilotage et de la navigation de l'aéronef

**PFD (Primary Flight Display)** : Écran de visualisation des instruments premiers nécessaires au vol

**PM (Pilot Monitoring)** : Nom donné au pilote chargé de la surveillance des systèmes et d'assister le PF

**Remise de gaz (EN. : Go Around)** : Manœuvre consistant à interrompre l'atterrissage ou la phase d'approche.

**RM (Représentation mentale)** : représentation mentale occurrente, modèle intériorisé (dans la mémoire) de la réalité.

**SA : Situation Awareness** – Conscience de la situation concept développée par Mica Endsley.

**SPO (Single Pilot Operation) / SPIC (Single Pilot In Crew)** : se réfère au pilotage d'un avion commercial avec un seul pilote dans le cockpit / dans l'avion.

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

# INTRODUCTION

Le transport aérien international a connu un taux de croissance à deux chiffres depuis les premiers jours de l'après 1945, jusqu'à la première crise pétrolière en 1973. Une grande partie de l'impulsion de cette croissance est venue de l'innovation technique. Les avions à turbopropulseurs au début des années 1950, les jets transatlantiques en 1958, les gros-porteurs et les moteurs à forte dérivation en 1970 et, plus tard, l'avionique avancée, ont constitué les principales innovations. Celles-ci ont généré des vitesses plus élevées, une plus grande taille, un meilleur contrôle des coûts unitaires et, par conséquent, des tarifs et des taux réels plus bas. Avec l'augmentation des revenus des usagers et du temps de loisir, il en est résulté une explosion de la demande de transport aérien.

Freinée conjoncturellement par la crise de la COVID\_19, la poursuite de cette augmentation du trafic aérien complique le fonctionnement des opérations dans le domaine aéronautique. C'est particulièrement vrai pour les opérateurs qui sont en première ligne, comme les pilotes et copilotes, dont la vigilance est constamment sollicitée (Perret, 2018). Depuis de nombreuses années, l'industrie aéronautique poursuit l'objectif d'un niveau de sécurité optimal en développant de nouveaux systèmes de haute technologie. Ainsi, de nouvelles interfaces et de nouvelles formes d'interaction soutiennent l'activité décisionnelle des opérateurs et redéfinissent progressivement le « cockpit du futur ». Cependant, ces systèmes, complexes et dynamiques, 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 (davantage de tâches à réaliser) que qualitative (changement d'état des tâches en cours).

En conséquence, l'intégration et la manipulation de ces interfaces homme-système (IHS) s'accompagnent d'un besoin de formation. Les compagnies aériennes ont développé des formations Crew Resources Management (CRM), pour sensibiliser les équipages aux phénomènes cognitifs et collectifs pouvant conduire à des erreurs de pilotage (Helmreich, Merritt, & Wilhelm, 1999). Malgré ces efforts d'apprentissage, l'étude d'un grand nombre d'accidents révèle que ceux ayant les conséquences les plus graves ont des origines principalement d'ordre psychologique et sociologique. Ainsi, la gestion des capacités

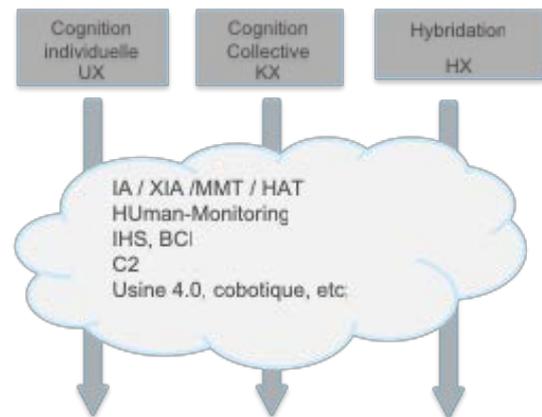
cognitives des pilotes constitue toujours un sujet d'actualité. D'autant plus que pour assurer l'exploitation commerciale d'un avion de ligne, il faut aujourd'hui environ 25 pilotes (1 vol long-courrier = 4 à 5 pilotes). La réduction du nombre de pilotes, et la migration vers des systèmes Single Pilot in Opération (SPO) sera aussi un moyen pour les compagnies aériennes de gagner en compétitivité et, peut-être, en sécurité. Dès lors, nous comprenons mieux l'importance des recherches en facteur humain pour la fiabilité des activités de transport aéronautique.

### **Le domaine de la recherche**

Nos travaux s'inscrivent dans un domaine scientifique et d'ingénierie relativement récent, la cognitique. La cognitique est une démarche d'ingénierie visant à une meilleure performance, une meilleure sécurité et un meilleur confort d'usage des systèmes complexes, notamment numériques. Elle s'inspire notamment (mais non exclusivement) des sciences cognitives, avec une visée et une intention applicative et industrielle. Son objet est le facteur humain et l'usage des technologies.

Le champ de recherche concerné par la démarche d'ingénierie cognitique est relativement large. Il fait appel à des méthodes extrêmement diverses et à une multitude d'applications possibles dans le cadre de domaines industriels variés. Ainsi, la vision proposée en Figure 1 n'est donc qu'une proposition de synthèse et de formalisation des différents thèmes de recherche et d'applications les plus communs dans le domaine de la cognitique. Elle ne peut en aucun cas être considérée comme figée, ou exacte, et devra être revue en fonction des évolutions à venir. Trois grands domaines peuvent être identifiés (Figure 1).

- **Les Interactions Homme-Systèmes** : Conception et développement de méthodes d'étude, analyse des besoins utilisateur(s), recommandations, maquettages, prototypage, simulation, évaluation.
- **L'augmentation et l'évaluation humaine** : Conception et usage des technologies d'augmentation /suppléance humaine, évaluation et Human-monitoring.
- **Gestion des connaissances pour l'aide à la décision** : Capitalisation, représentation, modélisation, transfert des connaissances et apprentissage, système d'aide à la décision.



**FIGURE 1 – LES DOMAINES D'ÉTUDES DE L'INGÉNIEURIE COGNITIVE.**

*Les Interactions Homme-Systèmes.* L'Homme moderne est confronté de façon quasi permanente à des systèmes technologiques plus ou moins complexes... électroménager, informatique, téléphone, automobile, cockpit, etc. La démarche d'ingénierie cognitive doit permettre de prendre en compte les exigences en matière d'adéquation aux besoins, de performance et de facilité d'usage. La démarche d'ingénierie cognitive s'attachera notamment à la conception et au développement de méthodes, à l'analyse des besoins utilisateur(s), aux recommandations, au maquettage, au prototypage, à la simulation et à l'évaluation. L'ensemble de cette démarche doit garantir un optimum en terme d'usabilité, d'affordance et d'accessibilité.

*L'augmentation et l'évaluation humaine.* Ce domaine est historiquement lié à celui de la suppléance, plus particulièrement en ce qui concerne les personnes vieillissantes ou en situation de handicap. Les progrès en biologie humaine, neurobiologie et biomécanique (entre autres) alliés à l'augmentation de la puissance de traitement des données et de la miniaturisation permettent aujourd'hui de palier nombre de déficiences. Cet essor technologique laisse envisager la possibilité de dépasser la problématique de l'homme « réparé » pour aborder celle de l'homme « augmenté ». Nous nous référons à la conception centrée utilisateur (CCU), le « design pour tous » ou « universel ». Ces méthodes se définissent généralement comme visant à concevoir, développer et mettre sur le marché des produits, des services, des systèmes ou des environnements qui soient accessibles et utilisables par le plus large éventail possible d'utilisateurs, sans recourir à l'adaptation ou à la conception spécialisée (Choi, 2005). Comme pour le domaine

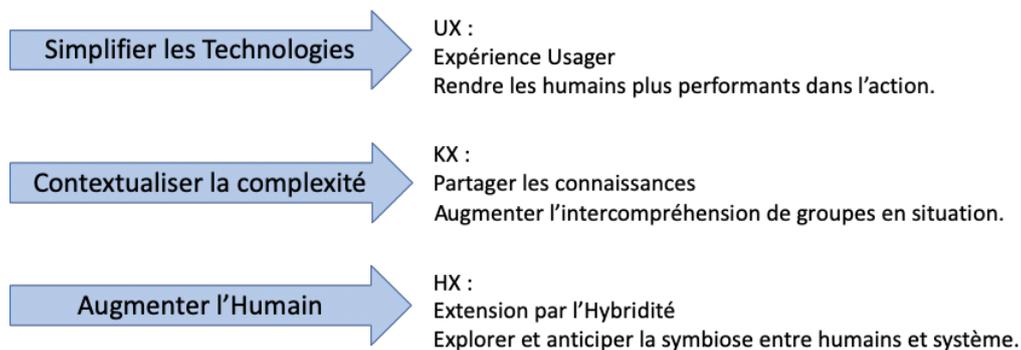
précédent, la démarche d'ingénierie cognitive s'intéresse à l'analyse du besoin, la spécification et la conception de systèmes d'aide et de suppléance pour la compensation du handicap, l'accessibilité, les interactions avec la robotique et l'Intelligence Artificielle pour une adaptation de ces technologies aux usages (cybersécurité notamment).

*Gestion des connaissances pour l'aide à la décision.* Ces dernières décennies, la gestion des connaissances est devenue un axe majeur de performance pour les organisations. Les études sur le sujet démontrent que l'utilisation des pratiques de gestion des connaissances est un moteur important de l'innovation (Inkinen, 2016). En outre, les caractéristiques de leadership et les facteurs organisationnels sont susceptibles de soutenir la performance de l'entreprise grâce à une gestion plus efficiente et efficace des ressources en connaissances. Dans ce cadre, les méthodes de l'ingénierie cognitive se sont d'abord attachées à la capitalisation des connaissances, leur représentation et leur modélisation. Mais ces dernières années, le développement de l'Intelligence Artificielle apporte des méthodes et outils spécifiques qui permettent de franchir de nouvelles étapes vers le transfert des connaissances, les apprentissages et le développement de systèmes d'aide à la décision : deep learning, machine learning, réseaux de neurones, etc. (Sen et al., 2018).

Le modèle en 3 domaines proposé en Figure 2, qui illustre les activités génériques en matière d'ingénierie cognitive à ce jour, correspond aussi, bien évidemment, à l'approche développée au sein de l'ENSC-IMS Cognitive en matière de formation, recherche et valorisation. Par ailleurs, en ce qui nous concerne, cela se traduit par la mise en œuvre de méthodes et outils autour de thématiques comme l'eXplainable AI (XAI), le Human Autonomous Teaming (HAT), le Biomonitoring, les BCI, le command and control, la Cobotique et l'usine 4.0, etc.

#### *La spécificité de l'orientation IMS\_ENSC*

Ces dernières années, l'ENSC-IMS Cognitive développe une grille de lecture des relations entretenues par la technologie et le facteur humain à travers la simplification des technologies (UX, pour User eXperience) et la contextualisation de la complexité (KX, pour Knowledge eXchange).



**FIGURE 2 – REPRÉSENTATION DES TROIS CONCEPTS UX, KX, HX (BLANC, 2018)**

L'UX porte une attention particulière sur la facilité d'usage, la compréhension immédiate ou encore l'utilisation intuitive d'un produit, d'un système ou d'un service. Pour cela, les processus de conception mettent l'accent sur l'utilisateur, en faisant en sorte que les produits, systèmes ou services puissent être qualifiés d'utiles, utilisables, trouvables, navigables, accessibles, efficaces, désirables, agréables, crédibles, etc.

Mais si tous les produits, systèmes et services en viennent à donner un tel confort à l'utilisateur, de nouveaux problèmes sont susceptibles de se poser dès lors que cet utilisateur sera impliqué dans un collectif. En effet, il lui deviendra de plus en plus difficile d'exprimer à un collègue le travail en cours de réalisation, dans la mesure où l'utilisateur lui-même n'aura plus véritablement besoin de se représenter ce qu'est le rôle de l'outil dans la réalisation de la tâche.

En parallèle, avec l'UX, nous identifions un nouveau paradigme par l'acronyme KX. Celui-ci représente un besoin de partage de connaissances (Knowledge eXchange) ; partage entre l'utilisateur et le système, mais aussi partage entre les utilisateurs d'un même système. D'ailleurs, de plus en plus souvent, la notion d'interface humain-machine laisse la place au concept de HAT (Human-Autonomy Teaming).

Le verbe « to eXchange » impliqué dans le KX est à entendre comme « to share » (et non pas comme « to swap »). Le KX doit permettre à un collectif de partager des connaissances ; il y a donc une dimension « Knowledge Management » dans ce concept, une dimension « Situation Awareness », ainsi qu'une dimension « Management d'équipe » et une dimension « Communication ».

### *La démarche opérationnelle en ingénierie cognitive*

La recherche et l'ingénierie en cognitive 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 (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.

Les domaines d'intervention fréquents de l'ingénierie en cognitive sont le développement ou l'adaptation d'interface Homme/Système (IHS), 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 / systèmes.
- Les objectifs sont souvent conflictuels : il faut faire vite, mais ne pas faire d'erreur, maximiser le critère économique et la sécurité.

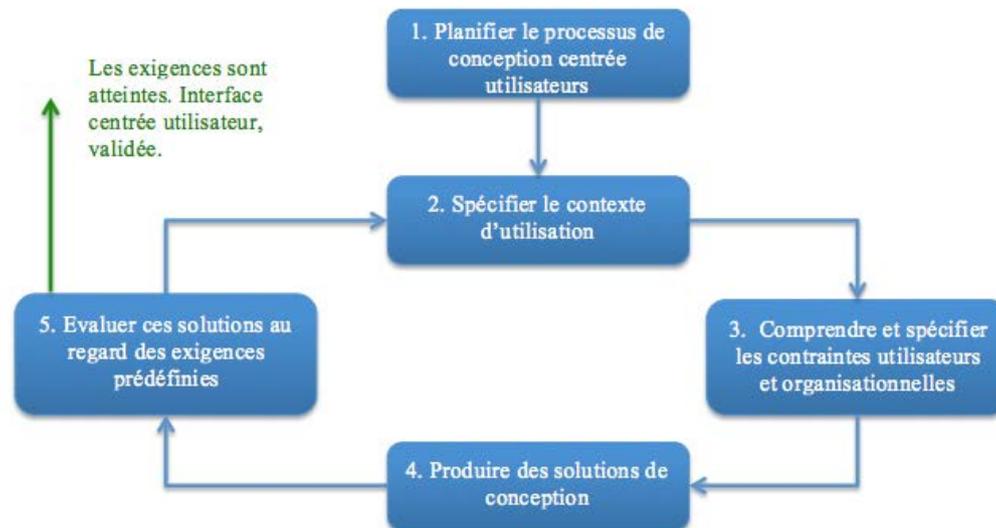
L'ingénierie en cognitive s'appuie sur la démarche dite de conception centrée utilisateur (CCU), qui consiste à considérer les utilisateurs et leurs besoins tout au long du processus de développement d'un produit. La conception centrée sur l'utilisateur s'appuie en particulier sur des critères d'utilisabilité et d'accessibilité

De manière plus précise, et à partir des principes de base de la CCU cités précédemment, la norme ISO 9241-210 (Organisation Internationale de Normalisation, 2010) identifie quatre activités principales centrées sur l'opérateur humain :

- Comprendre et spécifier le contexte d'utilisation ;
- Spécifier les contraintes et exigences de l'utilisateur et de l'organisation ;
- Proposer des solutions de conception et des prototypes ;

- Évaluer la conception par rapport aux contraintes et exigences.

Les deux premières activités constituent la phase d'analyse, suivie de la phase de conception et de la phase d'évaluation. Ces étapes sont menées dans le but d'intégrer les exigences d'utilisabilité dans le processus de développement et sont exécutées de manière itérative jusqu'à ce que les objectifs d'utilisabilité soient atteints (Figure 3).



**FIGURE 3 – ILLUSTRATIONS DES ACTIVITÉS DE CONCEPTION CENTRÉES SUR LES UTILISATEURS FINAUX (ISO 13407, 1999)**

Les utilisateurs doivent être impliqués dans l'ensemble de ces phases de conception. Ces dernières sont interdépendantes. De nombreuses itérations sont fréquemment nécessaires pour aboutir à une solution satisfaisante. Lors de chaque itération, les utilisateurs fournissent des feedbacks qui permettent d'apporter des améliorations au système. C'est l'addition de ces modifications qui aboutira à la proposition d'un système adapté.

### **Le contexte scientifique**

La question de la gestion des ressources cognitives est centrale dans la démarche de 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, certains (Moray, 1967) émettent 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 d'économie cognitive. Le principe d'économie des ressources cognitives s'entend davantage 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 et l'équipe Cognitive et Ingénierie Humaine (CIH) du laboratoire de IMS UMR 5218. Ces travaux sont conduits en relation avec 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 (Lini, 2013) et du projet PROJET ASTUTE (financement CEE, 2011-2014). Ce travail portait sur la stratégie d'anticipation et a permis la validation de solutions pour la gestion temporelle dans les IHM. La timeline dans AV2020 en est un des exemples les plus parlants (Figure 4).



**FIGURE 4 – IHS AVIONIQUE 2020 ET SA « TIME LINE »**

- Étape 2 : La délégation et restructuration des priorités. C'est le cadre de la thèse réalisée par Christophe Bey (2016), menée en collaboration CEAM /A400M
- Étape 3 : La schématisation. La stratégie d'emploi de représentations mentales structurées qui fait l'objet de cette thèse. Ce travail a été intégré 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 un prototype face à l'IHM système « classique » d'un A320.
- 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, de la conception ou amélioration des IHS et des économies cognitives qui en résultent, par la descente

dans les niveaux de contrôle (Rasmussen, 1983). C'est l'objet du projet Cleansky 2 « CO2TEAM », actuellement en cours de réalisation (2019-2021).

### **Le contexte opérationnel**

La problématique posée par les modes de représentation de la situation et la gestion des ressources cognitives pour les équipages est un problème central de l'activité de pilotage. Les prises de décision inadéquates ou bien encore les stratégies de prise d'information inadaptées sont régulièrement identifiées comme des défaillances potentiellement accidentogènes.

La mise à disposition des ressources ad-hoc, l'état du pilote et son expertise sont les garanties d'une prise de décision en adéquation avec la situation. Soulignons que ce n'est pas forcément la meilleure prise de décision qui est recherchée, mais celle qui à l'instant donné est la plus adaptée à la mise en œuvre par l'équipage et ce, dans 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 dans l'aviation civile, malgré l'augmentation du trafic et de la complexité des systèmes et des contraintes.

Ainsi, même si le nombre d'accidents demeure à un niveau très bas, « *From 2018 to 2019, there was a 16 per cent increase in the total number of accidents, as reported by States. The global accident rate of 2.9 accidents per million departures* », (International Civil Aviation Organization, 2020, p. 5), la croissance du trafic mondial se traduit par une augmentation apparente et statistique des incidents plus ou moins graves.

La seule réponse technologique ne semble pas suffisante pour résoudre ce problème. C'est pourquoi les constructeurs et les compagnies sont engagés dans un vaste chantier de prise en compte des facteurs humains. Ils s'intéressent notamment à une conception anthropocentrée des systèmes opérationnels, de façon à ce qu'ils soient en adéquation avec les multiples usages des pilotes. 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 situations dans lesquelles les personnels sont engagés.

Il est évident que la conception anthropocentrée, même si elle est efficace, ne peut être la seule 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 les pilotes en fonction des 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 entraîner les pilotes à faire face à la variabilité des situations.

# I REVUE DE LITTÉRATURE

# CHAPITRE 1 L'ENVIRONNEMENT

Dans ce premier chapitre, nous définissons le contexte dans lequel cette thèse s'inscrit. Pour notre travail, l'environnement d'étude est celui de l'aéronautique civile commerciale. Notre cas d'application est une ligne régulière moyen-courrier en Europe impliquant un porteur fortement représentatif de l'activité aérienne actuelle : l'Airbus A320. La situation d'étude, c'est-à-dire l'ensemble des activités des pilotes et des artefacts avec lesquels ils vont interagir, est scénarisée pour s'inscrire dans le cadre de ce que l'on définit comme une situation dynamique à forte pression temporelle. Dans ce contexte, une défaillance humaine et/ou technique peut avoir des conséquences particulièrement graves, mettant en jeu la vie des passagers et de l'équipage. Il est donc utile de préciser :

- Qu'est-ce qu'un environnement dynamique ?
- Les situations étudiées génèrent de l'incertitude et des risques associés. Il nous faut définir ces concepts pour comprendre les mécanismes cognitifs qui en découlent.

L'étude de situations dynamiques nous amènera à aborder les systèmes sociotechniques du point de vue de leurs capacités à s'adapter aux perturbations et changements (résilience).

## 1.1 Un environnement dynamique

D'après Samurçay et Hoc (1988, p. 188), *un environnement dynamique est défini, en opposition à un environnement statique, comme un regroupement de situations de travail caractérisées par le fait que ses propriétés (physiques ou structurelles) sont susceptibles d'être modifiées par d'autres facteurs que les actions de l'opérateur*. Ainsi, la situation continue à évoluer selon la dynamique interne du système, qu'il y ait ou non intervention (Amalberti & Hoc, 1998; Cellier, 1996). De plus, les interventions sont souvent irréversibles du fait de la proximité temporelle entre l'action et son effet, qui ne laisse aucune place à une éventuelle correction de la part de l'opérateur. Il n'est ainsi pas possible de revenir à la situation initiale (Sebillotte, 1984).

Les systèmes dans lesquels l'opérateur humain doit combiner son activité avec celles des automatismes apparaissent dans les années 80. C'est pour définir ces nouveaux systèmes de travail de plus en plus complexes que le terme d'environnement dynamique apparait. Ces nouveaux environnements nécessitent non seulement la médiation de processus aussi complexes que la planification, le diagnostic et la prise de décision (Hollnagel, Mancini, & Woods, 1988), mais également des ajustements de l'action à l'évolution de l'environnement.

Cette relative autonomie (dynamisme) de la situation vis-à-vis de l'opérateur et cette irréversibilité se retrouvent dans des situations de travail diverses, telles que la surveillance de centrales nucléaires (e.g. Vicente, Mumaw, & Roth, 2004), la surveillance de hauts fourneaux (e.g. A. Van Daele, 1992), la conduite automobile (e.g. Hoc, Young, & Blosseville, 2009), des situations médicales comme l'anesthésie (e.g. Neyns, 2011) ou les soins intensifs (e.g. Terraneo, Seferdjeli, & Diby, 2010), le contrôle aérien (e.g. Edwards, 2013; Pelayo, Loiselet, Beuscart-Zéphir, Rogalski, & Anceaux, 2010), les situations de conduite de moyens aériens (pilotage) (Endsley, 1995; e.g. Martin, Hourlier, & Cegarra, 2013), la navigation maritime (marine marchande) (e.g. Chauvin, Letirand, & Delhomme, 2007) ou la protection incendie (feux de forêt) (e.g. Rogalski, 2016).

Cellier (1996) évalue ces différentes situations vis-à-vis des exigences cognitives associées. Plusieurs dimensions sont identifiées pour caractériser ces environnements. En suivant ces critères, l'environnement des pilotes de ligne est décrit comme suit :

- La distance opérateur-situation. C'est-à-dire la distance spatiale ou temporelle entre l'action et son effet. Plus la distance est courte, plus l'opérateur pourra appréhender directement le système. Quand celle-ci augmente, l'opérateur doit mobiliser des représentations externes plus ou moins exhaustives et compatibles du système, afin de se construire une représentation de la situation. Dans un avion de ligne, la distance entre l'opérateur et le processus est paradoxalement faible. Une longue chaîne de systèmes complexes et redondants se situe entre le pilote et les effecteurs qui modifient les propriétés du système (assistants électroniques, mécaniques, etc.). Il est pourtant possible d'observer directement les effets des actions sur le système (changement de trajectoire, vitesse, reconfiguration des systèmes...), même si certains

phénomènes ne sont pas directement perceptibles (résolution de pannes, transferts de carburants) ;

- La continuité ou non des variables de l'environnement. Les variables et leurs représentations sont à la fois continues (ex. : vitesses) et discrètes (ex. : systèmes inopérants, capacités de l'avion). Cela apporte de la complexité dans l'appréhension des valeurs, l'articulation des représentations générées et l'extrapolation de leur interrelation (il est difficile d'estimer l'évolution des variables discontinues à partir de l'évolution des variables continues et réciproquement) ;
- Les dynamiques de la situation. D'origine interne ou en réponse aux actions de l'opérateur, elles augmentent la nécessité de collecte d'information et contraignent les possibilités d'action. Les dynamiques inférées aux différents événements présentent des temporalités très variables : très longues jusqu'à plusieurs heures, pour les évolutions de conditions météorologiques ; quand d'autres évoluent en quelques secondes comme lors de la survenue d'une panne. La coexistence de ces temporalités entremêlées est un facteur de complexité supplémentaire ;
- Un environnement au caractère instable. Dans le cas d'une situation de pilotage, l'environnement est instable par sa dynamique interne, dont l'évolution imprédictible et subreptice sollicite des ressources attentionnelles importantes (en effet, pour faire face à cette situation, l'opérateur devra observer et analyser une grande quantité d'éléments en même temps). Cela nécessite de fréquentes réflexions diagnostiques et des décisions d'action de la part de l'équipage.
- Degré d'ouverture du système. Même si nombre de mesures sont prises pour limiter l'émergence d'événements imprévisibles au sein d'un espace aérien régulé et contraint, ce dernier demeure très ouvert, ce qui augmente son imprédictibilité.

Les environnements dynamiques, quels qu'ils soient, évoluent de manière plus ou moins imprédictible. Pour l'opérateur qui doit faire face à ces situations, il semble probable que de l'incertitude apparaisse.

## 1.2 Incertitude

L'incertitude apparaît lorsqu'un individu fait face à une situation dans laquelle les informations qu'il peut obtenir de son environnement sont « peu fiables, incomplètes, inadéquates » (Hoc, 1996). Elle correspond à l'incapacité perçue par un individu à prédire quelque chose correctement (Milliken, 1987). De plus, toutes les situations dynamiques sont incertaines car « les processus techniques sont plus ou moins ouverts aux influences d'environnements incontrôlés » et « leur dynamique n'est pas toujours aisée à anticiper » (Hoc, 2004). La situation de pilotage d'un avion de ligne s'inscrit dans ce cadre.

L'incertitude peut être définie indépendamment des individus. Lancry (2007) présente l'incertitude comme « le produit de la variabilité contenue dans un système complexe ». L'incertitude est liée à la notion de hasard. Ce hasard résulte de l'empirique, du vécu. Cela nous permet d'identifier des événements qui se produisent alors qu'ils n'étaient pas attendus. L'incertitude est donc liée à l'absence de connaissance sur un phénomène ou une situation à un instant donné et pendant son évolution dans le temps. Cette incertitude empirique est mise en avant dans les travaux de Moisset et Couture (2001). Ces auteurs introduisent une autre forme d'incertitude : l'incertitude en finalité. Dans ce cas, l'incertitude provient du fait que la situation peut être influencée dans son déroulement par des facteurs extérieurs ou par la modification des déterminants de l'action. L'action humaine est alors modifiée par un événement extérieur, ou sa finalité redéfinie par des actions humaines extérieures. Cependant, elle peut également découler de « *l'interférence entre les comportements d'une personne et des événements externes naturels, sociaux, organisationnels aléatoires ou incertains* » (Lancry, 2007).

Cette complexité se traduit par des interactions de multiples variables soumises à une dynamique temporelle particulière et de plusieurs agents qui ont des objectifs différents et parfois même conflictuels. De ce fait, les situations ne sont que partiellement contrôlées par un seul opérateur. L'opérateur humain peut être confronté à l'imprévisibilité du processus. L'environnement a non seulement sa propre dynamique, mais les actions de l'opérateur influent également sur l'évolution de ce processus. Qui plus est, une non-action de l'opérateur peut, de la même façon, impliquer un changement dans le processus à contrôler. L'opérateur se trouve ainsi dans des situations de prise de décision dans

lesquelles il ne dispose pas de toutes les données nécessaires pour agir. Cela résulte du caractère évolutif du processus.

Toutes ces contraintes entraînent ce que l'on appelle des délais. On peut distinguer quatre types de délais qui peuvent influencer le mode de gestion de la situation (Eyrolle, Mariné, & Mailles, 1996). Ces quatre délais vont se succéder et s'accumuler dans le processus de gestion d'une situation :

- En premier lieu, le délai de transmission de l'information. Il dépend d'une part de l'état du processus à un instant donné et d'autre part de la disponibilité de l'information pour l'opérateur. Ce délai correspond au temps écoulé entre l'évolution du système et le moment où l'opérateur peut effectivement constater cette évolution.
- Le délai de réaction apparaît entre le moment où l'opérateur commande une action sur le processus et le moment où cette action a réellement lieu. C'est, par exemple, le temps de réaction d'un conducteur lors d'un freinage d'urgence, entre le moment où il décide de freiner et celui où la pédale de frein est réellement actionnée.
- Une fois que l'action a eu lieu, il y a un délai de latence (appelé également délai de réponse) correspondant au temps écoulé entre l'action et son effet sur le processus.
- Enfin, le délai de feedback : il existe un possible délai entre le résultat de l'action sur le processus et le retour d'informations disponibles.

Comme évoqué précédemment, ces différents délais peuvent influencer les activités de l'opérateur. De plus, celui-ci peut ignorer ou ne pas comprendre ces temps de latence (par inadvertance ou par manque de connaissance du processus). Cette ignorance ou cette méconnaissance peuvent le conduire à intervenir soit trop tôt, soit trop tard, et perdre ainsi le contrôle de la situation. Ce risque peut s'exprimer soit de façon objective (c'est-à-dire un risque direct pour la situation), soit de façon subjective (c'est-à-dire le risque pour l'opérateur de perdre le contrôle). Certaines actions peuvent déboucher sur un état critique qu'il ne sera peut-être pas possible de récupérer par la suite (Roth & Woods, 1988). Ces différentes observations démontrent l'importance de la gestion temporelle

(Carreras, Cellier, Valax, & Terrier, 2001). En effet, un environnement dynamique peut se gérer en amont, en cours et même en aval du processus (Morel, Amalberti, & Chauvin, 2008, 2009).

D'après Milliken (1987), trois types d'incertitude liée à l'environnement peuvent être distingués :

- L'incertitude d'état, c'est-à-dire l'incertitude sur l'état de l'environnement qui ne permet pas de prévoir comment ses différentes composantes peuvent évoluer.
- L'incertitude d'effet, qui correspond à la capacité d'un individu à prédire l'impact d'un changement de l'environnement sur sa propre organisation.
- l'incertitude de réponse : une méconnaissance des possibilités de réponses et/ou l'incapacité à prédire les conséquences d'un choix de réponse (Conrath, 1967; Duncan, 1972).

Bien que l'incertitude soit indépendante de l'individu, son impact lui est entièrement lié.

Pour Ladouceur, Gosselin et Dugas (2000), l'incertitude affecte les individus de façons variées. En effet, l'intolérance à l'incertitude peut être définie comme « *une prédisposition à réagir négativement à une situation ou un événement incertains, indépendamment de sa probabilité d'occurrence et de ses conséquences* » [*uncertainty as a predisposition to react negatively to an uncertain event or situation, independent of its probability of occurrence and of its associated consequences*](Ladouceur et al., 2000). L'incertitude est ainsi la résultante des actions et des interactions qu'un individu entretient avec son environnement (Theureau, 2006). Le domaine de l'aéronautique ne déroge pas à cette règle, malgré un environnement sociotechnique d'apparence standardisée et réglée.

Chaque situation d'incertitude a des conséquences particulières, que ce soit physiologiques ou psychologiques. Ainsi, l'incertitude impacte les émotions. Dans ce cas, la situation vécue est teintée négativement. Comme le montre Lancry (2007), elle est aussi génératrice de stress faisant émerger des inquiétudes. Marescaux (2007) met en évidence d'autres conséquences négatives : désorganisation des conduites, crise de nerfs, sortie de

poste, multiplication des erreurs, sources de troubles, de menaces, etc. Afin de contrer ces effets négatifs, les individus mettent en place des stratégies de « coping » (Cahour, 2010).

On parle de coping pour désigner la façon de s'ajuster aux situations difficiles (Mariage, 2001). Lazarus et Folkman (1984) définissent le coping comme « *l'ensemble des efforts cognitifs et comportementaux destinés à maîtriser, réduire ou tolérer les exigences internes ou externes qui menacent ou dépassent les ressources d'un individu* ». La littérature scientifique française parle de « stratégie d'ajustement » pour désigner les *coping strategy* anglo-saxonnes (Dantchev, 1989 ; Dantzer, 1989).

L'individu, confronté à des demandes physiques et psychologiques très intenses, répond par des stratégies comportementales et cognitives appelées, en anglais, *coping*. Chaque individu s'adapte différemment aux situations difficiles, ainsi les modes de *coping* mobilisés varient selon les personnes et leurs styles cognitifs. Les deux grands types de coping sont :

- Centré sur le problème :
  - La stratégie passe par l'anticipation et la projection dans le futur.
- Centré sur la personne et ses émotions :
  - Le sujet choisit de fuir ou de nier l'incertitude. C'est un comportement que l'on retrouve particulièrement dans les stratégies de compensation lors de situations de stress. Le sujet ignore la situation ou son caractère incertain.
  - Une autre stratégie consiste pour le sujet à s'appuyer sur les mythes, c'est-à-dire à répondre à l'incertitude en faisant appel aux croyances, aux religions, aux superstitions, aux démarches sectaires. C'est la résignation et l'acceptation de l'incertitude.

Afin de faire face à ces situations d'incertitudes, les individus mettent en place des stratégies de compensation. Ce sont les manifestations des styles cognitifs de coping.

Si l'on se réfère au pilotage en aéronautique, toutes les procédures et formations mises en place dans ce domaine ont pour objectif la maîtrise de l'incertitude par l'anticipation. Par exemple, un vol est toujours planifié à l'avance. On estime le carburant nécessaire : en situation normale, en cas de détournement, en cas de problème lors du détournement, etc. On ajoute une marge de sécurité, on prévoit la météo et son évolution potentielle, les

aéroports à proximité de celui de destination... Ainsi, la possibilité de faire face à une situation incertaine est réduite au minimum, à l'imprévisible, au statistiquement improbable.

Dans une routine métier où les incertitudes sont anticipées, comment permettre aux opérateurs de rester en capacité de gérer l'incertain ?

Dans le contexte aéronautique civil, l'avantage de l'anticipation omniprésente est aussi son défaut : l'opérateur n'est presque jamais confronté à une situation incertaine. De fait, les systèmes ne sont pas étudiés pour permettre aux opérateurs de se projeter dans des situations à fortes pressions temporelles. Ce manque d'entraînement face à l'incertitude augmente le risque (cf. 1.3). Afin de bien saisir les enjeux sous-jacents à cette problématique, nous allons approcher ce concept, aussi vaste que complexe.

### 1.3 Le risque

Que devient l'incertitude quand on peut planifier toutes les issues possibles pour une situation donnée ? D'après Frank Knight, économiste américain, on peut distinguer la notion de risque – dont on connaît la probabilité –, de celle d'incertitude – dont on ne peut pas calculer la probabilité – (Knight, 1971). Il est en effet raisonnable de penser qu'une situation dont on ne peut pas définir les évolutions possibles, est une situation dans laquelle il est impossible d'évaluer la probabilité d'occurrence de ces mêmes évolutions.

La situation dans laquelle évolue le pilote est régulière et prédictible dans la grande majorité des occurrences. Si la situation sort du cadre prescrit, par exemple lors de la survenue de pannes ou d'une perturbation météorologique, le pilote se retrouve face à la limite de la résilience du système. Le résultat de ses actions est incertain ; de ce fait, un risque apparaît. Ce risque peut être de plusieurs ordres : le risque de ne pas respecter les horaires, de détériorer l'appareil ou les infrastructures, d'engendrer la mort des personnes dans l'avion voire de personnes au sol, etc.

Selon Giddens, c'est le contexte de plus en plus complexe et son impossibilité de prédire le futur qui génèrent l'idée de risque : « *La notion de risque est liée à la volonté de contrôle et particulièrement à l'idée de contrôler le futur (...) C'est une société toujours plus préoccupée par le futur (et aussi par la sécurité), qui génère la notion de risque* » (Giddens, 1999, p. 3).

Böhm et Tanner (2018) donnent une définition plus globale : « *Le risque fait référence à une situation, à un événement ou à une activité qui peut mener à des résultats négatifs, incertains et qui affectent ce à quoi l'être humain attribue de la valeur* ». Le risque peut être résumé à « *la possibilité (ou la probabilité) qu'un événement ou une situation entraîne des conséquences négatives dans des conditions déterminées* ». Selon Leplat (2006), « *le risque est la possibilité qu'un danger s'actualise, c'est-à-dire entraîne effectivement des dommages, dans des conditions déterminées* ».

Le risque peut être généré à tout moment, à la suite d'un processus causal probabiliste dont le résultat est négatif et incertain (une situation, un événement, une activité, etc.). Les deux composantes essentielles du risque sont : 1) la gravité et 2) l'incertitude du résultat indésirable (ou de la perte). Le risque est caractérisé par la combinaison de l'aléa (ici la probabilité ou fréquence) et la vulnérabilité (la gravité).

La caractérisation d'un résultat implique une évaluation humaine. Ainsi, la définition du risque comme un « événement ayant des conséquences négatives » est liée à la subjectivité de l'individu. Pour Slovic (1999, p. 689) : « Le danger est réel, mais le risque est socialement construit ». Kouabenan (2007) souligne que la perception d'un risque par un individu peut « *affecter son comportement, ébranler son sentiment de contrôle, susciter des craintes, de l'angoisse ou dans certains cas du plaisir* ». Ainsi, on notera que la réelle gravité et la réelle fréquence d'apparition d'un danger n'est que peu corrélée à son acceptabilité, comme on peut le voir dans le transport par avion et celui par voiture : il y a, factuellement, beaucoup moins d'accidents dans le cadre du premier par rapport au second, pourtant la perception des individus quant au risque d'accident est généralement inverse. L'évaluation subjective du risque dépend du risque lui-même (probabilité d'occurrence, nature, gravité, contrôlabilité, médiatisation, etc.) mais également du sujet/individu concerné.

Il est donc nécessaire de distinguer risque objectif et risque subjectif. Le premier renvoie à la mesure du risque au regard d'une évaluation construite sur des données objectives, pouvant s'exprimer en fonction de différentes variables. Tandis que le second est le risque tel qu'évalué par le sujet, à propos d'une situation ou d'un événement spécifique rencontré (Saad, 1988). Certains opérateurs interrogés en entretien

l'expriment explicitement à travers la notion de « sentiment de risque » ressenti à un moment précis de leur activité. Dans le cadre de cette thèse, il paraît donc important de s'intéresser à l'écart entre risque objectif et risque subjectif pour pouvoir évaluer la représentation mentale (RM) d'un individu.

Selon Kouabenan (2007), la familiarité est un facteur important de la perception du risque, comme l'ont montré Fleming, Flin, Mearns et Gordon (1998) avec des opérateurs de plateformes pétrolières. Les caractéristiques propres de chaque sujet influent sur la familiarité, qu'elles soient de l'ordre du niveau d'expertise (formations, connaissances, niveau d'informations), du social (position sociale ou hiérarchique, rôle ou implication dans l'organisation, milieu social d'appartenance), de la physiologie/démographie (personnalité, âge, sexe, motivation), du culturel (croyances, valeurs, histoire personnelle, expérience professionnelle,...) ou encore des capacités de traitement de l'information, etc... (Fleming et al., 1998).

Au-delà des deux composantes du risque précédemment citées (fréquence et gravité), Cadet (d'après Cadet & Kouabéna, 2005) définit en 2001 le risque comme la résultante : de la complexité, de la représentabilité, de l'incertitude, de l'utilité réelle et de l'utilité perçue du système. Il établit une caractérisation du risque en 5 critères :

- 1) **La présence de plusieurs variables actives** : à l'origine, la situation à étudier se caractérise par le fait qu'aucune variable ne fournit une description satisfaisante de la situation. Pour y parvenir, il sera nécessaire de considérer plusieurs éléments d'information simultanément ou successivement ; c'est la complexité de la situation.
- 2) **La nécessité d'intégrer l'information** : pour permettre le passage de la diversité initiale à la phase terminale, qui aboutit à une évaluation spécifique d'une situation, des indices provenant de sources multiples devraient être recueillis et intégrés (Slovic, Kunreuther, & White, 1974). Ce paramètre souligne que le risque possède un lien fort avec la capacité d'un individu à « intégrer » des informations, c'est-à-dire à se créer une « représentation » de la situation. C'est la nécessité de représentation.
- 3) **Présence d'incertitudes** : ce paramètre et sa complexité ont été développés précédemment.

- 4) **Présence d'objectifs et de contraintes** : dans toute situation, le risque n'est admissible que si l'activité qui le génère permet d'atteindre des objectifs positifs ou souhaités. Ainsi, le risque associé à toute production industrielle n'est admissible que par la production, à un coût limité, de biens de consommation`. De même, le risque d'anesthésie n'est admissible que parce que l'intervention chirurgicale entraîne une amélioration de la santé, etc.
- 5) **Évaluation des effets** : une situation à risque se caractérise par la possibilité d'évaluer les effets à court ou à long terme, au niveau individuel, collectif ou sociétal. On mesure l'utilité perçue.

Pour Amalberti (1996), deux composantes du risque peuvent être distinguées : le **risque externe**, ou "distance à l'accident", qui est la conséquence d'une combinaison événement/comportement sur la sécurité ou la performance ; le **risque interne** de dépassement des ressources cognitives, aussi bien pour le contrôle de la situation que dans l'exécution de l'action.

En résumé, un risque est l'évaluation d'un danger par un individu / opérateur. Cette évaluation dépend de composantes subjectives : les conséquences évaluées par l'individu, sa familiarité avec le danger, sa perception de sa capacité à faire face au danger ; et de composantes objectives : les conséquences factuelles du danger, la probabilité de ce danger, sa complexité et les capacités cognitives de l'individu à comprendre et se représenter la situation.

Ces différents points de vue se recoupent. Dans chaque cas, nous notons que le risque peut être modifié par la prise en compte et l'amélioration de certains processus cognitifs comme la RM, la planification, la gestion des ressources cognitives ou la formation.

Neyns (2011) distingue les risques subis et les risques affrontés (ou choisis) (Figure 5). Les premiers concernent un danger éventuel qui est plus ou moins imprévisible (une erreur de situation ou d'activité), alors que les seconds correspondent à ceux que l'on prend en connaissance de cause mais dont on espère obtenir un large bénéfice malgré tout ; c'est le cas, par exemple, des nouveaux traitements contre le cancer. L'auteur établit également une topologie de la gravité du risque :

- Événement mineur (événement qui ne porte pas préjudice),
- Événement à la gravité significative (la défaillance est spontanément résolutive),
- Événement majeur (la défaillance n'est pas résolue spontanément),
- Événement grave à critique (les conséquences sont permanentes mais modérées),
- Événement catastrophique (les conséquences sont permanentes et graves).

Enfin, Neyns (2011) différencie risques involontaires, qui sont inconnus de l'opérateur ou non prévus initialement, et risques volontaires connus par l'opérateur, qui peut établir des mesures préventives pour les gérer ou en accepter un certain seuil.

	Risques involontaires (inconnus)	Risques volontaires (connus)
Risques subis	<p style="text-align: center;"><b>Incertitude, situation inédite, cas le plus défavorable</b>  <small>(cas du vol Paris-Rio : cet avion ne pouvait pas décrocher situation improbable)</small></p>	<p style="text-align: center;"><b>Risque géré, possibilité d'anticiper, de planifier,</b>  <small>(cas d'une panne pour laquelle une résolution est connue)</small></p>
Risques affrontés	<p style="text-align: center;"><b>Impossible</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>Risque choisi, Coût/bénéfice connu et accepté</b>  <small>(un passager prend un avion de ligne, le risque d'accident est acceptable par rapport au service rendu)</small></p>

**FIGURE 5 – EXEMPLES DE RISQUES ET LEUR CARACTÉRISATION D'APRÈS LES DEUX DIMENSIONS DU RISQUE SELON NEYNS (2011).**

## 1.4 La résilience des systèmes sociotechniques

La première acception est de penser la résilience comme s'il s'agissait d'adaptabilité, c'est-à-dire comme la capacité d'absorber ou de s'adapter aux perturbations et changements (bien que ces processus d'adaptation puissent parfois être assez lents et difficiles à discerner). En physique des matériaux, la résilience est la capacité des matériaux à résister à des chocs et déformations sans se rompre ou se déformer de

manière permanente, c'est-à-dire à retrouver leur état initial après avoir subi une contrainte. La résilience apparaît donc comme une caractéristique extrinsèque du système considéré. Elle caractérise la propriété de « faire face » dans l'adversité. La résilience peut être définie comparativement à la robustesse. La robustesse est la capacité d'un système à résister à un ensemble de situations prévisibles, qualifiables qualitativement voire quantitativement. Alors que la résilience peut être perçue comme la capacité à résister à un événement imprévisible, c'est-à-dire à subir un risque involontaire (selon la définition de Neyns, 2011).

Ainsi, la robustesse a pour objectif de maintenir la performance du système dans l'adversité, alors que la résilience a pour rôle de permettre au système de subsister même au prix de la détérioration de la performance.

Un système est donc considéré robuste par rapport à une perturbation lorsque la perturbation ne le fait pas sortir de cet intervalle de tolérance et pour la résilience lorsque le système retourne dans cet intervalle de tolérance et y reste (Clément et al., 2018).

En psychologie, la résilience peut être considérée comme un processus dynamique impliquant l'adaptation positive dans le cadre d'une adversité significative (Anaut, 2005). On peut citer deux théories sur lesquelles reposent le concept de résilience, la théorie de l'attachement de John Bowlby (1969), et les travaux sur le stress et le coping (cf. 1.2).

Ce concept est étudié depuis les années 1980 dans les pays anglo-saxons, avec comme principaux contributeur Emmy Werner, Michael Rutter, Robert Haggerty, Lonnie Sherrod et Norman Garmeiz.

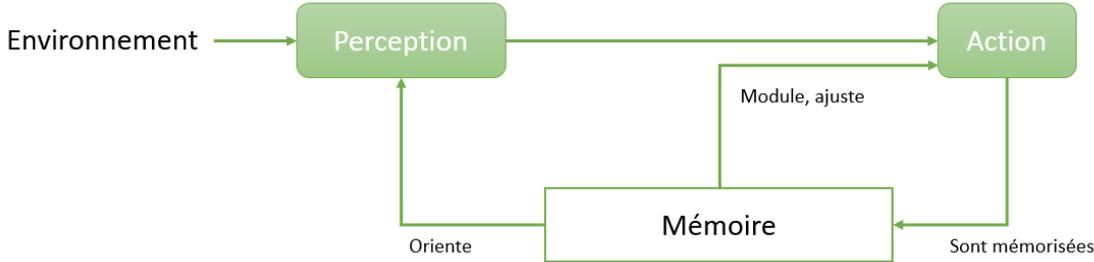
En France, les travaux autour de la résilience émergent surtout dans les années 1990, avec en particulier des praticiens du domaine de la psychiatrie : parmi les principaux contributeurs figurent Boris Cyrulnik, Michel Manciaux ou Stanislas Tomkiewicz.

En ingénierie cognitive, Hollnagel (2011, 2012) décrit les composantes de la résilience par sa capacité à répondre, à monitorer, à apprendre et à anticiper les perturbations. Ainsi, l'ingénierie de la résilience (Woods, Leveson, & Hollnagel, 2017)

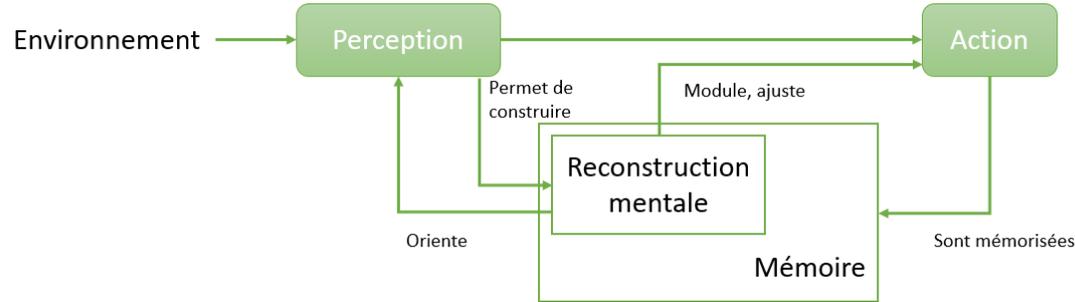
définit des organisations et des systèmes selon quatre types, appelés systèmes de premier, deuxième, troisième et quatrième type.



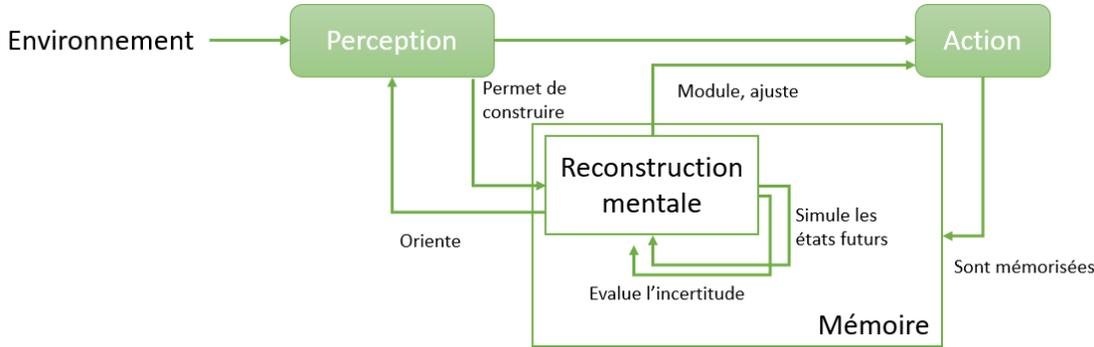
**FIGURE 6 – SYSTÈMES DE PREMIER TYPE**



**FIGURE 7 – SYSTÈMES DU SECOND TYPE**



**FIGURE 8 – SYSTÈMES DU TROISIÈME TYPE**



**FIGURE 9 – SYSTÈMES DU QUATRIÈME TYPE**

*Note : Dans ces schémas, nous faisons appel aux notions de mémoire et d'attention qui seront développées dans le chapitre suivant.*

1. Pouvoir réagir à un événement (surtout s'il est inattendu) est une condition indispensable à la survie du système, faute de quoi celui-ci finira par disparaître. Ainsi, les systèmes qui peuvent réagir de manière appropriée et donc soutenir leur existence, sont appelés **systèmes du premier type** (Figure 6). Réagir quand quelque chose se produit exige la capacité de surveiller et de répondre. Une surveillance est nécessaire pour déterminer si la situation implique une certaine forme de réaction ou d'intervention. Puis, le cas échéant, il faut répondre et mettre en œuvre la réaction. Les deux étapes doivent aller de pair. Un système qui réagit passivement chaque fois qu'il se passe quelque chose - chaque fois qu'une situation dépasse un certain seuil - sera par définition toujours surpris et donc toujours réactif. Cela peut fonctionner tant que la fréquence des événements est si faible qu'une réponse peut être complétée avant qu'une nouvelle réponse ne soit requise. Toutefois, seuls quelques systèmes peuvent profiter de ce luxe. Bien que les systèmes du premier type puissent survivre, du moins pendant un certain temps, ils ne sont pas vraiment résilients.
2. Si la capacité de réponse est fondamentale, il est également nécessaire de pouvoir modifier les réponses en fonction de l'expérience. Les **systèmes du second type** sont ceux qui peuvent gérer un événement non seulement lorsqu'il se produit, mais également après qu'il s'est produit (Figure 7). Cela signifie que le système peut tirer des leçons de ce qui s'est passé et utiliser cet apprentissage pour ajuster la façon dont il surveille (ce qu'il recherche) et comment il réagit (ce qu'il fait). L'apprentissage est nécessaire pour s'assurer que le système surveille les signes, les signaux et les symboles appropriés. L'apprentissage est également nécessaire pour ajuster les réponses en termes de durée, de type, d'intensité... Ces deux premiers types d'apprentissage sont nécessaires si l'environnement ou le contexte du système change en permanence. Plus la stabilité du contexte ou de l'environnement de travail est élevée, moins il est nécessaire de changer la surveillance et de réagir, et moins

il est donc nécessaire d'apprendre. Mais aucun environnement n'est parfaitement stable. L'un des effets de la surveillance est qu'un système peut détecter à temps l'évolution d'une situation et donc être capable de réagir avant qu'elle ne devienne trop grave (ou avant qu'il ne soit trop tard). Le dilemme d'une telle gestion par exception est qu'une intervention précoce peut sembler attrayante mais difficile à justifier. Alors qu'une intervention tardive est plus difficile parce que la situation se sera davantage détériorée et deviendra plus complexe et peut-être aussi plus coûteuse à contrôler.

3. Les  **systèmes du troisième type**  sont ceux qui peuvent gérer l'événement avant qu'il ne se produise, en analysant les évolutions dans le monde qui les entoure et en s'y préparant le plus efficacement possible (Figure 8). Un exemple typique est celui d'une organisation qui essaie d'anticiper et de se préparer à l'évolution des besoins clients, des réglementations (émissions de carbone, par exemple), etc. Pour réagir avant que quelque chose ne se produise, il faut être capable d'anticiper et/ou de prévoir. Cette capacité résulte d'une reconstruction mentale de l'environnement. Cela suppose d'appliquer des solutions préalablement apprises par analogie avec une expérience antérieure. Cette analogie oblige à prendre des risques. Agir avant d'avoir la certitude que la situation est semblable à celle reconstruite mentalement comporte le risque que les actions associées à cette reconstruction aient pu être erronée. Agir a posteriori élimine en grande partie l'incertitude de l'analogie, mais l'attente peut rendre toutes les actions envisageables obsolètes. D'autre part, rien ne garantit que de nouvelles informations permettront de mieux appréhender la situation, ou même que l'individu sera en mesure de percevoir ces informations. Les systèmes du troisième type sont capables de réagir, de surveiller, d'apprendre et d'anticiper et peuvent donc sembler répondre à tous les critères pour être appelés résilients - et être capables de gérer leur résilience. Pourtant, il est possible d'améliorer notre point de vue en considérant non seulement ce qui se passe entre le système et son environnement (avion, entreprise, exploitation, etc.), mais aussi ce qui se passe dans l'organisation même du système.

4. Dans les **systèmes du quatrième type**, l'anticipation englobe le système lui-même - non seulement dans le sens de se surveiller lui-même ou d'apprendre sur lui-même, mais en considérant comment le monde réagit ou change au fur à mesure des adaptations, et comment ces réponses peuvent affecter ou influencer sur son évolution. Ce type d'anticipation récursive représente la gestion de la résilience la plus évoluée (Figure 9). Cela nécessite, de la part de l'individu, d'être capable de reconstruire mentalement la situation mais également de mettre en place des simulations sur cette reconstruction afin de supposer les états futurs probables du système découlant des actions envisagées.

Dans le monde de l'aéronautique, le système « avion / pilote » peut être considéré comme un système de troisième type, voire de quatrième type. Si on tentait d'identifier l'apprentissage dans ce système, il serait localisé naturellement dans le pilote, mais également chez l'avionneur qui rend plus robustes les avions, les automatise et améliore les procédures au cours du temps. Les compagnies aériennes interviennent également sur ce dernier point. Cependant, la résilience touche à ses limites quand le système doit faire face à des situations inédites, qui ne peuvent pas être apprises. En effet, dans notre cas, l'anticipation résulte de l'apprentissage et de l'expertise (Blättler, Ferrari, Didierjean, & Marmèche, 2011). La seule option réside dans la capacité de l'individu à estimer la fiabilité de sa reconstruction mentale de l'environnement pour évaluer le degré d'incertitude de la situation.

## 1.5 Conclusion sur l'environnement

Ce chapitre nous a permis de définir le contexte de notre recherche et de l'explicitier : les pilotes de ligne travaillent dans un environnement dynamique, où l'incertitude et le risque sont omniprésents. Pour y faire face, ils mettent en œuvre des stratégies d'adaptation, de compensation. Celles-ci varient d'un individu à l'autre en fonction du style cognitif de « coping » de chacun. : ils acceptent de faire face à certains risques pour atteindre leurs objectifs mais doivent également s'adapter aux risques inattendus voire imprévisibles. Pour évoluer dans cet environnement, ils doivent en comprendre le fonctionnement, anticiper son évolution, se rappeler de ce qu'ils ont appris sur les pannes (risques) qu'ils vont rencontrer et comment les résoudre. In fine, ils doivent être en mesure de piloter l'avion en toutes circonstances et de le maintenir en état de

fonctionnement nominal. Ils doivent être résilients face aux perturbations et apprendre de leurs erreurs.

Les pilotes doivent se construire une **représentation mentale** de la situation qui déterminera leur aptitude à la prise de décision. Pour cela, ils doivent être attentifs à l'environnement et son évolution, mémoriser les caractéristiques de la situation, planifier les actions futures.

# CHAPITRE 2 LA PRISE DE DÉCISION EN INGÉNIERIE COGNITIVE

D'après Endsley, Hoffman, Kaber et Roth (2007) le terme « ingénierie cognitive » est issu des travaux de Norman (1986; 1981) et de Hollnagel et Woods (1983) et se retrouve en anglais sous le terme de « Cognitive Engineering » ou encore « Human Factor ». L'ingénierie cognitive met l'accent sur l'application des connaissances et des techniques de la psychologie cognitive pour la conception de systèmes homme-machine (Roth & Woods, 1988). L'ingénierie des systèmes cognitifs est une variante de l'ingénierie cognitive qui est apparue à peu près à la même époque. Elle offre une perspective systémique plus large pour l'analyse et la conception des interactions homme-machine (Hollnagel & Woods, 1983).

L'unité d'analyse de l'ingénierie des systèmes cognitifs englobe les phénomènes qui apparaissent à l'intersection des personnes, de la technologie et du travail. L'homme, la technologie et le travail sont analysés comme un système cognitif commun (Woods & Hollnagel, 2006). Les personnes sont considérées comme des agents orientés vers un objectif et qui s'adaptent aux exigences du cadre de travail et aux moyens (et limites) de la technologie disponible. L'étude des systèmes cognitifs communs consiste à découvrir comment les stratégies et les comportements des personnes sont adaptés aux objectifs et aux contraintes du domaine d'activité. Il s'agit notamment de découvrir comment les individus s'adaptent pour exploiter les moyens disponibles dans l'environnement et pour contourner ou résoudre les complexités dans la poursuite de leurs objectifs.

## 2.1 Définition de l'activité décisionnelle

De manière générale, l'activité décisionnelle (ou prise de décision) se définit comme un processus cognitif complexe visant à la sélection d'une action, ou d'une succession d'actions. La décision est un processus d'adaptation à la situation courante (Ross, Shafer, & Klein, 2006). Cette activité au cours de l'action, englobante et complexe, est un processus cognitif, affectif et perceptif dans lequel ces trois composantes sont inextricables (Klein, 1989). Selon les variables contextuelles et individuelles du moment,

la décision est influencée par les indices pertinents de la situation, par les buts plausibles de l'individu, par les attentes et les actions déployées (Kahneman, 1973; Klein, 1989).

Les définitions de l'activité décisionnelle ne font pas consensus dans la littérature actuelle. Différentes modélisations du processus décisionnel continuent d'être débattues. Depuis les premières théorisations de la prise de décision (Condorcet, 1785) jusqu'au plus récentes, les modèles sont soit : (1) séquentiels, c'est-à-dire que la décision est considérée comme prise suite à la détection d'un problème, à la recherche d'informations pour y faire face, à l'évaluation des solutions possibles, à l'exécution de la solution ; (2) soit non-séquentiels, c'est-à-dire que la décision est dite structurée autour de phases d'identification, de développement et de sélection.

## 2.2 Évolution des modèles pour l'analyse de l'activité décisionnelle

La prise de décision dans les activités humaines a longtemps été étudiée sous une approche dite « computationnelle », restée dominante en psychologie du travail et ergonomie, comme dans les travaux d'Amalberti et Hoc. La décision apparaît comme un processus à part entière du système de traitement de l'information. Elle constitue l'étape intermédiaire d'un déroulement par stades, permettant préalablement de saisir et de traiter des informations dans l'environnement, avant d'opérer un choix entre diverses alternatives possibles, puis d'agir. Le traitement repose sur les bases de connaissances précédemment emmagasinées que l'individu structure et mobilise le plus vite possible après avoir perçu les premiers résultats de son action. C'est ainsi que le sujet se représente le problème posé (Schmidt & Lee, 2005).

Parmi les modèles d'analyse de l'activité décisionnelle, il est un modèle particulièrement utilisé dans le courant de la « Naturalistic Decision Making » (NDM) en psychologie ergonomique, celui de Klein (1989), nommé « Recognition Primed Decision » (RPD). Initialement, son objectif était d'observer « la façon dont des opérateurs expérimentés, travaillant individuellement ou en groupe, dans des environnements dynamiques, incertains et évoluant souvent rapidement, identifient et évaluent la situation, prennent des décisions et réalisent des actions dont les conséquences sont significatives pour eux et pour l'organisation au sein de laquelle ils opèrent » (*Naturalistic decision making*, 1997, p. 5). En somme, il s'agit d'expliquer les décisions d'experts prises

sous forte pression temporelle et avec de grands enjeux (Hoffman & Lintern, 2006). Pour Klein (1997 ; 2008), le choix d'une solution optimale passe par la reconnaissance implicite de patterns, significatifs pour l'action. La situation s'impose à l'individu qui la retrouve et dont l'expertise se traduit par une reconnaissance finalisée et rapide de cette situation. L'auteur distingue alors trois modalités de reconnaissance utilisées par les experts face à une situation dynamique : une reconnaissance simple (« simple match »), un diagnostic de la situation (« diagnose the situation »), et une évaluation d'un cours d'action (« evaluate a course of action ») (modèle détaillé en 2.3.1.3).

Cette vision est remise en cause par plusieurs auteurs concernant la place de l'humain et son interaction avec l'environnement. Mouchet, Amans-Passaga et Gréhaigne (2010) reprenant Sève, Saury, Theureau et Durand (2002), remettent en cause le postulat d'un individu au « pilotage rationnel » qui, pour décider, appliquerait une logique objective et unique. Ce point sera abordé dans le Chapitre 3. Le pilotage est une activité dynamique et complexe, mobilisant les informations relatives à l'environnement, les valeurs, conceptions et connaissances relevant des expériences individuelles passées. L'activité de pilotage est parfois soumise à des pressions temporelles, corporelles et à d'autres obligations contextuelles, rendant le modèle séquentiel « détecter, identifier, agir », limité.

Malgré cette critique, les modèles issus de cette approche ont l'avantage de proposer un corpus de méthode d'évaluation relativement important que nous détaillerons par la suite. Nous choisirons donc de décrire le concept de Conscience de la Situation issu du courant de la NDM et sur lequel ces méthodes d'évaluation sont basées.

## 2.3 La conscience de situation

On peut définir la Conscience de la Situation – Situation Awareness (SA) – comme un élément clé des processus cognitifs en environnement dynamique (Chalandon, 2013). La littérature en ingénierie cognitive est assez homogène sur les fonctions principales associées à la SA : donner de la cohérence aux événements externes, créer des attentes et orienter la prise d'information, servir d'ancrage aux décisions et actions ultérieures, permettre l'anticipation des évolutions de la situation et des effets d'actions (Endsley, 1995; Grau, Menu, & Amalberti, 1996; Klein, 1989). De plus, les différentes approches de la SA sont unanimes sur sa modalité consciente ou du moins conscientisable

(Endsley, 1995; Sarter & Woods, 1991, p. 199; Smith & Hancock, 1995). Ces traits généraux sont cohérents avec deux caractéristiques de la SA soulignées par les définitions empiriques : sa finalisation (« savoir ce qui se passe pour savoir quoi faire ») et sa fonction anticipatrice (« être devant l'avion ») qui sont révélatrices de la hantise des équipages de ne pas disposer du temps nécessaire pour anticiper sur les événements et donc d'échouer dans l'ajustement de leur activité au dynamisme de la situation (Eyrolle et al., 1996). Cependant, des divergences sensibles existent dans la littérature quant à la nature de la SA et aux processus cognitifs impliqués. La SA apparaît comme un concept « mou », tantôt centré sur la perception immédiate de la situation, tantôt censé embrasser tout le champ de la cognition en environnement dynamique (Chalandon, 2013).

C'est ainsi que Breton et Rousseau, cités dans Roy, Breton et Rousseau (2007), Chalandon (2007), et Ozcan (2012) reprenant Durso & Gronlund (1999), distinguent deux approches de la conscience de la situation : l'une centrée sur le sujet, ou « vue de la personne », l'autre centrée sur la situation, ou « vue de l'environnement ». Chalandon explique que, dans le cadre la première, « *Par anticipation partielle du contexte et pré-activation d'invariants internes, la Conscience de la Situation favorise l'inscription de l'activité dans la dynamique de l'environnement* » alors que la seconde « *renverse la perspective en associant la Conscience de la Situation aux invariants externes du couplage sujet/environnement, notion élaborée à partir des affordances de la psychologie écologique* ». Roy, Breton & Rousseau, repris par Ozcan, affirment qu'il y a ensuite une différence importante selon que l'on considère la SA comme un état ou un processus.

On parle de « Situation Awareness » pour SA-état (Endsley, 1995) et de « Situation Assessment » pour SA-processus (Pew, 1994). La *Situation Awareness* s'intéresse au lien (similarité et différence) entre la situation et une représentation interne des éléments de la situation. La *Situation Assessment* s'attache à comprendre le processus permettant de passer de la situation réelle à une représentation intériorisée par l'individu. Dans la suite du manuscrit, nous parlerons de SA pour la *Situation Awareness* et préciserons explicitement quand nous parlerons de *Situation Assessment*.

## 2.3.1 Les différentes approches de la conscience de situation

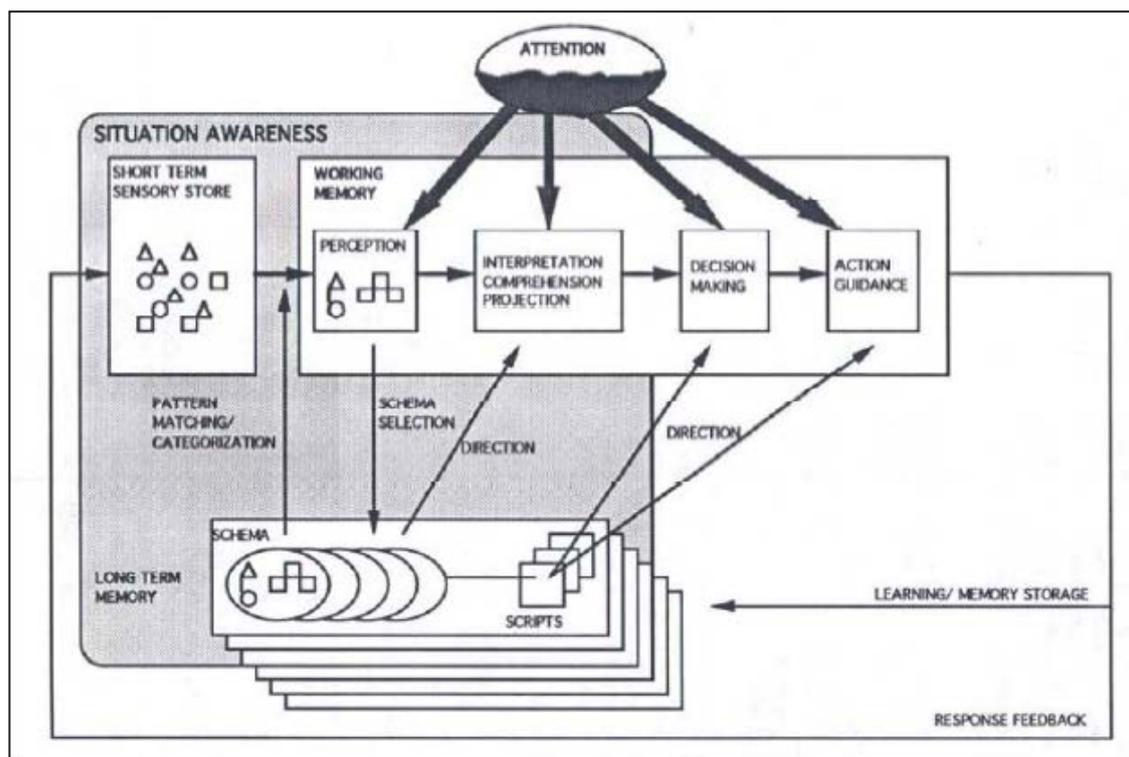
### 2.3.1.1 L'approche linéaire

Cette approche définit la SA comme le produit de trois états hiérarchiquement et temporellement organisés : « la perception des éléments de l'environnement dans un volume de temps et d'espace, la compréhension de leur signification et la projection de leur état dans le futur proche » (Endsley, 1995). Elle distingue les concepts de conscience de la situation et ceux de prise de décision et de performance. La conscience de situation se découpe en trois strates successives :

- 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 environnants : 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 en cours : 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 comprend que l'apparition de plusieurs aéronefs ennemis situés à une certaine distance les uns des autres et dans un certain contexte géographique donne des indications sur leurs intentions / objectifs.
- 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 qu'un aéronef ennemi dans une certaine position et une certaine configuration de lieu suggère une forte probabilité d'attaquer d'une certaine manière. Ce dernier niveau souligne le caractère indissociable des concepts de conscience de la situation et d'anticipation.

La Figure 10 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 vers un schéma qui orientera la compréhension et l'interprétation de la situation.



**FIGURE 10 – LA CONSCIENCE DE LA SITUATION SELON ENDLSEY (1995).**

Cette approche envisage une SA « contemplative » intervenant de façon indépendante et sérielle en amont de la prise de décision et n'intégrant pas les possibilités d'action. En effet l'identification de schéma en mémoire à long terme permet la compréhension de l'état de l'environnement, mais les « scripts » associés à la prise de décision n'interviennent qu'au moment effectif de la décision.

Cette position théorique est également la base d'une approche d'évaluation normative où la SA, en tant qu'état instantané de connaissances sur le monde, doit être la plus précise et complète possible, dans le pire des cas par rapport à un référentiel absolu, au mieux par rapport à un référentiel constitué de l'agrégat d'expertises. Cette approche est assez paradoxale car elle est centrée sur le sujet quant à la description de mécanismes cognitifs sous-tendant la SA, mais elle nie l'autonomie du sujet en spécifiant la production de ces mécanismes et donc les modes opératoires. De plus, en reprenant Amalberti (1996), le modèle sériel perception-compréhension-anticipation-décision-action, qui suppose une

dépendance à sens unique de l'amont vers l'aval, est d'une « désarmante naïveté » et il existe un parallélisme et des interdépendances qui sont amplifiés par l'expertise (Chalandon, 2013).

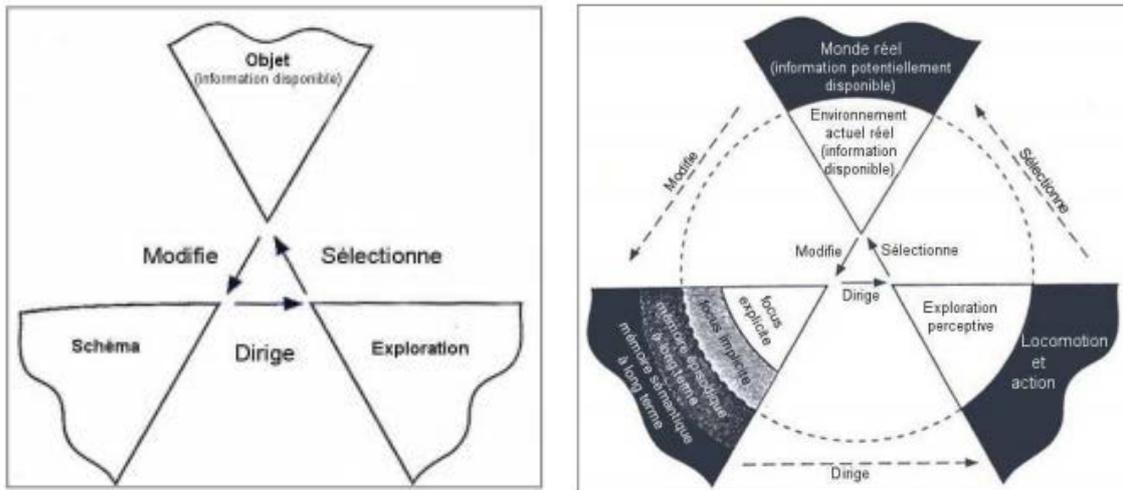
Ce modèle demeure une référence dans le domaine de l'aéronautique, autant sur le plan théorique que pratique (méthode d'analyse).

#### 2.3.1.2 Le cycle Perception-Action

Neisser (1976) propose ce qu'il appelle le cycle Perception-Action qui fait intervenir le triptyque environnement (ou objet), schéma, exploration. Comme l'indique Bailly (2004), le premier correspond à l'information disponible dans l'environnement externe, le deuxième à la connaissance interne stockée dans la mémoire à long terme quand elle n'est pas utilisée et le dernier à la recherche d'information dans l'environnement par l'opérateur. Ainsi, « *l'objet modifie le schéma, le schéma dirige l'exploration, et l'exploration mène au prélèvement de l'information sur l'objet dans l'environnement* » (Bailly, 2004).

Comme l'illustre la Figure 11, Adams, Tenney et Pew (1995) étendent le cycle de Neisser en intégrant les deux niveaux, implicite et explicite, de la mémoire active de Sanford et Garrod (1981), scindant alors le schéma en « focus explicite » (correspondant à la mémoire de travail) et le focus implicite contenant lui l'intégralité du schéma et ajoutant mémoire sémantique et épisodique.

Caractérisé comme une approche centrée sur l'opérateur par Ozcan (2012), le modèle de Neisser modifié par Adams permet selon Bailly (2004) « d'envisager plusieurs niveaux de traitement de l'information » et « de briser le cadre rigide des trois niveaux définis par Endsley ».



**FIGURE 11 – CYCLE PERCEPTUEL D'APRÈS NEISSER (1976) (À GAUCHE) ET SA VERSION ÉTENDUE D'APRÈS ADAMS ET AL (1995) (À DROITE).**

*Le traitement de l'information se présente sous la forme d'un cycle. À gauche l'environnement (objet) modifie les schémas mentaux, ces derniers orientent l'exploration de l'environnement. Cette exploration sélectionne les éléments de l'environnement qui modifieront les schémas.*

*Le cycle de droite explicite ces différentes étapes en les associant à des mémoires particulières, et à des fonctions perceptives et motrices. Le cercle interne correspond à la collecte d'information – une certaine passivité vis-à-vis de l'environnement – alors que le cercle externe est associé à l'action sur l'environnement pour produire des effets. Notons qu'il n'existe pas de cloisonnement entre les deux cercles (interne – externe), le cycle peut être parcouru sur sa partie interne et l'on peut passer sur la partie externe au niveau de l'environnement et inversement.*

Nous retenons de ce modèle, en plus de l'aspect cyclique, le concept sous-jacent d'orientation de la perception, d'une part endogène avec le « focus » qui dirige l'exploration visuelle, et d'autre part exogène avec l'environnement qui modifie le « focus ». Nous nous appuyerons sur les modèles de l'attention issus du domaine de la psychologie pour détailler ce concept dans le chapitre suivant.

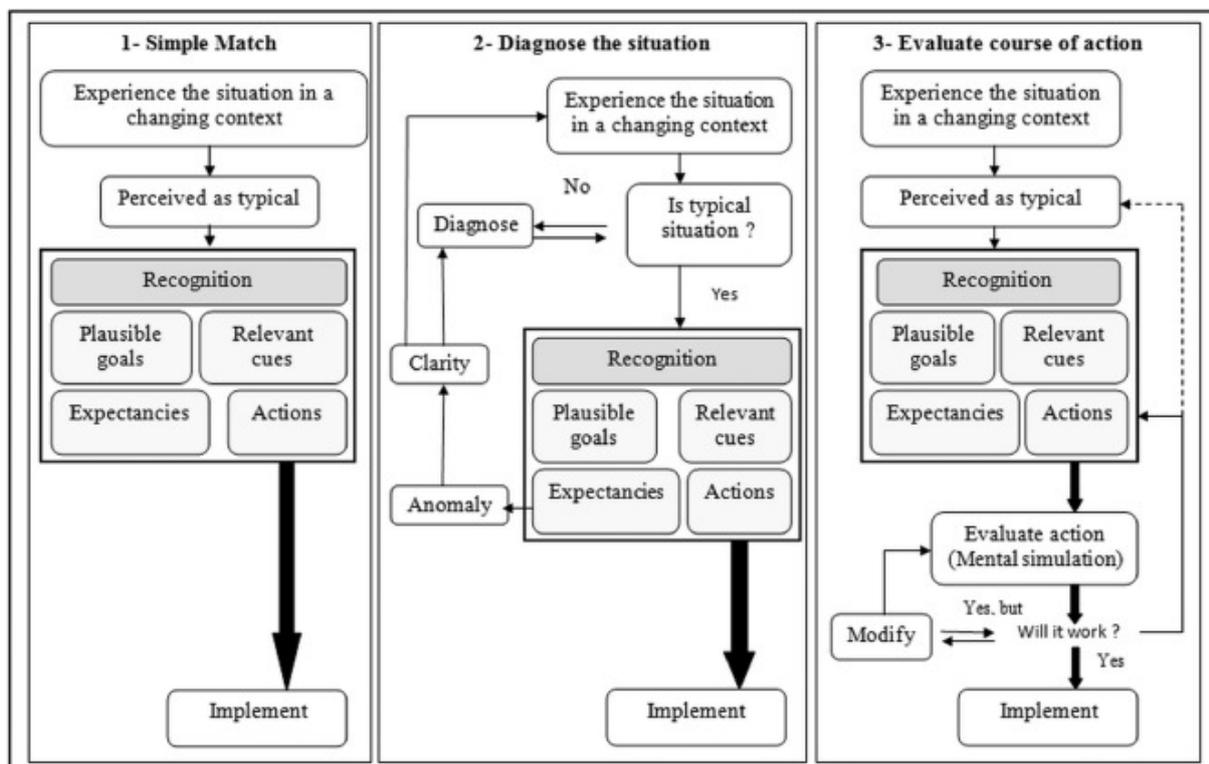
### 2.3.1.3 L'approche « décisionnelle » ou « réactive »

D'après Chalandon (2007), cette approche, issue du courant de recherche Naturalistic Decision Making (NDM), insiste sur les processus de construction de la conscience de la situation, qui ne peuvent être séparés des états produits, et sur l'existence de plusieurs niveaux de traitement fonctionnant en parallèle. Les chercheurs considèrent, en réaction au modèle linéaire, l'analyse exhaustive de la situation impossible sous contraintes

temporelles. La solution au problème de la synchronisation activité-environnement dans les situations à forte dynamique est alors la reconnaissance implicite de patterns significatifs pour l'action (*Naturalistic decision making*, 1997).

Un des modèles prédominant est celui développé par Klein (1993, p. 199) : le modèle « *Recognition Primed Decision* » (RPD). Il propose trois modes possibles d'évaluation de la situation de la situation (situation assessment) :

- Reconnaissance simple : une action est mise en œuvre sans comparaison avec les autres possibilités d'action. Ce mode consiste donc en un appariement implicite entre événements et connaissances fonctionnelles possédées en mémoire ;
- Adaptation d'actions : plusieurs actions apparaissent mais une seule est retenue. Celle-ci est simulée mentalement et, selon le résultat obtenu, est adoptée ou modifiée pour devenir réalisable ;
- Stratégie complexe : ce mode n'intervient que lorsque les autres ont échoué ou que la situation ne correspond pas aux attentes : il y a alors réévaluation de la situation ou bien sélection d'une autre action en vue d'être évaluée.



**FIGURE 12 – TRADUCTION DU MODÈLE *RECOGNIZED PRIMED DECISION* DE KLEIN (1989).**

Le modèle se décompose en trois modalités d'action : une reconnaissance simple (« simple match »), un diagnostic de la situation (« diagnose the situation »), et une évaluation d'un cours d'action.

2.3.1.4 L'approche « centrée sur la régulation »

Pour cette approche, issue de l'ergonomie centrée sur l'activité, le processus de compréhension consiste en l'ajustement permanent d'une représentation fonctionnelle selon l'historique de la situation et les buts à atteindre (*Team performance assessment and measurement*, 1997; Hoc & Amalberti, 1995; Sarter & Woods, 1991). Cette activité de révision de la représentation dite « occurrente » fonctionne par des aller-retours entre représentation et réel. Les éléments de la représentation occurrente jugés cohérents avec l'environnement guident l'actualisation des éléments qui sont « périmés ». Le sujet admet que la représentation occurrente peut être incomplète et donc partiellement représentative de la réalité.

Le modèle met donc en place, comme dans celui de RPD, trois boucles de contrôle :

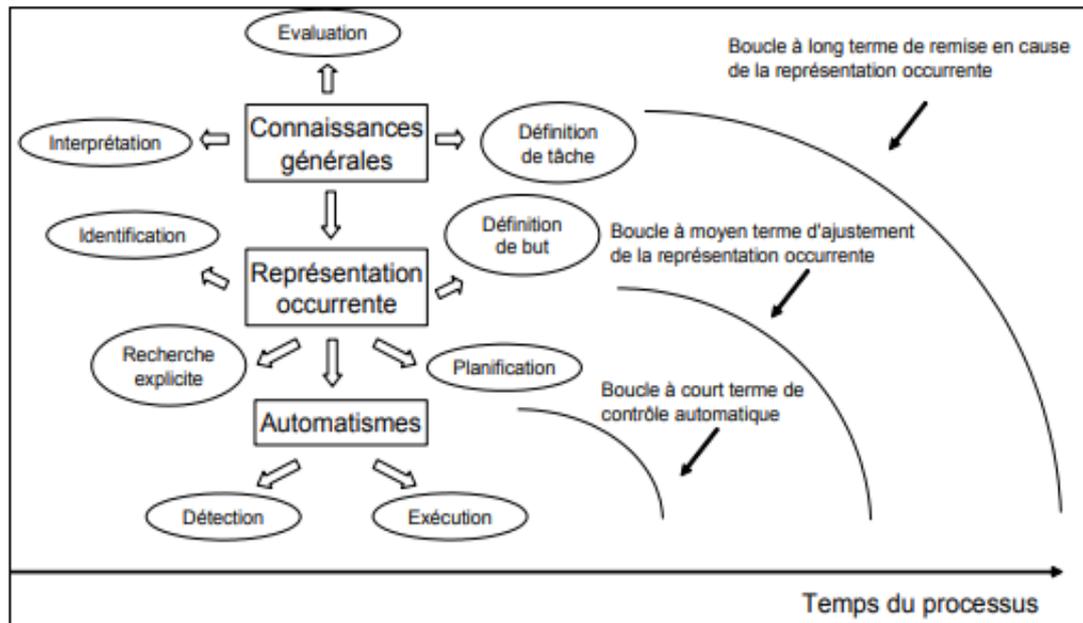
- À court terme : le contrôle est quasi automatique, suivant les possibilités d'action sur le moment même ;
- À moyen terme : la « représentation occurrente » s'ajuste par anticipation ou adaptation au phénomène, alimentée par les informations du processus ou par des connaissances ;
- À long terme : en cas de profonde incompréhension, on observe une recomposition partielle ou totale de la représentation, en utilisant des connaissances plus générales.

Tout est lié dans ce modèle, les boucles de régulation interagissent entre elles et fonctionnent en parallèle à chaque fois qu'on augmente de niveau (Neyns, 2011).

Ajoutons que Chalandon (2007) souligne une triple dualité :

- Le produit et le processus de la compréhension se co-déterminent, la conscience de situation ne pouvant être envisagée en dehors des processus qui la soutiennent ;
- La SA joue un rôle métacognitif en plus d'un rôle cognitif, puisqu'il y a un diagnostic de la qualité de la SA par rapport à soi ;

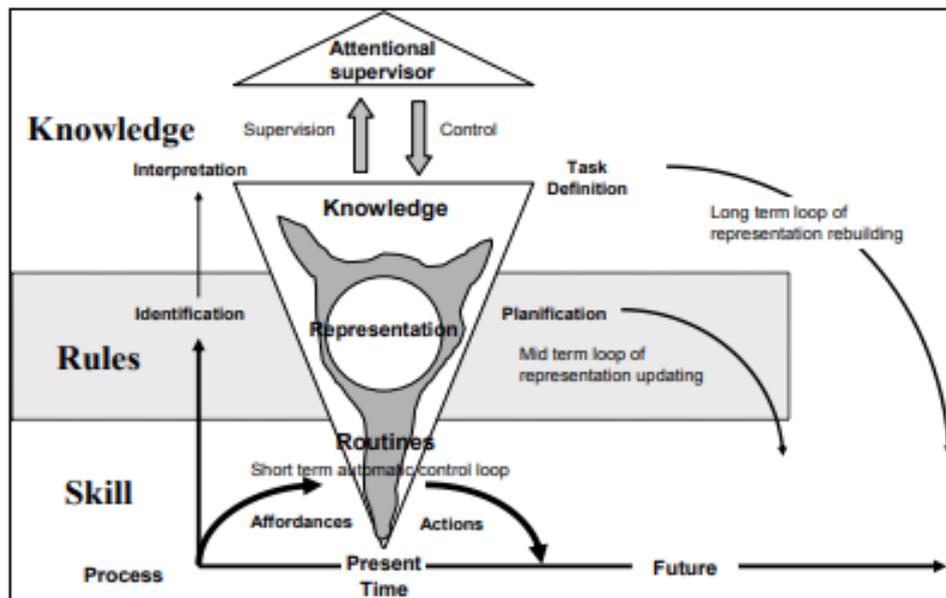
- La situation est un système dual pilote-tâche dont les éléments se co-déterminent : l'analyse doit alors articuler système cognitif et domaine d'action.



**FIGURE 13 – UNE APPROCHE CENTRÉE SUR LA RÉGULATION : LA RÉOLUTION DE PROBLÈME EN SITUATION DYNAMIQUE (HOC, 1996)**

Notons qu'Amalberti (2001) a rassemblé son modèle et celui de Rasmussen (1983) (SRK – Skill, Rules, Knowledge) dans la proposition suivante (Figure 14). Rasmussen décrit le processus de résolution de problème comme une adaptation à la situation sur trois niveaux. Selon la complexité de la situation, l'individu fera appel :

- aux compétences (Skill), que l'on peut assimiler à des actes réflexes ou de routine, où l'action est exécutée de manière inconsciente dans la plupart des cas.
- aux règles (Rules), pour les actions qui demandent une prise de décision consciente et une interprétation.
- aux connaissances (Knowledge), pour comprendre la situation, structurer l'action et l'ajuster en fonction des buts recherchés.



**FIGURE 14 – UNIFICATION DU MODÈLE DE CONTRÔLE DYNAMIQUE ET DU MODÈLE SRK DE RASMUSSEN (1983) D'APRÈS AMALBERTI (2001)**

Mais il est également possible de les rapprocher du modèle RPD de Klein, et ce pour plusieurs raisons :

- Les trois mettent en scène trois boucles parallèles, dont chacune permet l'obtention d'une décision et d'un plan d'action à la fin.
- La première boucle (Skills ; Reconnaissance simple ; Boucle à court terme) renvoie à la notion d'automatisme : l'opérateur agit de manière automatique en identifiant implicitement une activité routinière.
- La deuxième boucle (Rules, Adaptation d'actions, Boucle à moyen terme) correspond à une situation connue qu'on reconnaît par la mise en relation des éléments perçus de l'environnement et de schémas contenus dans notre mémoire à long terme. L'opérateur construit une RM de la situation. Au schéma sélectionné pour appréhender la situation sont associées une ou des actions disponibles, parmi lesquelles l'opérateur pourra faire son choix pour agir selon ses buts.
- La troisième boucle (Knowledge, Stratégie complexe, Boucle à long terme) correspond à des situations relativement générales ou qui ne correspondent pas aux attentes. Dans ce cas l'individu va faire appel à des connaissances plus générales, permettant de construire une RM par composition totale ou partielle de

différentes représentations déjà présentes en mémoire à long terme. Les actions à réaliser ne seront pas directement disponibles et une planification sera nécessaire pour envisager des solutions inédites à la situation. Nous pouvons néanmoins émettre une réserve quant au rapprochement, d'une part, des troisièmes boucles Knowledge et Boucle à long terme et, d'autre part, de la stratégie complexe de Klein qui ne sous-entend pas nécessairement la création de solutions inédites.

On retient du modèle de régulation comme des modèles RPD et SRK que la stratégie de prise de décision (et le processus de traitement de l'information) dépend de la pression temporelle et de la complexité de la situation. Dans le modèle de régulation, ces deux composantes semblent liées. Il n'est pas possible de traiter une situation complexe en peu de temps.

#### 2.3.1.5 L'approche « centrée sur les contraintes »

En rupture avec les modèles précédents, la problématique de la SA est ici interprétée comme imposant un nécessaire changement de paradigme, de la cognition centrée sur le sujet, vers l'étude du couplage dynamique entre l'homme et l'environnement. Aussi appelée modèle néo-écologique ou cognition située, cette approche souligne la nécessité pour l'opérateur d'avoir une conscience explicite des contraintes et ressources de l'environnement et définit la SA comme « une conscience dirigée vers l'externe » (Smith & Hancock, 1995). Refusant d'identifier la SA à un produit ou à une étape des processus cognitifs, les partisans de ce modèle reprennent les notions d'affordance et de perception directe de Gibson (1979). La SA est identifiée à un invariant structurant la connaissance et le comportement, permettant de répondre aux exigences normatives de l'environnement sociotechnique (Flach, 2015). Gibson (ibid.) développe l'idée que certaines composantes de l'environnement « offrent » des possibilités d'interaction à un sujet particulier. Puisque pour Gibson la perception serait déterminée directement par la structuration des stimuli externes, le modèle néo-écologique retient la possibilité que le sujet reçoit « directement » des affordances issues d'une situation. Si cette approche est explicitement normative, elle est très différente de la prescription de l'approche linéaire, en ce sens qu'elle ne cherche pas à nier l'autonomie de l'opérateur en spécifiant la totalité de la SA-produit mais à « l'éclairer » en explicitant les contraintes de l'environnement

nécessaires à l'action efficace (Flach, Tanabe, Monta, Vicente, & Rasmussen, 1998). À ce titre, Vincente (1999) parle d'approche « formatrice ».

On peut rapprocher cette conception de celle du cercle perceptif (Adams et al., 1995) où l'environnement modifie le « focus ».

### 2.3.2 Tentative d'unification

Nous avons recensé plusieurs modèles de conscience de situation. Certains partagent des points communs, d'autres divergent sur bien des aspects ; aussi notre but est ici de tenter une unification, ou du moins une caractérisation des uns par rapport aux autres.

Nous retenons deux grandes approches :

1. Une conception unitaire (linéaire ou cyclique) du processus décisionnel, dans laquelle les étapes se succèdent mais restent identiques, peu importe la situation : modèle d'Endsley, cycle perceptif et analyse de situation. Bien que ces concepts divergent d'un point de vue épistémologique, ils sont très proches dans leur application pratique. Cette approche présente deux avantages, en particulier pour le modèle d'Endsley. Elle dispose de nombreux outils d'évaluation, que nous détaillons dans la partie suivante (cf. 2.4) et fait référence dans le domaine de l'aéronautique.
2. Une conception multiple du processus de décision dans laquelle la stratégie de résolution dépendra de contraintes (temps, ressources, complexité...) : modèles décisionnels, de régulation et SRK (Rasmussen, 1983). Cette conception est théoriquement plus riche et plus cohérente avec les modèles de la mémoire, de l'attention et de la planification que nous développons dans le chapitre suivant.

Enfin, il y a le modèle néo-écologique, aussi appelé « approche basée sur les contraintes ». Il est difficile de le réunir avec un autre modèle, étant donné qu'il rejette l'analyse et même le rôle de nombreux processus cognitifs, considérant que l'information et les affordances proposées par l'environnement nous parviennent directement et ne nécessitent pas de traitement pour accéder à leur contenu une fois perçues. On retiendra le concept d'affordance dans ce modèle.

## 2.4 La mesure de la conscience de la situation

Le modèle d'Endsley est devenu rapidement une référence pour le monde de l'aéronautique pour lequel il a été initialement développé, mais fait également référence indépendamment du domaine, dès lors qu'on s'intéresse à la SA (Sharma, Nazir, & Ernstsén, 2019). Par conséquent, plusieurs méthodes d'évaluation quantitative dérivées de ce modèle ont été développées. La plupart ont été validées et utilisées dans de nombreuses études.

Nous avons réalisé une analyse de ces différentes méthodes afin de déterminer celle qui nous permet de répondre à notre problématique, c'est-à-dire : l'évaluation de la RM que se fait un opérateur de la situation au cours d'une activité réelle. Il nous importe également de comprendre quels éléments externes au sujet modifient cette représentation (environnement, interface, coéquipier...) et ce, de manière chronologique

MÉTHODES D'ANALYSE DE LA CONSCIENCE DE LA SITUATION	SYNTHÈSE DE LA MÉTHODE	AVANTAGES POUR NOTRE ÉTUDE	LIMITES POUR NOTRE ÉTUDE
<p align="center"><b>SITUATION AWARENESS GLOBAL ASSESSMENT TECHNIQUE (SAGAT) (ENDSLEY, 1988)</b></p>	<p>SAGAT est une méthode d'évaluation de la conscience de la situation basée sur l'interruption de la tâche. Cette méthode repose sur le postulat d'Endsley et la modélisation de la CS en 3 niveaux. L'activité analysée doit être bien connue par l'analyste, les questions interrogeant les 3 niveaux de CS doivent être préparées. La tâche est réalisée en simulateur haute-fidélité. À chaque interruption, des questions sont posées au sujet pour évaluer son niveau de CS, la réponse est notée de façon binaire.</p>	<p>La méthode permet d'obtenir une CS objective, non biaisée par la performance ou la détérioration de la mémoire.</p>	<p>Il faut pouvoir produire un simulateur haute-fidélité et que la tâche soit simulable. L'interruption de tâche est très intrusive et dégrade fortement la performance à la tâche. Ne peut pas être réalisée durant une tâche collaborative. Le questionnement peut informer le sujet sur les aspects dont il n'était pas conscient.</p>
<p align="center"><b>PROPOSITIONAL NETWORK (SALMON, STANTON, WALKER, JENKINS, &amp; RAFFERTY, 2010; N. A. STANTON ET AL., 2006)</b></p>	<p>Cette méthode s'appuie sur plusieurs méthodes de recueil de données, en général il est préférable que la tâche soit observée et qu'une retranscription des verbalisations soit faite. À partir de ces données, on construit un réseau de liens entre les différents éléments de la tâche. Par exemple, entre les concepts « souris » et « rongeur », on trouvera le lien « est ». Dans le réseau de concept, cela sera représenté par une flèche sur laquelle on aura écrit « est ». Par la suite, la méthode demande d'être vérifiée par plusieurs relecteurs et des experts du domaine. L'objectif de cette méthodologie est de concevoir la représentation de la SA qu'un opérateur doit posséder du système.</p>	<p>Permet de constituer des liens entre les différents éléments de la CS. Les liens peuvent être étudiés quantitativement/statistiquement afin de déterminer les concepts les plus importants et créer des hiérarchies de concept.</p>	<p>Cette méthode permet de modéliser la CS d'une activité mais pas de la mesurer.</p>

<p><b>SITUATION AWARENESS RATING TECHNIQUE (SART) (SELCON &amp; TAYLOR, 1990)</b></p>	<p>Permet d'analyser la SA a posteriori à l'aide d'un questionnaire. Le questionnaire se décompose en 10 questions réparties en 3 catégories, la demande de ressources attentionnelles (D – Demand), la ressource attentionnelle (S – Supply), la compréhension de la situation (U – Understanding). Le sujet répond sur une échelle de 1 à 7 aux questions. D, S et U correspondent à la somme des scores des questions de chaque catégorie. On calcule la SA d'un sujet par la formule : <math>SA = U - (D - S)</math></p>	<p>C'est une méthode simple et rapide, avec des données faciles à analyser, qui s'applique dans tous les domaines, de manière non intrusive.</p>	<p>Cette mesure subjective de la CS est influencée par la performance du sujet sur la tâche. D'autre part, la question se pose de savoir si le sujet peut être conscient qu'il a une conscience erronée de la situation. Comme toute méthode de post analyse, la dégradation de la mémoire dévalue la pertinence de la méthode. De plus, les items semblent plus représentatifs de la charge de travail que de la CS.</p>
<p><b>SITUATION AWARENESS SUBJECTIVE WORKLOAD DOMINANCE (SA-SWORD) (VIDULICH &amp; HUGHES, 1991)</b></p>	<p>Cette méthode a pour objectif de comparer la CS produite par deux artefacts différents (interfaces/tâches). Dans la comparaison de plusieurs artefacts (A, B et C), tous les cas doivent être testés (A contre B, A contre C, B contre C). Pour chaque comparaison (ex. : A contre B), le sujet note sa préférence sur une échelle de 17 valeurs. La valeur centrale (9<sup>e</sup> valeur) vaut 1, s'il préfère A la note sera de 2 (8<sup>e</sup>) à 9 (1<sup>e</sup>), s'il préfère B, la note sera de 1/2 (10<sup>e</sup>) à 1/ 9 (17<sup>e</sup>). Ces valeurs sont reportées dans une matrice, la diagonale vaut 1 et seule la triangulation supérieure est remplie. La note de chaque artefact est donnée par la moyenne géométrique de la ligne, sur la moyenne totale.</p>	<p>Peut s'appliquer dans des nombreux domaines, c'est une méthode facile à mettre en place. Une méthode dont la validité a été éprouvée et pour laquelle les sujets ont un haut taux d'acceptation.</p>	<p>La méthode se base sur la conception qu'ont les sujets de la CS. De ce fait, il reste une grande variabilité inter-sujet et, de plus, la définition d'une bonne et mauvaise CS n'est pas la même pour tous. Comme pour toutes méthode d'évaluation a posteriori, les sujets sont influencés pour l'évaluation de la CS par leur performance à la tâche. Les sujets ont tendance à oublier les périodes de faible SA pendant la tâche.</p>
<p><b>SPAM (DURSO ET AL., 1998)</b></p>	<p>Cette méthode a pour objectif de mesurer la CS pendant une tâche comme le SAGAT, mais sans l'interrompre. Les questions ne concernent pas</p>	<p>Comme le SAGAT, il n'y a pas les problèmes de mesure de la CS par post-traitement. La tâche</p>	<p>Le recueil reste très intrusif et dégrade la performance sur la tâche. Cette méthode ne peut</p>

**SA REQUIREMENTS  
ANALYSIS  
(ENDSLEY, 1993)**

<p>une conscience de situation, mais directement un fait révélateur de la conscience de situation à un instant donné. Les questions sont posées par téléphone. La CS est évaluée à travers la validité de la réponse et du temps de réponse pour les réponses justes.</p>	<p>n'est pas interrompue. La méthode est facile à mettre en place et peut s'appliquer sur des tâches réelles (sans simulateur).</p>	<p>pas s'appliquer sur toutes les tâches. Le questionnement peut informer le sujet des aspects dont il n'était pas conscient. Les questions doivent être élaborées pendant le scénario.</p>
<p>Cette méthode a pour objectif de capitaliser le savoir d'expert d'un domaine à l'aide d'entretiens. D'abord, il faut expliquer le concept de CS aux experts et leur demander de définir pour la tâche donnée ce qui est pour eux une « bonne » CS. Après un approfondissement de l'entretien autour d'une bonne CS, l'expert est questionné afin de définir quelle CS est nécessaire pour chaque phase de la tâche, c'est-à-dire les prises de décision, la planification et les actions. Enfin, l'analyste suggère des éléments qui devraient entrer dans la CS pour relancer la réflexion sur la CS parfaite. Une détermination des différents objectifs liés à la tâche est ensuite réalisée, comme par exemple une HTA. Les tâches sont mises en regard des CS associées et l'expert détermine la criticité des CS en fonction de la tâche (non importante (1) – très importante (3)). Cela permet de créer une recommandation ordonnée des CS associées aux tâches.</p>	<p>Permet d'obtenir une vision structurée des différentes CS nécessaires par rapport à un scénario.</p>	<p>Cette méthode ne permet pas d'avoir des informations sur la conception d'interfaces, ni sur la SA réelle d'un opérateur.</p>

Nous constatons que ces techniques de mesure de la SA (SAGAT, SART (Selcon & Taylor, 1990), SPAM, SA-SWORD, mais aussi PSAQ, CAST et MARS), nécessitent une interruption de la tâche étudiée, ou font l'objet d'une évaluation unique a posteriori et ne situent pas l'expérimentation dans un cadre « écologique ».

## 2.5 Conclusion sur la prise de décision en ingénierie cognitive

Les méthodes associées aux différents modèles de prise de décision développés en ingénierie cognitive ne permettent pas une compréhension fine de la prise de décision. De plus, il est difficile d'établir un lien direct entre les méthodes d'évaluation et les modèles associés. Les différents concepts (mémoire, attention, planification...) évoqués dans ces modèles ne sont pas clairement définis dans le champ de l'ingénierie cognitive, et fluctuent d'un auteur à l'autre. Il semble essentiel de fixer ces concepts en faisant appel à la neuropsychologie et à la psychologie cognitive.

# CHAPITRE 3 LES FONCTIONS EXÉCUTIVES

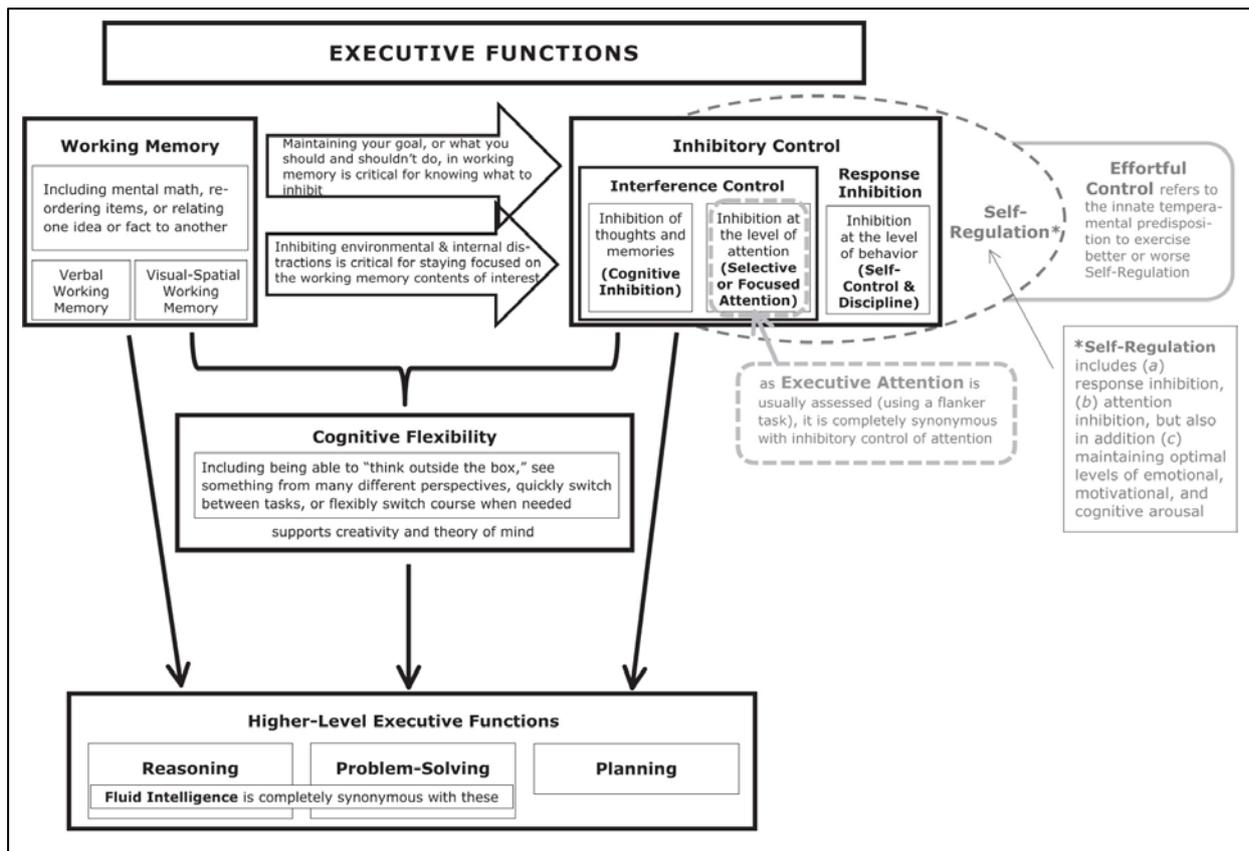
Dans ce chapitre, nous nous intéressons aux aspects étudiés en psychologie cognitive qui participent à la compréhension de la prise de décision. En plus des concepts déjà évoqués (mémoire, attention, planification), nous soulignons le rôle des émotions dans les processus de prise de décision. En effet, celui-ci n'est pas ou peu abordé dans les approches issues de l'ingénierie cognitive.

Nous cherchons à décrire les processus mobilisés lorsque les individus doivent évaluer, juger, poser un diagnostic et décider de leur action future, en vue d'atteindre un but donné, en l'occurrence piloter un avion, assurer la sécurité des personnes à bord mais aussi assurer l'intégrité de l'appareil.

Nous présentons un modèle de prise de décision issu de la neuropsychologie (Diamond, 2013) qui nous permettra d'aborder les notions d'attention, de mémoire et de planification.

D'après Diamond (2013), dont le travail repose sur la synthèse de plusieurs modèles (Miyake et al., 2000; Rabbitt, 1997) (Figure 15), les principales fonctions exécutives sont :

- L'inhibition
  - L'inhibition de la réponse (autocontrôle - résistance aux tentations et résistance à l'action impulsive)
  - Le contrôle des interférences (attention sélective et inhibition cognitive)
- La mémoire de travail
- La flexibilité cognitive (y compris la pensée créative "hors des sentiers battus", le fait de voir les choses sous différents angles et de s'adapter rapidement et avec souplesse aux changements de circonstances, la capacité de théorie de l'esprit)
- Les fonctions exécutives de hauts niveaux
  - Capacité à raisonner
  - Résolution de problèmes
  - Planification



**FIGURE 15 – FONCTIONS EXÉCUTIVES ET TERMES ASSOCIÉS. TRADUIT DE DIAMOND (2013).**

Ainsi, si un individu veut faire face à une situation particulière, il doit « porter son attention » sur cette situation (cf. 3.1). Il devra également percevoir les indices de l'environnement qui lui permettront de comprendre la situation. Le recours à la mémoire lui permettra de se reporter à des situations similaires (cf. 3.2). Enfin, la planification permettra de guider l'activité (cf. 3.3).

### 3.1 L'attention

L'attention est un concept dont il est difficile de donner une définition simple (Lithfous, Després, & Dufour, 2018 d'après ; Zanto & Gazzaley, 2014). Même s'il n'existe pas de consensus, la définition donnée par le psychologue et philosophe William James (1890, p. 403-404) fait référence. Elle est reprise par la majorité des auteurs contemporains (Lithfous et al., 2018) :

« L'attention est la prise de possession par l'esprit, sous une forme claire et vive, d'un objet ou d'une suite de pensées parmi plusieurs qui sont présents simultanément. »

“[Attention] is the taking possession by the mind, in clear and vivid form, of one out of what seem several simultaneously possible objects or trains of thought.”

En psychologie cognitive, l'attention est considérée comme une fonction exécutive complexe permettant d'adapter les informations provenant de l'environnement aux besoins de l'organisme (Ben Azouz, Dellagi, Kebir, & Tabbane, 2009). Ainsi, il existe différents processus attentionnels tels que la sélection, le contrôle ou l'activation. Ces processus se distinguent aussi bien par leur fonctionnement, que par les réseaux cérébraux qui les sous-tendent (Petersen & Posner, 2012).

Nous décrivons l'attention au travers du modèle hiérarchique de Sohlberg et Mateer (1987, 1989), basé sur des cas cliniques de neuropsychologie expérimentale. Selon ce modèle, l'attention se décompose de la manière suivante :

- Arousal : que l'on associe à l'alerte dans le modèle de Posner et plus généralement aux processus pré-attentifs.
- Attention sélective : Fait référence à la capacité à prêter attention à un stimulus ou à une activité précise en présence d'autres stimuli distracteurs.
- Attention focalisée : Fait référence à la capacité à centrer son attention sur un stimulus.
- Attention soutenue : Fait référence à la capacité à prêter attention à un stimulus ou à une activité durant un long moment.
- Attention alternée : Fait référence à la capacité à changer de centre d'attention entre deux ou plus stimuli.
- Attention partagée : Peut être définie comme la capacité de notre cerveau à prêter attention à plusieurs stimuli ou activités à la fois.

Les attentions dites sélective, focalisée, soutenue et alternée peuvent être considérées comme des modes de fonctionnement résultant de l'impact de la fonction exécutive d'inhibition sur l'attention. Nous la décrivons rapidement avant de nous attarder sur l'attention partagée, qui a historiquement beaucoup fait débat. Mais nous commencerons par aborder les modes opératoires de l'attention.

### 3.1.1 Modes opératoires de l'attention

L'attention volontaire (ou endogène ou *top-down*) et l'attention automatique (ou réflexive ou exogène ou involontaire ou *bottom-up*) sont deux notions antagonistes (Ibos, 2009; Sieroff, 2008). Pour Posner (2016), ce sont les deux modes opératoires de l'orientation de l'attention. L'attention volontaire est la capacité d'orienter consciemment ses facultés de traitement vers une position de l'espace ou vers des objets particulièrement importants pour l'individu. L'attention automatique correspond à l'orientation automatique des capacités de traitement vers des stimuli.

Cette distinction automatique/volontaire est également liée à l'environnement. De ce point de vue, nous parlerons de « saillance ». Nous pouvons la définir comme la valeur attribuée à un stimulus pour son traitement. Un stimulus doté d'une saillance intrinsèque (comme un stimulus rouge parmi des stimuli) générera une attention automatique. À l'inverse, un objet ayant une saillance extrinsèque aura une forte valeur de saillance, indépendamment de ses propriétés. En effet, c'est le sujet qui attribue sa valeur au stimulus. Dans ce cas, on se trouve dans une situation d'attention volontaire. Ces deux notions sont liées au « visuel », bien qu'elles soient transposables à d'autres domaines perceptuels.

### 3.1.2 Processus pré-attentifs

Afin d'optimiser le processus cognitif impliquant l'attention, des phénomènes pré-attentifs ont été mis en avant. Ces phénomènes se situent en dehors de l'attention proprement dite, mais y participent puisqu'ils en sont les précurseurs. Ils interviennent avant que l'attention ne soit consciente (Ben Azouz et al., 2009; Sieroff, 2008).

- L'alerte (ou vigilance) est un phénomène présent avant que l'attention proprement dite ne soit activée et avant même qu'un stimulus environnant ne se présente. Cet état permet de maintenir un niveau adéquat d'activation du système cognitif (alerte tonique) et prépare le système attentionnel à répondre à un éventuel stimulus (alerte phasique) (Posner, 1978).
- L'orientation est le phénomène pré-attentif qui permet d'attribuer de l'attention à un espace potentiellement important, en optimisant les processus

perceptuels. C'est un phénomène qui rejoint ceux des attentions volontaire et automatique, ainsi que les principes de saillance (cf. 3.1.1).

### 3.1.3 L'attention sélective

Comme son nom l'indique, l'attention sélective se caractérise par une sélectivité ainsi qu'un traitement de l'information à l'entrée du système cognitif. L'attention sélective est la fonction exécutive d'inhibition contrôlée de l'attention.

Plusieurs modèles ont été proposés, certains caractérisés par leur niveau de sélectivité et d'autres par le traitement de l'information. Parmi ceux dont le niveau de sélectivité a été nuancé, on observe des modèles présentant les caractéristiques suivantes :

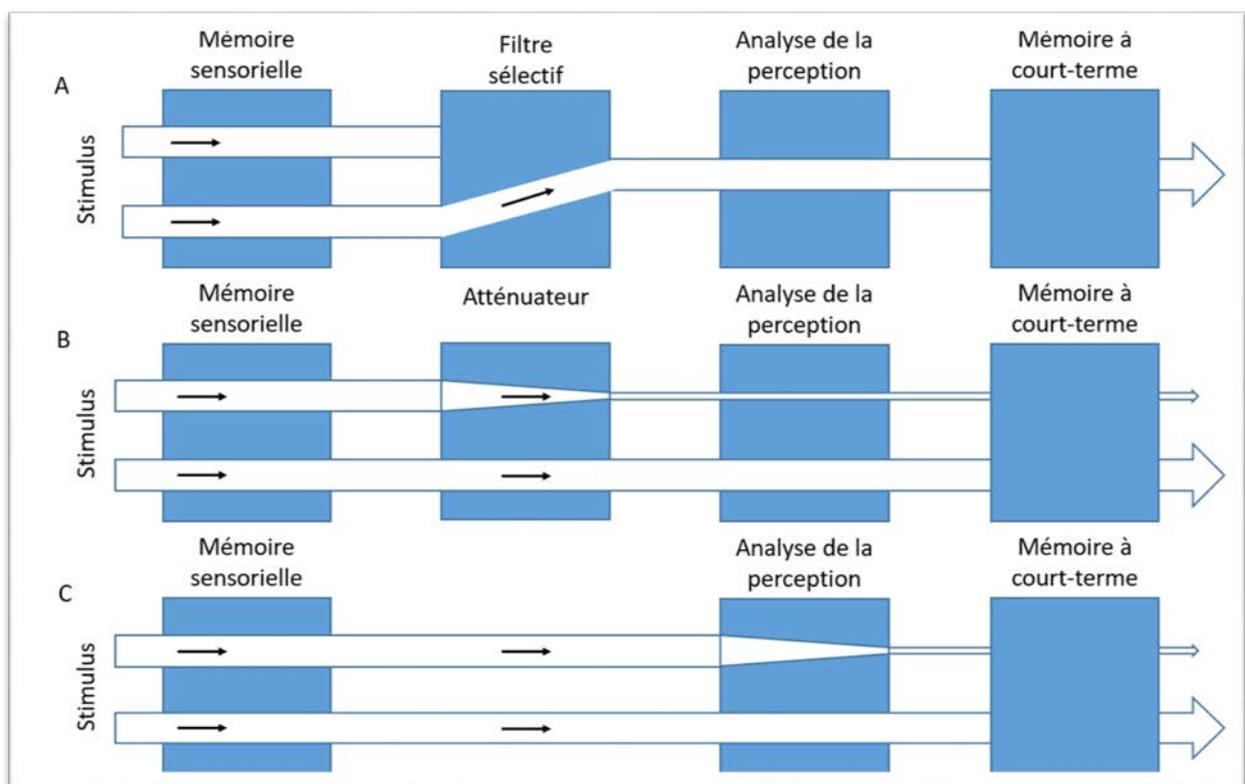
- La quantité d'information sélectionnée est très limitée (LaBerge, 1983; Müller, Bartelt, Donner, Villringer, & Brandt, 2003; Posner, Snyder, & Davidson, 1980).
- L'attention apparaît liée au champ visuel, qui peut s'élargir ou se restreindre selon le besoin (modèles du spotlight, Eriksen & St James, 1986).
- Le traitement en simultané de plusieurs stimulus tend vers un concept d'attention divisée (Broadbent, 1958; Deutsch & Deutsch, 1963; Kahneman, 1973; Treisman, 1964).

### 3.1.4 L'attention divisée

L'attention divisée peut être entendue comme la division de l'attention en plusieurs canaux perceptifs, comme des stimuli de différents types (auditif, visuel) ou comme le partage de l'attention pour traiter des stimuli provenant du même canal (Awh & Pashler, 2000; Morawetz, Holz, Baudewig, Treue, & Dechent, 2007; Niebergall, Khayat, Treue, & Martinez-Trujillo, 2011). On notera l'effet « *Cocktail Party* » (Cherry, 1953), qui met en avant le partage d'attention. Cet effet se manifeste par le fait de pouvoir suivre une conversation dans un environnement bruyant (inhibition du bruit), tout en restant attentif à ce bruit : si une personne nous appelle, on l'entendra.

Les disparités concernant le traitement de l'information ont donné naissance historiquement à trois grandes théories :

- La théorie selon laquelle on ne traite qu'une information à la fois. Dans ce cas, il existerait une sélection, un filtre, dans les informations. C'est la théorie du filtre perceptif de Broadbent (1957, 1958), qui propose un modèle dans lequel l'information pertinente est discriminée au niveau de la perception (Figure 16, A).
- La théorie de l'atténuation (Treisman, 1964) (Figure 16, B).
- La théorie de la sélection tardive. Deutsch et Deutsch (1963) décalent le filtre au niveau de l'analyse de la perception (hypothèse C de la Figure 16). Toutes les informations entrent dans le système cognitif et ne sont sélectionnées qu'après.

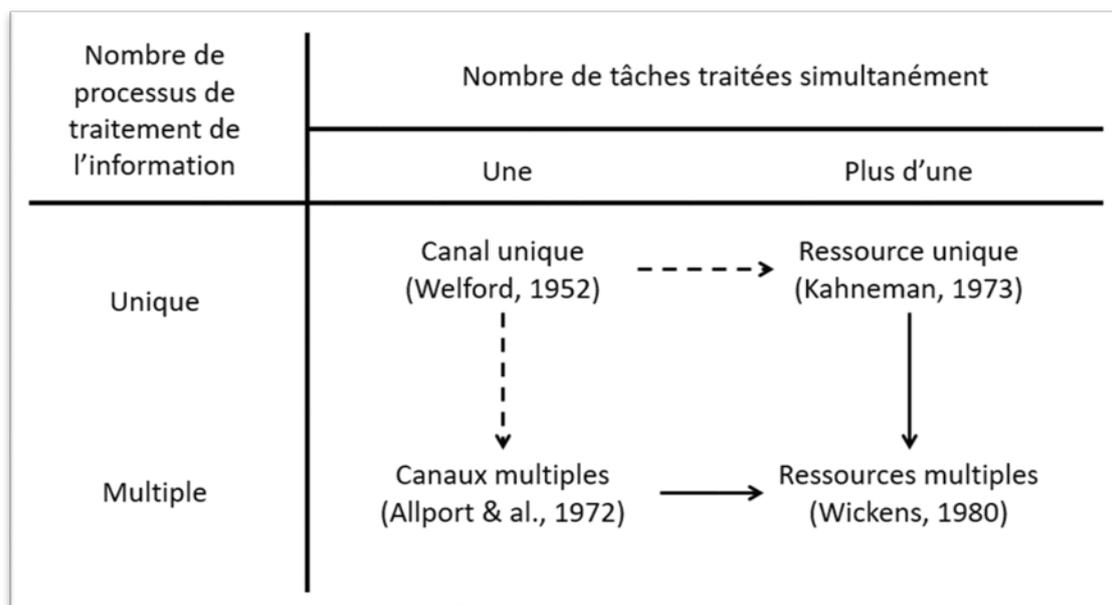


**FIGURE 16 - UNE RESSOURCE COGNITIVE SÉQUENTIELLE ET SÉLECTIVE, LA SÉLECTION DES STIMULI SE PRODUIT À SA PERCEPTION (A ET B), OU À SON ANALYSE (C).**

De nouveaux modèles voient le jour permettant de répondre à la problématique de partage de ressources entre tâches simultanées. Ils prennent en compte les impacts de la difficulté des tâches sur la réussite de l'objectif global de l'activité. Plusieurs études tendent à montrer qu'il existe plusieurs types de ressources (chacune d'entre elles ayant ses limites), et que deux tâches réalisées parallèlement peuvent l'être avec les mêmes

niveaux de performances que si elles étaient réalisées séparément (Kantowitz & Knight Jr, 1976; Navon & Gopher, 1979; C. D. Wickens, 1976). De même, deux tâches réalisées en parallèle donneraient un meilleur résultat si elles n'utilisaient pas le même type de ressources (Kantowitz & Knight Jr, 1976; North, 1977; C. D. Wickens, 1976).

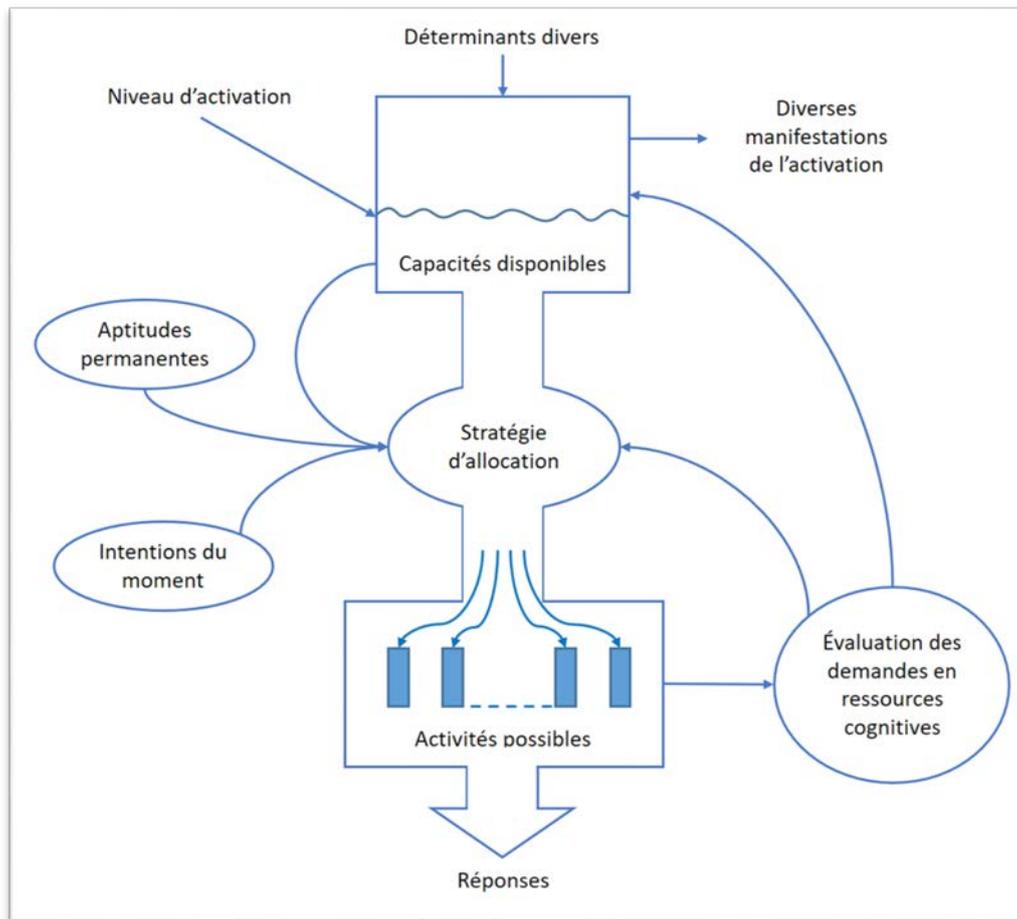
C'est ainsi que de Welford (1952) à Wickens (C. Wickens, Derrick, Berringer, & Micalizzi, 1980), nous sommes passés d'une ressource cognitive utilisant un canal de traitement unique à une ressource cognitive identifiée comme une somme de capacités réparties sur de multiples canaux .



**FIGURE 17 – EVOLUTION DU CONCEPT DE RESSOURCE COGNITIVE, DU PRINCIPE DE CANAL UNIQUE (WELFORD, 1952) AUX MULTIPLES RESSOURCES (C. WICKENS ET AL., 1980).**

Pour Kahneman (1973), la réponse à cette problématique de ressource cognitive se trouve entre le modèle séquentiel et le modèle parallèle (Figure 18 – Modèle de ressources cognitives uniques, traduit d'après Kahneman (1973).). Ainsi, le modèle présente des « activités possibles ». Le sujet évalue la demande en ressources cognitives associée à chacune de ses activités. La mobilisation des ressources pourra évoluer et des règles de priorisation seront établies. La quantité de ressources mobilisées est également influencée par les types de stimuli qui ont été générés, les règles de priorisation peuvent être altérées et perturber l'allocation des ressources à une tâche (comme quand on entend

son nom dans une conversation), ou le besoin de se concentrer sur une tâche particulière à un moment donné.

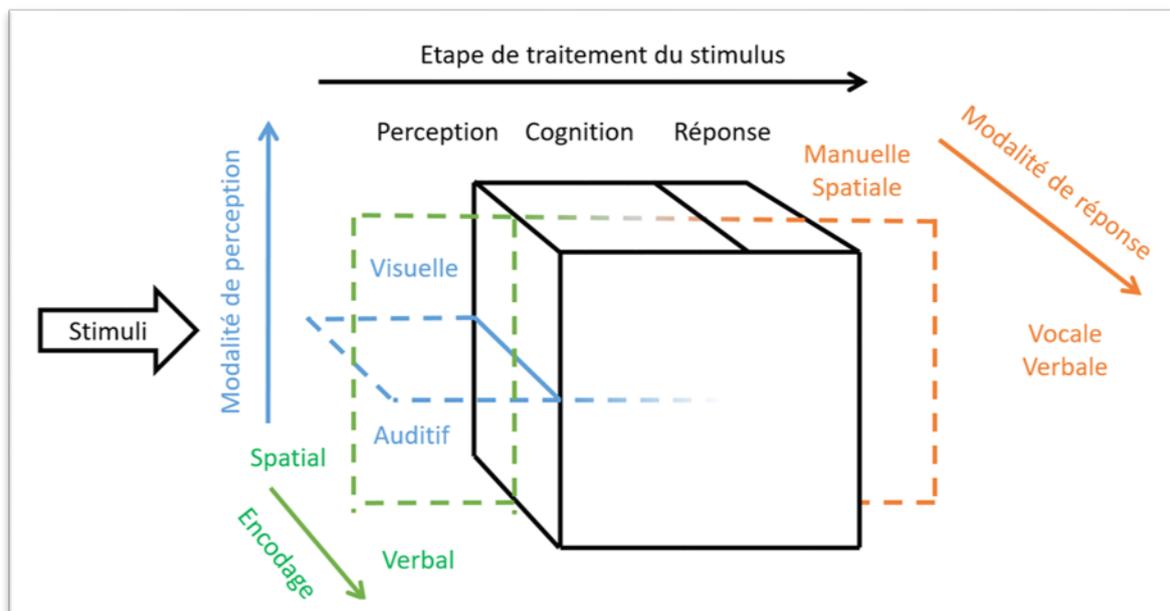


**FIGURE 18 – MODÈLE DE RESSOURCES COGNITIVES UNIQUES, TRADUIT D'APRÈS KAHNEMAN (1973).**

Ce modèle apporte une solution unificatrice de beaucoup de phénomènes observés, tout en restant relativement simple et complet. Malgré cela, il paraît complexe d'expliquer le phénomène de double tâche par son biais (les deux tâches peuvent être réalisées en parallèle sans se perturber), à moins de supposer que les capacités disponibles peuvent être potentiellement infinies.

Navon et Gopher (1979) proposent plusieurs modèles permettant d'expliquer l'activité cognitive lors d'une double tâche. Ils cherchent également à modéliser l'impact de la difficulté et de l'entraînement à la tâche. Dans cette démarche, ils ne rejettent pas les cas où deux tâches partagent les mêmes ressources cognitives, mais imaginent des situations où les ressources provenant de plusieurs canaux sont plus ou moins liées les unes aux autres (en concurrence).

C'est réellement Wickens (1980) qui propose une définition des différentes ressources cognitives. Il définit ces « réservoirs de ressources » selon 4 facteurs : les modalités d'entrée et les modalités de sortie, les niveaux de traitements et enfin, les codes utilisés. Ce modèle fait référence en termes de conceptualisation de la ressource cognitive multiple (Figure 19 – Modèle 4-D de Wickens (1980)).



**FIGURE 19 – MODÈLE 4-D DE WICKENS (1980)**

Malgré leur apparente différence, le modèle de 4-D de Wickens (1980) et le modèle de la ressource unique de Kahneman (1973) ne sont pas contradictoires, mais complémentaires (Chapon et al., 2004). Ils n'utilisent pas le même référentiel temporel. Il est possible d'analyser des tâches de long terme selon le modèle de Kahneman, qui explique les problématiques d'allocation de ressources de façon satisfaisante. Wickens sera quant à lui plus adapté pour expliquer un partage de tâche et l'évolution de la performance à

court terme. Dans ce cas, l'approche multitâche passe nécessairement par la mobilisation de plusieurs types de ressources.

### 3.1.5 L'attention soutenue

L'attention soutenue est la capacité à orienter son attention vers la détection de signaux à faible probabilité d'occurrence (Koella, 1982). Elle désigne le maintien de l'attention de façon volontaire et prolongée, se traduisant par une sensation d'effort pour résister aux distractions. En aéronautique, c'est le type d'attention qui est sollicitée par le pilote pour surveiller son vol. La vigilance est une condition nécessaire, mais non suffisante, au mécanisme de l'attention soutenue (Rochon, 2011).

### 3.1.6 Conclusion sur l'attention

Au travers de cette analyse de l'attention, nous avons pu relever deux éléments essentiels. Premièrement, l'attention constitue le point d'entrée du processus cognitif et a fortiori elle est le précurseur de la construction d'une RM chez le sujet. Deuxièmement, l'importance du concept de saillance intrinsèque. Cette notion nous permet de comprendre que l'environnement peut directement influencer le processus cognitif. Cela nous intéresse tout particulièrement au regard de notre objectif de conception / évaluation d'interface. De la même façon, nous notons que, comme le décrit Wickens, notre attention sera influencée par la modalité et l'encodage du stimulus perçu.

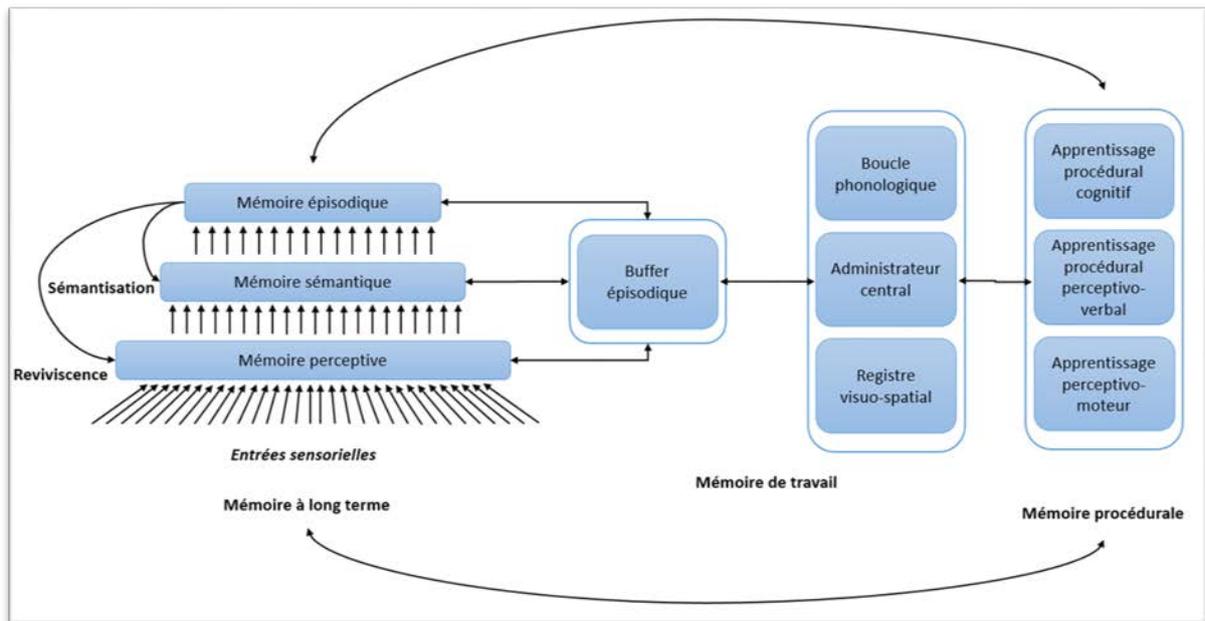
## 3.2 La mémoire

Nous étudions la mémoire en nous intéressant à son fonctionnement par une approche fonctionnelle ou modulaire utilisée en psychologie. Dans cette partie, nous contextualisons la fonction exécutive de mémoire de travail dans le modèle plus global des « mémoires ».

### 3.2.1 Modèle MNESIS

L'approche en psychologie permet d'envisager le fonctionnement à l'échelle systémique et ainsi d'avoir une vision générale de la structure de la mémoire. C'est pourquoi le modèle Modèle Néo-Structural Inter-Systémique de la mémoire humaine (MNESIS) est intéressant (F. Eustache & Desgranges, 2003) : c'est une « *proposition de synthèse des orientations théoriques qui [...] paraissent actuellement les plus pertinentes en neuropsychologie de la mémoire* » (Francis Eustache & Desgranges, 2010).

Ce modèle regroupe différentes théories de référence en ce qui concerne la mémoire, comme les théories de Tulving (1995) et de Baddeley et Hitch (1974). Il reprend également les dynamiques de la mémoire proposées par Conway (1997) et Schacter et Scarry (2001). Ce modèle, principalement connu en France, permet de construire une trame et d'envisager les relations entre les différents modèles de référence. C'est dans cette optique que nous l'utiliserons.



**FIGURE 20 – MODÈLE MNÉSIS (F. EUSTACHE & DESGRANGES, 2003)**

Ce modèle intègre les concepts développés par Tulving (1995) sur la mémoire à long terme, ceux de Baddeley et Hitch (1974) sur la mémoire de travail et les boucles dynamiques et reconstructives proposées par Conway (1997) et Schacter & Scarry (2001).

Il est possible d'expliquer le modèle MNÉSIS en le divisant en trois grandes parties (« Mnésis, un modèle pour cinq mémoires », 2007), la mémoire à long terme (mémoire perceptive, mémoire sémantique, mémoire épisodique), la mémoire de travail et la mémoire procédurale.

Un concept intéressant que l'on ne retrouve pas dans le modèle MNÉSIS est celui de niveaux de conscience de Tulving (2001). Ce concept nous semble essentiel dans notre démarche pour ce que nous chercherons à atteindre les niveaux de conscience des individus pour en comprendre les activités. Il distingue 3 types de mémoire, chacune avec un niveau de conscience associé :

- La mémoire sémantique, associée à la conscience noétique. Ce niveau de conscience se manifeste par la simple conscience de connaissances sur le monde, sur la base d'un sentiment de familiarité.
- La mémoire épisodique, associée à la conscience auto-noétique. Marquée par l'identité de soi, la conscience auto-noétique se caractérise par la capacité à revivre les événements mémorisés, à voyager mentalement dans le temps (passé, présent, futur).
- La mémoire procédurale, associée à la conscience anoétique. Cette mémoire s'exprime directement dans les comportements et l'action, sans conscience.

### 3.2.1.1 Mémoire à long terme

Comme on peut le voir sur la Figure 20, le modèle MNESIS reprend la structure hiérarchique du modèle de mémoire à long terme (à gauche) développé par Tulving (2001). Trois types de mémoires y sont décrits :

1. À la base de cette hiérarchie, la **mémoire perceptive** permet de stocker les informations élémentaires sur les formes des objets, la structure des mots, la hauteur d'une note de musique, sans pour autant avoir de notion de sens. On différencie une mémoire perceptive par modalité (auditive, visuelle, ...). Cet élément fait écho aux modèles de l'attention divisée vus précédemment.
2. La **mémoire sémantique** multi sensorielle (unique pour toutes les modalités) apporte du sens aux informations transmises par la mémoire perceptive, à l'aide des connaissances générales et abstraites (reconnaitre une personne célèbre sur plusieurs photos qui n'ont jamais été vues).
3. Enfin, la **mémoire épisodique** stocke les souvenirs et la prise de conscience d'évènement, dans un contexte spatio-temporel spécifique. Ce sont des connaissances singulières et concrètes (reconnaitre une photo, car on se souvient du moment où elle a été prise).

L'information traverse ces systèmes de manière séquentielle, le traitement du niveau supérieur dépend de celui du niveau inférieur. Le stockage se fait en parallèle sur chaque niveau, et la récupération est indépendante entre les niveaux.

Deux boucles de rétroaction sont présentes (Figure 20) : celle de sémantisation, et celle de reviviscence.

La sémantisation est le processus qui permet la généralisation d'un évènement personnel vécu. Ce processus fait perdre progressivement à un évènement ses caractéristiques contextuelles (spatio-temporelles). Cela intervient en particulier par la répétition (exemple : le passage du concept de « notre enfant », à celui de « l'enfance »).

La reviviscence est la capacité « d'effectuer un voyage mental rétrospectif dans le temps » (Tulving, 2002; Tulving, Eustache, Desgranges, & Viader, 2004) afin de revivre, de re-percevoir des événements passés. Cette dernière boucle de rétroaction nous invite à nous questionner également sur les faux souvenirs qu'elle peut générer.

### 3.2.1.2 Mémoire de travail

Au centre du schéma MNESIS (Figure 20), nous retrouvons les concepts de la théorie de Baddeley et Hitch (1974) actualisée par Baddeley (2000). La mémoire de travail a pour rôle de maintenir et de manipuler les informations nécessaires à l'activité cognitive. Cette mémoire a une fonction exécutive.

Dans le cas des pilotes de lignes, cela permet de garder les informations concernant une panne pour la résoudre. Autre exemple : garder en tête les informations fournies par la tour de contrôle pour changer d'altitude et de cap.

L'auteur propose de séparer la mémoire de travail en trois composantes :

1. L'**administrateur central** a pour rôle de gérer les fonctions exécutives, d'orienter l'attention. C'est ce système qui serait en jeu dans la prise de décision. Son fonctionnement est assisté par deux systèmes auxiliaires qui lui sont subordonnées. « *L'administrateur central est chargé de coordonner, de sélectionner et de contrôler les opérations de traitements des informations provenant des systèmes esclaves, la boucle phonologique et le calepin visuo-spatial* » (Beau, 2011, p. 41). En somme, l'administrateur est, pour de nombreux auteurs, le siège de la prise de décision.

2. Le premier système auxiliaire est la **boucle phonologique**, qui maintient les informations verbales présentées auditivement ou visuellement, et les stocke sous forme de code phonologique. C'est ce qui permet par exemple la compréhension d'un texte.
3. Le deuxième système auxiliaire est le **registre visuo-spatial**, qui maintient à court terme l'information visuo-spatiale et est impliqué dans la génération et la manipulation des images mentales, les rotations mentales, les localisations et les mémorisations d'objets non verbalisables.

Eustache et Desgranges (2003) reprenant Baddeley (2000, 2001) introduisent le principe de « Buffer épisodique », qui sert de pont avec les mémoires situées : épisodique, sémantique et perceptive. Cette mémoire-tampon épisodique stockerait temporairement les informations sensorielles nouvelles dans leur contexte. Elle serait à l'origine de notre « conscience du moment présent ».

### 3.2.1.3 Mémoire procédurale

A la droite du schéma MNESIS (Figure 20), nous retrouvons la dernière partie du modèle, la mémoire procédurale. C'est la mémoire qui permet l'automatisation des tâches, la conduite, l'écriture (graphie), les réflexes (par exemple chez les sportifs). Ces automatismes ont l'avantage d'avoir un coût cognitif nul. Ils permettent de libérer les capacités de la mémoire de travail. Mais l'acquisition de ces automatismes se fait lentement, par le biais de nombreuses répétitions. De ce fait, ce type de mémoire est coûteux en ressources cognitives.

Nous distinguons trois grands registres d'apprentissage : les apprentissages cognitifs, perceptivo-verbaux et perceptivo-moteurs. Ces trois apprentissages sont classiquement séparés par les neuropsychologues (sur la base des données empiriques) qui reconnaissent eux-mêmes que ces frontières restent floues (« Mnésis, un modèle pour cinq mémoires », 2007).

Des liens directs sont présents entre les mémoires procédurales perceptivo-motrices et les mémoires perceptives : les réflexes. Un autre lien existe entre les systèmes de mémoire épisodique-sémantique et la mémoire procédurale cognitive : l'apprentissage

(Beau, 2011). En effet, si la mémoire sémantique se construit par l'apprentissage d'événements (mémoire épisode), la mémoire procédurale se construit également par la répétition des événements et la reconnaissance des situations.

#### 3.2.1.4 Fonctionnement de la mémoire pour la résolution de tâches complexes

La résolution de tâches complexes soulève des questions concernant leur gestion mnésique. En effet, celles-ci requièrent de maintenir simultanément de grandes quantités d'information en mémoire. 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 stocker une grande quantité d'information. Cowan (1993) propose une vision hiérarchique, dans laquelle une partie des éléments de la mémoire à long terme serait activée à un instant donné. Dans ces représentations actives, seule une partie serait visible via le focus attentionnel. Mais à tout moment, ce dernier pourrait se déplacer vers la partie activée de la mémoire à long terme.

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. Toutefois, les informations stockées sont difficiles d'accès et peuvent être distinguées en deux catégories principales : les connaissances déclaratives et procédurales.

- La première catégorie renvoie à du savoir explicitable : elle décrit le monde, les lois qui le régissent, les objets. Associée à d'autres connaissances déclaratives, elle permet des inférences.
- La seconde catégorie consiste en des connaissances guidant l'action et permettant d'agir sur le monde. Elles sont difficilement verbalisables.

Ericsson & Kintsch (1995) introduisent un nouveau concept, repris par Durso & Gronlund (1999) dans leur analyse de la conscience de situation, la mémoire « de travail à long terme », appelé buffer épisodique dans le modèle Mnésis. Elle ne serait active que dans des conditions bien précises. 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 (Tulving, 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. Cela permet de « tirer » le fil des informations correspondant en mémoire à long terme, à une vitesse comparable à la récupération en mémoire de travail.

Les indices perçus dans l'environnement du sujet permettent de récupérer les structures mentales d'action stockées dans la mémoire à long terme et, ainsi, d'atteindre un niveau de performance satisfaisant dans l'action.

### 3.2.2 Conclusion sur la mémoire

Nous avons décrit la mémoire de travail comme une fonction exécutive. De cette étude, nous retenons que la résolution de tâches complexes prend place dans la mémoire de travail, et plus particulièrement dans le buffer épisodique. C'est l'administrateur central qui va créer cette « représentation de la situation » dans ce buffer épisodique, en puisant dans les différentes mémoires et en générant des liens entre les informations recueillies.

## 3.3 La planification

Aleksandr Romanovich Lurija est pionnier dans l'étude de la planification et de manière générale en psychologie et neurobiologie (Lurija, 1978, 1995). Pour la suite, nous nous appuyerons sur la définition donnée par Hoc (Hoc, 1987, p. 198), complétée par Richard (1990), qui définit la planification comme "l'élaboration et/ou l'utilisation de représentations schématiques et/ou hiérarchisées (plans) susceptibles de guider l'activité" (Hoc, 1987, p. 198; Richard, 1990).

Selon la 9<sup>ème</sup> édition du Dictionnaire de l'Académie Française, planifier c'est "*Définir des objectifs précis pour un terme fixé et déterminer les moyens qui doivent être mis en œuvre pour y parvenir.*" Cette planification découle d'un mécanisme composé de plusieurs étapes. Dans un premier temps, l'opérateur se doit de déterminer les contraintes auxquelles il est soumis. Par la suite, il va être en mesure d'apporter des solutions, soit en sélectionnant certaines qui lui sont familières, soit en élaborant de nouvelles. Peu à peu, ces solutions seront raffinées, puis mises en place (Agnès Van Daele & Carpinelli, 2001).

Deux modes de vision soulignent différents aspects sous-jacents du terme planification.

- L'anticipation : Le plan est vu comme un projet. C'est une représentation qui précède l'exécution en elle-même.
- La schématisation : Le plan est ici vu dans sa globalité et la représentation sera abstraite, avec un degré de raffinement plus ou moins important.

Par ailleurs, la structuration de la planification va dépendre de deux types de hiérarchies distinctes (Morineau, 2010) :

- La hiérarchie fonctionnelle (Rasmussen, 1983, 1986), qui consiste à effectuer une analyse des étapes cognitives nécessaires au traitement des informations sur la base du modèle de la double échelle de prise de décision. Ce modèle envisage la prise de décision comme le déroulement d'une séquence d'états de connaissance mis en lien à travers des activités de traitement de l'information. Ces états et activités cognitives vont de la détection de l'information à la planification de l'exécution d'une action, en passant par son évaluation. De nombreux raccourcis permettent de réduire le nombre des traitements.
- La hiérarchie structurelle (Kieras, 1997; Sebillotte, 1991; Shepherd, 2001), qui est une modélisation hiérarchisant la tâche à travers des buts et sous-buts à atteindre.

L'environnement dans lequel évolue l'opérateur est dynamique. Ce dernier doit faire face à des événements imprévus en y allouant des ressources cognitives. Celles-ci étant limitées, la performance de l'opérateur en réaction aux changements peut être insuffisante. Le processus d'anticipation et de planification permet de s'affranchir, ou du moins de réduire, cette limitation. Nous constatons que pour réaliser cette activité cognitive, le sujet a besoin de construire une RM de son environnement et d'effectuer des simulations.

### 3.4 Conclusion sur les fonctions exécutives

L'activité cognitive est conditionnée par les capacités humaines de traitement de l'information. Ces capacités structurent le processus par lequel la « donnée » est traitée dans le processus décisionnel.

Ainsi, les limites attentionnelles et le processus d'activation qui y est associé définissent la manière dont on perçoit l'environnement, dont on oriente notre attention sur telle ou telle activité. Cela s'effectue sous réserve de pouvoir identifier ces activités et d'en comprendre l'environnement à l'aide des informations présentes dans les mémoires sémantique et épisodique. Il est également nécessaire de se représenter cette situation dans la mémoire de travail afin d'anticiper les évolutions de l'environnement et de planifier les actions à réaliser, à condition qu'elles soient disponibles en mémoire procédurale. Dans le cas contraire, un processus de conception de nouvelles solutions se mettra en place.

Le chapitre suivant traite de la nécessité de se représenter l'environnement pour mettre en œuvre la prise de décision.

# CHAPITRE 4 LES REPRÉSENTATIONS MENTALES

## 4.1 Qu'est-ce qu'une représentation mentale ?

Bien souvent, l'opérateur doit se représenter mentalement le fonctionnement du système ou l'état des objets de travail avec lesquels il opère. Même lorsqu'il y a perception immédiate, une RM du travail en cours ou à réaliser sert de guide à l'activité. Elle remplit une fonction d'assistance utile aux processus de prises d'information et aux raisonnements.

L'activité de représentation est liée à la fonction symbolique, c'est-à-dire à cette forme de l'activité humaine qui consiste à produire des symboles qui sont, rappelons-le, des "valant pour". Autrement dit, "il y a activité de représentation lorsqu'un objet ou lorsque les éléments d'un ensemble d'objets se trouvent exprimés, traduits, figurés, sous la forme d'un nouvel ensemble d'éléments, et qu'une correspondance systématique se trouve réalisée entre l'ensemble de départ et l'ensemble d'arrivée." (Denis, 1989, p. 21). Cette mise en correspondance fait intervenir deux aspects : la conservation des relations entre les éléments faisant l'objet de la représentation, d'une part, et la transformation de l'information de départ par un processus de codage qui donne lieu à un changement de nature, d'autre part.

Ochanine (1977) est un des premiers à concevoir la notion de RM permettant de réaliser une activité. Ce chercheur soviétique a imaginé le concept d'images opératives qui « sont des structures informationnelles spécialisées qui se forment au cours de telle ou telle action dirigée sur des objets », à distinguer des images cognitives, « reflet intégral des objets dans toute la diversité de leurs propriétés accessibles » (*L'image opérative*, 1981; Weill-Fassina, 2016). Spérandio (1984) déclare que l'aspect cognitif tend à recenser un maximum d'informations sur l'objet considéré, ce qui est coûteux en temps et donc contradictoire avec une action rapide, alors que l'aspect opératif ne reflète que les caractéristiques utiles de l'objet pour la prise de décision et l'action. D'un point de vue pratique, l'opérativité se traduit, au plan cognitif, par un « filtrage sélectif » des informations et au plan de l'action par un « accordage » adaptatif. Il écrit également qu'« il

vaudrait mieux parler de représentations mentales » à propos des images opératives, ce qui rejoint notre point de vue. Nous garderons cette définition pour la suite du manuscrit.

## 4.2 Représentations occurrentes, modèles mentaux, modèles de situations...

Il convient, en fait, de distinguer : 1) des représentations occurrentes d'une situation ; et 2) des structures permanentes (nommées « schémas, schèmes, « frames », scripts ou scénarios). Une représentation occurrente est un modèle intériorisé de la réalité, élaboré en mémoire à court terme, alors que les schémas sont des structures permanentes stockées en mémoire à long terme, décrivant des situations prototypiques et/ou des séquences d'actions et permettant de comprendre et d'agir.

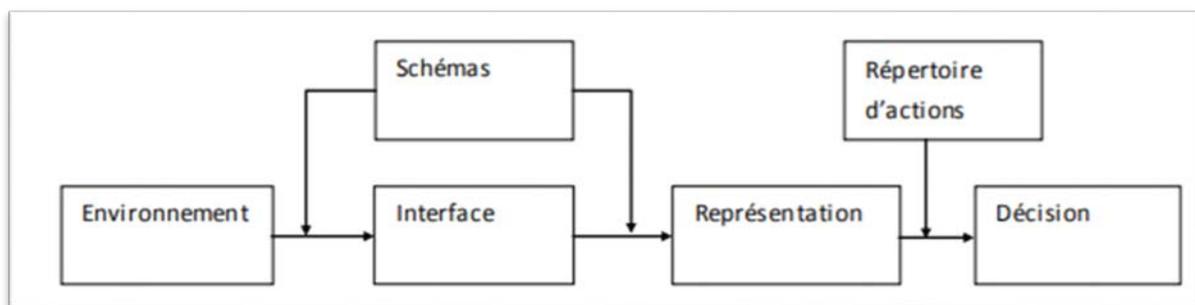
C'est une distinction que font de nombreux chercheurs. Priolet (2008) explique ainsi que « dans la théorie des modèles mentaux développée par Johnson-Laird (1983), le sujet construit, à partir des données, une représentation analogique d'une situation qui serait stockée temporairement dans la mémoire de travail, contrairement aux schémas qui seraient stockés dans la mémoire à long terme ». Ehrlich, Tardieu, et Cavazza (1993) utilisent également cette distinction modèle mental/schéma. Johnson-Laird et Byrne (1991) écrivent que ce sont ces modèles mentaux qui permettent le raisonnement par la simulation de situations.

D'autre part, Durso et Gronlund (1999) comme Van Dijk et Kintsch (1983) distinguent : modèle mental (*mental model*) et modèle de situation (*situation model*). Le premier est une structure de la mémoire à long terme, difficile à modifier, qui existe à un niveau général ou abstrait. Tandis que le second est une instanciation d'un modèle mental en mémoire de travail, construit en fonction des circonstances spécifiques de l'environnement et des attentes ou prédictions de l'opérateur. Un modèle mental peut donc engendrer des milliers de modèle de situation qui eux, permettent de produire le résultat attendu d'un système particulier. Pour ces auteurs (ibid.), le modèle de situation construit en mémoire de travail comprend des « pointeurs » (liens) renvoyant aux informations du modèle mental se situant en mémoire à long terme. On dit aussi que les modèles mentaux sont élaborés en mémoire de travail à long terme.

Ajoutons que Priolet (2008) indique que Reusser (1989), Staub et Reusser (1995) et Nathan, Kintsch et Young (1992) utilisent eux aussi la distinction modèle mental/schéma, mais nomment le premier modèle de situation ou modèle épisodique de situation.

Notons par ailleurs que l'on peut faire un parallèle entre cette distinction modèle mental au sens de schème, schéma, etc., et représentation occurrente ou modèle de situation et la distinction philosophique essence/accident. L'essence renvoie à ce que la chose est, au nécessaire (au sens de Platon), tandis que l'accident renvoie à ce qui est vrai pour une chose mais non nécessaire, donc au contingent. Le modèle mental peut ainsi être conceptualisé comme essence d'un type de situation. De par ses perceptions de la situation, l'opérateur construit sa représentation occurrente ou modèle de situation, composant ainsi un accident du modèle de situation.

Lipshitz et Ben Shaul (1997) proposent de représenter (Figure 21) les liens existant entre « environnement », « schémas », « représentation » et « décision ». Dans une situation de travail, la relation entre l'opérateur et son environnement est médiée par différentes interfaces. Cette médiation implique que l'opérateur ne dispose que d'informations partielles sur son environnement. Cependant, les informations ne s'imposent pas à l'opérateur. Celui-ci dispose de « schémas » qui le guident dans la recherche des informations manquantes. Les schémas participent également à la transformation d'informations sensorielles équivoques en informations significatives pour l'opérateur. La représentation apparaît, enfin, comme le déterminant principal de la prise de décision. Les actions pertinentes sont reconnues d'après les caractéristiques de la situation telles qu'elles apparaissent dans la représentation.



**FIGURE 21 – LES RELATIONS ENTRE ENVIRONNEMENT, SCHÉMAS, REPRÉSENTATION ET DÉCISION (LIPSHITZ & SHAUL, 1997).**

En effet, Amalberti (2001) indique qu'il existe un consensus parmi les différents auteurs ayant étudié les modèles mentaux quant à la fonctionnalité de prédiction du modèle mental (Norman (1983), Ochanine (1977), Piaget (1974)). C'est par cette capacité à prédire, à envisager l'évolution probable du système ou de la situation, que la RM permet la prise de décision de l'opérateur. Piaget (1974), repris par Amalberti (2001), parle de notion de précorrection à propos des modèles mentaux puisque ceux-ci intègrent la capacité du sujet à agir sur le monde, ce qui permet de produire des corrections tant que l'exécution n'est pas déclenchée. C'est cette capacité qui permet la planification.

Synthétisant l'apport de la théorie des représentations sociales, Garniez et Sauvé (1999) gardent la définition suivante :

*"Une représentation est un phénomène mental qui correspond à un ensemble plus ou moins conscient, organisé et cohérent, d'éléments cognitifs, affectifs et du domaine des valeurs concernant un objet particulier. On y retrouve des éléments conceptuels, des attitudes, des valeurs, des images mentales, des connotations, des associations, etc. C'est un univers symbolique, culturellement déterminé, où se forment les théories spontanées, les opinions, les préjugés, les décisions d'action, etc."* (Garniez & Sauvé, 1999, p. 66).

### 4.3 Les schémas et les schèmes

Comme l'explique Richard (1990), la notion de schéma de connaissance emprunte à la fois :

- A la notion de « schéma » proposée par Bartlett (1932) pour expliquer les déformations systématiques observées dans la reproduction de récits ;
- A la notion de stéréotype utilisée en psychologie sociale ;
- A la notion piagétienne de schème. Piaget a proposé la notion de « schème d'action ».

Pour Piaget, il s'agit d'une construction de la pensée à partir d'une situation, qui lie un ensemble de connaissances à cette situation, et se voient associées, en fonction de buts et de conditions, en vue d'une action. Ainsi, « le schème est une structure ou organisation des actions telles qu'elles se transforment ou se généralisent lors de la répétition de cette action en des circonstances semblables ou analogues » (Piaget & Inhelder, 1971).

Le schème, ou « schème d'action » lie la reconnaissance d'une situation à son évolution et à l'action ; « la structure générale de cette action se conservant au cours de ses répétitions, se consolidant par l'exercice et s'appliquant à des situations qui varient en fonction des modifications du milieu » (Piaget, 1960, p. 552).

Pour Piaget, un schème comprend donc des signaux, une description du but de l'action et des moyens de l'action. Il génère, par conséquent, dans une situation donnée, une suite d'actions en vue d'atteindre un certain but. Notons que le schème d'action de Piaget est intimement lié à son processus d'apprentissage : il s'agit d'un processus dynamique qui recherche l'équilibre entre un individu et l'environnement qu'il perçoit et dans lequel il évolue. Pour Piaget, la pensée humaine se construit progressivement lorsque l'individu est confronté à son environnement extérieur. Cet apprentissage est composé de deux processus : l'assimilation (qui est en fait la réutilisation du schème pour correspondre à la nouvelle information perçue) et l'accommodation (un nouveau schème est créé lorsque les informations perçues sont trop différentes des schèmes en mémoire).

La notion de « schéma » a été introduite par Bartlett (1932) en tant que structure mentale représentant certains aspects de l'environnement. Les schémas (nommés aussi patrons) sous-tendent une structuration des informations liées à une situation, un événement ou un objet particulier. Celui-ci est associé à un ensemble de connaissances, qui se voit chacune attribuer une valeur. Différents auteurs ont depuis complété et raffiné cette structure de connaissances.

Minsky (1974) étend la notion de patron par celle de « frame ». Un « frame » contient de l'information sur la mise en œuvre du patron, sur les attentes qui vont être générées dans une situation donnée, et sur ce qu'il convient de faire si ces attentes ne sont pas satisfaites. Minsky lie donc les patrons à la notion d'action.

Le patron est un objet de représentation utile : il peut être comparé à d'autres patrons sur la base des connaissances qui lui sont attachées et des valeurs de ces connaissances. Donc si deux situations sont identifiées et ont un même ensemble de connaissances, il est raisonnable de supposer qu'elles appartiennent à la même catégorie de situation.

Les travaux de Schank et Abelson (2013) raffinent cette notion sous les termes de scripts et de plans.

Un script se différencie d'un frame par le fait que les différentes informations contenues dans le script sont ordonnées. Par exemple, un script « aller chez le médecin » sera composé d'une séquence d'événements : rejoindre le cabinet, patienter dans la salle d'attente, rencontrer le médecin, discuter des symptômes...

Enfin, les plans associent la notion de buts à ces connaissances. Un plan est ainsi un « schéma orienté but » : il présente les connaissances pertinentes qui vont permettre, au sein de ce plan, d'atteindre un but.

Lakoff et Johnson (1980) préfèrent quant à eux parler de Gestalts, qui correspond à un réseau multidimensionnel construit par l'expérience et caractérisé par les dimensions, le composant et le contenu de ces dimensions. Cette définition rejoint le concept de représentation occurrente puisque le réseau, caractérisé par ses dimensions, constitue alors le modèle mental. C'est le contenu de ces dimensions qui construit le modèle particulier lié au contexte. Cependant, les auteurs expriment leur volonté d'englober dans cette notion les concepts de scripts, frames et schémas.

Fillmore (1977) définit quant à lui le concept de scène, qui met l'accent sur les éléments connexes associés au schéma d'un concept, d'un objet, etc., qui vont dépendre de notre propre vécu.

Schank (1999) développe la notion de Memory Organization Packets (MOP). Un MOP est déterminé comme un ensemble de scènes augmenté des transitions entre lesdites scènes (d'où la notion d'organisation, puisque le concept insiste alors sur l'organisation des scènes).

La différence principale entre un schéma et un schème vient de l'utilisation dynamique du schème lors de l'apprentissage. Enfin, si ces théories présentent les modalités selon lesquelles les percepts sont organisés, compris et utilisés par les individus, il nous faut aussi préciser quelles informations peuvent être extraites d'une situation et quelles informations font sens au sein de cette situation. Selon la théorie de Piaget sur la structuration de la mémoire, l'enfant compare les informations nouvelles aux structures déjà connues : il construit peu à peu sa connaissance de son environnement et parvient de la sorte à distinguer un chien d'un chat. Le monde devient ainsi de plus en plus compréhensible et certaines informations vont plus facilement émerger lors de la

perception d'une scène. Ces informations vont pouvoir être classées, organisées et comparées par un individu.

De nombreux termes recouvrent des notions proches ou en partie équivalentes. Nous retiendrons pour notre part les termes **schémas** et **scripts**. Le schéma, tel que nous le considérons, constitue une structure dans la mémoire à long terme, construite par l'expérience, et qui contient l'essence d'une situation déjà rencontrée, son prototype. Il est susceptible d'être modifié a posteriori par la rencontre de la situation. Si un écart se trouve observé, le schéma est précisé, transformé ou englobé dans un schéma plus large. Un nouveau schéma est créé si la situation est trop différente des celles déjà rencontrées. Les scripts quant à eux constituent une séquence d'actions ordonnées, associées à un schéma et stockées en mémoire à long terme.

Pour la suite du manuscrit, nous retiendrons le terme de représentation mentale occurrente, ou plus simplement de **représentation mentale (RM)** pour un modèle intériorisé de la réalité, élaboré en mémoire à court terme ou mémoire de travail et plus précisément dans le buffer épisodique. Nous utiliserons le terme de **modèle mental** pour désigner une structure de la mémoire à long terme composé de **schémas** et de **scripts**.

#### 4.4 Conclusion sur la représentation mentale : la théorie de l'esprit.

Afin d'améliorer la RM de l'opérateur, il faut pouvoir l'identifier et la comprendre. Il est pour cela nécessaire de s'intéresser à la capacité des individus à identifier ces représentations mentales chez les autres. Ainsi, notre méthode d'analyse des représentations mentales prendra en compte les limites des individus à se construire des images mentales et donnera des pistes sur l'amélioration de cette capacité.

Duval et ses collaborateurs (2011) définissent la théorie de l'esprit (en anglais Theory of Mind -ToM) par « la capacité mentale d'inférer des états mentaux à soi-même et à autrui et de les comprendre ». Il est donc fait référence à une capacité cognitive qui permet d'attribuer à un individu une ou des représentations mentales bien que celles-ci soient inobservables par définition. Cette capacité peut être rattachée à la cognition sociale. En effet, elle s'appuie sur les capacités cognitives d'un individu à percevoir, mémoriser, raisonner, connaître. Pour identifier les représentations mentales d'autrui, l'individu doit attribuer ou inférer des états émotionnels ou cognitifs. De fait, la capacité d'attribuer des

représentations mentales à un individu est souvent reliée à des notions comme la mentalisation « mentalizing » (Frith, Wolpert, Frith, & Frith, 2003; Shamay-Tsoory & Aharon-Peretz, 2007), la lecture des états mentaux « mindreading » (Castelli et al., 2010), la prise de perspective « perspective-taking » (Hynes, Baird, & Grafton, 2006), l'empathie « empathy » (Decety, 2010) ou la compréhension sociale « social understanding » (Sullivan & Ruffman, 2004).

La ToM est une capacité métacognitive (« *La métacognition est un monitoring et une régulation des processus cognitifs.* » (Flavell, 1976, p. 232), définie aussi comme « *la connaissance et le contrôle qu'un système cognitif peut avoir de lui-même et de son propre fonctionnement* » (Chartier & Lautrey, 1992, p. 29)). Cela revient à construire une méta représentation de la RM d'un sujet. Dans cette thèse, notre objectif est d'accéder à cette méta représentation lors de l'observation et de la modélisation d'activité. Alors que la représentation renvoie à une perception directe de l'environnement, la méta représentation est une représentation d'une représentation. Il est possible de construire une réflexion sur les pensées d'un individu et d'établir un raisonnement permettant de spéculer sur ses croyances, son ressenti et celui qu'il veut (parfois faussement) faire transparaître. Cependant, sans un échange avec l'individu, une relation avec lui, mais également une reconnaissance de ses émotions et de ses processus cognitifs, aucune méta représentation n'est possible (Miermont, 1997). Ainsi, pour développer notre approche méthodologique et construire notre outil, il sera nécessaire d'installer une relation adéquate entre l'expert et l'individu.

Certains auteurs différencient les représentations mentales selon leurs natures. C'est-à-dire qu'ils étudient de manière dissociée la ToM dite cognitive et la ToM affective (Kalbe et al., 2010; Shamay-Tsoory & Aharon-Peretz, 2007).

- La ToM cognitive permet de comprendre les pensées, les intentions et les croyances.
- La ToM affective aura pour objectif de comprendre les émotions et les sentiments.

Notre attention se portera sur ToM cognitive pour l'étude de la relation entre l'opérateur et le système. Pour l'étude du système sociotechnique pilote / co-pilote, la

ToM affective aurait tout son intérêt : 1) dans la compréhension des relations entre les pilotes et ; 2) dans les représentations qu'ils se font l'un de l'autre.

D'autres aspects de la ToM peuvent être pris en compte. Par exemple, il est possible de s'intéresser non plus à sa nature mais à son niveau. Une ToM de premier ordre se définit comme la capacité pour un individu de se mettre à la place du sujet et de considérer sa RM « depuis son point de vue ». Une ToM de deuxième ordre est la capacité d'un individu de se représenter la RM d'un autre individu. Une ToM de deuxième ordre nécessite la mobilisation de ressources cognitives supérieures puisqu'il faut adopter simultanément les deux perspectives précédentes.

Selon Miller et Rose (2009), c'est une ToM de second ordre qu'il est nécessaire de mobiliser pour comprendre finement le comportement humain. C'est par conséquent ce type de ToM que nous tenterons de mobiliser pour les méthodes d'évaluation que nous souhaitons concevoir.

## CONCLUSION DE LA REVUE DE LITTÉRATURE

Une situation dynamique, incertaine, risquée et à forte pression temporelle demande au pilote de mobiliser toutes ses capacités cognitives. Chacune de ces capacités permet de traiter une partie de cette situation complexe. Néanmoins, elles présentent des limites qui affectent les possibilités d'adaptation. C'est, par exemple, le cas de la mémoire, de l'attention ou de l'anticipation. Ainsi, en dehors du champ de fonctionnement normal de ces facultés, le pilote se trouve dans un état dégradé. Il devient plus sensible aux perturbations de son environnement. Il perd sa résilience.

L'état de la RM est un indicateur de l'état cognitif général d'un individu, mais il en est aussi l'un des déterminants.

Au cours de notre apprentissages de la bibliographe, nous avons pu constater qu'il est difficile de décrire une représentation mentale. Nous avons démontré que les théories et méthodes issues de l'ingénierie cognitive et plus particulièrement des « human factor » anglo-saxons, ne sont pas suffisantes pour ce faire. De même, les méthodes associées aux différents modèles de prise de décision développés en ingénierie cognitive ne permettent pas une compréhension fine de la prise de décision.

# II

## PARTIE EMPIRIQUE

# CHAPITRE 5 APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

Nous avons pu précédemment souligner (Chapitre 2) que l'analyse de la RM des opérateurs dans notre domaine d'étude ne peut pas reposer sur des méthodes d'analyses issues uniquement de l'ingénierie cognitive, ne permettant pas une analyse fine de l'activité décisionnelle des opérateurs dans leur dynamique. Le Chapitre 3 nous permet d'envisager une approche différente de l'activité décisionnelle au travers des fonctions exécutives, et d'identifier clairement le siège de la représentation occurrente de la situation dans la mémoire de travail. Le Chapitre 4 nous a permis de clarifier les termes de RM, modèle mental, schémas et scripts.

Dans ce chapitre, nous clarifions notre question de recherche et nous présentons l'approche méthodologique mise en œuvre.

## 5.1 Question de recherche

Au regard de la thématique générale de nos travaux (cf. Introduction) et des apports bibliographiques issus de la partie théorique (cf. Chapitre 1 à 4), nous définissons les objectifs notre recherche comme les suivants :

- Analyser les représentations mentales des opérateurs, que l'on postule comme constituant l'élément soutenant la prise de décision.
- Évaluer l'impact des interfaces sur cette RM.
- Avoir une vision chronologique de l'évolution de cette RM dans le temps.
- Disposer d'une méthode opérationnelle et applicable de manière écologique dans un environnement à forte contrainte temporelle et dynamique (ici l'aéronautique civil), qui permet de répondre aux trois points précédents.

La thèse que nous formulons est que les théories et méthodes issues de l'ingénierie cognitive et plus particulièrement des « *human factor* » anglo-saxons, ne sont pas suffisantes pour analyser finement et chronologiquement les représentations mentales. En faisant notamment appel aux méthodes issues de la psychologie cognitive, nous élaborerons, grâce aux approches de l'auto-confrontation et l'explicitation, une méthode innovante et opérationnelle pour l'étude des interfaces dans le monde industriel (MERIA).

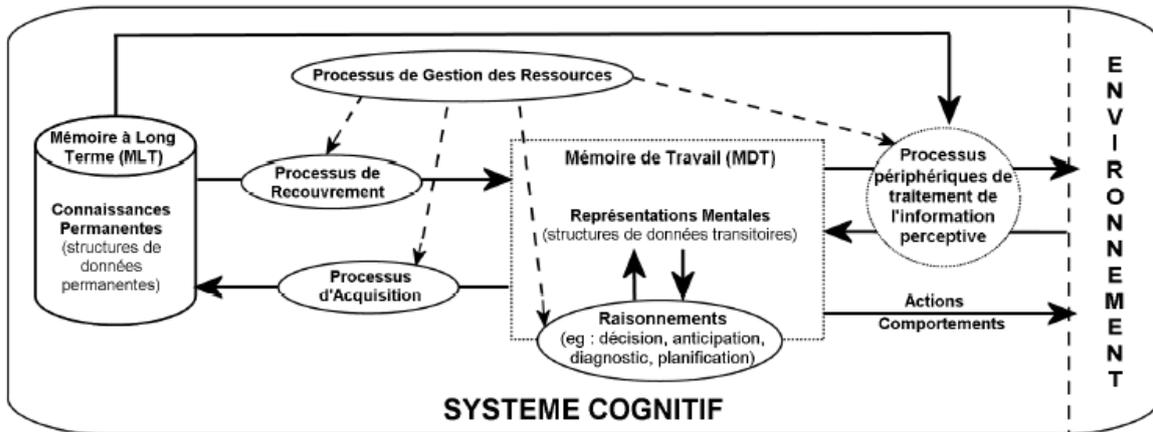
## 5.2 Notre approche de la prise de décision.

Nous avons vu que la prise de décision est un concept complexe d'un point de vue théorique, vis-à-vis duquel les avis sont loin d'être unanimes. Nous retenons deux choses : 1) une vision modulaire et séquentielle permet d'appréhender le processus de décision de manière unitaire (une décision pour un problème) ; 2) la prise en compte des fonctions exécutives ouvre l'opportunité d'interpréter l'aspect non-linéaire de la prise de décision.

Il nous semble pertinent de conjuguer ces deux visions pour notre étude qui se veut représentative de l'analyse de la dynamique de la RM qui sous-tend la prise de décision. Dans une optique d'application opérationnelle, nous avons cherché un modèle applicatif de l'étude des représentations dans la prise de décision. Nous avons pu identifier le modèle COSMODRIVE de Thierry Bellet, élaboré dans le contexte de l'automobile.

Dans le cadre d'un projet de recherche dans le secteur automobile (projet "Cosmodrive"), Bellet et al. (2007) s'inspirent de la boucle "perception, action, cognition" de Neisser (1976) pour positionner la RM comme une structure quasi-centrale dans le processus cognitif de l'opérateur. L'intérêt de sa modélisation consiste à placer chacune des briques "perception-cognition-action" dans un environnement dynamique, avec différentes boucles de rétroaction / régulation, en mettant l'accent sur les allers-retours nécessaires pour tout opérateur.

L'architecture cognitive qui sous-tend le modèle de conduite de Bellet (1998) est représentée (Figure 22). Elle est composée de deux types de structures de mémoire. Premièrement, la mémoire à long terme, qui contient toutes les connaissances et les souvenirs acquis par le sujet au cours de sa vie. Bellet y regroupe les mémoires procédurales et à long terme (cf. 3.2.1.1 et 3.2.1.3). Ces données sont des connaissances permanentes (c'est-à-dire des modèles mentaux, i.e. : schéma + script). Ensuite, une mémoire de travail, ou mémoire opérationnelle, dans laquelle sont construites des structures de données transitoires : les représentations mentales. Le fonctionnement du système cognitif résulte de l'action des fonctions exécutives (i.e. raisonnement, anticipation, prise de décision, planification d'action et diagnostic) (Bailly, 2004).



**FIGURE 22 – REPRÉSENTATION DE ARCHITECTURE COGNITIVE DU MODÈLE DU CONDUCTEUR SELON BELLET (1998).**

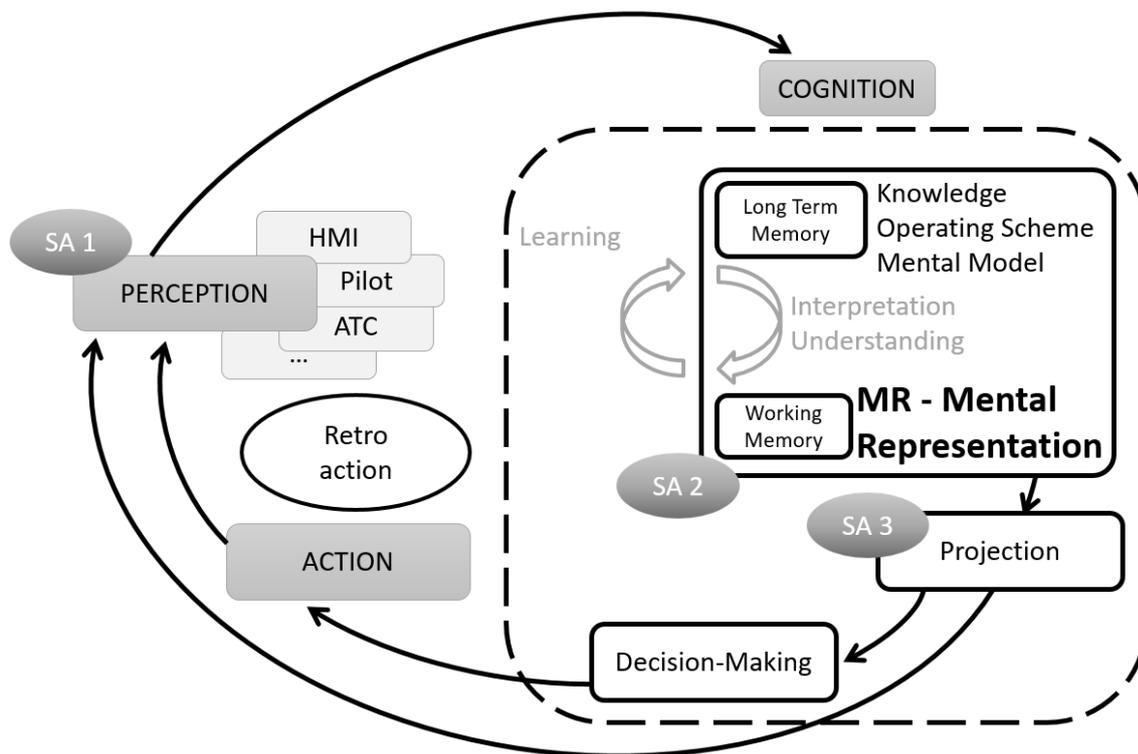
Remarquons que Bellet et ses collaborateurs (2007) et Paris (2014) identifient de nombreux points communs entre le concept de RM et l'état de conscience de la situation introduit et développé par Endsley (1988).

### 5.2.1 Proposition d'une vision intégrative d'un modèle de prise de décision

En s'inspirant des modèles de Bellet et al. (2009) et Endsley (1995), nous proposons une vision intégrée des concepts de "RM - attendue et réelle", de "connaissance de la situation" et de "prise de décision" pour l'opérateur en relation avec une IHM (voir Figure 23). Le modèle proposé décrit un processus d'appariement entre les processus de « perception cognition » et « RM », orienté vers un objectif de prise de décision efficace > action.

Ici nous effectuons un rapprochement entre deux points de vue qui conceptuellement ne se recoupent pas, mais pour lesquels nous allons essayer de créer un lien. Celle de la conception de la prise de décision au sens large en tant que processus (Bellet, Klein, Vicente...), et celle de la conception en tant qu'état (Endsley). Même si ces deux concepts ne s'opposent pas, il n'est pas naturel de les associer. Nous réalisons cependant ce rapprochement car il est nécessaire de s'inscrire dans les travaux antérieurs d'Endsley quand on souhaite traiter de la prise de décision dans le domaine aéronautique. Il convient également d'appréhender la vision processus et les fonctions exécutives qui y sont associées il l'on veut étudier les déterminant de l'émergence de la RM.

La RM est placée volontairement au centre de ce processus / cycle. Comme la situation étudiée est dynamique, l'analyse de la RM doit se faire de manière continue, prenant en compte les boucles de contrôle indiquant que l'opérateur adapte progressivement ses représentations et ses actions au contexte changeant. Ainsi, une approche cyclique du processus semble plus appropriée aux situations dynamiques. Une telle approche permet d'associer les structures de mémoire au modèle linéaire de SA d'Endsley. Le processus de construction de la RM peut être associé à l'étape de compréhension d'Endsley (niveau 2 de la SA). Cette construction est aussi un processus d'échange entre la MT (Mémoire de Travail), dans laquelle la RM émerge, et les MLT (mémoire à long terme – procédurale, épisodique, sémantique), dans laquelle les modèles mentaux demeurent. Cette vision est basée sur le principe proposé par Bellet du dialogue perpétuel entre MLT et MT. Cette boucle s'inscrit dans une autre boucle, celle de la mise à jour du processus perceptuel par rapport à l'environnement.



**FIGURE 23 – VISION INTÉGRATIVE DES CONCEPTS DE « RM - ATTENDUE ET RÉELLE », « CONSCIENCE DE LA SITUATION » ET « PRISE DE DÉCISION » DE L'OPÉRATEUR EN RELATION AVEC LES IHS, INSPIRÉE DE BELLET & AL. (2009) ET ENDSLEY (1995) (ATC : CONTROL DU TRAFFIC AÉRIEN).**

### 5.2.2 Analyse comparative des méthodes d'analyse des IHMs

Les IHM disponibles dans les cockpits sont certifiées et subissent différents types d'évaluation pour vérifier qu'elles sont adaptées ou non à l'activité de l'opérateur. Les méthodologies d'évaluation qui nous intéressent sont celles qui cherchent à évaluer conjointement les performances de l'interface et l'utilisation qui en est faite par l'opérateur. Nous cherchons à croiser l'ingénierie des systèmes avec l'analyse de l'activité cognitive, le but est d'améliorer l'intégration des aspects humains dans les activités de l'ingénierie système (Raymond, Prun, & Cegarra, 2016). Différentes catégories de méthodes existent, nous les citons dans le Tableau 1, en précisant sur la première ligne : les 4 catégories de méthodes d'évaluation de l'IHM, puis pour chacune d'entre elles, les exemples de méthodes associées, les avantages / inconvénients, et enfin les possibilités d'aborder directement la RM.

L'objectif de ce tableau est de classer les méthodes en fonction de leurs capacités à évaluer les représentations mentales.

**TABLEAU 1 – MÉTHODOLOGIES D'ÉVALUATION DES IHS. (SOULIGNÉES QUAND RM ACCESSIBLE)**

Catégories de méthodes d'évaluation de l'IHM <sup>1</sup>	Méthodes d'analyse des tâches	Méthodes d'analyse cognitive des tâches	Méthodes d'analyse de la CS
<b>Exemples de méthodes (soulignées lorsque RM est accessible)</b>	HTA, VPA (Annett, 2004)	<u>ACTA</u> <sup>2</sup> , Cognitive Walkthrough, Cognitive Work Analysis, Critical Decision Method. (Vicente, 1999)	SAGAT <sup>3</sup> , SPAM <sup>4</sup> , Analysis of the requirements of situational awareness (Endsley, 1988, 2000; Selcon & Taylor, 1990)
<b>Avantage (s)</b>	Description spécifique de la tâche	Combine plusieurs méthodes, accès aux stratégies décisionnelles, analyse de l'utilisation de l'opérateur par rapport à l'interface	Accès à une description précise de la situation pendant une activité
<b>Désavantage (s)</b>	Aucune verbalisation possible des tâches cognitives et des sentiments subjectifs pendant l'action	Une méthode qui peut être utilisée uniquement si l'interaction avec l'interface est facile à apprendre seul	L'interruption de la tâche est très intrusive, aucune information sur la relation de l'opérateur avec les interfaces
<b>Capacité à étudier la représentation mentale (RM) : OUI/ NON / Par quelle(s) méthode(s) ?</b>	NON	<u>OUI, toutes les méthodes citées</u> permettraient d'accéder à la RM MAIS elles n'ont pas été conçues à cette fin ; elles n'offrent pas d'accès aux "éléments satellites" de la RM ni à l'évolution de la RM.	<u>OUI, SPAM / SA</u> <u>Analyse des besoins</u> , mais il faut concentrer les questions sur le RM, sans induire.

Parmi ces méthodes, nous n'en identifions aucune qui soit directement concernée par l'analyse de l'activité des opérateurs in situ et qui réponde à nos besoins d'analyse des représentations mentales.

Stanton, Baber et Harris (2008) soulignent que dans les nouvelles situations de travail, de plus en plus complexes, il devient nécessaire de s'éloigner de l'utilisation de méthodes

<sup>1</sup> Tableau créé à partir du livre : "Human Factors Methods, A Practical Guide for Engineering and Design", Second Edition, after Stanton, Salmon, Rafferty, Walker, Baber and Jenkins (2013)

<sup>2</sup> ACTA: Cognitive Task Analysis.

<sup>3</sup> SAGAT: Situation Awareness Global Assessment Technique.

<sup>4</sup> SPAM: Situation Present Assessment Method

isolées et d'utiliser les avantages de plusieurs méthodes combinées pour créer un protocole de « triangulation » des données. Cela donne une méthode d'étude plus riche et plus adaptée aux situations et aux niveaux cognitifs observés. Par exemple, dans le cadre de l'étude " Event Analysis of the Systemic Teamwork Framework " (EAST) (Salmon, Lenne, Walker, Stanton, & Filtness, 2014), les auteurs proposent une triangulation de méthodes et d'analyses pour évaluer différents niveaux et points de vue sur l'activité du sujet, soit : le réseau de tâches, le réseau social et le réseau de connaissances impliqués dans la situation.

Jusqu'à présent, à notre connaissance, aucun auteur ne s'est intéressé à la question méthodologique concernant l'analyse de la RM et son évolution dans le temps. Par conséquent, l'objectif de ce chapitre est de proposer une nouvelle méthodologie et un nouvel outil de collecte et d'analyse des données pour l'étude de la RM. Ce type d'approche apparaît intéressant car les méthodes de conception conventionnelles ne prennent pas en compte la nécessité d'un alignement entre les modèles mentaux des opérateurs et les données du système affichées.

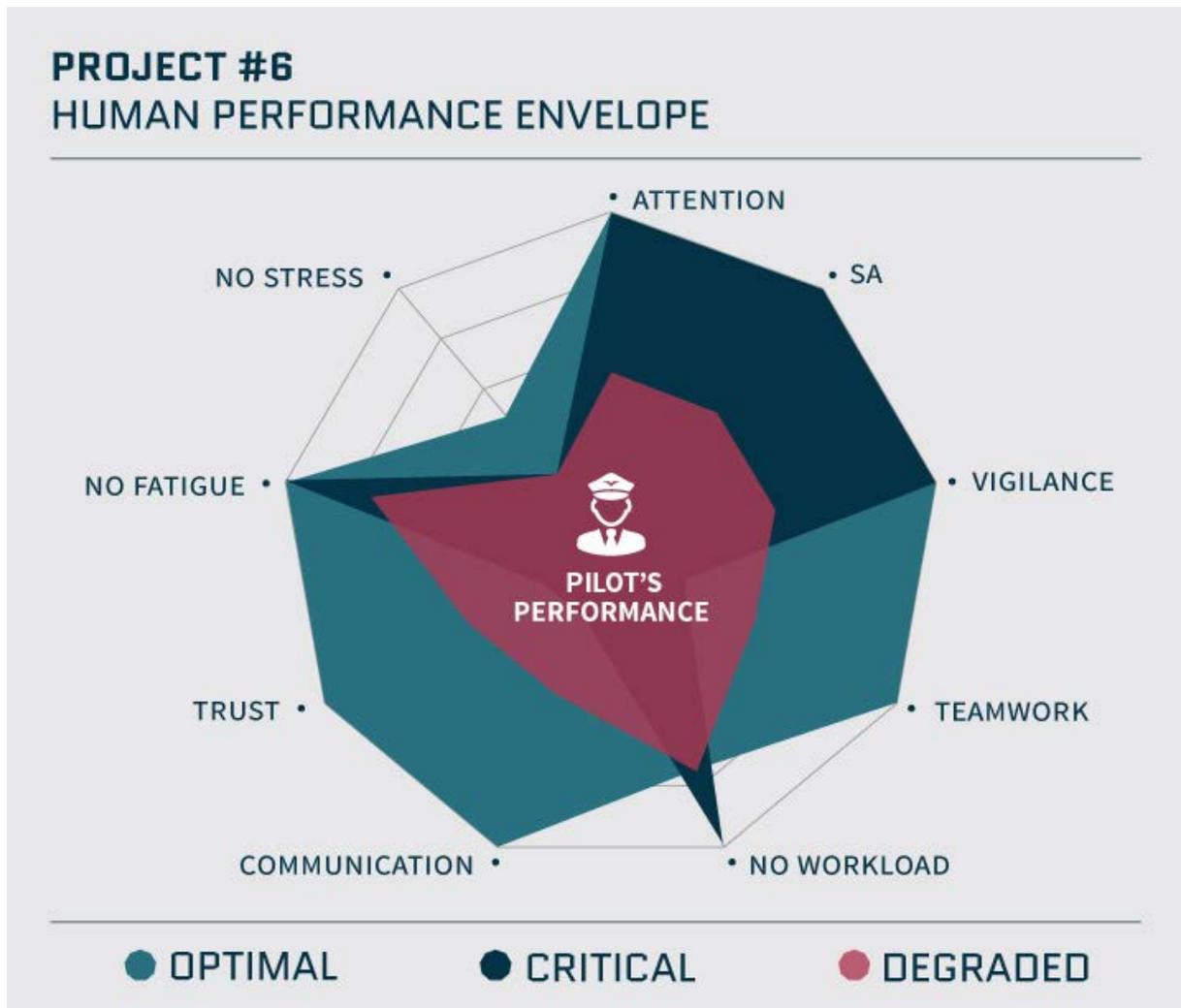
Pour surmonter cet écueil, nous nous sommes inspirés des méthodes conventionnelles de collecte de données, des méthodes d'analyse de la SA. Ainsi, notre recherche se concentre sur l'analyse de la RM des opérateurs interagissant avec les interfaces étudiées. Nous soulignons que la RM effective, qui sera observée et interrogée dans l'analyse de l'activité, sera comparée avec la RM attendue par l'expert juge de la procédure de vol. C'est aussi cet écart entre « RM effective vs RM attendu » qui nous intéresse.

## 5.3 Contexte et démarche expérimentale

### 5.3.1 Le projet H2020 Future Sky Safety P6 – Human Performance Envelope

Nous avons eu l'opportunité de participer au projet européen baptisé *Future Sky Safety P6 – Human Performance Envelope* (cf. Figure 24), dont l'objectif était d'améliorer la résilience du système sociotechnique « pilote / avion » afin d'augmenter la sécurité aérienne. L'approche consistait à mesurer et évaluer plusieurs paramètres reflétant l'activité des pilotes à l'aide de capteurs (oculométrie, ECG, respiration), de questionnaires et de méthodes d'interview (Kirwan et al., 2019). Plus généralement, ce

projet devrait contribuer à l'amélioration de « l'enveloppe de performance humaine » pour les pilotes, également appelée « HPE » (Graziani et al., 2016).



**FIGURE 24 – CONCEPT D'ENVELOPPE DE LA PERFORMANCE HUMAINE (HPE)**

Nous avons principalement participé à l'analyse de l'activité pilote en mettant en œuvre des méthodologies d'entretien. Ce projet nous a offert l'opportunité de concevoir un outil d'analyse d'activité, capable d'identifier rapidement la ou les sources responsables des erreurs de RM du pilote (en termes de HSI – Human System Interaction – et HMI).

Ce projet s'est déroulé en partenariat avec plusieurs centres de recherche en Europe et partenaires industriels (The Dutch National Aerospace Laboratory (NLR), Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Office National d'Etudes et de Recherches

Aérospatiales (ONERA), Centre Suisse d'Electronique et Microtechnique (CSEM), EUROCONTROL (ECTL), Thales Avionics (TAV), Deep Blue (DBL), Deutsche Lufthansa Aktiengesellschaft (DLH), Cranfield University (Cranfield), Embraer).

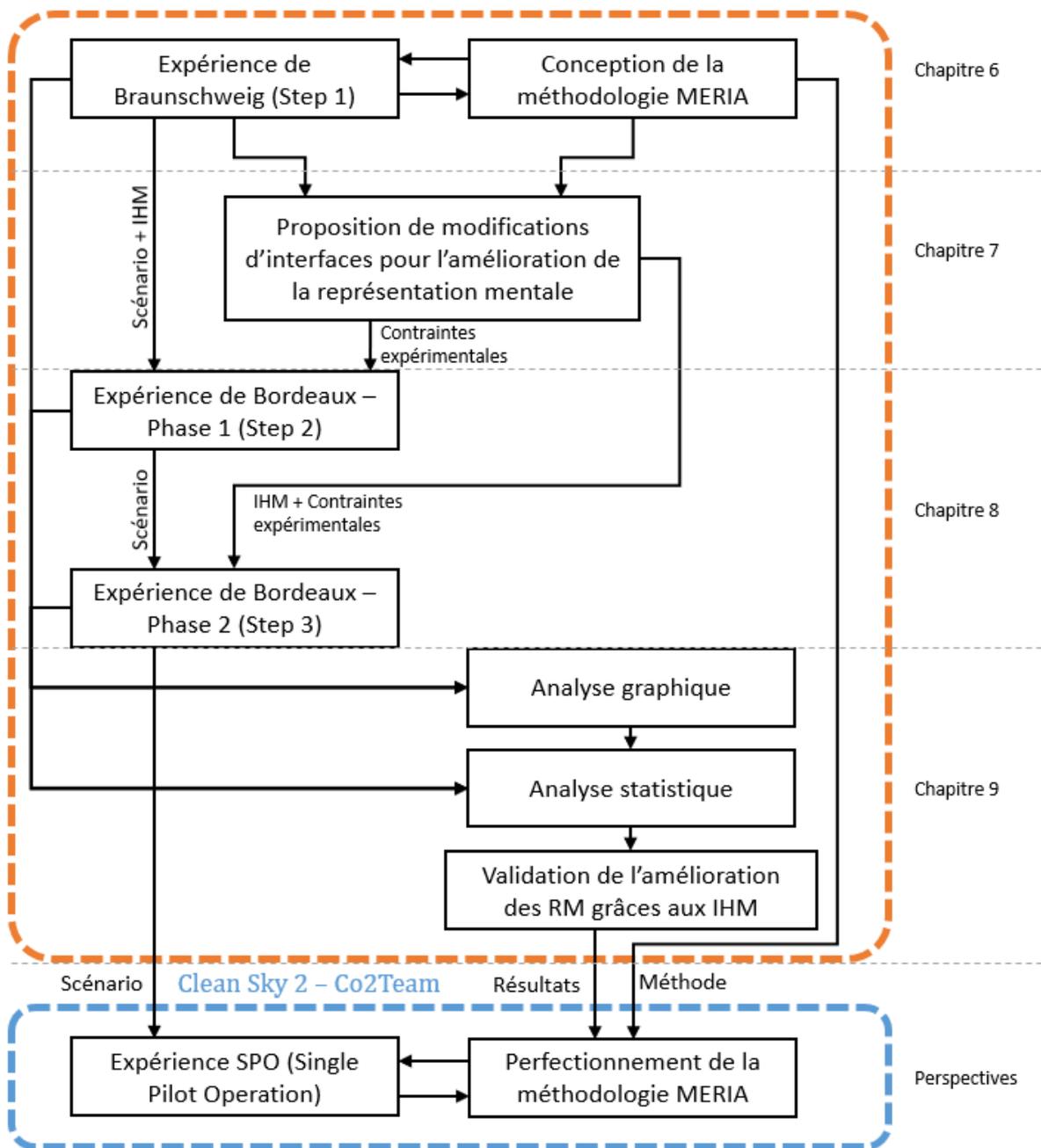
Ce projet et les expériences auxquelles nous avons participé sont financés par le programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union Européenne au titre de l'accord de subvention n° 640597.

### 5.3.2 Organisation de notre démarche de recherche

Pour la conduite de cette thèse, notre démarche de recherche a été la suivante (Figure 25) :

1. Concevoir une méthode permettant d'évaluer la représentations mentale des opérateurs (Letouzé et al., 2020) (MERIA – cf. Chapitre 6),
2. Mettre en place en parallèle une expérimentation permettant de tester cette méthode et de la valider dans le cadre d'un premier cas d'application (Braunschweig – Step 1 – cf. Chapitre 6),
3. Emettre des recommandations pour une évolution des interfaces de cockpits d'avion en se basant sur l'analyse de la première expérience (cf. Chapitre 7),
4. Évaluer la pertinence de ces nouvelles interfaces grâce à l'étude comparative des performances des pilotes selon deux conditions expérimentales (Expérience de Bordeaux – Phase 1 (Step 2), et Phase 2 (Step 3), cf. Chapitre 8),
5. Observer les résultats de ces expérimentations et valider la pertinence de ces recommandations d'IHM sur l'amélioration des RM (cf. Chapitre 9).
6. Améliorer : à la suite de cette démarche il sera pertinent d'améliorer la méthode pour rationaliser le processus de collecte et de traitement de la donnée : c'est l'opportunité qui nous est offerte au travers du projet Co2Team (cf. Perspective).

## Future Sky Safety P6 – Human Performance Envelope



**FIGURE 25 – DÉMARCHE EXPÉRIMENTALE MISE EN ŒUVRE POUR NOTRE TRAVAIL**

# CHAPITRE 6 MÉTHODES D'ÉVALUATION DES PROCESSUS COGNITIFS IMPLIQUÉS DANS LA PRISE DE DÉCISION (MERIA)

L'objet de ce chapitre est de d'identifier et de mesurer les écarts entre les représentations mentales « prescrites » et les représentations mentales « réelles » des opérateurs. Cela doit permettre de mettre en évidence les artefacts technologiques à l'origine de ces écarts. En d'autres termes, nous souhaitons comprendre précisément quels sont les différents types d'erreurs générées par le dispositif "copilote / interfaces homme-système" afin de les résoudre grâce à une conception améliorée.

Dans cet objectif, nous avons conçu une méthode pour représenter et interpréter les résultats expérimentaux recueillis dans le cadre d'une triangulation d'observations et d'entretiens d'auto-confrontation. Les méthodes et théories utilisées sont celles des domaines de la psychologie ergonomique issus des travaux de Leplat (2006, p. 200) et de la psychologie phénoménologique empirique (Theureau, 2006; Vermersch, 1996) en matière d'analyse d'activité.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons aux données de l'expérience de Braunschweig – Step 1, et à la méthodologie MERIA créée en parallèle. La méthodologie MERIA et les résultats de l'expérience de Braunschweig ont donné lieu à une publication (Letouzé et al., 2020).

## 6.1 Le contexte d'étude

### 6.1.1 Le rôle du co-pilote dans l'avion

L'opération aéronautique que nous avons observée est celle du **copilote** (pilot monitoring). Les copilotes interviennent particulièrement dans les situations dynamiques, incertaines et risquées pour aider le pilote en charge des commandes (pilote flying). Ils doivent prendre de multiples décisions sous la pression, en temps réel, pour atteindre leurs objectifs de performance (Graziani et al., 2016). Dans un avion de ligne, le copilote assiste donc le pilote dans la prise de décision, il lui apporte toutes les

informations nécessaires pour que celui-ci puisse avoir tous les éléments / informations à l'esprit pour prendre une décision. Dans ce contexte, le copilote doit comprendre l'environnement, en extraire les éléments saillants et filtrer ceux qui ne le sont pas pour aider le pilote. Plus concrètement, c'est le co-pilote qui consulte la documentation pour identifier les procédures à suivre, les limitations opérationnelles du système en cas de pannes. Il est également en charge de la communication avec le contrôle aérien. Il effectue les procédures de résolution de pannes. Il se maintient informé des évolutions de la météo, et transmet les informations concernant les consignes de vol (changement de cap, autorisation de descente/montée, autorisation d'atterrissage, restriction, zone à éviter, procédure d'attente à l'arrivée d'un aéroport, consignes de roulage...).

### 6.1.2 Rappel du contexte

Les sujets / opérateurs observés (10 co-pilotes d'un avion commercial moyen-courrier de type A320) travaillent dans un environnement défini comme dynamique, par opposition à un environnement statique (cf. 1.1). Afin de faciliter le travail du copilote (comme du pilote) dans ce contexte, l'automatisation des systèmes se généralise. Ainsi, l'activité de l'opérateur évolue et il est devenu essentiel de comprendre comment assister, au moins partiellement, des activités telles que la planification, le diagnostic et la prise de décision (Bellet et al., 2009; Roth & Woods, 1988). L'équipage doit faire face à un environnement incertain, et ce pour les trois dimensions définies dans le Chapitre 1 (cf. 1.2) :

- L'incertitude d'état : l'état de l'appareil, le trafic aérien ou la disponibilité de l'aéroport (qui ne sont pas connus avec certitude et peuvent évoluer), l'environnement (météo).
- L'incertitude d'effet, qui apparaît en premier lieu au travers de l'automatisation, ces systèmes d'aide dont les pilotes ne perçoivent pas l'intégralité de la complexité ou même du fonctionnement : de ce fait, le pilote ne peut pas dire comment ses actions seront prises en compte par le système, sauf peut-être par l'expérience.
- L'incertitude de réponse : l'envoi d'une commande à l'appareil ne déclenche pas nécessairement une action immédiate de l'avion, par exemple une consigne d'altitude peut être donnée à l'appareil et, bien qu'il l'ait prise en compte, le

système peut mettre plusieurs secondes avant qu'on en perçoive les effets. Il peut même ne pas réagir si cette commande entre en conflit avec une autre. Le pilote peut ne pas être conscient de ces latences au conflit.

Kouabenan et Dubois (2003) soulignent que le risque est une " construction sociale et cognitive ", c'est-à-dire que l'évaluation du caractère risqué ou non des situations dépend des individus, des groupes et des circonstances contextuelles. Comme nous l'avons déjà vu (cf. 1.3), c'est ce risque subjectif qui nous intéresse dans cette étude. L'un des enjeux du projet FSS est de concevoir une IHM qui puisse réduire les différences de représentation entre la situation perçue et la situation réelle pour les opérateurs, et les aider efficacement dans leur prise de décision.

## 6.2 Méthodes

### 6.2.1 Description des expérimentations menées

#### 6.2.1.1 Le simulateur

Dans le cadre du projet FSS, nous avons mené une expérience à Braunschweig (Allemagne) sur le site du Centre de simulation de vol AVES (Air Vehicle Simulator), exploité par le Centre allemand de recherche aéronautique DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt). Ce simulateur dynamique permet de reproduire toutes les conditions de vol, grâce à une plateforme à 6 degrés de liberté. Le champ de vision est reproduit autour du cockpit dans un espace de 240 ° par 95 ° (« Outbound Flight to the Future », 2014).

#### 6.2.1.2 Description du scénario expérimental

##### *Éléments contextuels pour la mise en œuvre du scénario*

Pour concevoir le scénario de support pour cette expérience, nous avons pris en compte les rapports d'accident et de sécurité de l'Agence européenne de la sécurité aérienne (EASA) et de l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI). Ces documents nous ont permis de définir un scénario critique et complexe générant différents degrés de coopération entre le commandant de bord (responsable du vol), le copilote (accompagnant le commandant de bord), leurs différentes IHM et le contrôle du trafic aérien (ATC - plus communément appelé comme tour de contrôle).

Dans notre étude, le commandant de bord était passif (car la mise en place du scénario servait un objectif de formation), il ne dirigeait pas les actions des copilotes mais devait les orienter ou prendre une décision si leurs actions étaient susceptibles de conduire à un accident ou crash. Nous avons concentré notre collecte de données sur l'activité des copilotes en raison de leur contact direct et continu avec toutes les interfaces du cockpit et de l'ATC. Pendant le scénario, ils ont dû interagir avec le capitaine et l'ATC, tous deux complices de l'expérience.

#### *Instructions et étapes attendues du scénario*

Pour les copilotes, l'instruction générale du scénario était la suivante : "Vous commencez votre descente (Top of Descent) vers l'aéroport de Brême et vous atterrirez sur la piste 27".

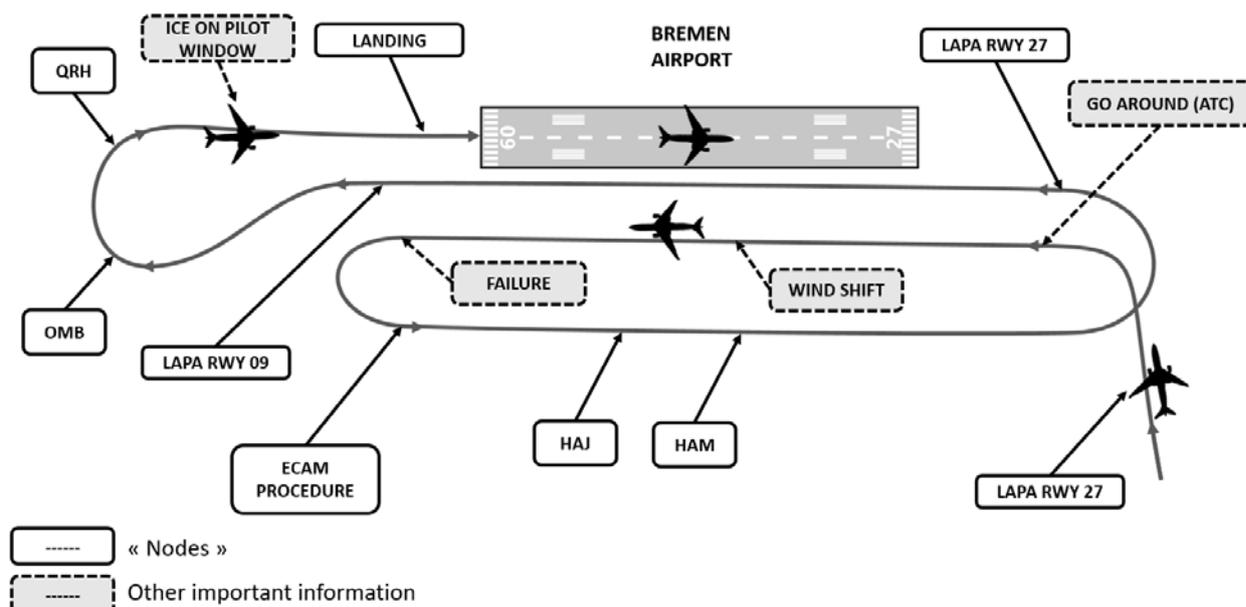
Le contexte du scénario critique observé est unique car il débute au milieu du vol (dans une phase juste avant l'approche et l'atterrissage), pour que les copilotes n'aient pas conscience a priori de la quantité de carburant restante (Fuel On Board) pour atteindre la fin du vol.

Le scénario a été construit autour de 9 étapes structurantes que nous avons appelées « nœuds » (Figure 26). Il s'agit des procédures qui doivent être effectuées par tous les copilotes. L'aéroport de Brême dispose de 2 pistes (27 et 09) (Figure 27). L'avion dispose de 55 minutes d'autonomie. Pour réaliser ce scénario, l'équipage dispose d'un maximum de 50 minutes.

**« LAPA RWY 27 → ECAM PROCEDURE → HAJ → HAM → LAPA RWY 27 →  
LAPA RWY 09 → OMB → QRH → LANDING »**

#### **FIGURE 26 – SUCCESSION DES DIFFÉRENTES PHASES REMARQUABLES DU SCÉNARIO.**

Ces phases constituent le squelette de l'analyse et de la modélisation, elles sont classées par ordre d'apparition chronologique. ECAM Procedure : interface informant sur l'état du système (défaillances et procédures à suivre), HAJ : aéroport d'Hanovre, HAM : aéroport d'Hambourg, LAPA : Calcul de la performance d'atterrissage, OMB : Manuel de procédures, QRH : Quick Reference Handbook, LANDING : Atterrissage.



**FIGURE 27 – REPRÉSENTATION SCHEMATIQUE DES ÉTAPES DE VOL DU SCÉNARIO ("NŒUDS" ET AUTRES ÉVÉNEMENTS IMPORTANT).**

ECAM Procedure : interface informant sur l'état du système (défaillances et procédures à suivre). HAJ : aéroport d'Hanovre, HAM : aéroport d'Hambourg, LAPA : Calcul de la performance d'atterrissage, QRH : Quick Reference Handbook, LANDING : Atterrissage, OMB : Manuel de procédures, FAILLURE : Panne, WIND SHIFT : Changement de sens du vent, ICE ON PILOTE WINDOW : glace sur la vitre du pilote.

*Description des participants et mise en œuvre des expériences*

Le projet FSS a permis d'accéder à un panel de 10 co-pilotes, (ils connaissent toutes les particularités de l'aéroport de Brême : longueur de la piste, aéroports proches, prolongement non officiel de la piste, etc. – voir Tableau 2). Ces participants volontaires et rémunérés sont des "experts" de la tâche, ce qui offre un intérêt particulier pour l'analyse de la prise de décision, de la conscience de la situation et des mécanismes de RM. Dans leur activité professionnelle, aucun des copilotes recrutés n'est commandant de bord, c'est-à-dire responsable de l'avion ou de ses passagers.

**TABLEAU 2 – PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES D’EXPERTISES DU PANEL DES 10 PARTICIPANTS DE NOTRE EXPÉRIMENTATION. SD : ECART-TYPE.**

	<b>Moyen</b>	<b>Minimum</b>	<b>Maximum</b>	<b>SD</b>
<b>Age (Années)</b>	30,9	28	36	3,28
<b>Nombre total d’heures de vol</b>	4045	2250	7000	1569
<b>Nombre total d’heures de vol sur Airbus A320</b>	3125	250	6000	1557
<b>Nombre total d’heures de vol sur les 12 derniers mois</b>	678,7	600	750	42,78

Les expériences se déroulent sur deux semaines (un co-pilote par jour). Pour chaque sujet, l'expérience et l'instruction est préalablement décrites par le commandant de bord (complice des expérimentateurs). Un questionnaire d'informations personnelles est rempli, puis la réalisation du scénario dans le simulateur commence.

### 6.2.2 Approche générale de la triangulation des méthodes et des points de vue de l'activité

Une triangulation des méthodes a été mise en œuvre, combinant le qualitatif et le quantitatif et mettant en évidence de manière détaillée et contrastée l'activité observée (Altrichter, 2008). L'étude se concentre sur la compréhension des représentations mentales des co-pilotes lors de la réalisation d'un scénario critique. Nous présentons également l'étude de cas d'un co-pilote pour ses résultats particulièrement intéressants (nous justifierons cela plus loin dans la section des résultats).

Pour utiliser l'outil MERIA (MEntal Representation Impact Analysis) décrit dans ce travail, nous avons procédé en plusieurs étapes que nous décrivons chronologiquement.

Les expérimentations se déroulent au laboratoire du DLR, membre du projet FSS. Tout d'abord, un questionnaire démographique a été rempli. Ensuite, le scénario est réalisé par le pilote et le co-pilote. Deux experts en sciences cognitives observent à distance à l'aide de caméras et identifient des éléments pour guider l'interview. Ces deux experts sont appuyés eux-mêmes par un expert en aéronautique, également présent dans la salle, dont

le rôle sera décrit plus loin. À la fin de la passation, les deux experts en sciences cognitives réalisent un entretien filmé d'auto-confrontation avec le copilote sujet de l'étude.

Le Tableau 3 décrit, à l'issue des 10 passages expérimentaux, le type de données collectées, la quantité associée et les différentes dimensions de l'activité rapportée. L'objectif est d'améliorer "la richesse et la sophistication de notre analyse" (Guilbert & Lancry, 2007) et de se rapprocher le plus possible de la "valeur réelle des informations collectées" (De Battisti, Salini, & Crescentini, 2006), en fusionnant ces trois points de vue sur l'activité.

Le point de vue « extrinsèque » est obtenu par des enregistrements vidéo de l'ensemble de l'activité. Il donne une vision objective de l'activité de l'opérateur. Ce point de vue, appelé aussi "troisième personne", donne un large aperçu de ce qui se passe dans le cockpit.

**TABLEAU 3 – PRÉSENTATION DES DIFFÉRENTS TYPES DE MÉTHODES DE RECUEILS UTILISÉES ET VOLUME DES DONNÉES RECUEILLIES.**

	<b>POINT DE VUE EXTRINSÈQUE</b>	<b>POINT DE VUE INTRINSÈQUE LOCALISÉ</b>	<b>POINT DE VUE INTRINSÈQUE NON- LOCALISÉ</b>
<b>MATÉRIEL COLLECTÉ</b>	Vidéo et audio de l'activité dans le cockpit (50 min*10)	Entretien d'auto-confrontation explicitant	Profil (Age, expérience)
	Vidéo et audio de la salle d'observation (50 min*10)		
<b>TOTAL</b>	Env. 17 heures	Env. 7,5 heures	10 Questionnaires

Le point de vue « intrinsèque localisé » est obtenu par un entretien d'auto-confrontation, dans lequel le copilote est invité à décrire précisément le scénario vécu et les mécanismes cognitifs qui sous-tendent son activité de gestion de crise. Nos questions portent sur la constitution et l'évolution de la RM, par exemple : "A ce moment, quelles étaient vos options ? Qu'avez-vous vu ? Qu'avez-vous compris ? À quoi vous attendiez-vous ?" Ce point de vue intrinsèque fournit les expériences subjectives du copilote, il donne une explication précise des mécanismes cognitifs dont il avait conscience.

Enfin, le point de vue « intrinsèque non localisé » provient d'un questionnaire individuel. Ce troisième point de vue de l'activité permet de remplir des items personnels de nature démographique et d'expérience.

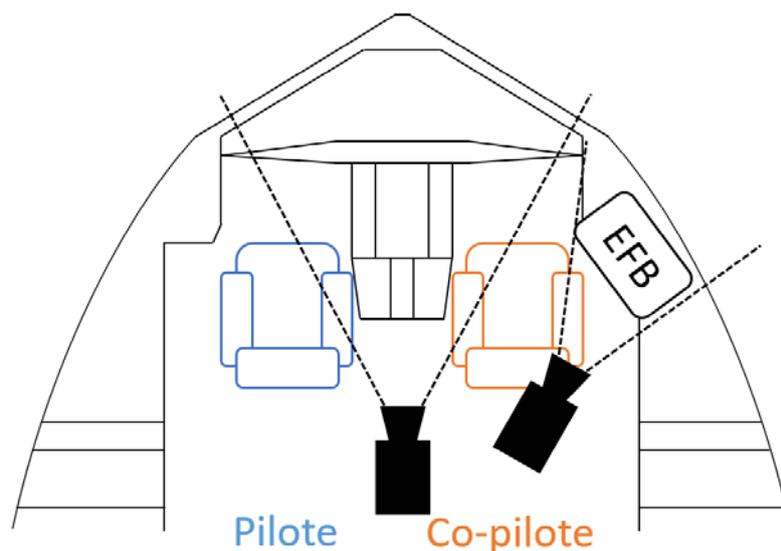
Dans le cadre de la triangulation de ces méthodes, nous avons particulièrement insisté sur l'analyse des RM des co-pilotes. C'est ce qui différencie cette approche des autres protocoles méthodologiques tels que l'EAST (Stanton et al., 2008) mentionné ci-dessus.

## 6.3 Recueil et analyse des données

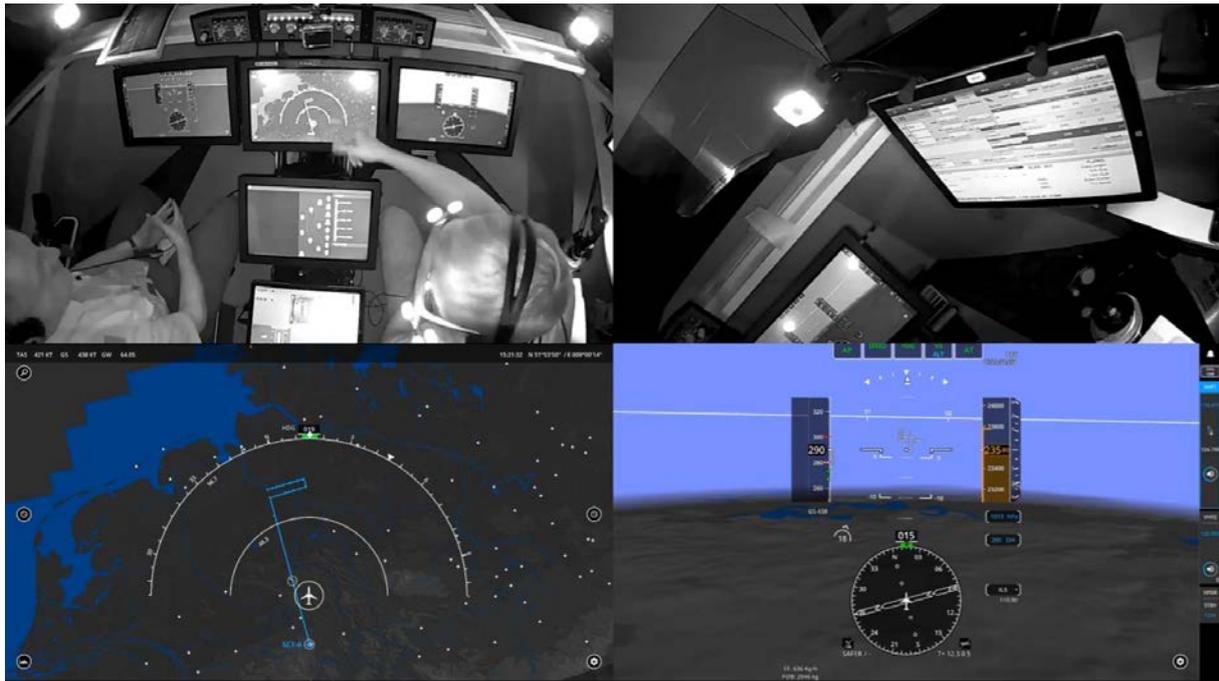
### 6.3.1 Observations de l'activité à travers le déroulement du scénario.

#### 6.3.1.1 Collecte des vidéos data

L'activité des copilotes pendant la simulation a été enregistrée au moyen de deux caméras placées au milieu du cockpit. La première était située au-dessus du copilote et du pilote (au-dessus du panneau supérieur) pour observer les interactions de ces deux opérateurs. La seconde était placée au-dessus de la tablette EFB (Electronic Flight Bag) pour suivre les copilotes lors de l'accès à l'OMB (Operational Manual Part B) par exemple, ou lors du calcul du LAPA (Landing calculation and performance tool Page). On peut voir un exemple du type d'image obtenues sur la Figure 29. Ces caméras étaient placées hors de vue des pilotes et elles étaient donc non intrusives.



**FIGURE 28 – POSITION DES CAMÉRAS DANS LE COCKPIT (VUE DE DESSOUS DU COCKPIT, LES RECTANGLES NOIR REPRÉSENTENT LES CAMÉRAS AVEC EN POINTILLÉ LEUR CHAMPS DE PRISE DE VUE).**



**FIGURE 29 – EXEMPLE D’IMAGE OBTENUE AVEC LES CAMÉRAS (EXTRAIT DE L’EXPÉRIENCE DE BORDEAUX - STEP2)**

Une troisième caméra a été placée dans la salle de contrôle. L'objectif était ici de recueillir les indications données par la tour de contrôle (mise en scène du scénario en temps réel, annonce des pannes, etc.). Elle a également enregistré les commentaires d'un expert aéronautique (C. S.-M.) positionné dans la salle de contrôle qui commentait le comportement du copilote, notamment les écarts entre prescrit et réalisé. C. S.-M. connaît très bien la compagnie aérienne et les règles qu'elle prescrivait. En effet, il a 8 ans d'expérience en tant que formateur et 25 ans d'expérience en tant que pilote. Il a participé activement à la création de l'activité de référence et du scénario. Il a été une ressource précieuse pour nous aider à comprendre et interpréter les comportements des copilotes sur le plan technique.

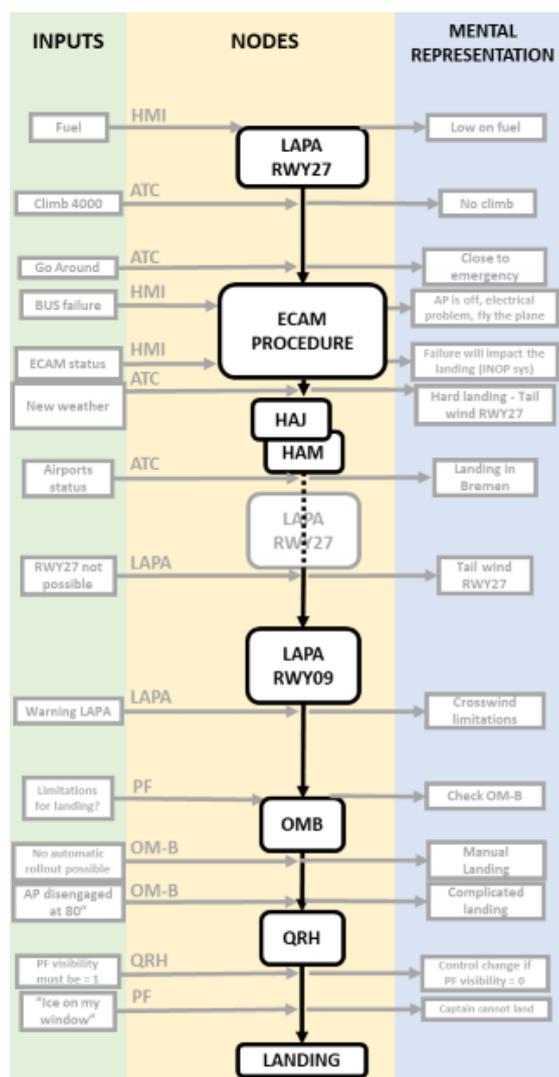


**FIGURE 30 - VUE DE LA SALLE DE CONTRÔLE, COMMENTAIRES EN TEMPS RÉEL DE L'EXPERT AÉRONAUTIQUE.**

Par ailleurs, les experts en sciences cognitives (en charge de la passation des entretiens d'auto-confrontation) étaient présents en la salle de contrôle, ils notaient sur une frise chronologique les différentes lacunes constatées. Les explications de C. S.-M. ont ainsi permis de faire des hypothèses sur l'évolution de la RM des copilotes au fur et à mesure de l'avancement du scénario.

#### 6.3.1.2 Analyses des données vidéo

Sur la base du scénario prescrit, nous avons créé une première grille d'observation de l'activité, en alignant chronologiquement les macro-tâches prescrites du copilote, ainsi qu'en formalisant les indications émises par le commandant de bord (PF) (complice), la salle de contrôle (ATC) et le système avion (IHM) (Figure 31).



**FIGURE 31 – MODÉLISATION DE L'ACTIVITÉ PRESCRITE (LES COLONNES SONT EXPLIQUÉES EN 6.4.1).**

À partir des différentes collections de vidéos (cockpit et salle de contrôle), nous avons retranscrit, en complétant cette première grille (Figure 32), l'activité réelle déployée par le copilote : les comportements attendus et inattendus des copilotes, les actions mal comprises ou nécessitant une explication, ainsi que les commentaires de C. S.-M. en salle de contrôle. Tous ces éléments ont constitué un apport précieux pour l'entretien individuel détaillé mené 30 minutes plus tard.

## 6.3.2 Entretiens d'auto-confrontation et explicitation

### 6.3.2.1 Collection des verbatim

Notre approche est basée sur la complémentarité de deux techniques : les entretiens d'auto-confrontation. Cette approche nous permet d'obtenir des données précises de manière chronologique. Ainsi, nous pouvons suivre l'évolution de la RM pendant les différentes étapes du scénario pour le copilote interviewé, de même que les conséquences pour l'équipage et pour la réalisation de la mission.

Après l'expérience sur simulateur, chaque copilote participe individuellement à un entretien "d'auto-confrontation". L'objectif était de décrire ce qu'ils avaient vécu pendant la simulation. Plus précisément, nous voulions recueillir les modèles mentaux mobilisés par chacun des copilotes. En effet, c'est en connaissant les modèles mentaux mobilisés que nous pourrions comprendre sur quelle base est constitué le RM de ces derniers.

Von Cranach et Kalbermatten (1982) sont parmi les principaux initiateurs de l'entretien d'auto-confrontation. En France, Pinsky et Theureau (1987) l'ont défini comme un outil pour "documenter l'expérience ou la conscience pré-réflexive ou la compréhension immédiate de l'expérience de l'acteur à chaque moment de l'activité" (Pinsky & Theureau, 1987). Dans le sens de Theureau (2010), l'entretien d'auto-confrontation repose sur le produit de l'observation ou de l'enregistrement d'un comportement (nous avons ici la vidéo de l'activité du copilote). Il consiste à rendre explicites les actions et les communications de la personne interrogée par des questions habiles non inductives, inspirées de l'interview de Vermersch (1994) ; à reconstituer les interprétations et les focus du copilote ; à atteindre la conscience pré-réflexive, grâce à une situation revécue - cadre théorique de la sémiotique de Pierce, rappelé par Cahour (2006).

Pour réaliser ces entretiens, nous nous sommes également appuyés sur la méthode de ballade Cognitive (Polson & Smith, 1999). Il est intéressant d'utiliser cette méthode car elle est centrée sur la tâche prescrite (scénario prescrit) et propose la comparaison avec la tâche réelle (scénario réel). Elle permet de suivre précisément le scénario proposé au sujet, de recueillir pas à pas son évolution dans la situation et de pouvoir identifier avec précision la source des succès ou des erreurs.

### 6.3.2.2 Analyse des verbatim

Une fois les entretiens recueillis, ils ont été entièrement transcrits. Ensuite, nous avons réorganisé chronologiquement les récits d'expériences selon le scénario prescrit par la compagnie aérienne. Ces verbatim mettent en évidence la compréhension / l'incompréhension de l'événement passé, et les interfaces liées à ces situations problématiques. Nous associons ces verbatim à chaque événement factuel dans leur chronologie et surtout à la diminution de la quantité de carburant, pour laquelle nous disposons de relevés très réguliers.

D'une manière générale, nous nous sommes appuyés sur ces verbatim placés dans l'ordre chronologique pour coder chacune des briques relatives à la RM évolutive des copilotes dans le scénario. Les données verbales de l'expert de la salle de contrôle nous ont également aidés à caractériser ces briques.

## 6.4 Description de l'outil MERIA et étude de cas

### 6.4.1 Les Trois Colonnes d'analyse De l'outil MERIA

L'outil MERIA a été développé à partir de plusieurs ensembles de données (vidéos, notes d'entretien, etc.) qui, une fois combinés, fournissent une vue complète de la situation vécue par les copilotes. Un exemple complet de l'outil développé (MERIA) est proposé dans la figure 5 pour le copilote 8.

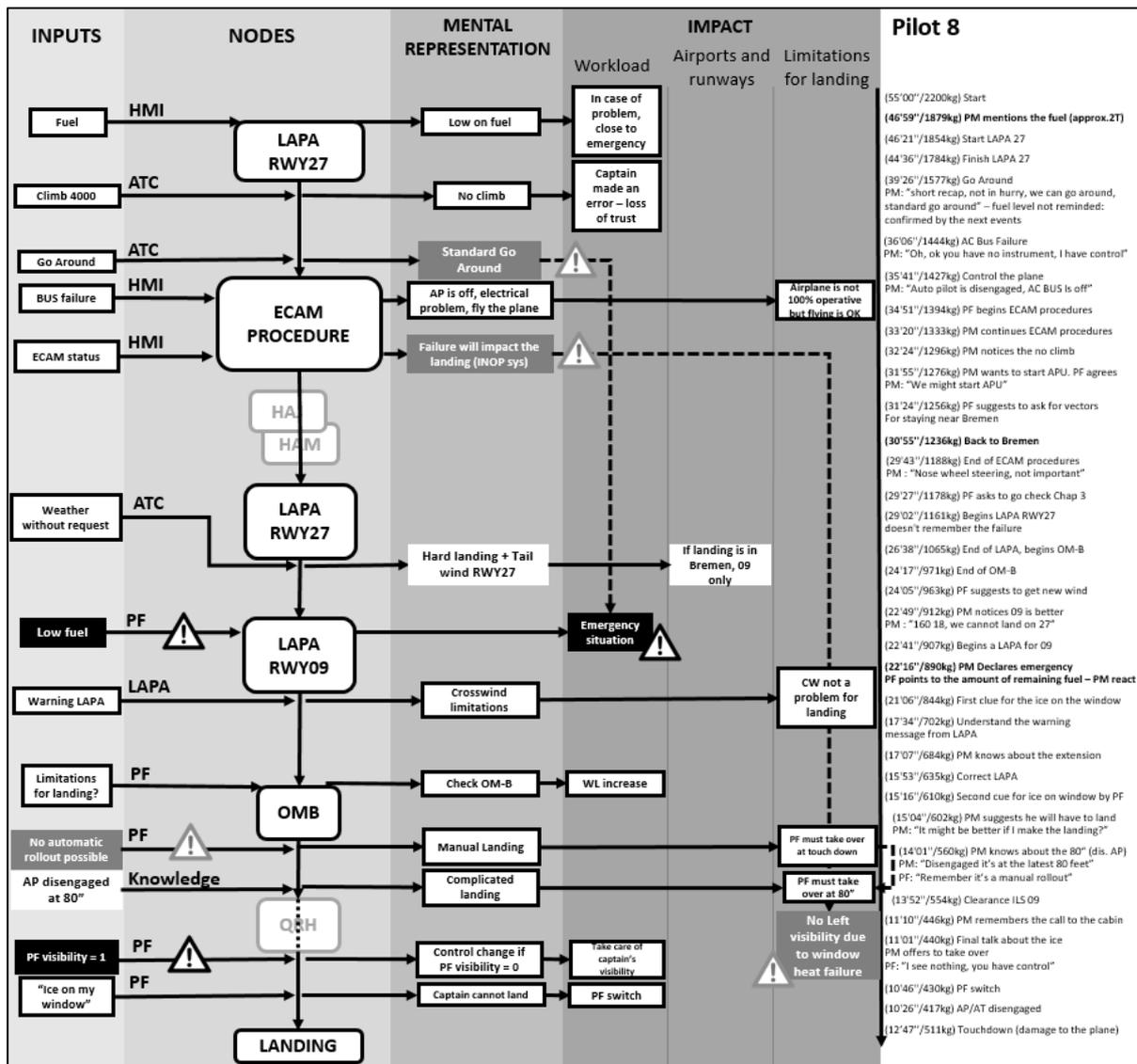
L'outil est construit comme suit :

- Le scénario de vol prescrit permet de modéliser les différentes étapes suivies par chaque opérateur. Elles constituent le squelette central de l'outil. Elles sont représentées par des carrés blancs placés dans la colonne "NODES". Chaque étape est identifiée par un acronyme bien connu des experts en aviation.
- Dans la colonne "INPUT", les encadrés indiquent les différentes sources d'information dont dispose le copilote. A la base de ces encadrés, il est précisé par quel moyen/source l'information est parvenue au copilote. Au fil du scénario, le code couleur de ces carrés peut évoluer en fonction de la compréhension des éléments perçus par le copilote : *Blanc sans contour : le copilote connaissait l'information sans la lire/voir ; Blanc avec contour noir : le copilote a perçu*

*l'information ; Gris : le copilote n'a vu qu'une partie de l'information ; Noir : le copilote n'a pas perçu l'information.*

- Dans la colonne "REPRESENTATION MENTALE", nous codons les éléments relatifs à la RM réelle du copilote. Elle varie et évolue au cours du scénario. *Le code couleur est le suivant : Blanc sans contour : l'activité réelle a dépassé l'activité prescrite (ou attendue) ; Blanc avec contour noir : l'activité réelle correspond à l'activité prescrite ; Gris : l'activité réelle a été inférieure à l'activité prescrite, sans être qualifiée de critique ; Noir : l'activité réelle a été inférieure à l'activité prescrite et la situation est ou devient critique.*
- Dans la colonne "IMPACT", sont indiquées les conséquences des actions mises en œuvre dès que la charge mentale, le choix de l'aéroport/piste (Brême ou autres) et ou les limitations pour l'atterrissage interviennent dans le déroulé du scénario. Le code couleur appliqué à chaque impact correspond aux codes couleur des représentations mentales codées précédemment.

*N.B. : Les couleurs décrites sont celles utilisées pour les figures en noir et blanc (ou dégradé de gris). Pour les figures en couleur, on notera la correspondance suivante : Blanc sans contour pour Vert, Blanc avec contour noir pour Bleu, Gris pour Orange et Noir pour Rouge.*



**FIGURE 32 – MODÈLE MERIA CORRESPONDANT À L'ACTIVITÉ DU COPILOTE 8**  
 le codage des éléments est décrit plus haut, les triangles avec un point d'exclamation indiquent une mauvaise performance.

Pour le renseignement de la grille du modèle MERIA (Figure 32), nous avons réalisé un double codage (deux juges) afin d'identifier :

- les "INPUT" qui ont été perçus ou non par les copilotes ;
- les écarts (ou non) de "MENTAL REPRESENTATION" entre ce qui est attendu par la procédure et ce qui était effectif au moment du scénario ;
- les décisions du copilote.

Le codage de certaines représentations mentales s'est avéré difficile en raison de la sophistication des actions et des verbalisations des copilotes. Nous avons donc conçu une grille d'analyse (Figure 33), capable de statuer sur les différents écarts de RM à partir de critères discutés entre les deux juges.

Représentation Mentale	Vert	Bleu	Orange	Rouge
<b>Low on fuel</b>	Emergency déclarée (mentionne qu'il faut le déclarer)	Emergency déclarée après le GA (mentionne qu'il faut le déclarer)	Emergency déclarée après la panne (mentionne qu'il faut le déclarer)	PF signale le "Low Fuel"
<b>No Climb</b>		Il le voit tout de suite	Il le voit "plus tard"	ATC le lui dit
<b>Close to emergency</b>	Emergency déclarée (mentionne qu'il faut le déclarer)	Emergency déclarée après la panne (mentionne qu'il faut le déclarer)	Emergency déclarée après les <i>Alternate</i> (mentionne qu'il faut le déclarer)	PF lui demande de déclarer l'"Emergency"
<b>AP is off, electrical problem, fly the plane</b>		Prend les commandes en mains et sait que l'AP est Off	Ne tient pas les commandes mais sait que l'AP est coupé	N'a pas conscience que l'AP est coupé
<b>Failure will impact the landing (INOP sys)</b>		Identifie : Reverse 1, Spoiler, N/W Steering, left WINDSHIELD Heat Il commente l'impact de ses pannes sur l'atterrissage	Identifie : Reverse 1, Spoiler, N/W Steering, left WINDSHIELD Heat Ne décrit pas l'impact sur l'atterrissage	Oublie de citer plus d'un élément qui impacte l'atterrissage
<b>Difficult Landing - Tail wind RWY27</b>	Identifie qu'il faut utiliser la RWY09	Annonce qu'il faut réévaluer le calcul de l'atterrissage	Refait le LAPA sans changer le vent	Refait le LAPA sans entrer plusieurs éléments cruciaux
<b>Landing in Bremen</b>	Demande l'état de l'aéroport Hanovre, conclut que c'est impossible reste sur Brème et demande la RWY09	Demande l'état de l'aéroport Hanovre, conclut que c'est impossible et reste sur Brème	Demande l'état de l'aéroport Hanovre, puis demande les autres aéroports encore plus loin sans que le PF lui ai demandé - Semble exclure Brème des options possibles	Le PF demande de rester à Brème
<b>Tail wind RWY27</b>	Réalise un LAPA RWY27 sur la demande du PF, mais pense que RWY09 est une meilleure option	Comprend que RWY27 est impossible avec le LAPA, comprend que c'est en lien avec le "Tail Wind"	Comprend qu'il ne peut pas atterrir RWY27, mais ne sais pas pourquoi, choisi/propose RWY09	Comprend qu'il ne peut pas atterrir RWY27 et cherche un autre aéroport OU Veut quand même atterrir RWY27
<b>Crosswind limitations</b>	Comprend que la limitation était déjà présente avec le N/W Steering, mais vérifie quand même dans l'OMB	Vérifie l'OMB	Comprend qu'il y a un problème mais ne sait pas où chercher la solution.	Pense qu'il n'y a pas de problème le message est un bug /n'a pas d'importance
<b>Check OM-B</b>		Trouve l'information et comprend son impact	Trouve l'information et ne comprend pas son impact OU Il est guidé pour trouver l'information mais comprend son impact	Ne trouve pas l'information (PF guide pour la trouver et la comprendre)
<b>Manual Landing</b>	Il sait qu'il va devoir atterrir	Il comprend le "Manual Roll-Out" et son lien avec le "N/W Steering" et/ le CW	Il comprend le "Manual Roll-Out" mais ne comprend pas son lien avec le "N/W Steering" et/ le CW	Pense que l'"Auto Roll Out" est possible
<b>Complicated landing</b>	Demande une assistance sans consulter le PF (Ex. : au moment de "Emergency")	Propose une préparation cabine ou le "Tow Truck" ou Fire Brigade	Approuve la préparation cabine ou "Tow Truck" ou Fire Brigade proposé par le PF	Pense que la préparation cabine ou le "Tow Truck" ou Fire Brigade sont inutile quand le PF propose
<b>Captain cannot land</b>	Fait le lien avec la panne et demande de prendre les commandes	Propose de prendre les commandes	Demande s'il doit prendre les commandes	PF lui dit de prendre les commandes

**FIGURE 33 – GRILLE D'ANALYSE FINALE APRÈS CONSOLIDATION ENTRE LES DEUX EXPERTS.**

Les couleurs correspondent respectivement – de gauche à droite – Blanc sans contour, Blanc avec contour noir, gris et noir.

La pertinence de la grille a été validée sur 3 exemples (3 pilotes différents) avec évolution de la grille après le premier essai. Le premier essai s'est fait avec une grille réalisée par un seul des évaluateurs, sans concertation ni explication de la grille. Le second essai a été réalisé sur une grille modifiée pour tenir compte des ambiguïtés identifiées lors du premier codage. Pour le troisième essai, la grille n'a pas été modifiée, mais les deux évaluateurs se sont accordés sur l'interprétation des catégories.

**TABLEAU 4 – ACCORD INTER JUGE CALCULE SUR LES DIFFÉRENTES GRILLES.**

	Essai 1	Essai 2 G. Finale	Essai 3 G. Finale	Essai 2+3	Essai 2+3 Corrigé <sup>5</sup>
Kappa avec pondération quadratique	0,2737	0,5806	0,6405	0,625	0,8301

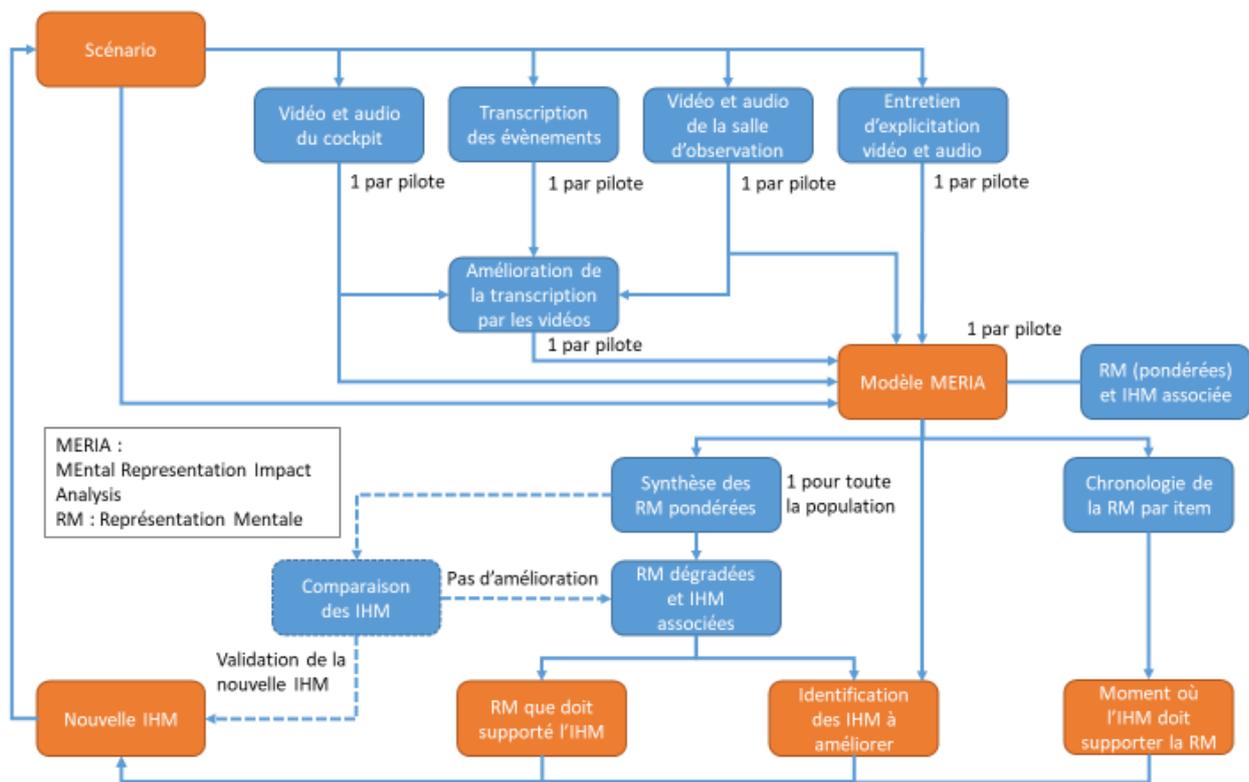
Un calcul du kappa de Cohen (Cohen, 1960) a été effectué pour chacun des essais en utilisant une pondération quadratique (Tableau 4). Nous avons obtenu un score de 0,27 au premier essai et de 0,58 au second. Un score de 0,83 a été obtenu entre les deux experts lors de la troisième pondération quadratique du kappa de Cohen. Ce score est considéré comme un accord "presque parfait" (Landis & Koch, 1977).

#### 6.4.2 Résumé du processus de traitement des données

La Figure 34 résume les différentes données collectées et leurs traitements dans la méthode MERIA. Cette représentation graphique permet d'illustrer les finalités envisagées pour ces données (« Moment où l'IHM doit supporter la RM », « Identification des IHM à améliorer », « RM que doit supporter l'IHM » et « Nouvelle IHM ») ainsi le modèle MERIA permet d'identifier directement l'influence des IHMs sur les représentations mentales.

---

<sup>5</sup> Avec correction de l'erreur d'interprétation de la grille sur l'essai 2 (d'après l'interprétation faite de la grille lors de l'essai 3).  
Théodore Letouzé



**FIGURE 34 – RÉSUMÉ DU PROCESSUS DE TRAITEMENT DES DONNÉES DANS MERIA**

Pour faciliter l'étude d'un panel de copilotes (10 dans notre cas), il nous a fallu créer un outil de synthèse (ex. : Tableau 5).

Le Tableau 5 montre les données synthétisées des RM pondérées pour l'expérience de Braunschweig. Les 10 copilotes qui ont participé à l'expérience sont classés selon leur ordre de passage. Ce type de représentation présente l'avantage de donner à voir en un coup d'œil les moments du scénario les plus problématiques, en identifiant les colonnes les plus orange/rouge, mais également les pilotes qui ont été le plus en difficulté (les lignes oranges/rouges). Ce type de synthèse permet ensuite d'identifier les interfaces à améliorer : c'est ce que nous ferons dans le Chapitre 7.

Cependant, cela ne permet pas a priori de faire des traitements plus précis. Pour ce faire, nous réalisons des conversions de ces couleurs, soit en modalités, soit en échelle numérique ordonnée afin de pouvoir effectuer des traitements statistiques. Cette étape sera décrite dans le Chapitre 9.

**TABLEAU 5 – SYNTHÈSE DES REPRÉSENTATIONS MENTALES DE COPILOTES DE L'EXPÉRIENCE DE BRAUNSCHWEIG (STEP 1).**

(Vert : l'activité réelle a dépassé l'activité prescrite (ou attendue) ; Bleu : l'activité réelle correspond à l'activité prescrite ; Orange : l'activité réelle a été inférieure à l'activité prescrite, sans être qualifiée de critique ; Rouge : l'activité réelle a été inférieure à l'activité prescrite et la situation est ou devient critique ; Gris : Absence de données)

Pilot	LowFuel	NoClimb	CloseEm	APoff	Failure	DiffLanding	LandBremen	TailWind	CWLimit	OMB	ManLand	Compland	CaptNoLand
Pilot_01	Bleu	Rouge	Orange	Bleu	Orange	Orange	Bleu	Bleu	Bleu	Rouge	Rouge	Vert	Rouge
Pilot_02	Vert	Bleu	Orange	Bleu	Orange	Orange	Bleu	Bleu	Orange	Orange	Orange	Orange	Bleu
Pilot_03	Rouge	Bleu	Rouge	Bleu	Orange	Vert	Rouge	Vert	Rouge	Rouge	Rouge	Bleu	Rouge
Pilot_04	Bleu	Rouge	Rouge	Bleu	Bleu	Orange	Rouge	Orange	Bleu	Bleu	Orange	Orange	Vert
Pilot_05	Bleu	Bleu	Rouge	Bleu	Bleu	Orange	Bleu	Orange	Rouge	Rouge	Rouge	Orange	Bleu
Pilot_06	Orange	Gris	Orange	Bleu	Bleu	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert	Bleu	Orange	Bleu
Pilot_07	Orange	Bleu	Orange	Bleu	Orange	Orange	Bleu	Bleu	Vert	Vert	Bleu	Orange	Orange
Pilot_08	Vert	Bleu	Orange	Bleu	Orange	Vert	Vert	Bleu	Bleu	Bleu	Orange	Bleu	Bleu
Pilot_09	Orange	Bleu	Orange	Bleu	Orange	Rouge	Bleu	Orange	Bleu	Rouge	Rouge	Orange	Rouge
Pilot_10	Vert	Bleu	Orange	Bleu	Bleu	Vert	Vert	Vert	Bleu	Rouge	Bleu	Bleu	Orange

### 6.4.3 Étude de cas : Co-pilote 8

#### 6.4.3.1 Justification du choix du co-pilote n°8

Le copilote n°8 est âgé de 28 ans, il a totalisé 2800 heures de vol dont 2600 h sur A320 et 650 h au cours des 12 derniers mois. Selon l'expert de référence, c'est un bon copilote, qui fait des erreurs isolées et identifiables. Lors de la simulation de vol, ce copilote a illustré plusieurs problèmes de RM que nous détaillons ci-dessous.

#### 6.4.3.2 Retour sur l'expérimentation avec le copilote 8.

Le Tableau 6 décrit l'expérience vécue par le copilote n°8 (Pour les autres pilotes voir Annexe 1 – Grilles MERIA Step 1). Il permet de comparer les événements et les représentations mentales prescrites, avec les événements réels et les représentations mentales.

En gras, sont indiqués les événements pour lesquels le copilote a compris la situation malgré une mauvaise perception des éléments de son environnement (= sorte de rattrapage de la situation grâce à la mobilisation d'un bon modèle mental identifié par d'autres indices de la situation et de son expérience).

En italique, sont notés des événements que le copilote a bien vu (= éléments de l'environnement suffisamment lisibles), mais le modèle mental sélectionné et appliqué par le sujet pour conduire les actions n'était pas adapté (= plusieurs hypothèses peuvent expliquer le fait que le copilote sélectionne un mauvais modèle mental : mauvaise compréhension / projection de la situation, ne dispose pas de ressources suffisantes pour accroître la compréhension de la situation, etc.)

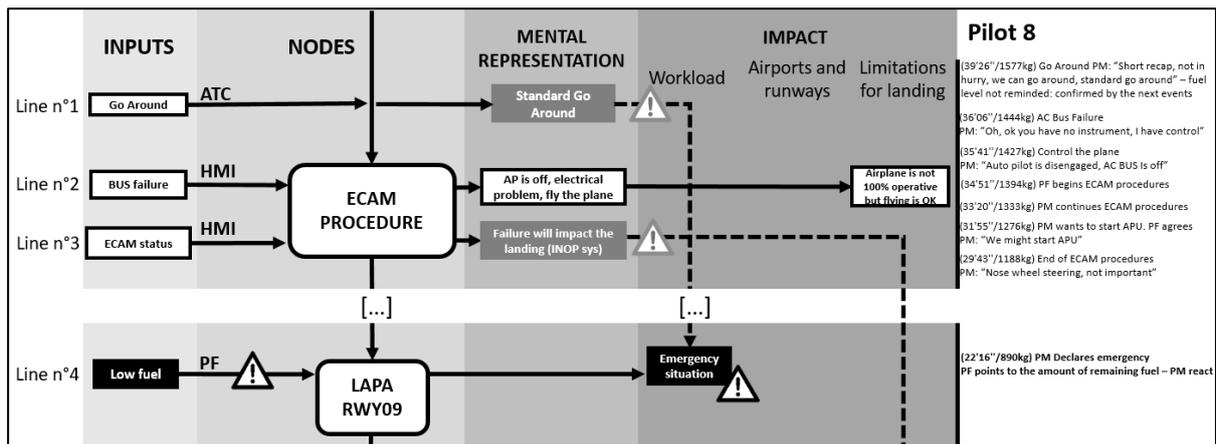
**TABLEAU 6 – RÉCIT RÉDUIT DE L'EXPÉRIENCE VÉCUE DU COPILOTE 8.**  
 (Gras : Mauvaise perception de l'INPUT mais bonne RM de la situation ; Italique :  
 Bonne perception mais mauvaise RM de la situation.)

Phases	<b>DURÉE DE LA PHASE (DURÉE PRESCRITE)</b>	<b>LES ÉVÉNEMENTS ET LA RM PRESCRITE</b>	<b>LES ÉVÉNEMENTS ET LA RM RÉELLE</b>
<b>Phase 1</b>	16 minutes (18 min)	L'avion est sur le point d'atterrir sur la piste 27. Il ne peut pas atterrir et doit faire demi-tour car il y a un véhicule sur la piste. Le copilote prend conscience de la quantité de carburant restante.	Idem
<b>Phase 2</b>	3 minutes (3 min)	L'avion commence à faire un virage pour tenter une autre approche sur la piste 27.  Le copilote se souvient que la quantité de carburant est proche de la limite légale.	Idem  <i>Le copilote ne se souvient pas que la quantité de carburant est proche de la limite légale.</i>
<b>Phase 3</b>	14 minutes (13 min)	Une panne se produit, le copilote comprend la situation et réagit en prenant le contrôle de l'avion.  Il comprend les conséquences de la panne électrique et ses raisons. Il déclare "URGENCE".  La météo change, l'avion ne peut plus atterrir sur la piste 27, le copilote demande la météo, calcule la possibilité d'atterrissage. Il comprend que les autres aéroports sont indisponibles/inaccessibles et	Idem  <i>Il n'évalue pas toutes les conséquences et les causes de la panne. <b>La météo change, l'avion ne peut plus atterrir sur la piste 27. Le copilote demande la météo ; il comprend que la seule option est d'atterrir sur la piste 09.</b> Il évalue la possibilité d'atterrir. Il n'envisage pas d'autres aéroports. Il déclare "URGENCE"</i>

		que la seule option est d'atterrir à Brême sur la piste 09.	uniquement parce que le commandant de bord le lui rappelle.
<b>Phase 4</b>	10 minutes (13 min)	<p>En raison de la panne et des conditions météorologiques, l'avion doit atterrir avec des capacités bien inférieures à la normale.</p> <p>Le copilote le comprend et consulte les manuels de bord pour connaître les limites, il comprend qu'il devra probablement faire l'atterrissage car il voit que le commandant de bord n'a pas de visibilité. L'atterrissage est effectué par le copilote.</p>	<p>Idem</p> <p><b>Le copilote ne consulte pas le manuel de bord et il en oublie certains éléments (systèmes inopérants), mais il connaît les limites et en déduit qu'il vaut mieux faire l'atterrissage. C'est ce qu'il propose au commandant de bord même s'il n'a pas vu que le commandant de bord n'a pas de visibilité.</b> L'atterrissage est effectué par le copilote.</p>

#### 6.4.3.3 Lecture du modèle basé sur le comportement du copilote n°8

La Figure 35 présente un « focus » descriptif sur la première partie du scénario du copilote n°8 (phases 2 et 3), en utilisant l'outil de modélisation MERIA (voir Figure 32). Elle met en évidence plusieurs erreurs et lacunes dans sa RM. Cet exemple nous permet d'expliquer la lecture de la Figure 32. C'est aussi cette lecture qui nous permet de construire le résumé de l'expérience (Tableau 6).



**FIGURE 35 – EXTRAIT DES PHASES 2 & 3 DU MODÈLE MERIA DU PILOTE 8.**

(Blanc sans contour : réel > prescrit ; Blanc avec contours noirs : réel = prescrit ; Gris : réel < prescrit, sans être critique ; Noir : réel << prescrit, état critique ; Les triangles permettent d'identifier rapidement les éléments qui nuisent à l'activité)

Dans l'exemple présenté en Figure 35, nous nous intéressons particulièrement à la phase 2 et au début de la phase 3 du scénario. La ligne 1 décrit le "GO AROUND" demandé au copilote. En lisant de gauche à droite, nous trouvons la demande exprimée par la tour de contrôle (ATC) d'effectuer une remise des gaz, ici représentée par le rectangle blanc aux contours noirs "GO AROUND". La flèche représentant l'impact de cet événement dans la représentation du copilote conduit au rectangle de RM "STANDARD GO AROUND" de même couleur. Le code de couleur gris attribué au rectangle signifie que le copilote n'a pas intégré toutes les implications (conséquences possibles) dans sa RM de la situation. Dans ce cas, le niveau de carburant particulièrement bas rend cette procédure plus critique qu'à l'habitude. Un verbatim placé dans la dernière colonne permet de justifier ce résultat. Le copilote annonce à son pilote : *"Récapitulons rapidement, nous ne sommes pas pressés, nous pouvons faire le tour, c'est un « go around » standard"*. Cette seule information ne justifie pas qu'il n'ait pas tenu compte du niveau de carburant, mais cela sera confirmé par les événements suivants. Cet élément de justification se trouve facilement en suivant la flèche noire (en pointillés, pour signifier un retard entre les deux rectangles) qui part du rectangle "STANDARD GO AROUND" vers le rectangle "EMERGENCY SITUATION".

Le rectangle "EMERGENCY SITUATION" en bas de la Figure 35 (ligne 4) est une conséquence indirecte du rectangle gris "STANDARD GO AROUND", mais aussi la conséquence directe du rappel du carburant restant représenté par le rectangle noir "LOW FUEL" à gauche du rectangle "LAPA RWY09". Ce rappel est fait par le commandant

de bord, comme on peut le voir avec la mention "Pilote Flying" (PF) au-dessus de la flèche partant du rectangle "LOW FUEL". On peut même noter que le commandant de bord montre du doigt au copilote les informations relatives au carburant à bord, comme indiqué dans la colonne de droite, mot à mot. Cet événement se produit pendant la phase de calcul des performances d'atterrissage pour la piste 09 comme mentionné dans la colonne "NODE" (comme indiqué par le rectangle "LAPA RWY09" entre les rectangles rouges "Low fuel" et "Emergency situation").

A la ligne 2 (Figure 35), on peut voir que l'IHM produit le message "BUS failure", pendant la phase "ECAM PROCEDURE". Grâce à cette indication, le copilote comprend qu'il y a un problème électrique, que le pilote automatique ne fonctionne plus, et que comme les écrans du commandant de bord s'éteignent, il devient le pilote aux commandes. Il prend alors les commandes manuellement (rectangle blanc : "AP is off, electric problem, fly the plane"). La conséquence de la panne est un avion qui ne fonctionne pas pleinement mais qui peut voler. Ces éléments sont tous compris conformément au scénario prescrit car les rectangles sont tous en blanc avec des contours noirs. Le copilote indique : *"Oh, ok vous (capitaine) n'avez pas d'instrument, je prends les commandes [j'ai les commandes]"* et *"le pilote automatique est déconnecté, le AC BUS est éteint"*, le AC BUS 1 est l'élément responsable de la panne.

En regardant la ligne 3, on voit que lorsque le copilote lit les systèmes inopérants sur le "ECAM Status" pendant la phase de "ECAM PROCEDURE", il n'identifie pas complètement tous les systèmes en panne, susceptibles d'impacter l'atterrissage, comme : la roue directionnelle devant l'avion, le « Reverse 1 » (inversement du flux secondaire du moteur gauche) et la fenêtre du commandant de bord qui n'a plus la fonction de dégivrage.

Nous constatons que grâce à sa rigueur descriptive et interprétative, l'outil de modélisation MERIA donne accès à l'activité cognitive du sujet et aux représentations mentales associées (voir Figure 32 pour l'ensemble de la modélisation du copilote 8). Les codes de couleur appliqués mettent bien en évidence les questions importantes ayant un impact sur l'évolution du scénario.

#### 6.4.3.4 La classification des erreurs

L'objectif de notre approche et des résultats obtenus est de mettre en évidence tous les problèmes (ou lacunes) liés aux représentations mentales, mais surtout de pouvoir en identifier l'origine. En effet, lorsque les sujets ont été interrogés, ils ont décrit les éléments qui ont conduit à la construction de leur RM, ce qui nous a permis d'établir un lien avec les éléments de l'IHM impliqués dans la construction des RM défaillantes. Le copilote peut avoir mal compris une information, mal interprété un élément de la situation ou avoir mal anticipé un événement. Il se peut également qu'il n'ait pas mobilisé le bon modèle mental pour analyser la situation.

À la suite d'une analyse détaillée de tous les copilotes étudiés, trois grandes catégories d'erreurs et une catégorie de succès sont apparues. Elles sont présentées dans le tableau 5 et ont été définies grâce à la combinaison de deux variables : "INPUT" (éléments perçus par les co-pilotes) et la "MENTAL REPRESENTATION".

**TABLEAU 7 – DÉFINITION DES CATÉGORIES D'ERREURS (C1, C2, C3) ET DE SUCCÈS (C4) - LE GRAS ET L'ITALIQUE CORRESPONDENT À LA CODIFICATION UTILISÉE EN TABLEAU 6 POUR L'IDENTIFICATION DES ERREURS-.**

	"INPUT" en gris ou noir	"INPUT" en blanc avec ou sans contour noir
"MENTAL REPRESENTATION" En gris ou en noir	C1 : Mauvaise perception et mauvais modèle mental	C3 : <i>Une bonne perception mais un mauvais modèle mental</i>
"MENTAL REPRESENTATION" En blanc avec ou sans contour noir	<b>C2 : Une mauvaise perception mais un bon modèle mental</b>	C4 : Bonne perception et bon modèle mental

Pour résumer, les erreurs commises par le copilote 8 sont énumérées dans le Tableau 8.

**TABLEAU 8 – ERREURS ET SUCCÈS OBSERVÉS CHEZ LE CO-PILOTE 8, RÉPARTIS SELON LES CATÉGORIES DÉFINIES AU TABLEAU 7.**

Catégories	C1	C2	C3	C4
Co-pilote # 8 (nombre d'items)	0	<b>2</b>	2	8
Distribution des erreurs de perception ou de RM	0%	<b>50%</b>	50%	

Contrairement aux résultats de la littérature sur la récupération des erreurs de conscience situationnelle (Jones & Endsley, 1996), nous n'observons pas une majorité d'erreurs associées à des défauts de perception (dans notre étude : 0% d'erreurs dues à une mauvaise perception). Jones et Endsley (1996) identifient 76,3% des erreurs liées à la perception (C1 + C2), 20,3% des erreurs liées à la compréhension - avec une bonne perception (C3, nous trouvons 50% de ce type dans notre étude), et enfin 3,4% liées à la planification (non traitées dans notre étude). Notre approche de la RM nous permet de mettre en évidence d'autres phénomènes liés aux fonctions cognitives permettant de nuancer les propos de Jones et Endsley. En effet, nous ne considérons pas la catégorie C2 comme une erreur puisque l'objectif de l'action est atteint, grâce à la mobilisation d'un modèle mental adapté. Pour Jones et Endsley, cette situation est interprétée comme une erreur de perception et donc une erreur dans l'absolu. Du Tableau 8, il faut retenir la place importante que représentent les erreurs de catégorie C3.

#### 6.4.3.5 Analyse synthétique de l'activité des 10 copilotes

En utilisant le codage utilisé pour le copilote n°8 dans le Tableau 8, nous avons effectué une étude plus synthétique des 10 copilotes afin de confirmer l'hypothèse suivante : la plupart des erreurs des copilotes proviennent d'erreurs de catégorie C3 ; c'est-à-dire d'erreurs de modèle mental (RM).

L'étude menée avec 10 co-pilotes est synthétisée (Tableau 9). Cela nous a permis de confirmer les hypothèses observées avec le co-pilote 8.

**TABLEAU 9 – COMPARAISON DES DIFFÉRENTES CATÉGORIES D'ERREURS (C1, C2, C3) ET DE SUCCÈS (C4) (EN %), OBSERVÉES CHEZ LES 10 COPILOTES DU PANEL.**

(C1 : Mauvaise perception et mauvais modèle mental, C2 : Une mauvaise perception mais un bon modèle mental, C3 : Une bonne perception mais un mauvais modèle mental, C4 : Bonne perception et bon modèle mental).

Co-Pilot	C1	C2	C3	C4
<b>Co-pilot 1</b>	28,6%	7,1%	<b>35,7%</b>	28,6%
<b>Co-pilot 2</b>	14,3%	14,3%	<b>28,6%</b>	42,9%
<b>Co-pilot 3</b>	35,7%	7,1%	28,6%	28,6%
<b>Co-pilot 4</b>	16,7%	8,3%	<b>33,3%</b>	41,7%
<b>Co-pilot 5</b>	25,0%	0,0%	<b>41,7%</b>	33,3%
<b>Co-pilot 6</b>	0,0%	0,0%	<b>16,7%</b>	83,3%
<b>Co-pilot 7</b>	28,6%	7,1%	14,3%	50,0%
<b>Co-pilot 8</b>	0,0%	16,7%	<b>16,7%</b>	66,7%
<b>Co-pilot 9</b>	30,8%	7,7%	23,1%	38,5%
<b>Co-pilot 10</b>	0,0%	15,4%	<b>15,4%</b>	69,2%

En effet, pour 7 des 10 copilotes (n°1, 2, 4, 5, 6, 8 et 10), les erreurs de RM apparaissent plus importantes que les erreurs de perception (en gras dans le tableau 7).

Le tableau 8 montre que les données recueillies au cours de nos expérimentations ne correspondent pas aux observations de Jones et Endsley (1996) issus de leur étude sur les causes des accidents en aéronautique. Il faut cependant noter que notre étude se rapporte à une situation critique où l'équipage fait tout pour éviter un accident, tandis que l'analyse effectuée par Jones et Endsley (1996) se rapporte à des accidents qui se sont effectivement produits. Cela explique probablement la présence d'une plus faible proportion de mauvaises perceptions dans notre étude.

**TABLEAU 10 – COMPARAISON ENTRE MR (LETOUZÉ ET AL., 2020) ET SA (JONES & ENDSLEY, 1996).**

Répartition des erreurs par catégorie d'après les résultats de Braunschweig et ceux de Jones et Endsley. (C1 : Mauvaise perception et mauvais modèle mental, C2 : Une mauvaise perception mais un bon modèle mental, C3 : Une bonne perception mais un mauvais modèle mental)

Catégorie d'erreur	C1	C2	C3
Répartition des erreurs (Perception et RM) Selon Endsley (1996)	35,8%	16,4%	47,8%
	52,2%		
	76,3%		20,3%

MERIA met également en avant un phénomène qui ne peut être expliqué par le modèle d'Endsley SA : celui de "Bonne RM, mais mauvaise perception" - C2. En effet, le mécanisme de linéarité du modèle Endsley ne laisse pas la possibilité d'une SA de niveau 1 non satisfaisante et d'une SA de niveau 2 efficace. Une SA de niveau 2 implique nécessairement une SA de niveau 1 : selon le modèle d'Endsley, les SA de niveaux supérieurs englobent celles de niveaux inférieurs. C'est-à-dire qu'une bonne compréhension malgré une mauvaise perception est identifiée comme un défaut dans le processus cognitif. Ainsi, Jones et Endsley (1996) reconnaissent que 16,4% des erreurs sont en fait des succès parce qu'elles génèrent une bonne RM, laissant au pilote le contrôle de sa situation.

Ces résultats montrent qu'une mauvaise RM est une cause importante des erreurs et a donc des implications sur les processus de prise de décision. En identifiant ces erreurs de RM et les IHM qui y sont associées, il est donc possible de proposer, de modifier ou d'améliorer les interfaces afin qu'elles génèrent de nouvelles représentations mentales, adaptées aux besoins de l'opérateur. Dans notre étude de cas, nous estimons que près de la moitié des erreurs pourrait être résolue en améliorant l'IHM.

## 6.5 Discussion

Dans les domaines comme l'aéronautique, la recherche de la performance et de la réduction de l'erreur humaine est le dernier levier susceptible d'améliorer sensiblement la sécurité (OACI 2013). C'est dans cette perspective que la méthodologie MERIA a été développée, afin de concevoir des interfaces permettant aux opérateurs d'être plus résilients. Cette résilience nécessite une parfaite compréhension de l'environnement.

C'est l'objectif recherché dans le développement et l'application de notre méthode. En premier lieu, nous allons aborder les apports des résultats de notre étude, puis nous nous intéresserons à ses limites.

À travers l'analyse des résultats obtenus sur le panel de 10 copilotes, nous observons que la perception ne semble pas être le principal facteur impliqué dans la mauvaise compréhension d'une situation ou dans une prise de décision erronée. D'après le Tableau 10, dans 83,6% (C1 : 35,8% + C3 : 47,8%) des cas d'erreurs, l'opérateur a une mauvaise RM. Dans 42,8% des cas de mauvaise RM ( $C1/(C1+C3)$ ), la perception est la cause de la génération d'une mauvaise RM. Dans 52% (C1 : 35,8% + C2 : 16,4%) des cas d'erreurs, l'opérateur a une mauvaise perception. Mais dans 32% des cas de mauvaise perception ( $C2/(C1+C2)$ ), l'opérateur parvient à reconstruire une bonne RM grâce au commandant de bord, à son expérience ou au contexte. L'application de notre méthode associée à l'analyse des entretiens nous permet d'identifier les cas où le copilote n'a pas réussi à assimiler les données perçues, notamment lorsque celles-ci ne correspondaient pas à ce qu'il "attendait" en termes de format de données (ex. : kg pour le fuel alors que le pilote réfléchit en temps ou distances). Ainsi, les défauts de RM résultent d'un décalage entre la RM associée aux données / informations et le format sous lequel elles sont transmises par l'interface.

L'approche MERIA permet d'interroger la RM des opérateurs, d'identifier les écarts entre la RM observée et la RM prescrite, mais aussi les écarts entre l'image mentale attendue par l'opérateur et celle produite par l'IHM.

La méthode MERIA offre une vision complète des différents points de vue de l'activité, en particulier pour un opérateur dans un environnement dynamique complexe. Elle donne accès à la séquence chronologique de l'évolution de la RM de l'opérateur. Ainsi, il est possible d'en déceler les lacunes et d'identifier les sources responsables (souvent en termes d'IHM). C'est pourquoi notre méthode est particulièrement bien adaptée aux besoins de prototypage rapide pour de nouvelles interfaces.

Précisons que cet outil est destiné aux experts du domaine, tant pour la lecture des résultats d'analyses que pour leur application. Il est synthétique et utilise un vocabulaire très technique. La lisibilité n'est donc accessible que pour un expert du domaine. La

vulgarisation des termes utilisés dans le modèle le rendrait évidemment plus accessible aux non-experts, mais cela compliquerait la modélisation et surtout réduirait son caractère synthétique.

Il faut noter que le « coût » de l'application de cette méthode est non négligeable, même pour un expert. La création du scénario nécessite la participation d'experts du domaine et d'expérimentateurs. Mais la véritable complexité de la méthode vient de l'aspect « chronophage » des observations, des entretiens et de leur traitement, d'autant plus que l'analyse nécessite l'implication de deux experts en facteur humain.

Les différences observées entre nos résultats et ceux présentés par Jones et Endsley (1996), peuvent soulever des interrogations sur notre classification des erreurs et le choix de classer certains éléments comme "correctement perçus" bien qu'ils génèrent une mauvaise RM. Néanmoins, nous pouvons soutenir que la perception de l'élément est correcte grâce à la mobilisation d'indices obtenus par la verbalisation au cours de l'action ou lors des entretiens en auto-confrontation des opérateurs. De plus, la méthode de classification des erreurs a été stabilisée par un double encodage effectué par deux experts ayant participé à l'expérimentation, puis aux entretiens. Cela rend les catégories d'erreur/succès plus fiables et atteste que la codification est représentative de l'activité réelle. Notre modèle illustre bien le paradoxe de bonne perception et de mauvaise RM. La boucle de perception du modèle fonctionne parfaitement dans ce cas, mais c'est la boucle de compréhension/apprentissage qui fait défaut. C'est le dialogue entre le MLT et le buffer épisodique qui n'a pas permis de récupérer les bons modèles mentaux, soit car ils n'existaient pas (jamais rencontrés / appris) soit que les indices de récupération n'étaient pas suffisants.

Notre évaluation de la RM peut être controversée en raison de la difficulté à observer un processus cognitif interne imperceptible. Notre identification de la RM est basée sur des marqueurs externes qui sont des conséquences de cette RM. Au cours de nos travaux de recherche, nous nous sommes concentrés sur l'interprétation de ces marqueurs via une analyse conduite simultanément par deux experts, puis en comparant les arguments des experts afin de déterminer dans chaque cas si un marqueur était représentatif d'un

processus de RM. Ce processus d'identification des marqueurs est similaire dans sa méthode à celui de la classification des erreurs.

Notre méthode enrichit également les outils plus traditionnels d'évaluation de la SA, puisqu'elle met en évidence les cas de RM "suffisants" par rapport à la situation, malgré une perception erronée de l'environnement. Cela peut être fait en comparant les prescriptions avec les observations.

## 6.6 Conclusion

Notre recherche vise à définir une méthode d'analyse des interfaces via l'étude des phénomènes cognitifs associés à la RM. Dans ce travail, nous détaillons le processus d'application de la méthode développée et nous l'illustrons par des exemples démontrant son intérêt. Notre objectif est de permettre son application à d'autres domaines tels que l'automobile, le ferroviaire ou le nucléaire. En effet, dans ces domaines, elle permettra d'aborder les deux problématiques pour lesquelles elle a été développée :

- Premièrement, l'évaluation d'une RM afin de définir et concevoir des IHM d'une manière plus efficace que les méthodes existantes. Il s'agit de changer les paradigmes de représentation de l'information afin de la rendre cohérente avec les images mentales auxquelles les opérateurs l'associent.
- Deuxièmement, aborder les problèmes de l'amélioration progressive des IHM. La méthode MERIA peut permettre de comparer une RM générée par deux types d'interfaces différentes afin de définir celle qui est la plus proche de l'image mentale de l'opérateur et donc de déterminer si une modification / évolution de l'IHM est pertinente.

Grace à cette méthode, nous fournissons un outil pour évaluer les IHM en identifiant les écarts entre les RM attendues et celles réellement générées par l'interface. La méthode permet également de proposer de nouvelles IHM qui génèrent des images mentales attendues par les opérateurs.

# CHAPITRE 7 PROPOSITION DE MODIFICATIONS D'INTERFACES POUR L'AMÉLIORATION DE LA REPRÉSENTATION MENTALE

Dans ce chapitre, nous décrivons la méthode que nous avons employée pour produire de nouvelles interfaces dans le but d'améliorer la RM des opérateurs. Nous décrivons également les différentes interfaces qui ont été implémentées. Ces interfaces seront utilisées pour les expériences menées à Bordeaux (Step2 et Step3).

Avant d'aller plus loin, il convient de mettre en regard les besoins expérimentaux face aux limites et contraintes techniques. C'est l'objet de la première partie. Nous décrivons ensuite la méthode de production des concepts de nouvelles interfaces. Nous terminerons par la description détaillée des interfaces qui ont été développées.

## 7.1 Limites et contraintes

Notre cas d'application est d'analyser les représentations mentales générées par le cockpit d'un A320 *legacy* et de proposer des améliorations d'interfaces, de les implémenter et de comparer la représentation et performance entre les deux systèmes (*legacy* vs amélioré).

Nous avons une base de travail très représentative de la réalité. En effet, le simulateur A320 *legacy* que nous avons utilisé est un simulateur *full flight*, c'est-à-dire un simulateur qui est certifié strictement identique à un avion réel. Un vol dans ce simulateur est équivalent à un vol réel. Le simulateur possède un numéro d'immatriculation comme un avion réel. Les ordinateurs de bord, l'électronique, les interfaces sont celles d'un avion, ce qui nous permet d'analyser les représentations mentales des opérateurs comme si nous étions dans un vrai avion. Cependant, ce simulateur étant certifié au sens aéronautique du terme, il n'est pas envisageable de modifier le simulateur de quelque manière que ce soit.

Il nous fallait donc trouver une manière de réaliser une comparaison valable entre les interfaces *legacy* et les interfaces améliorées que nous proposons. Deux solutions s'offraient à nous :

1. Soit, nous comparions les représentations mentales des opérateurs sur A320 *legacy* à celle d'opérateurs réalisant le même scénario sur un simulateur suffisamment réaliste avec les modifications d'interfaces que nous proposons. Cette solution demande d'avoir un simulateur de vols extrêmement réaliste, tant en termes d'interface que de comportement aérodynamique de la simulation et en logique de fonctionnement interne (pannes, logique de fonctionnement...). Cet aspect logistique de l'expérimentation reposait sur un partenaire qui s'est avéré dans l'impossibilité de produire ce type de simulateur.
2. Soit, nous réalisons une nouvelle expérimentation sur un simulateur moins réaliste mais partiellement semblable aux modalités de fonctionnement d'un A320 : reprenant les codes, les logiques et les fonctionnalités afin de disposer d'une simulation de référence sur un simulateur « modifiable » avec lequel nous pourrions implémenter nos interfaces et réaliser une nouvelle série d'expérimentation.

C'est cette deuxième solution qui a été choisie. Seule cette solution était envisageable pour réaliser une étude rigoureuse avec les contraintes techniques qui étaient les nôtres.

## 7.2 La conception des interfaces

### 7.2.1 Identification des interfaces problématiques

Sur la base des résultats issus du premier panel de copilotes (Step1, Figure 25), nous observons que la constitution de la RM est différente d'un sujet à l'autre. Cependant, certains invariants liés à l'apparition d'une RM erronée permettent d'en attribuer la responsabilité à la mise en jeu d'une interface ou d'un élément d'interface précisément déterminée dans l'espace et dans le temps.

Pour proposer des solutions d'amélioration qui répondent à ces problématiques, nous avons mobilisé des méthodes d'idéation et de création collaboratives. Nous avons imaginé de nouvelles interfaces qui, selon nous, répondent aux problèmes de représentation identifiés précédemment. Nous avons validé la pertinence de ces interfaces avec des experts dans la formation de pilotes de ligne. Ces interfaces ont été implémentées et testées sur deux panels de pilotes avec des modalités différentes (Step2 et Step3, Figure 25).

La phase d'identification a commencé pendant les observations et entretien d'auto-confrontation. Lors des expérimentations, l'expert en formation identifie les écarts éventuels avec le prescrit et il les signale. À partir de ces signalements, nous pouvons identifier les phases / étapes sur lesquelles nous devons être particulièrement attentifs pendant les entretiens d'auto-confrontation.

Pendant les entretiens, nous identifions les éléments informatifs de l'environnement qui ne sont pas en accord avec la manière dont l'information a été enregistrée. L'exemple le plus parlant est celui de la quantité de carburant restant : l'interface donne une information en kilogramme, or lors de la restitution, tous les pilotes l'énoncent en termes de temps de vol résiduel. Par la suite, certains vont évoquer la quantité.

De même, la panne AC 1 BUS est restituée par les pilotes comme une panne électrique, mais elle correspond à bien d'autres conséquences éloignées de l'alimentation électrique à proprement parler, ce dont ils n'ont apparemment pas conscience, même a posteriori (dysfonctionnement moteur, problème de directions, problème de dégivrage, limitation réglementaires...).

Pour résumer, nous avons pu identifier les interfaces à l'origine de mauvaises représentations mentales chez nos opérateurs. Elles sont liées à :

- La représentation du carburant, la quantité, le temps de vol possible associé, mais également la représentation spatiale de ce temps en distance (numérique), et sur une carte.
- L'explication de la panne, sans nom, mais également les systèmes non fonctionnels afférents et les limitations pour l'appareil, les moyens disponibles pour résoudre la panne, la priorisation des conséquences en termes de criticité.
- Le changement de météo, son impact sur les possibilités d'atterrissage, sur l'état du sol.

### 7.2.2 Méthode d'idéation

Nous avons décomposé la méthode de conception de nouvelles interfaces en trois phases, 1 – identifier les différents types d'interfaces dans d'autres domaines qui répondent à nos problèmes, 2 – confronter ces idées d'interfaces avec un groupe d'expert,

3 – confronter les concepts d’interfaces retenus à des pilotes et aux équipes de développement pour la faisabilité technique.

#### 7.2.2.1 La recherche de concepts

Pour chaque problématique identifiée, nous avons analysé ce que chaque constructeur proposait dans le domaine de l’aéronautique, que ce soit dans le cadre de l’aviation commerciale, d’affaire ou de loisir (les deux derniers avec des contraintes de certifications moins strictes donc plus ouvertes en termes de possibilités).

L’étude des différentes solutions proposées par les équipementiers auxquels nous avons eu accès montre des choix d’interfaces et de présentation de l’information relativement variés. Le Tableau 11, présente les représentations graphiques de plusieurs éléments d’interface que nous identifions comme générant de mauvaise RM.

Les fabricants des matériels sont portés en colonnes, les données présentées par les interfaces sont regroupées en 4 principaux ensembles : carburant, météo, pannes, environnement (Relief).

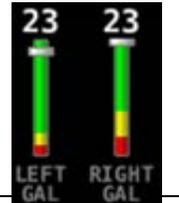
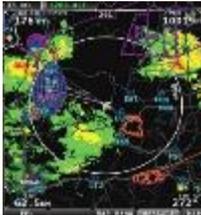
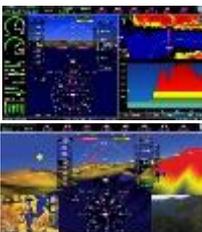
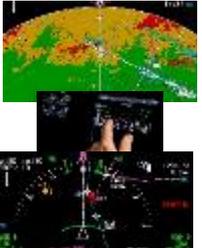
En premier lieu sont identifiées les interfaces dédiées à la présentation du carburant restant à bord, nous observons plusieurs types de gauges, indiquant de manière qualitative (avec des couleurs) la criticité de l’information. Ce type de codification est aussi utilisée pour les pannes. La répartition spatiale du carburant dans les différents réservoirs est aussi représentée.

En ce qui concerne la météo, plusieurs représentations cartographiques sont proposées. Elle se différencie de celle d’un A320 par la résolution graphique ou la superposition de plusieurs fonds de carte (relief, point d’intérêt, ...).

En ce qui concerne les pannes nous n’avons pas identifié de solutions innovantes ou radicalement différentes chez les équipementiers.

Enfin, la représentation du relief se fait en mode cartographie, vue du dessus, mais également en coupe (avec le profil de descente/monté) et en 3D avec une vision simplifiée du relief réel (SVS – Synthic View System).

**TABEAU 11 – INVENTAIRES DES INTERFACES CHEZ DIFFÉRENTS ÉQUIPEMENTIERS RÉPONDANT À NOS PROBLÉMATIQUES**

	Honeywell	Garmin	Rockwell-Collins	JP instruments	Dynon Avionics	Genesis Aerosystems	TL Elektronik	Avionique EASy (Dassault/Honeywell)	
Carburants									
Météo									
Pannes									
Environnement (relief)									

Parmi ceux-ci, nous retiendrons particulièrement deux interfaces : Easy de Dassault / Honeywell, et Rockwell-Collins.

Celle de l'avionique EASy (Figure 36) propose comme interface de contrôle une vision graphique simplifiée du fonctionnement interne de l'appareil. Cette interface est similaire à celle d'un A320 sur certains points, mais la possibilité d'effectuer directement des actions sur l'interface tactile facilite la compréhension du système. On y retrouve également une autre solution intéressante : la *check list* dynamique. Il est possible de compléter une *check list* en cochant les items directement sur l'interface.

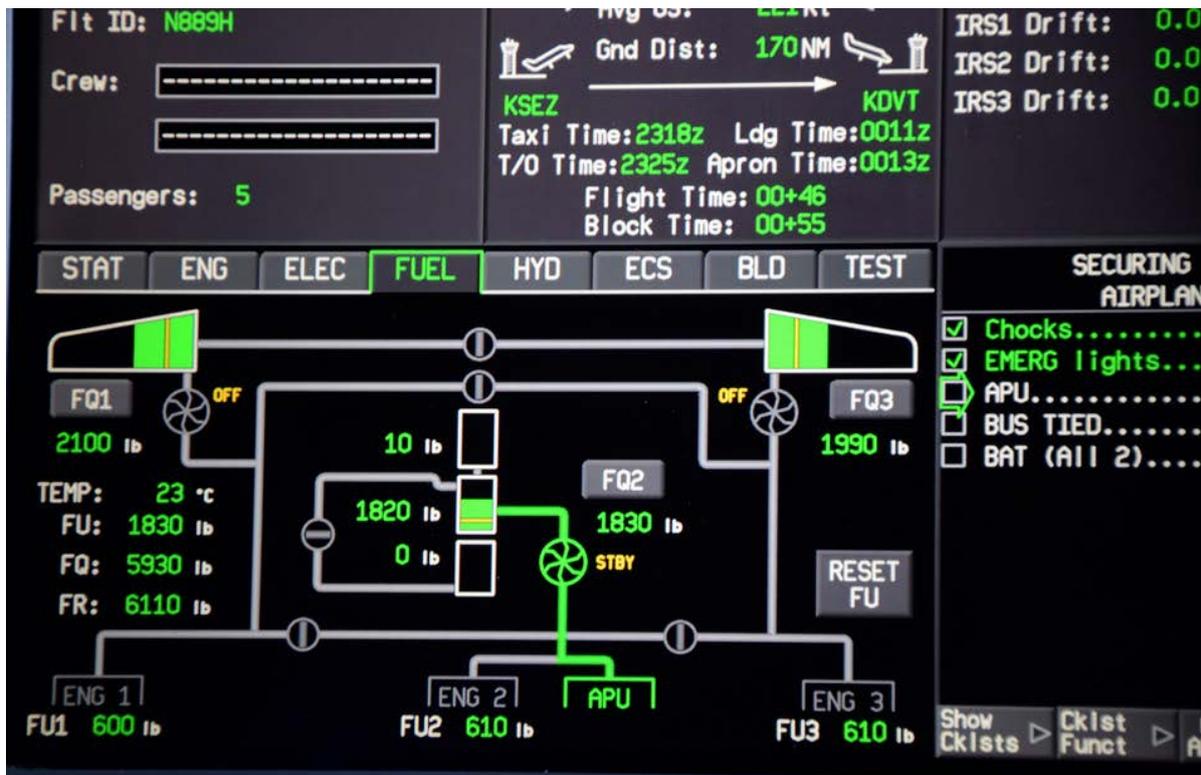


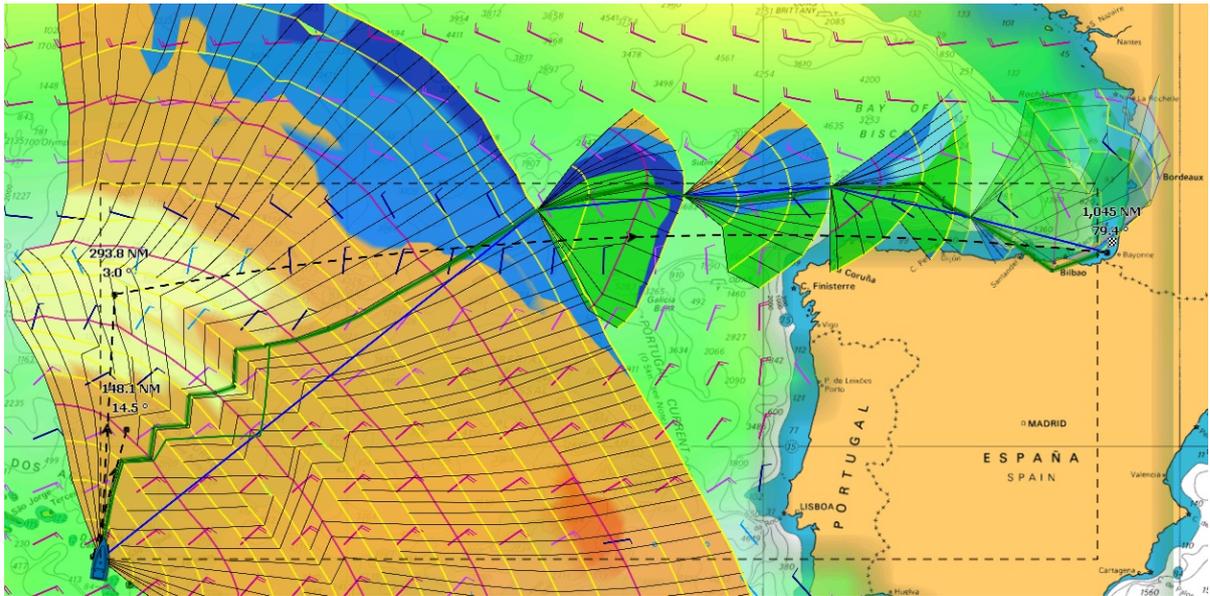
FIGURE 36 – INTERFACE AVIONIQUE EASY DÉVELOPPÉE PAR DASSAULT ET HONEYWELL.

Celle de Rockwell-Collins (Figure 37) propose d'interagir directement avec l'interface (cartographie) pour avoir plus de détails sur des éléments de l'environnement : le sens des pistes, leurs disponibilités, les limitations, la météo à tel ou tel point, etc. Dans un A320 *legacy*, ces éléments ne sont pas tous disponibles, et pour ceux qui le sont, ce n'est que par l'intermédiaire de l'ordinateur de bord et une interaction via clavier/sélection de ligne (par des flèches suivant/précédant).



**FIGURE 37 – INTERFACE DE ROCKWELL-COLLINS AVEC UNE INTERACTION DIRECTE AVEC LA CARTOGRAPHIE.**

Au-delà de l'analyse des solutions de ces équipementiers aéronautiques, nous avons également étudié ce que l'on pouvait trouver en navigation maritime. Citons un exemple particulièrement intéressant : celui de la planification de trajet en fonction des courants et des vents, comme on peut le voir sur la Figure 38. Ici, le trajet en bleu représente une ligne droite entre les points de passage, en vert le trajet le plus court en temps pour y arriver. Il est intéressant de noter que grâce à cette solution, le navigateur peut d'une part comprendre ce que l'automate a pris comme consigne (ligne bleue), et d'autre part accéder à l'explication de la recommandation de l'automate (ligne verte), au travers de la carte des vents et des courants en surimpression.



**FIGURE 38 – REPRÉSENTATION D’UN TRAJET OPTIMISÉ EN FONCTION DU VENT ET DES COURANTS.**

#### 7.2.2.2 La confrontation des idées à l’expertise métier

Lors de réunions du consortium FSS, nous avons pu organiser des ateliers d’idéation pour réfléchir aux différentes problématiques issues de notre analyse. Nous nous sommes appuyés sur les images et concepts trouvés lors de nos recherches de benchmark afin de produire des recommandations pour la conception de nouvelles interfaces.

La première étape a consisté à décrire les problèmes rencontrés, à les regrouper et à présenter leurs fréquences d’apparition (Tableau 12). La fréquence est représentée par un pourcentage correspondant au nombre d’erreurs provenant de telle ou telle interface, par rapport au nombre total d’incidents.

**TABLEAU 12 – DIFFÉRENTES AIDES À APPORTER AU COPILOTE SELON LES PHASES DU SCENARIO D'APRÈS LES EXPÉRIMENTATIONS STEP1.**

Ce tableau est en relation avec les hypothèses que nous avons formulées. (Le dégradé de couleur met en avant les fréquences les plus élevées en rouge)

Phases du scénario	Aide associé à chaque incident	Fréquence
LAPA RWY27	Avertissement sur le niveau de carburant	16%
Climb4000	Retour d'information : actions réalisées	4%
GO Around (Critical fuel)	Projection du champ d'action en vol par rapport aux besoins d'atterrissage	18%
ECAM PROCEDURE	Combiner les défaillances pour expliquer les conséquences et les garder à l'esprit	13%
CONSIDER NEW AIRPORT (FUEL)	Projection du champ d'action en vol (carburant + vent + vitesse) par rapport aux besoins pour l'atterrissage	9%
RWY SHIFT (WIND)	Combiner la météo avec les besoins pour atterrir et expliquer les options	13%
LAPA RWY09 (Warning)	Combiner l'état de l'avion avec la nécessité d'atterrir et expliquer les limites	7%
OMB (Knowledge about landing limitations)	Combiner les défaillances pour expliquer les conséquences et les garder à l'esprit	13%
QRH (Awareness about PF visibility = 1)	Expliquer ce qu'il faut faire pour suivre les procédures	5%
LANDING	Combiner les défaillances et l'état de l'avion pour expliquer qui doit garder le contrôle à chaque instant.	4%
	<b>Total incidents</b>	<b>100%</b>

Les résultats recueillis sont présentés dans le Tableau 13.

**TABLEAU 13 – PROPOSITION DES SOLUTIONS POUR LES DIFFÉRENTES PHASES, ISSU DE L’AVIS DE DEUX EXPERTS DU CONSORTIUM QUESTIONNÉS AVANT LA RÉUNION D’IDÉATION.**

Phases du scénario	Expert 1	Expert 2
LAPA RWY27	Représentation graphique des niveaux des réservoirs de carburant ou carte de la projection de la trajectoire avec les problèmes de carburant	Carburant en temps (avec configuration actuelle + vitesse)
Climb4000	Journal des dernières actions effectuées	Rien de mieux (augmente la charge de travail)
GO Around (Critical fuel)	Projection de parcours en 3D	Carburant en temps
ECAM PROCEDURE	Résumé de l'état de l'avion ; visualisation aux rayons X des composants de l'avion et de son état	Résumé de l'ECAM (en fonction de la gravité de la situation) Résumé des données en cas d'anomalie
CONSIDER NEW AIRPORT (FUEL)	Carte ou liste des aéroports disponibles en fonction des défaillances	Vent arrière et vent de travers (références avions) Auto. Mise à jour de la météo et de l'état des pistes
RWY SHIFT (WIND)	Projection de parcours en 3D Montrer la trajectoire d'atterrissage et ses changements en tenant compte du vent	Vent arrière et vent de travers (références avions) Auto. Mise à jour de la météo
LAPA RWY09 (Warning)	Projection de parcours en 3D Montrer la trajectoire d'atterrissage et ses changements en tenant compte des défaillances	Normaliser l'EFB Le rendre plus intuitif
OMB (Knowledge about landing limitations)	Diagramme des défaillances, de leur détérioration potentielle et des risques qui en découlent. Chronologie des événements attendus.	Formation Des indications supplémentaires pourraient peut-être aider.
QRH (Awareness about PF visibility = 1)	Chronologie des règles à suivre à chaque instant. Pour suivre la procédure.	Des indications supplémentaires pourraient peut-être aider.
LANDING	Chronologie des règles à suivre à chaque instant. Pour être en sécurité.	Les informations peuvent ou non être prises en compte selon la situation.

Au cours de la séance de travail nous avons convergé vers une description sommaire des interfaces à implémenter et une classification de ces « aides » selon 4 modalités déterminées en fonction du pourcentage de situations problématiques qu'elles aidaient à résoudre (Retour d'information enrichi : 12%, Données fusionnées et interprétation pour la résolution des problèmes : 23%, Aide à la représentation spatiale pour une

compréhension instantanée des contraintes spatiales : 29%, Aide chronologique pour une compréhension instantanée des contraintes temporelles : 36%). Les propositions et la classification est détaillée dans le Tableau 14.

**TABLEAU 14 – CLASSIFICATION DES AIDES ET RÉSULTAT DE LA RÉUNION DE TRAVAIL PAR PHASES**

Phases du scénario	Classification des aides	Résultat de la réunion de travail
LAPA RWY27	Aide à la représentation spatiale Aide à la représentation chronologique Retour d'information enrichi	Il reste du temps pour se dérouter Le carburant en temps Prévision des distances
Climb4000	Retour d'information enrichi Aide à la représentation spatiale	Conscient de l'ascension et non de l'action --> pourrait être intéressant dans le scénario Mais en fait, l'ATC sait que si l'avion ne monte pas. => en accord avec la majorité : Ne rien faire
GO Around (Critical fuel)	Aide à la représentation spatiale Aide à la représentation chronologique	Frederik Example (Risk by Phases)
ECAM PROCEDURE	Données fusionnées et interprétation	Mieux vaut montrer l'impossible que le possible Philosophie : Diriger par objectif => mon objectif est interrompu, qu'est-ce qui a interrompu mon objectif, et comment atteindre mon objectif Lien entre défaillances et conséquences (visuellement) Montrer ce qui est le plus critique La spatialisation de la défaillance sur l'avion est inutile
CONSIDER NEW AIRPORT (FUEL)	Aide à la représentation spatiale Aide à la représentation chronologique	Ce qui est possible et ce qui réduit les possibilités Quel aéroport est disponible (ou non) et pourquoi ; indiquer lequel est considéré comme le meilleur choix ou <b>Afficher uniquement l'aéroport disponible ?</b> <b>Actuellement, ils ont déjà la météo 1h avant. Et ont déjà préparé 2 aéroports de diversion.</b>
RWY SHIFT (WIND)	Aide à la représentation chronologique	Indiquer si un changement de vent est prévu et quand le vent change
LAPA RWY09 (Warning)	Données fusionnées et interprétation	Mieux vaut montrer ce qui est impossible que ce qui est possible

		Philosophie : Diriger par objectif => mon objectif est interrompu, qu'est-ce qui a interrompu mon objectif, et comment atteindre mon objectif
OMB (Knowledge about landing limitations)	Données fusionnées et interprétation	Intégré dans l'IHM
QRH (Awareness about PF visibility = 1)	Données fusionnées et interprétation	Intégré dans l'IHM
LANDING	Aide à la représentation chronologique	Mieux vaut montrer l'impossible que le possible Philosophie : Diriger par objectif => mon objectif est interrompu, qu'est-ce qui a interrompu mon objectif et comment l'atteindre quand même.

Ces spécifications sont par la suite déclinées en interfaces.

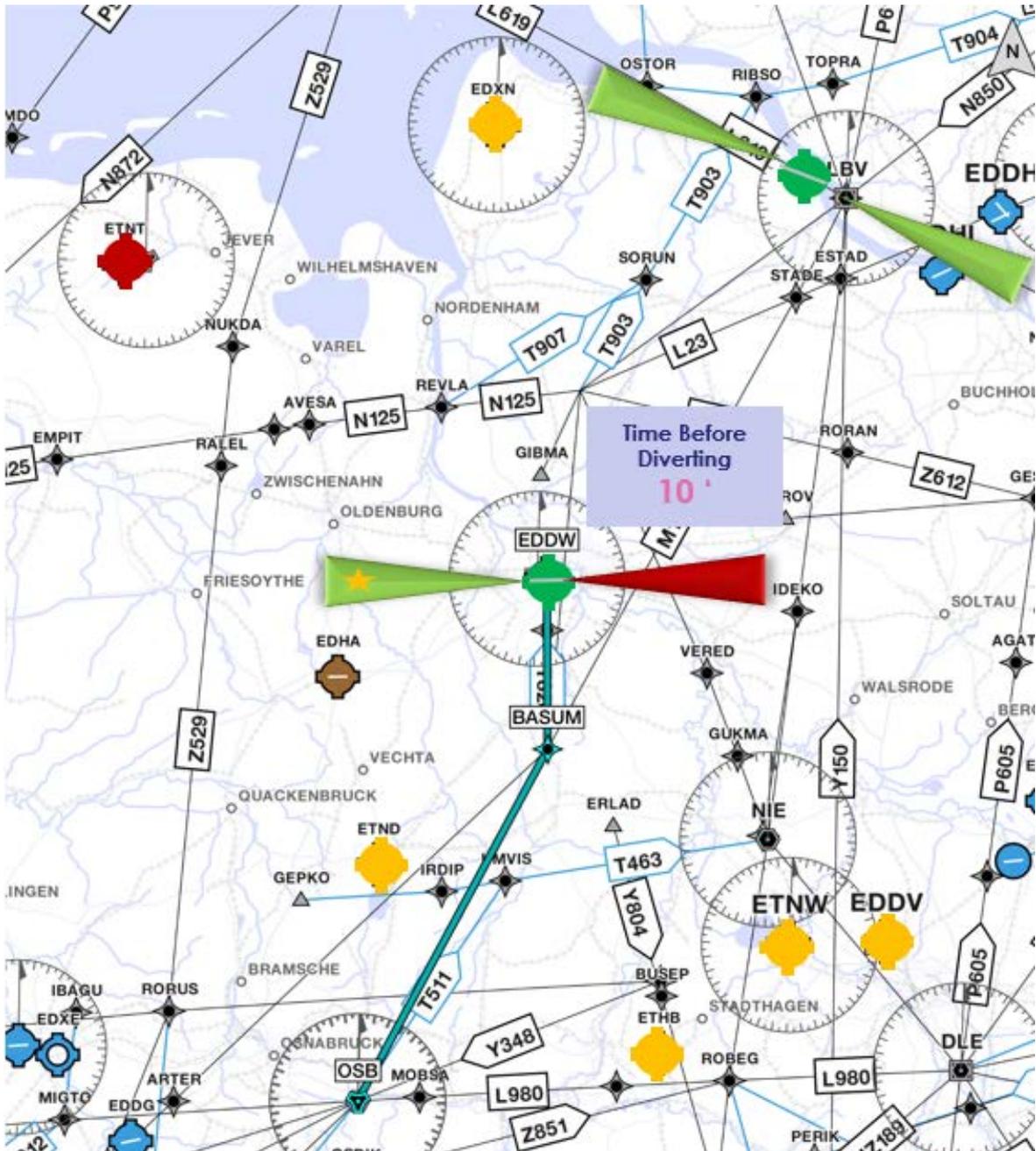
### 7.2.3 L'implémentation et l'interprétation

Les idées produites par ces ateliers de travail ont ensuite été interprétées avec l'industriel en termes de solutions techniques et des interfaces ont été produites. Nous avons pu les présenter à des pilotes pour valider leur intelligibilité a priori.

Sur cette base, l'industriel a ainsi pu élaborer deux concepts (étape à laquelle nous avons pu apporter notre contribution) pour résoudre les problèmes de représentation spatiale des contraintes :

- Une représentation des pistes selon les capacités de l'avion et la météo,
- Une représentation des aéroports accessibles en fonction du carburant restant.

Les pistes sont représentées à proximité des aéroports sous forme de cônes (Figure 39). Les aéroports principaux (celui de destination et ceux éventuels de détournement) sont présentés en vert quand ils sont accessibles - seules les pistes de ces derniers sont affichées avec une codification pour indiquer celles où il est possible d'atterrir (vert), celles où il est impossible d'atterrir (rouge) et celle qui est recommandée (vert avec une étoile). Les autres aéroports possibles mais non prévus dans le plan de vol figurent en jaune. Les aéroports où il n'est pas possible d'atterrir sont en rouge.



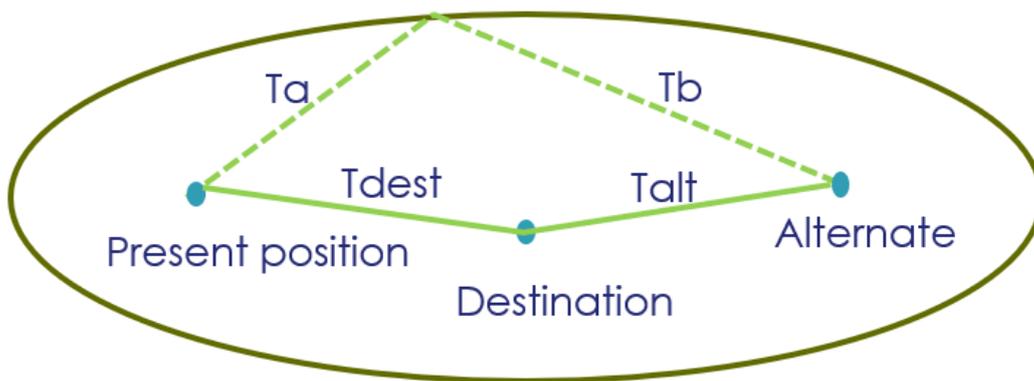
**FIGURE 39 – CONCEPT DE REPRÉSENTATION DES PISTES ET AÉROPORTS**

(Les cercles vert correspondent aux aéroports disponibles, les cercles jaunes et rouges correspondent aux aéroports indisponibles, le fond de carte correspond à des routes aériennes, les triangles représentent les pistes et leurs disponibilité – vert – ou indisponibilité – rouge)

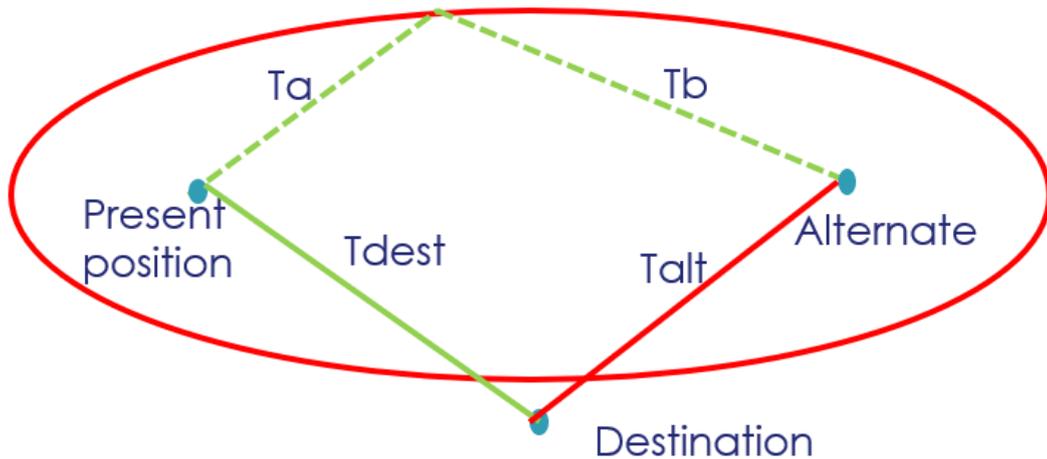
Pour représenter le champs des possibles en termes d'autonomie (carburant), le premier élément est de tracer un cercle autour de l'appareil, qui délimite la zone atteignable. Cette solution permet intuitivement de disposer d'une information facilement interprétable.

Une autre solution a été imaginée pour répondre à la problématique suivante : jusqu'à quand je peux hésité avant de choisir d'aller vers l'aéroport de détournement ?

Afin de répondre à cette problématique, nous proposons une représentation sous forme d'ellipse. Les Figure 40 et Figure 41 représentent les deux situations envisageables : soit l'aéroport de destination est dans l'ellipse et l'aéroport de détournement est accessible ; soit l'aéroport de destination est en dehors de l'ellipse et l'aéroport de détournement n'est pas accessible. Cette représentation se base sur le fait qu'une ellipse a la propriété suivante :  $T_a + T_b = \text{constante}$ . Ici la constante est la distance parcourable avec le carburant restant. Ainsi, si les foyers de l'ellipse correspondent à la position actuelle et celle de l'aéroport de détournement, tout point à l'intérieur de l'ellipse est déterminé comme accessible. Tant que l'aéroport de destination reste dans l'ellipse, il est atteignable et l'aéroport de détournement également.



**FIGURE 40 – ELLIPSE REPRÉSENTANT UN AÉROPORT DE DÉTOURNEMENT (ALTERNATE) ACCESSIBLE APRÈS AVOIR ATTEINT L'AÉROPORT PRINCIPAL.**



**FIGURE 41 – ELLIPSE REPRÉSENTANT UN AÉROPORT DE DÉTOURNEMENT (ALTERNATE) NON ACCESSIBLE APRÈS AVOIR ATTEINT L’AÉROPORT PRINCIPAL.**

### 7.3 Les nouvelles interfaces

De manière générale, le simulateur utilisé pour les Step 2 et 3 se base sur des produits grands public. Le modèle de vol provient du simulateur A320 de X-Plane avec quelques fonctionnalités supplémentaires. Le décor provient du simulateur Prepared 3D (Lockheed Martin). Ce simulateur est utilisé comme démonstrateur sur le Campus de Thales et comme banc d'essai et simulateur de validation.

### 7.3.1 Description d'un cockpit *legacy*

#### 7.3.1.1 Le PFD (Primary Flight Display) *Legacy*

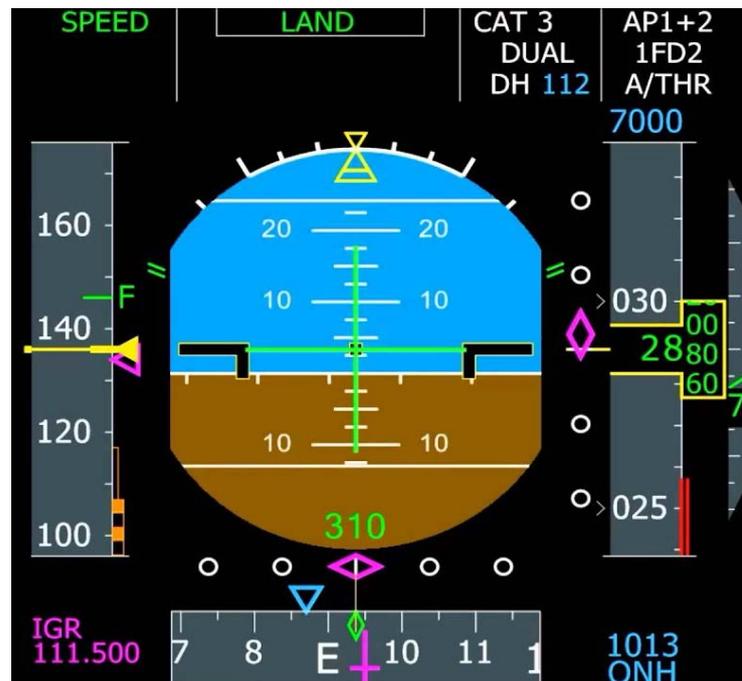


FIGURE 42 – VUE DU PFD *LEGACY*

Le Primary Flight Display (Figure 42) est utilisé pour représenter :

- l'horizon artificiel, c'est-à-dire l'assiette de l'aéronef par rapport à l'horizon (zone centrale de l'écran – bleu et marron pour le ciel et le sol) ;
- la vitesse air de l'aéronef (réglette gauche, ~135 nœuds affichés), c'est-à-dire sa vitesse mesurée dans la masse d'air dans laquelle il est situé, qui est fonction de la densité et de la température de l'environnement ;
- les vitesses limites : sur l'indicateur de vitesse, la valeur maximale tolérée par l'avion est affichée ainsi que la vitesse minimale avant décrochage (chute brutale de l'avion par perte de la portance – ici zone en orange sur la réglette de gauche) ;
- la consigne de vitesse donnée par le pilote automatique et représentée par le triangle magenta sur l'indicateur de vitesse (réglette à gauche de l'écran) ;
- le niveau de vol ou son altitude barométrique corrigée (réglette droite, 2880 pieds affichés en vert) : son altitude par rapport au niveau théorique de la mer au-dessus d'une certaine altitude puis son altitude par rapport au terrain de destination (valeur moyenne de pression dans la région du terrain) ;

- la consigne d'altitude donnée par le pilote automatique et représentée par un nombre magenta sous l'indicateur d'altitude (réglette à droite de l'écran ici non présent), ou un nombre bleu en haut de la réglette à droite si la valeur est sélectionnée mais non suivie (ici nous sommes en phase d'atterrissage, l'altitude diminue progressivement et la consigne et données pas le losange magenta juste à gauche de la réglette de droite) ;
- la vitesse verticale (réglette à l'extrémité droite - 7 en vert - pour 700 pieds par minutes) qui indique un taux de descente de l'aéronef en pieds par minute ou en degré de pente ;
- le cap de l'aéronef (magenta en bas de l'écran) en degrés ;
- les différents modes du pilote automatique (zone supérieure).

### 7.3.1.2 Le ND (Navigation Display) Legacy



**FIGURE 43 – VUE DU ND LEGACY**

Le Navigation Display (Figure 43) est utilisé pour représenter :

- la route suivie : le trait vert, la position de l'avion par rapport à la route est représentée par le symbole d'avion jaune au centre de l'écran ;
- les points de passage (waypoints) : les noms sont affichés sur la route, le prochain point de passage est affiché dans la partie supérieure droite avec le temps et la distance avant passage vertical (ici le nom est RW13L et la distance 6,3 nautiques) ;

- le cap : affiché numériquement en haut de l'écran à droite (134°) et les différentes consignes ayant trait au cap affiché sur la rose (graduée en degrés) dans la partie supérieure de l'écran ;
- la vitesse air réelle, la vitesse et le sens du vent et la vitesse sol (vitesse air réelle – vitesse du vent) en résultant dans la partie supérieure gauche (GS – Ground Speed : 136 ; TAS – True Air Speed : 134 ; le vent arrive en 271 avec une vitesse de 3 nœuds, la flèche verte indique le sens par rapport à l'avion)
- des informations météorologiques et de relief, en surimpression (ici non présentes – ces informations sont celles fournies par le radar de l'avion).

### 7.3.2 Interfaces communes aux Step 2 et 3

Le moyen utilisé pour les évaluations des Step 2 et Step 3 est le démonstrateur de cockpit situé sur le Campus Thales à Mérignac (Figure 44 et Figure 45). L'interface du cockpit est composée de quatre écrans tactiles de 17" qui représentent l'état actuel de la gamme de produits Thales pour les cockpits. Ces écrans jouent le rôle des innombrables interrupteurs, boutons et cadrans des cockpits de la génération précédente, comme celui de l'A320. Un FCU (Flight Control Unit) physique, similaire à celui disponible sur l'A320, est également installé au-dessus des écrans tactiles pour gérer les paramètres de vol du pilote automatique (altitude, vitesse, cap, etc.) Les Figure 44 et Figure 45 illustrent le cockpit de l'Avionics 2020.

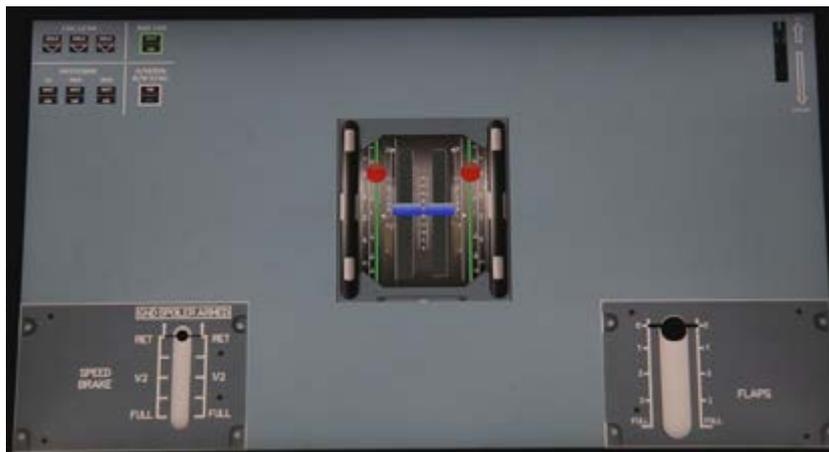


**FIGURE 44 – LE COCKPIT DU SIMULATEUR D'AVIONICS 2020 (AV2020)**



**FIGURE 45 – VUE DU COCKPIT AV2020**

Chaque pilote dispose d'un écran principal de vol (PFD). L'écran central est l'écran de navigation (ND) partagé par les deux pilotes. Sous l'écran de navigation se trouve l'ECAM (Electronic Centralized Aircraft Monitoring).



**FIGURE 46 – LE PEDESTAL VIRTUEL UTILISÉ DANS LES EXPÉRIMENTATIONS STEP 2 ET STEP 3 (commande de gaz au centre, volets en bas à droite, et aérofreins en bas à gauche)**

Sous l'ECAM se trouve un écran tactile qui représente le socle avec la manette des gaz, le train d'atterrissage, les volets et les leviers de frein (Figure 46). Les pilotes peuvent également sélectionner les performances de freinage automatique (Low, Medium, Max). Les voyants de rétroaction du train d'atterrissage sont également présents.

### 7.3.3 Step2 Description de l'interface

Dans ce paragraphe, nous proposons une description des IHM conçues pour Step2 avec l'AV2020. Nous précisons les évolutions en termes de conception par rapport à Step1 réalisé sur un simulateur A320.

#### 7.3.3.1 Primary Flight Display PFD

La Figure 47 présente un exemple de PFD utilisé lors de Step 2. Le carburant restant à bord est affiché à gauche de la rose des vents (rectangle rouge). Il est exprimé en kilogrammes. Juste au-dessus, le débit de carburant est affiché en kilogrammes par heure, comme le montre la Figure 47 (rectangle rouge également). La flèche de vent, normalement sur l'écran de navigation, est ici affichée sur le PFD sous la forme d'un cercle avec une flèche et la valeur de la vitesse du vent (entourée en vert sur la figure). Pour notre expérimentation, le pilote automatique était dans un mode sélectionné et non dans un mode géré.



FIGURE 47 – VUE DU PFD DANS L'EXPÉRIMENTATION STEP 2 DE L'EXPÉRIMENTATION.

En haut du PFD (Figure 48), on peut voir le FMA (Flight Mode Annunciator) (Rectangle jaune). Le pilote automatique était dans un mode sélectionné et non dans un mode géré. Le pilote peut sélectionner les fréquences VHF1 et VHF2 pour communiquer avec l'ATC

(Air Traffic Control) dans un menu qui s'ouvre à droite du PFD comme le montre la Figure 48.



**FIGURE 48 – VUE DU PFD AVEC CARTOUCHE VHF DANS LA PARTIE DROITE  
(cadre vert)**

Sur la Figure 49, la défaillance est apparue mentionnée. Le nom de la défaillance est affiché en haut à droite (en rouge). Les pilotes peuvent appuyer dessus pour arrêter l'alarme et ouvrir la procédure ECAM (Electronic Centralised Aircraft Monitor).

En dessous de l'altitude et de la pression atmosphérique standard (1013hPa), se trouve la hauteur de décision (DH) affichée. Et en dessous de DH, se trouve le mode de navigation radio NAV (VOR/ILS) et la fréquence sélectionnée.

En arrière-plan se trouve un système de vision synthétique (SVS) qui fournit l'environnement de vol, y compris le terrain, les obstacles et d'autres données topographiques, en remplaçant la représentation conventionnelle du ciel et du sol sur le PFD.



**FIGURE 49 – VUE DU PFD AVEC UN MESSAGE D'ERREUR INDIQUANT UNE PANNE ÉLECTRIQUE « AC BUS 1 FAULT » (EN ROUGE EN HAUT À DROITE) PENDANT L'EXPÉRIMENTATION STEP 2**

Après avoir éteint l'alarme, une cloche rouge (en haut à droite) s'affiche pour rappeler la panne, comme indiqué dans la Figure 50 en haut à droite.



**FIGURE 50 – VUE DU PFD APRÈS AVOIR ÉTEINT L'ALARME DE PANNE**

Les pilotes peuvent l'ouvrir à nouveau pour voir le nom de la panne à tout moment ou pour ouvrir la procédure ECAM ou la liste des systèmes inopérants (Figure 51).

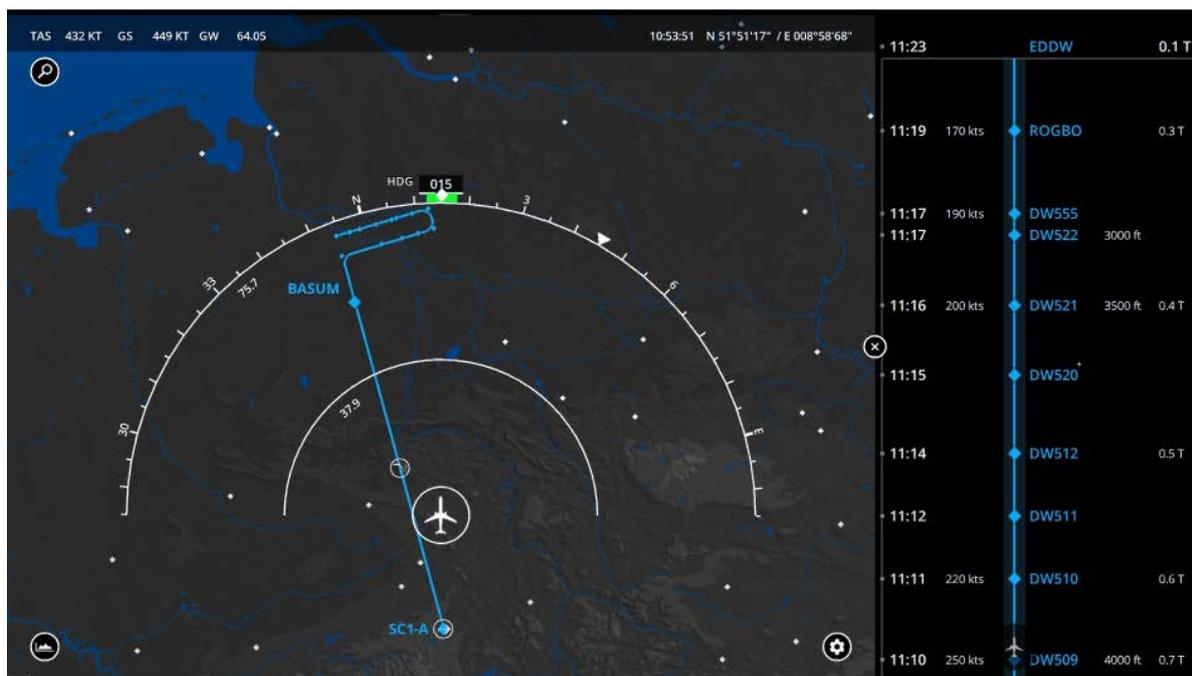


**FIGURE 51 – VUE DU PFD AVEC LE BOUTON D’OUVRIR LA PROCÉDURE ECAM EN HAUT À DROITE**

### 7.3.3.2 L’écran de navigation – Navigation Display (ND)

#### *La « TimeLine » – Chronologie des évènements*

Sur le ND, il est possible d'ouvrir une chronologie des évènements à droite de l'écran comme indiqué dans Figure 52. Comme dans un FMC, la ligne de temps indique les prochains points de cheminement, la vitesse, les restrictions d'altitude de la procédure d'approche pour chaque point de cheminement et le temps de passage (temps de survol).



**FIGURE 52 – VUE DU ND PENDANT L'EXPÉRIMENTATION STEP 2**

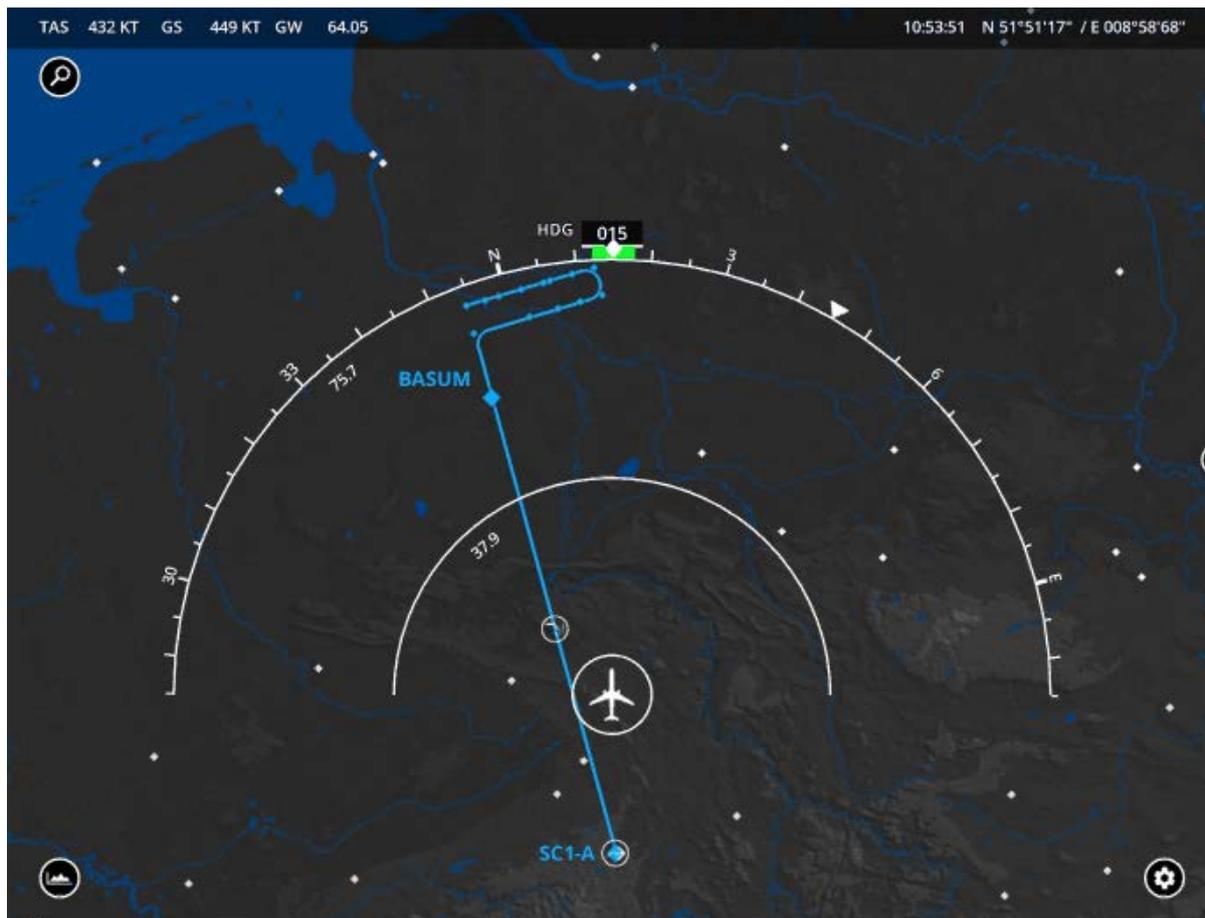
L'échelle de la carte est matérialisée par les deux demi-cercles blancs. Le demi-cercle intérieur matérialise la distance de 37.9 NM. Le demi-cercle extérieur matérialise la distance de 75.7NM. Dans ce second cas la graduation indique le cap en degré, ici il est de 015°. Dans la partie droite de la figure il apparait la représentation graphique de la timeline (en bleu).

*ND zoom scales – Changement d'échelle sur l'écran de navigation*

Il est donné aux pilotes la possibilité de faire un zoom avant et arrière sur l'écran de navigation en rapprochant ou éloignant deux doigts. L'échelle est donc libre comme indiqué dans la Figure 52 avec une échelle de 75,7NM.

La Figure 54, montre une échelle différente, de 46NM, choisie par les pilotes. Les échelles sont libres et non imposées par l'interface, comme dans l'ancien A320 où les échelles possibles sont 10NM, 20NM, 40NM, 80NM, 160NM, 320NM.

Sur les Figure 52 et Figure 54 on peut voir en haut, les informations sur le poids global de l'avion (GW 64,05 tonnes Figure 52 et 63,99 tonnes Figure 54).



**FIGURE 53 – ND AVEC UNE AUTRE ÉCHELLE**

L'échelle de la carte est matérialisée par les deux demi-cercles blancs. Le demi-cercle intérieur matérialise la distance de 23 NM. Le demi-cercle extérieur matérialise la distance de 46 NM.

La Figure 54 montre une échelle différente, de 46NM, choisie par les pilotes. Les échelles sont libres et non imposées par l'interface, comme dans l'ancien A320 où les échelles possibles sont 10NM, 20NM, 40NM, 80NM, 160NM, 320NM.

Sur les Figure 53 et Figure 54, les informations sur le poids global de l'avion figurent en haut (GW 64,05 tonnes Figure 53 et 63,99 tonnes Figure 54).

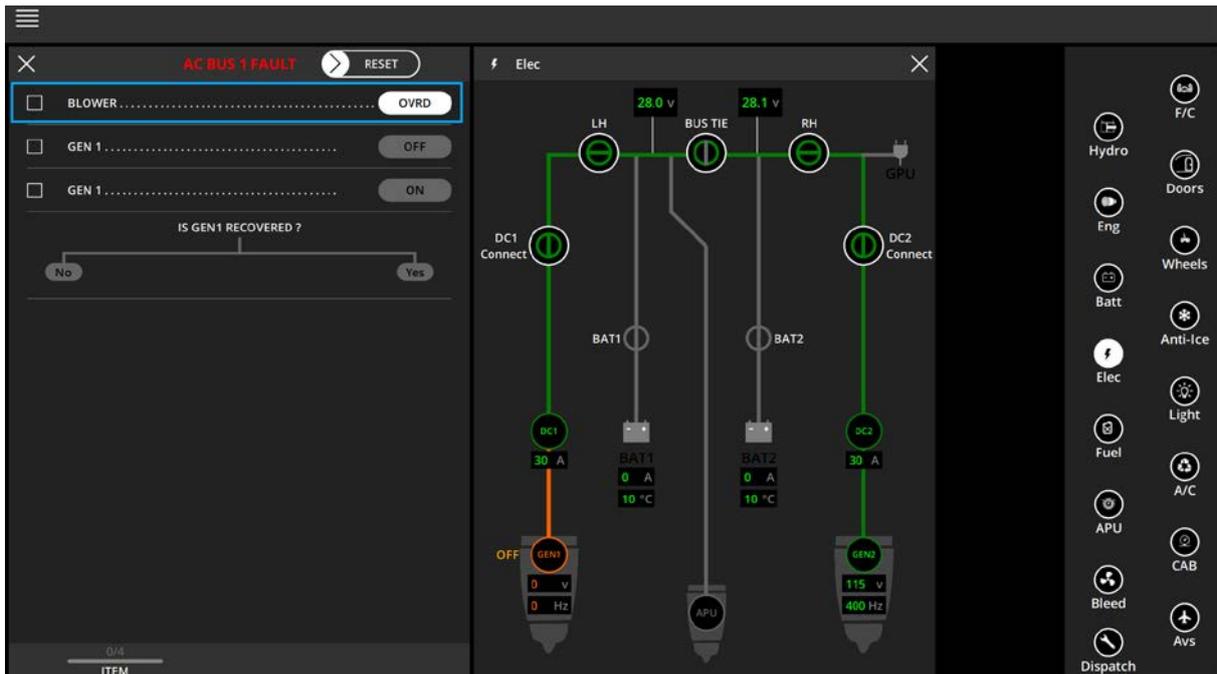


**FIGURE 54 – ND AVEC UNE AUTRE ÉCHELLE**

L'échelle de la carte est matérialisée par les deux demi-cercles blancs. Le demi-cercle intérieur matérialise la distance de 23 NM. Le demi-cercle extérieur matérialise la distance de 46 NM.

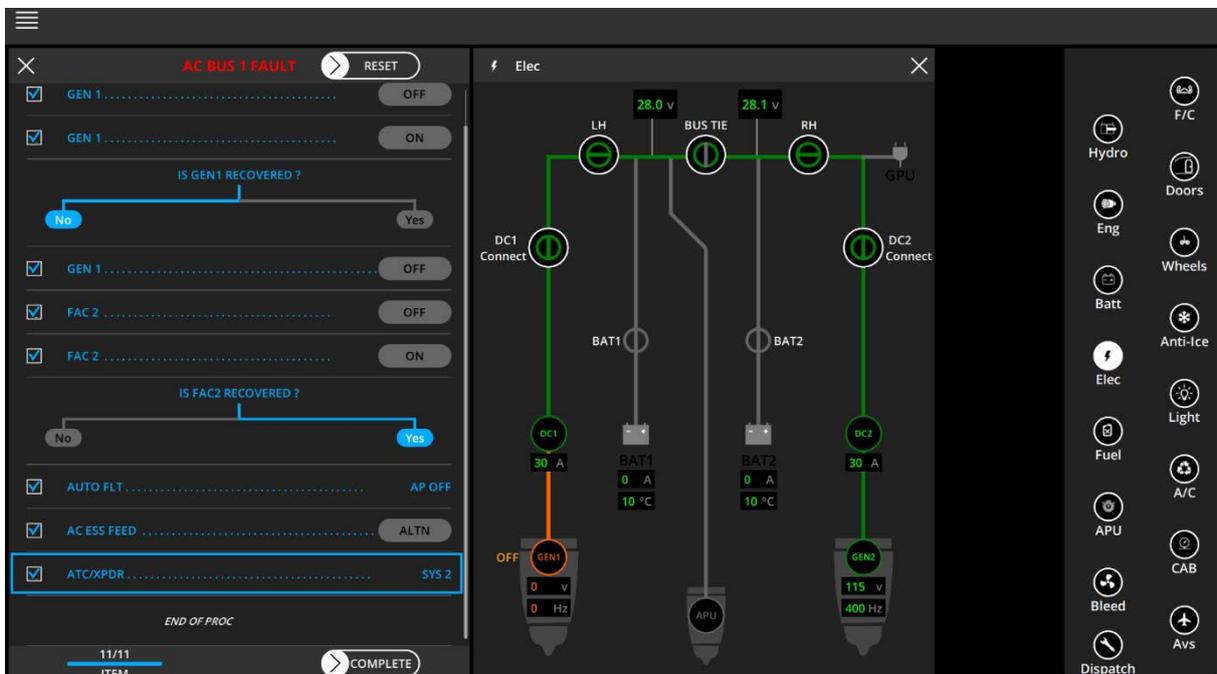
### 7.3.3.3 The Electronic Centralised Aircraft Monitor (ECAM)

Lorsque la panne AC BUS 1 apparaît, le pilote ouvre la procédure de résolution ECAM (Figure 55). Le pilote appuie sur chaque élément un par un. Le premier élément met le ventilateur en mode "Override", le deuxième élément éteint le générateur 1 et le troisième élément rallume le générateur 1.



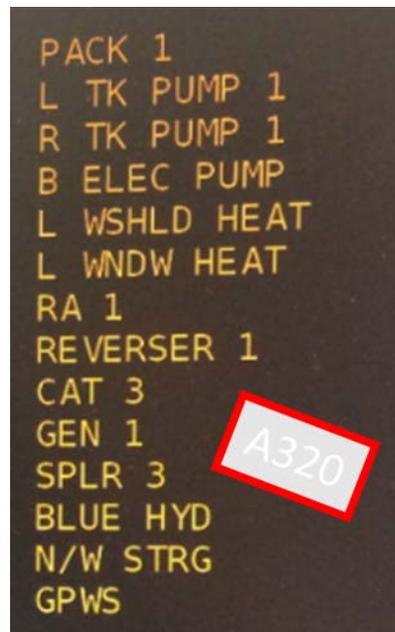
**FIGURE 55 – ECAM AC BUS 1 FAULT ÉCRAN DE RÉOLUTION DE PANNE (PREMIÈRE PARTIE)**

Ensuite, le pilote sélectionne " Yes " ou " No " si le GEN 1 est récupéré et le reste de la procédure s'ouvre en conséquence (Figure 56). Le pilote continue de la même manière pour le reste de la procédure.



**FIGURE 56 – ECAM AC BUS 1 FAULT ÉCRAN DE RÉOLUTION DE PANNE (DEUXIÈME PARTIE)**

A la fin de la procédure, l'ECAM affiche les systèmes inopérants suite à la panne et la procédure de résolution, à droite de l'écran. Sur la Figure 57 apparaît la liste des systèmes inopérants après la panne du AC BUS 1 dans un A320. Dans Step 2, la liste est la même que dans un A320 mais l'ordre change, le tri est fait par importance pour l'atterrissage.



**FIGURE 57 – SYSTÈME INOPÉRANT SUR UN A320 LEGACY**

#### 7.3.4 Step 3 Description de l'interface

La plate-forme utilisée pour les évaluations de Step 3 est identique à celle de Step 2. Seuls le logiciel et l'interface utilisateur associée sont différents dans Step 3.

##### 7.3.4.1 Primary Flight Display (PFD)

L'écran principal de vol (PFD) de Step 3 a une jauge différente pour représenter la quantité de carburant en kilogrammes et affiche le temps de vol restant. L'indicateur de carburant se trouve à gauche de la rose des vents, comme indiqué dans la Figure 58. La représentation du vent par rapport à l'avion est également affichée sur le PFD (Figure 58), à gauche de la rose des vents.



**FIGURE 58 – VUE DU PFD DANS LA PHASE STEP 3 DE L’EXPÉRIMENTATION.**  
*(Avec une gauge indiquant la quantité de carburant restant – en bleu – en plus de la valeur en kg)*

Sur la Figure 59, le temps de carburant restant apparaît inférieur aux 30 minutes légales, et il est donc affiché en rouge. La panne s'est déjà produite et une cloche rouge est affichée en haut à droite. Les pilotes peuvent appuyer dessus pour arrêter l'alarme et ouvrir la procédure ECAM (Electronic Centralised Aircraft Monitor).



**FIGURE 59 – VUE DU PFD AVEC UN TEMPS DE VOL RESTANT <30MIN (D'APRÈS CARBURANT)**  
*(Indication du temps de vol en rouge au-dessus de la gauge de carburant)*

#### 7.3.4.2 Navigation Display (ND)

L'affichage de la navigation est le même qu'à l'étape 2. Les cercles ont été ajoutés pour matérialiser la distance atteignable avec le carburant restant.

##### *Le cercle orange*

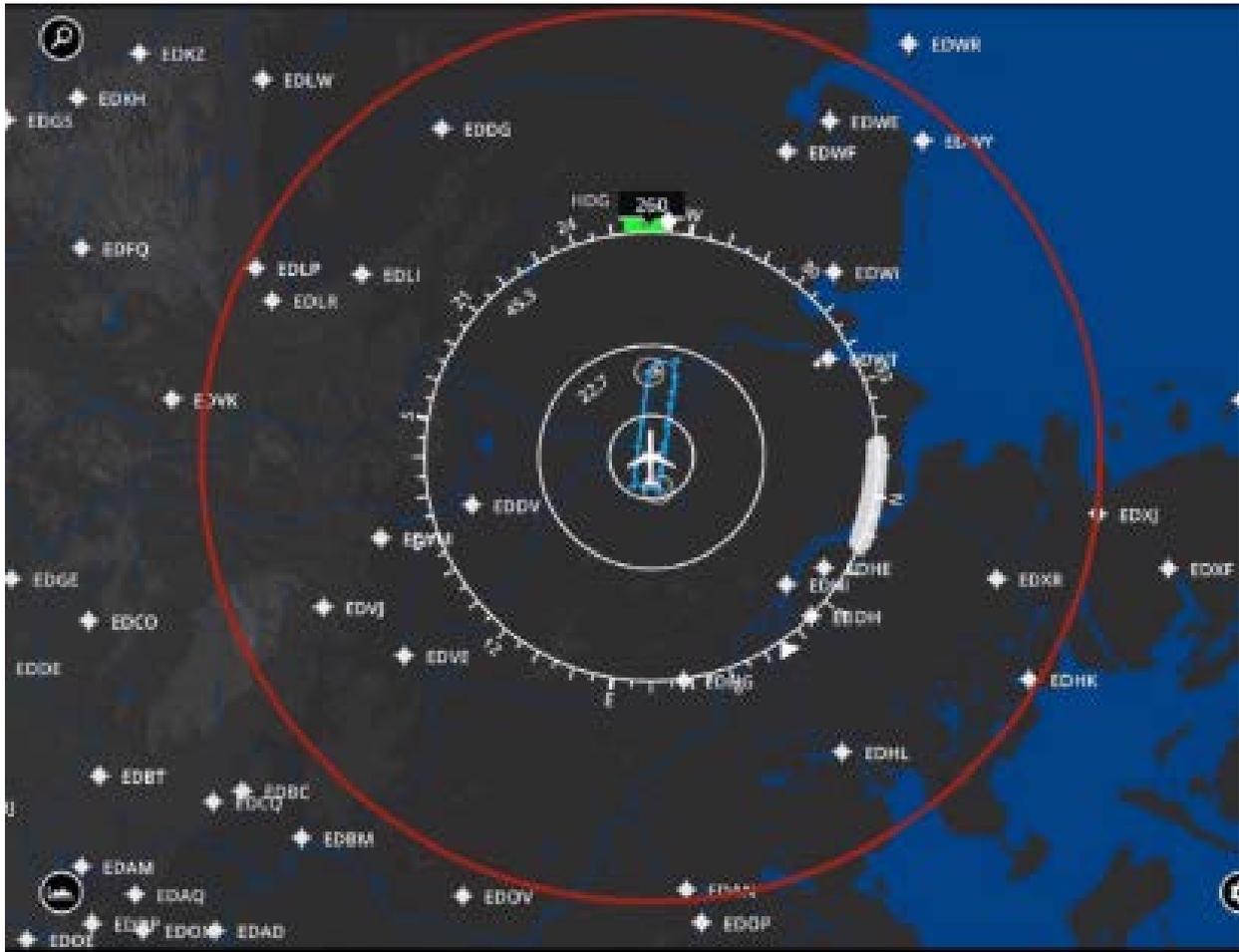
Un cercle orange et un cercle rouge sont affichés sur l'écran de navigation (ND). Le cercle orange indique la distance de vol atteignable avec 30 min (1200 kg) de carburant restant dans les réservoirs (réserve légale de carburant OACI). Il indique également les aéroports alternatifs accessibles.



**FIGURE 60 – CERCLE ORANGE AU DÉBUT DU SCÉNARIO**

Les aéroports alternatifs situés hors du cercle orange peuvent éventuellement être accessibles par une route directe (Figure 60, Figure 61).

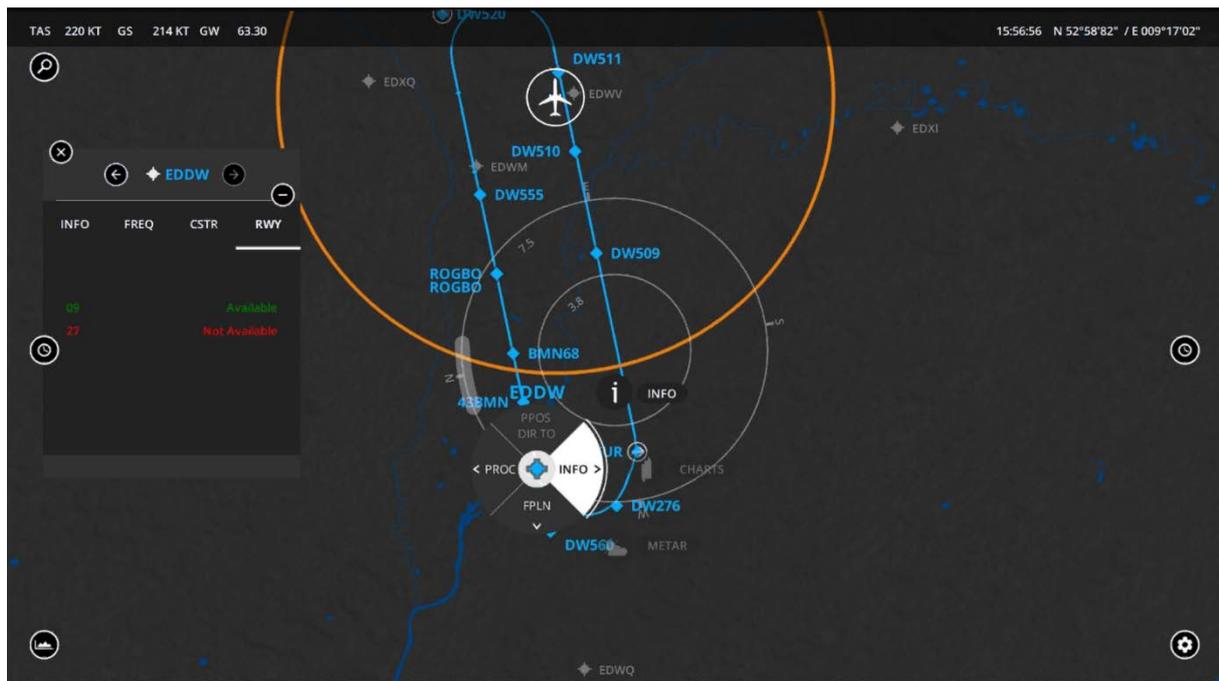




**FIGURE 62 – CERCLE ROUGE APRÈS LE GA**

*Aéroports et pistes d'atterrissage disponibles*

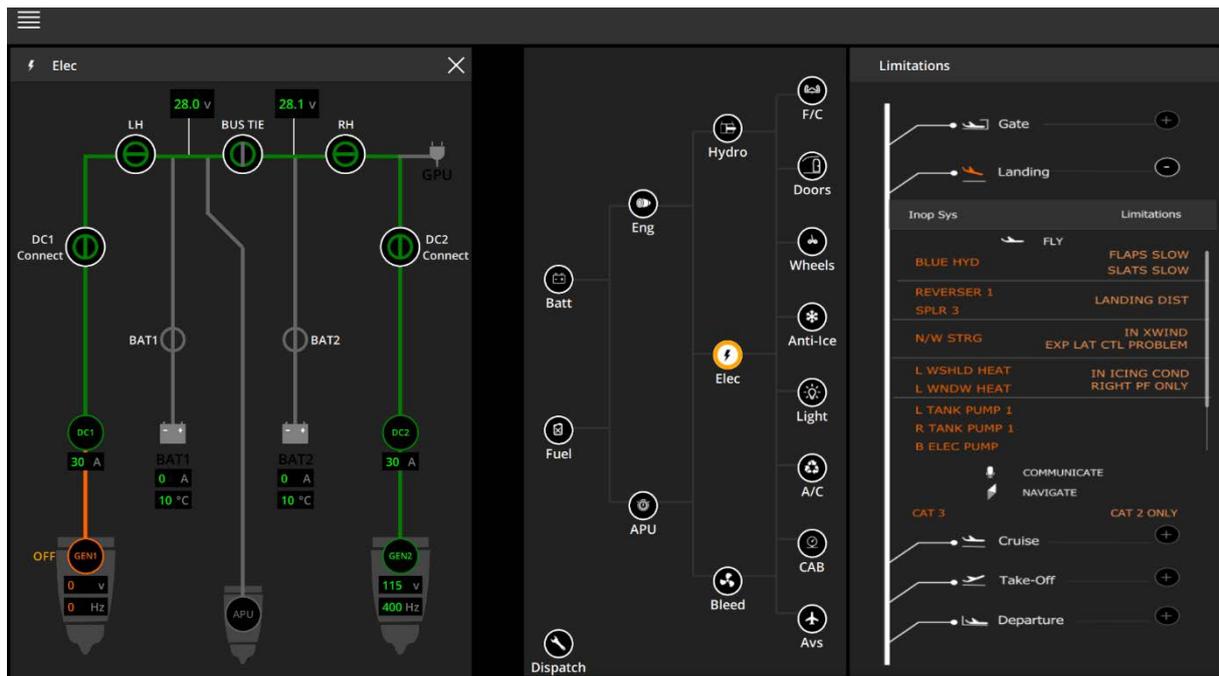
Sur le ND, les pilotes peuvent sélectionner l'aéroport de leur choix et voir les pistes disponibles. La disponibilité des pistes est calculée en fonction du statut de l'avion et de la météo de l'aéroport. Sur la Figure 63 nous pouvons observer qu'après la panne et la nouvelle météo, la seule piste disponible à Brême (EDDW) est la RWY09.



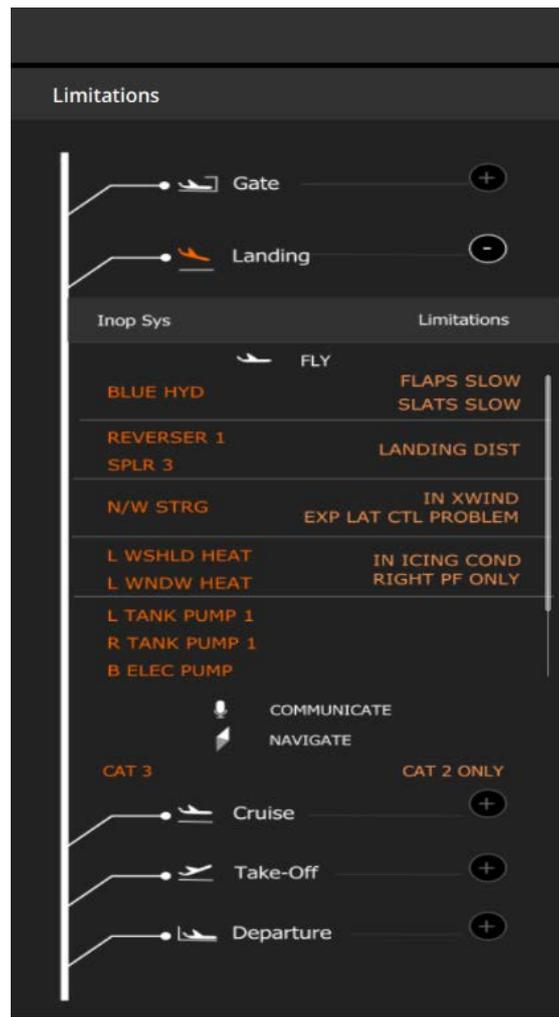
**FIGURE 63 – PISTE ACCESSIBLE EN FIN DE SCÉNARIO À BREME (EDDW)**

#### 7.3.4.3 The Electronic Centralised Aircraft Monitor (ECAM)

En plus des fonctionnalités présentées dans Step2, certaines fonctions améliorent la compréhension de la situation par les pilotes. À la fin de la procédure, l'ECAM affiche les systèmes inopérants suite à la panne et la procédure de résolution comme indiqué sur la Figure 64, « on the right of the display ». En plus de la liste des systèmes inopérants, figure une liste des limitations pour l'atterrissage devant chaque élément (Figure 64, Figure 65).



**FIGURE 64 – VUE DE L'ECAM LORS DE LA PANNE AC BUS 1 FAULT**  
*(À gauche une représentation graphique du système électrique de l'avion avec en orange les systèmes non fonctionnels, à droite une liste reprenant l'intégralité des systèmes inopérants et la conséquence de leur défaillance sur la poursuite du vol.)*



**FIGURE 65 – DÉTAIL DE LA PARTIE SYSTÈMES INOPÉRANTS DE LA FIGURE 64 (PARTIE DROITE)**  
*(Colonne de gauche en orange foncé, les systèmes inopérants avec une formulation identique à celle utilisé dans un A320 legacy, colonne de droite en orange plus clair, les conséquences de ces pannes sur le vol)*

# CHAPITRE 8 EXPÉRIMENTATIONS DE BORDEAUX

## STEP2 – STEP3

Comme nous l'avons présenté dans le Chapitre 5, nous avons réalisé une expérience sur le site de Thales à Bordeaux. Cette expérience s'est déroulée sur deux semaines. Elle présentait deux modalités. Pendant la première semaine (Bordeaux – Step 2) les pilotes effectuaient une passation sur un cockpit conceptuellement proche de celui d'un A320 *legacy*. Puis, la deuxième semaine (Bordeaux – Step 3), un autre groupe de pilotes effectuaient une passation sur un cockpit équipé les nouvelles interfaces que nous avons proposées (cf. Chapitre 7).

### 8.1 Analyse comparative des modalités Step 1 / Step 2 / Step 3

#### 8.1.1 Step 1

Dans le cadre des premières expérimentations Step1, l'interface utilisée était celle d'un simulateur de vol dynamique. C'est un système certifié pour l'entraînement et l'évaluation de pilotes, il fonctionne exactement comme un A320. C'est le plus haut niveau de représentativité que peut avoir un simulateur. Ce simulateur, nommé AVES, est installé au DLR (Braunschweig), centre de recherche allemand en aéronautique.

#### 8.1.2 Step 2

Dans le cadre des secondes expérimentations Step12, conduites à Bordeaux, l'interface utilisateur est celle d'un prototype réaliste d'un cockpit d'A320 développé par Thales. C'est une interface entièrement tactile dont la logique de fonctionnement est proche de celle d'un A320 (même philosophie constructeur). La dynamique de vol est également très proche de celle d'un A320. Cependant, certains éléments d'interfaces sont modifiés par rapport au cockpit de l'A320 réel :

- L'Overhead (partie permettant de contrôle de systèmes hydrauliques, pneumatiques, carburant et électrique) n'est plus présent physiquement (les fonctionnalités sont reportées sur d'autres systèmes)
- Des checklist interactives et plus rapides ont été ajoutées.

- Une priorisation des systèmes inopérants a été réalisée (la liste est réordonnée par ordre d'importance).
- La création des plans de vols et leurs modifications se font par l'intermédiaire d'une carte (auparavant par ligne de commande).
- La quantité de carburant de l'avion a été déplacée sur l'affichage principal.
- L'affichage principal (PFD) qui donne l'inclinaison et l'orientation par rapport au sol, présente désormais une image virtuelle reconstituant la forme du relief et les éléments remarquables (antennes, aéroports...)

### 8.1.3 Step 3

Dans le cadre des troisièmes expérimentations Step3, conduites à Bordeaux, l'interface est presque identique à celle du Step2, mais elle possède des éléments en plus :

- Les conséquences des pannes sont expliquées.
- Sur la carte où l'avion est repéré, un cercle autour de l'avion est matérialisé pour indiquer la distance qui peut être parcourue avec le carburant restant.
- Il est possible de savoir si un aéroport est disponible pour un atterrissage (légalement ou techniquement) en cliquant sur l'icône qui le représente sur la carte et cela en tenant compte de l'état de l'avion (pannes comprises).
- Les informations concernant le carburant ont été enrichies (quantité de carburant, temps de vol, distance parcourable).

## 8.2 Présentations du panel de copilotes

Les deux panels sont constitués de co-pilotes de la même compagnie aérienne, garantissant une formation similaire et une homogénéité dans l'application des procédures au standard de la compagnie.

La répartition des pilotes dans les deux panels a été faite de manière aléatoire et en fonction des disponibilités des pilotes au cours de deux semaines d'expérimentations. Les pilotes étaient tous affectés sur la ligne Hambourg-Bordeaux, et effectuaient cette expérimentation dans un temps d'attente entre un vol aller et un vol retour. Les pilotes étaient, comme pour Step 1, rémunérés pour participer à l'expérience. Chaque passation (chaque co-pilote) durait une demi-journée (ce qui augmente la complexité de la logistique par rapport à Step 1 où il n'y avait qu'un pilote par journée).

Le co-pilote arrivant le matin était accueilli à 9h, un expérimentateur administrait différents questionnaires dont celui concernant les données personnelles (expériences et Age) (cf. Tableau 15 et Tableau 16). Puis, il était formé sur le simulateur pendant 1h pour comprendre les différences et limites vis-à-vis d'un A320 réel. Il effectuait un vol d'essai (Décollage Bordeaux- Atterrissage Bordeaux) avec le commandant de bord (complice) pendant environs 30 min. Le pilote et le co-pilote faisaient une pause de 10 minutes puis le scénario d'expérimental était réalisé pendant 1h environ. Par la suite, le co-pilote était emmené dans une autre salle. 20 à 30 minutes après la fin de simulation nous réalisons l'entretien d'auto-confrontation. Pendant ce temps, un expérimentateur accueillait le pilote de l'après-midi, et prenait en charges les étapes de questionnaires et familiarisation avec le simulateur. Cette organisation logistique nous permettait de réaliser l'expérimentation avec le second co-pilote en milieu d'après-midi.

**TABLEAU 15 – PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DES 10 PARTICIPANTS DE L'EXPÉRIENCE DE BORDEAUX ETAPE 1 (STEP 2). SD : ECART-TYPE.**

	<b>Moyen</b>	<b>Minimum</b>	<b>Maximum</b>	<b>SD</b>
<b>Age (Années)</b>	32,4	28	41	4,81
<b>Nombre total d'heures de vol</b>	4801	3000	8500	2080
<b>Nombre total d'heures de vol sur Airbus A320</b>	3735	500	6500	1775
<b>Nombre total d'heures de vol sur les 12 derniers mois</b>	562,1	330	700	130,58

**TABLEAU 16 - PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DES 10 PARTICIPANTS DE L'EXPÉRIENCE DE BORDEAUX ÉTAPE 2 (STEP 3). SD : ÉCART-TYPE.**

	<b>Moyen</b>	<b>Minimum</b>	<b>Maximum</b>	<b>SD</b>
<b>Age (Années)</b>	33,1	29	38	3,07
<b>Nombre total d'heures de vol</b>	4680	2800	7000	1493
<b>Nombre total d'heures de vol sur Airbus A320</b>	4435	2700	6500	1251
<b>Nombre total d'heures de vol sur les 12 derniers mois</b>	681	560	800	77,09

### 8.3 Données récoltées

Rappelons que l'objectif de notre étude est principalement de comprendre le lien entre les interfaces et les représentations mentales. Pour se faire, nous cherchons à comparer les représentations mentales de copilotes ayant réalisé le scénario expérimental avec le cockpit Step2 avec celles des copilotes ayant utilisé le cockpit Step3.

Afin d'étudier le lien entre RMs et IHS, nous avons appliqué la méthode MERIA (Cf. Annexe 2 – Grilles MERIA Step 2 et 3). Nous avons utilisé la même grille pour les 3 modalités, en « codant » Step2 et Step3 sur la base de celle effectuée pour Step1.

*NB. : Les différents copilotes portent des numéros en fonction de leur ordre de passage. Cette numérotation est issue de la codification réalisée par les partenaires du projet. Elle est peu cohérente mais a été conservée car elle permettait d'échanger sur la base d'un référentiel commun. Les copilotes ayant passé l'expérience sur le cockpit Step 2 sont numérotés de 21 à 30, ceux ayant passé l'expérience sur Step 3 sont numérotés 31 à 40. Pour rappel, les copilotes de ayant passé l'expérience sur Step 1 sont numérotés 1 à 10.*

**TABLEAU 17 – RÉSUMÉ DES RÉSULTATS ACQUIS SUR L'ÉVALUATION DES REPRÉSENTATIONS MENTALES DES COPILOTES AU COURS DE STEP 2**

Vert : l'activité réelle a dépassé l'activité prescrite (ou attendue) ; Bleu : l'activité réelle correspond à l'activité prescrite ; Orange : l'activité réelle a été inférieure à l'activité prescrite, sans être qualifiée de critique ; Rouge : l'activité réelle a été inférieure à l'activité prescrite et la situation est ou devient critique ; Gris : Absence de données.

LowFuel, NoClimb, CloseEm, APoff Failure, DiffLanding, LandBremen, TailWind, CWLimit, OMB, ManLand, CompLand, CaptNoLand : sont les phases du scénario dans l'ordre chronologique. cf. : 6.2.1.2

Pilot	Rang	Step	LowFuel	NoClimb	CloseEm	APoff	Failure	DiffLanding	LandBremen	TailWind	CWLimit	OMB	ManLand	CompLand	CaptNoLand
Pilot_21	1	2	Bleu	Gris	Vert	Gris	Bleu	Vert	Bleu	Vert	Orange	Orange	Bleu	Bleu	Rouge
Pilot_22	2	2	Orange	Bleu	Rouge	Orange	Rouge	Rouge	Bleu	Rouge	Rouge	Orange	Rouge	Orange	Bleu
Pilot_23	3	2	Bleu	Bleu	Vert	Bleu	Bleu	Orange	Bleu	Orange	Rouge	Orange	Bleu	Bleu	Rouge
Pilot_24	4	2	Orange	Gris	Orange	Orange	Bleu	Bleu	Bleu	Orange	Orange	Orange	Bleu	Orange	Vert
Pilot_25	5	2	Orange	Bleu	Orange	Bleu	Bleu	Vert	Orange	Vert	Bleu	Bleu	Orange	Vert	Bleu
Pilot_26	6	2	Orange	Bleu	Orange	Rouge	Bleu	Rouge	Rouge	Rouge	Orange	Bleu	Bleu	Orange	Rouge
Pilot_27	7	2	Bleu	Bleu	Rouge	Orange	Orange	Orange	Gris	Orange	Bleu	Bleu	Bleu	Orange	Bleu
Pilot_28	8	2	Vert	Bleu	Vert	Bleu	Bleu	Vert	Vert	Bleu	Bleu	Bleu	Bleu	Vert	Vert
Pilot_29	9	2	Rouge	Bleu	Rouge	Orange	Orange	Bleu	Rouge	Rouge	Bleu	Bleu	Orange	Vert	Vert
Pilot_30	10	2	Vert	Bleu	Vert	Rouge	Bleu	Vert	Vert	Vert	Orange	Orange	Bleu	Bleu	Rouge

**TABEAU 18 – RÉSUMÉ DES RÉSULTATS ACQUIS SUR L'ÉVALUATION DES REPRÉSENTATIONS MENTALES DES COPILOTES AU COURS DE STEP 3**

Vert : l'activité réelle a dépassé l'activité prescrite (ou attendue) ; Bleu : l'activité réelle correspond à l'activité prescrite ; Orange : l'activité réelle a été inférieure à l'activité prescrite, sans être qualifiée de critique ; Rouge : l'activité réelle a été inférieure à l'activité prescrite et la situation est ou devient critique ; Gris : Absence de données.

LowFuel, NoClimb, CloseEm, APoff Failure, DiffLanding, LandBremen, TailWind, CWLimit, OMB, ManLand, CompLand, CaptNoLand : sont les phases du scénario dans l'ordre chronologique. cf. : 6.2.1.2

Pilot	Rang	Step	LowFuel	NoClimb	CloseEm	APoff	Failure	DiffLanding	LandBremen	TailWind	CWLimit	OMB	ManLand	CompLand	CaptNoLand
Pilot_31	1	3	Vert	Bleu	Vert	Rouge	Orange	Orange	Bleu	Rouge	Rouge	Orange	Bleu	Orange	Bleu
Pilot_32	2	3	Rouge	Bleu	Bleu	Bleu	Orange	Vert	Vert	Vert	Bleu	Bleu	Orange	Orange	Vert
Pilot_33	3	3	Orange	Gris	Bleu	Rouge	Bleu	Vert	Vert	Vert	Orange	Orange	Orange	Orange	Vert
Pilot_34	4	3	Orange	Bleu	Bleu	Orange	Bleu	Vert	Vert	Vert	Orange	Bleu	Bleu	Orange	Vert
Pilot_35	5	3	Vert	Gris	Vert	Orange	Bleu	Vert	Vert	Vert	Bleu	Bleu	Bleu	Orange	Vert
Pilot_36	6	3	Orange	Gris	Bleu	Bleu	Bleu	Bleu	Bleu	Orange	Rouge	Bleu	Orange	Bleu	Vert
Pilot_37	7	3	Orange	Bleu	Bleu	Rouge	Bleu	Vert	Bleu	Vert	Orange	Bleu	Bleu	Orange	Vert
Pilot_38	8	3	Vert	Bleu	Vert	Orange	Vert	Vert	Vert	Vert	Bleu	Orange	Orange	Orange	Vert
Pilot_39	9	3	Rouge	Gris	Rouge	Rouge	Bleu	Vert	Vert	Vert	Bleu	Bleu	Bleu	Orange	Vert
Pilot_40	10	3	Orange	Bleu	Orange	Rouge	Orange	Vert	Bleu	Vert	Orange	Orange	Bleu	Vert	Vert

Ce type de représentation permet d'identifier rapidement les pilotes en difficulté (Pilote 22 pour Step2 et 31 pour Step3) et ceux ayant une bonne RM (Pilote 28 et 35).

## 8.4 Résultats préliminaires

En première approche, nous remarquons visuellement que Step 2 présente moins de cases vertes et plus de cases rouges que Step 3. Nous avons également constaté que les co-pilotes 22 et 31 semblent avoir visuellement les moins bonnes représentations mentales parmi les co-pilotes de leurs Step et les co-pilotes 28 et 35 les meilleures.

À ce stade, notre approche est exclusivement graphique. Cependant, pour comparer les pilotes entre eux il est possible de concaténer les résultats issus des différentes phases du scénario expérimental. Mais nous ne pouvons pas explicitement dire que chaque phase influe la prise de décision de la même façon. S'il est possible de hiérarchiser les qualités des représentations mentale (par construction), il est impossible de définir la distance inter catégories.

Néanmoins, dans un but exploratoire nous avons choisi de procéder à une transcription quantitative directe, linéaire et ordonnée des catégories. Ainsi, pour chaque couleur nous attribuons un score, : 4 pour Vert, 3 pour Bleu, 2 pour Orange, 1 pour Rouge.

Cela nous permet d'aborder semi-quantitativement les résultats par pilotes et par phase. Notons que pour certains pilotes, des phases/événements n'ont pas eu lieu, les imperfections techniques du simulateur n'ont pas permis de les produire. Dans ces cas, les scores sont calculés sans tenir compte de ces phases (uniquement pour les copilotes concernés).

En suivant cette démarche nous obtenons un classement hiérarchisé des pilotes (cf. Tableau 19). L'hypothèse qui se dégage de l'analyse visuelle (subjective) est ainsi confirmée par la modélisation simple des données. Les pilotes 28 et 35 ont les meilleurs scores pour leurs Steps respectif, et les pilotes 22 et 31 les plus bas.

En procédant à une démarche similaire pour les phases de l'expérience (Tableau 20) nous constatons que les représentations mentales des pilotes au cours des phases « LowFuel » et « APoff » sont légèrement détériorées et fortement pour « CompLand ». Les pilotes présentent une RM du niveau en carburant (« LowFuel ») qui se détériore entre Step 2 et Step 3, mais l'écart étant faible, nous ne pouvons pas réellement conclure. Pour « APoff », nous attribuons l'écart observé à l'imperfection du simulateur. En effet, dans un A320 (auquel les pilotes sont habitués), la désactivation du pilote automatique est signalée par une forte alarme sonore qui n'était pas présente dans notre cas. Enfin, pour « CompLand », qui correspond à la RM des pilotes vis-à-vis du risque inhérent à l'atterrissage, nous pouvons supposer que la minimisation du risque est liée à une bonne représentation de la situation en amont (« DiffLanding », « LandBremen », « TailWind »). Le risque devient donc « affronté » et non subi (Cf. 1.3).

Pour toutes les autres phases, nous remarquons que les représentations mentales des pilotes se sont améliorées en Step3. Nous pouvons donc supposer que nos recommandations d'IHM ont globalement amélioré la RM des pilotes. Néanmoins, pour confirmer cette tendance, il est nécessaire de procéder à une approche plus statistique et objective, c'est l'objet du Chapitre 9.

**TABLEAU 19 – CALCUL DU SCORE ATTRIBUÉ PAR PILOTE, LE GRADIENT DE COULEUR SUR LE SCORE PERMET UNE LECTURE PLUS RAPIDE (VERT MEILLEUR SCORE, ROUGE LE MOINS BON), LA CODIFICATION DES RM RESTE IDENTIQUE.**

Pilot	Rang	Step	LowFuel	NoClimb	CloseEm	APoff	Failure	DiffLanding	LandBremen	TailWind	CWLimit	OMB	ManLand	Compland	CaptNoLand	Score
Pilot_28	8	2	Green	Blue	Green	Blue	Blue	Green	Green	Blue	Blue	Blue	Blue	Green	Green	3,46
Pilot_25	5	2	Orange	Blue	Orange	Blue	Blue	Green	Orange	Green	Blue	Blue	Orange	Green	Blue	2,92
Pilot_30	10	2	Green	Blue	Green	Red	Blue	Green	Green	Green	Orange	Orange	Blue	Blue	Red	2,92
Pilot_21	1	2	Blue	Grey	Green	Grey	Blue	Green	Blue	Green	Orange	Orange	Blue	Blue	Red	2,90
Pilot_23	3	2	Blue	Blue	Green	Blue	Blue	Orange	Blue	Orange	Red	Orange	Blue	Blue	Red	2,53
Pilot_24	4	2	Orange	Grey	Orange	Orange	Blue	Blue	Blue	Orange	Orange	Orange	Blue	Orange	Green	2,5
Pilot_27	7	2	Blue	Blue	Red	Orange	Orange	Orange	Grey	Orange	Blue	Blue	Blue	Orange	Blue	2,41
Pilot_29	9	2	Red	Blue	Red	Orange	Orange	Blue	Red	Red	Blue	Blue	Orange	Green	Green	2,30
Pilot_26	6	2	Orange	Blue	Orange	Red	Blue	Red	Red	Red	Orange	Blue	Blue	Orange	Red	1,92
Pilot_22	2	2	Orange	Blue	Red	Orange	Red	Red	Blue	Red	Red	Orange	Red	Orange	Blue	1,76
Pilot_35	5	3	Green	Grey	Green	Orange	Blue	Green	Green	Green	Blue	Blue	Blue	Orange	Green	3,33
Pilot_38	8	3	Green	Blue	Green	Orange	Green	Green	Green	Green	Blue	Orange	Orange	Orange	Green	3,23
Pilot_34	4	3	Orange	Blue	Blue	Orange	Blue	Green	Green	Green	Orange	Blue	Blue	Orange	Green	3
Pilot_32	2	3	Red	Blue	Blue	Blue	Orange	Green	Green	Green	Blue	Blue	Blue	Orange	Green	2,92
Pilot_37	7	3	Orange	Blue	Blue	Red	Blue	Blue	Blue	Green	Orange	Blue	Blue	Orange	Green	2,76
Pilot_40	10	3	Orange	Blue	Orange	Red	Orange	Green	Blue	Green	Blue	Orange	Blue	Green	Green	2,76
Pilot_33	3	3	Orange	Grey	Blue	Red	Blue	Green	Green	Green	Orange	Orange	Orange	Orange	Green	2,75
Pilot_39	9	3	Red	Grey	Red	Red	Blue	Green	Green	Green	Blue	Blue	Blue	Orange	Green	2,75
Pilot_36	6	3	Orange	Grey	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Orange	Red	Blue	Orange	Blue	Green	2,66
Pilot_31	1	3	Green	Blue	Green	Red	Orange	Orange	Blue	Red	Red	Orange	Blue	Orange	Blue	2,38

**TABLEAU 20 – CALCUL DU SCORE ATTRIBUÉ POUR CHAQUE PHASE DU SCENARIO AU COURS DES STEP (2 & 3), LE GRADIENT DE COULEUR SUR LE SCORE PERMET UNE LECTURE PLUS RAPIDE (VERT MEILLEUR SCORE, ROUGE LE MOINS BON), LA CODIFICATION DES RM RESTE IDENTIQUE.**

Pilot	Rang	Step	LowFuel	NoClimb	CloseEm	APoff	Failure	DiffLanding	LandBremen	TailWind	CWLimit	OMB	ManLand	Compland	CaptNoLand
Pilot_21	1	2													
Pilot_22	2	2													
Pilot_23	3	2													
Pilot_24	4	2													
Pilot_25	5	2													
Pilot_26	6	2													
Pilot_27	7	2													
Pilot_28	8	2													
Pilot_29	9	2													
Pilot_30	10	2													
			2,6	3	2,5	2,11	2,6	2,8	2,66	2,4	2,2	2,5	2,6	2,9	2,5
Pilot_31	1	3													
Pilot_32	2	3													
Pilot_33	3	3													
Pilot_34	4	3													
Pilot_35	5	3													
Pilot_36	6	3													
Pilot_37	7	3													
Pilot_38	8	3													
Pilot_39	9	3													
Pilot_40	10	3													
			2,4	3	3	1,7	2,8	3,6	3,6	3,5	2,2	2,6	2,6	2,3	3,9

# CHAPITRE 9 APPROCHE STATISTIQUE DE L'ANALYSE DES DONNÉES DES TROIS EXPÉRIENCES ; STEP1, 2 ET 3

Dans ce chapitre, nous détaillons la méthode d'analyse employée pour le traitement statistique des données sur l'ensemble des étapes expérimentales. Notre étude de cas porte sur les trois groupes de copilotes qui sont confrontés au même scénario. Nous nous intéressons particulièrement aux cas où l'interface génère des représentations mentales chez les opérateurs qui sont incompatibles avec la situation. Cette incohérence entraîne un écart observable entre l'activité prescrite et l'activité réelle.

## 9.1 Rappel des objectifs de l'étude

Dans cette étude, nous nous sommes fixé trois objectifs :

- Le premier objectif est d'établir un lien objectif entre les éventuelles représentations mentales erronées et l'interface qui en est potentiellement à l'origine. L'outil de modélisation que nous avons conçu nous permet d'identifier ce lien et de le placer dans un contexte temporel (cf. MERIA - Chapitre 6).
- Le second objectif est de proposer des recommandations en ce qui concerne la conception ou l'amélioration des interfaces sur la base de l'étude des RM des copilotes et par conséquent d'améliorer la prise de décision. (Cf. Chapitre 7).
- Enfin, le troisième objectif est de valider l'apport de ces nouvelles interfaces pour l'amélioration des représentations mentales des opérateurs et par conséquent leurs performances.

Pour répondre à ces problématiques, nous avons réalisé une série d'expérimentations sur 3 panels de 10 co-pilotes chacun (Braunschweig : Step 1, et Bordeaux : Step 2 et Step 3).

## 9.2 Présentation des données collectées sur les trois panels

Les données ont été obtenues à l'aide d'un scénario expérimental réalisé à l'aide de deux simulateurs de poste de pilotage : un simulateur dynamique d'A320 classique et un simulateur de concept de poste de pilotage statique à écran tactile avancé. Les pilotes ont déclaré avoir trouvé les simulations beaucoup plus difficiles que les entraînements habituels réalisés sur simulateur.

Les 30 copilotes ont réalisé un même scénario mais avec des interfaces différentes. Ces trois interfaces correspondant aux trois étapes du plan expérimental sont identifiées par le paramètre *Step* dans le jeu de données.

## 9.3 Contextualisation des variables dans le scénario

Pour rappel, la consigne générale du scénario pour le co-pilote était la suivante : « Vous amorcez votre descente sur l'aéroport de Brême et vous allez atterrir en piste 27 ».

Le scénario comporte plusieurs phases, de durées inégales. Différents « nœuds » (ou éléments clés du scénario) structurent ces phases. Dans l'ordre chronologique les nœuds sont : *LowFuel* > *NoClimb* > *CloseEm* > *APoff* > *FailLure* > *DiffLanding* > *LandBremen* > *TailWind* > *CWLlimit* > *OMB* > *ManLand* > *CompLand* > *CaptNoLand*

Ces éléments correspondent à des représentations mentales attendues à des instants précis du scénario. Ce qui se traduit par : L'avion est en vol avec peu de carburant (*LowFuel*). Le commandant de bord fait une erreur en demandant à l'avion de monter (*NoClimb*). L'avion ne peut pas atterrir et doit remettre les gaz alors qu'il n'y a plus beaucoup de carburant, l'équipage est donc proche d'une situation d'urgence (*CloseEm*). Une panne se produit, l'écran du pilote ainsi que l'autopilote se coupent, le copilote doit prendre les commandes en manuel (*APoff*). L'équipage doit résoudre la panne (*FailLure*). En conséquence de la panne certains systèmes ne fonctionnent plus et l'atterrissage sera plus difficile (*DiffLanding*). Un détournement vers un autre aéroport pourrait être une option mais aux vues de la situation de l'avion, il faut atterrir à Brême (*LandBremen*). Le vent ayant tourné, il faut atterrir en piste 09, au lieu de la numéro 27 prévue initialement (*TailWind*). Le vent de travers ajoute les limitations concernant l'atterrissage (*CWLlimit*). Le copilote doit consulter le manuel OMB pour connaître les

contraintes réglementaires de l'atterrissage dans ces conditions. Il doit également déterminer s'il n'y a pas d'autres problèmes possibles d'après les manuels (*OMB*). Selon les informations recueillies, l'atterrissage doit se faire en manuel (*ManLand*). Le commandant de bord et le copilote récapitulent les actions à faire pour l'atterrissage car celui-ci s'avère particulièrement compliqué (*CompLand*). De la glace de forme sur la vitre du commandant de bord pendant la descente et le copilote doit procéder à un atterrissage en manuel (*CaptNoLand*).

Pour chacune de ces phases, la qualité de la RM du copilote est codée *green*, *blue*, *orange* ou *red* par les observateurs. *Green* est la meilleure performance et *red* la moins bonne. Si la représentation n'a pas pu être évaluée (l'événement ne s'est pas produit ou problème technique) alors elle est codée *grey*.

## 9.4 Formatage des données

Les données sont regroupées dans un fichier nommé *MERIA.txt*, la première ligne du fichier comporte le nom des colonnes.

La première colonne *Pilot* donne l'identifiant du pilote. Mais comme la codification n'était pas constante, deux autres colonnes ont été construites à cet effet : les colonnes 2 et 3, *Step* et *Rang*.

- *Step* prend les valeurs 1, 2 ou 3 correspondant à chacune des modalités. Nous pouvons considérer qu'il y a trois expériences distinctes. La première est réalisée sur un simulateur haute-fidélité, et les deux autres sur des simulateurs moins représentatifs de la réalité, mais avec des interfaces tactiles.
- *Rang* prend des valeurs de 1 à 10 c'est l'ordre de passage du pilote dans le *Step*.

Les colonnes 4 à 16 correspondent aux nœuds du scénario et leurs valeurs sont celles de la qualité de la RM. La colonne 17 *Score*, correspond à la moyenne des représentations mentales convertis en valeurs numériques (4 pour *green* à 1 pour *red*), la moyenne est calculée sur les représentations mentales évaluées (exclues représentations mentales avec pour valeur *grey*). Ce score permet d'ordonner les individus, mais il est arbitraire car tous les nœuds n'ont pas la même valeur au sein du scénario. L'écart entre une

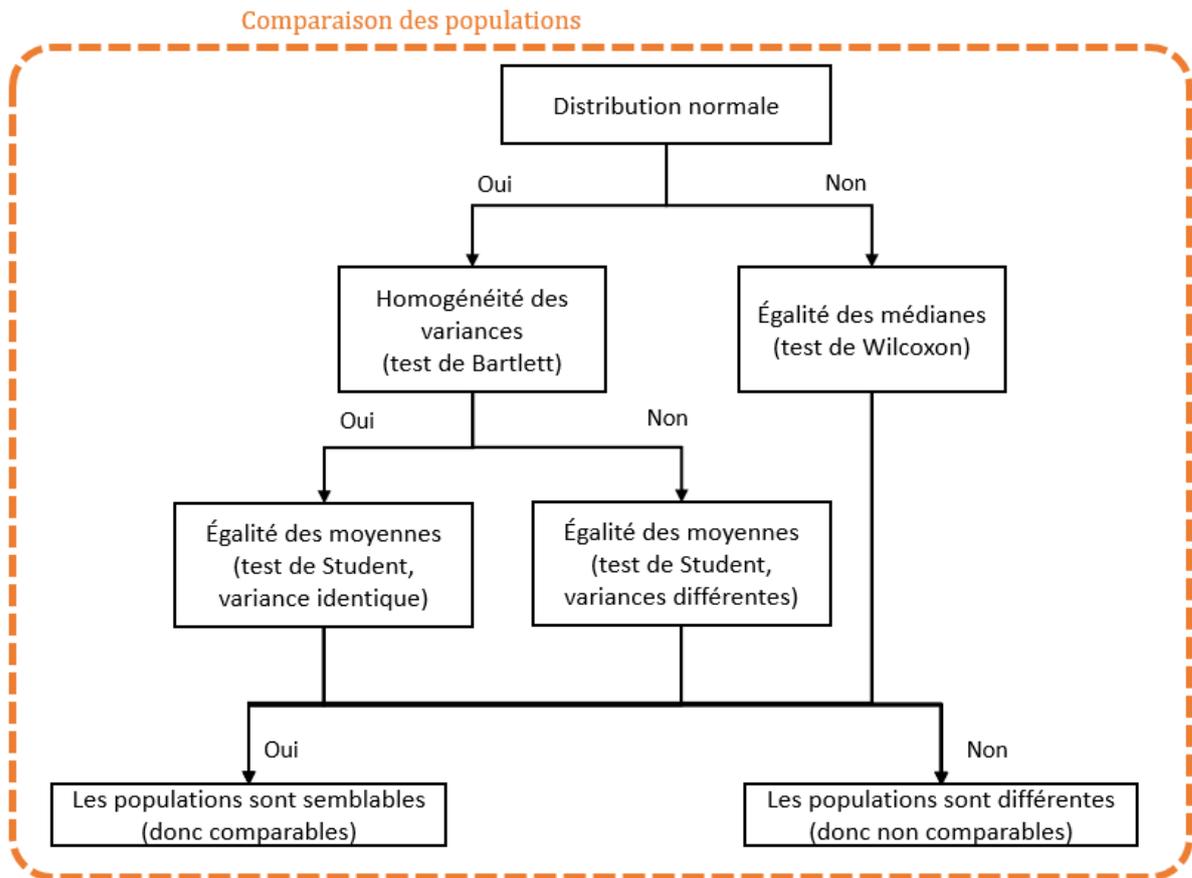
représentation *orange* et *red* n'est pas comparable à l'écart entre une représentation *green* et *blue*. Ces scores servent à la représentation graphique.

Les colonnes *18* à *21* permettent de caractériser le sujet, ce sont les données démographiques, l'Age *Age*, le nombre d'heures de vol effectuées par le pilote dans toute sa carrière *nb\_H\_tot*, le nombre d'heures de vol effectuées par le pilote dans toute sa carrière sur A320 *nb\_H\_A320*, le nombre d'heures de vol effectuées par le pilote sur les 12 derniers mois *nb\_H\_12\_mois*.

## 9.5 Comparabilité des populations des trois Steps.

Il nous faut vérifier que les trois groupes d'individus ayant participé aux trois phases expérimentales (Step1, 2 et 3) sont issus de la même population. Ainsi, nous pourrions établir que les éventuelles différences de performances observées sont uniquement la conséquence de la conception des différentes interfaces et non d'une différence entre les groupes (âge ou expérience). Stricto sensu, les tests de comparaison de populations cherchent à déterminer si  $K$  ( $K \geq 2$ ) échantillons proviennent de la même population relativement à la variable d'intérêt (ici l'âge – une variable – et l'expériences – trois variables).

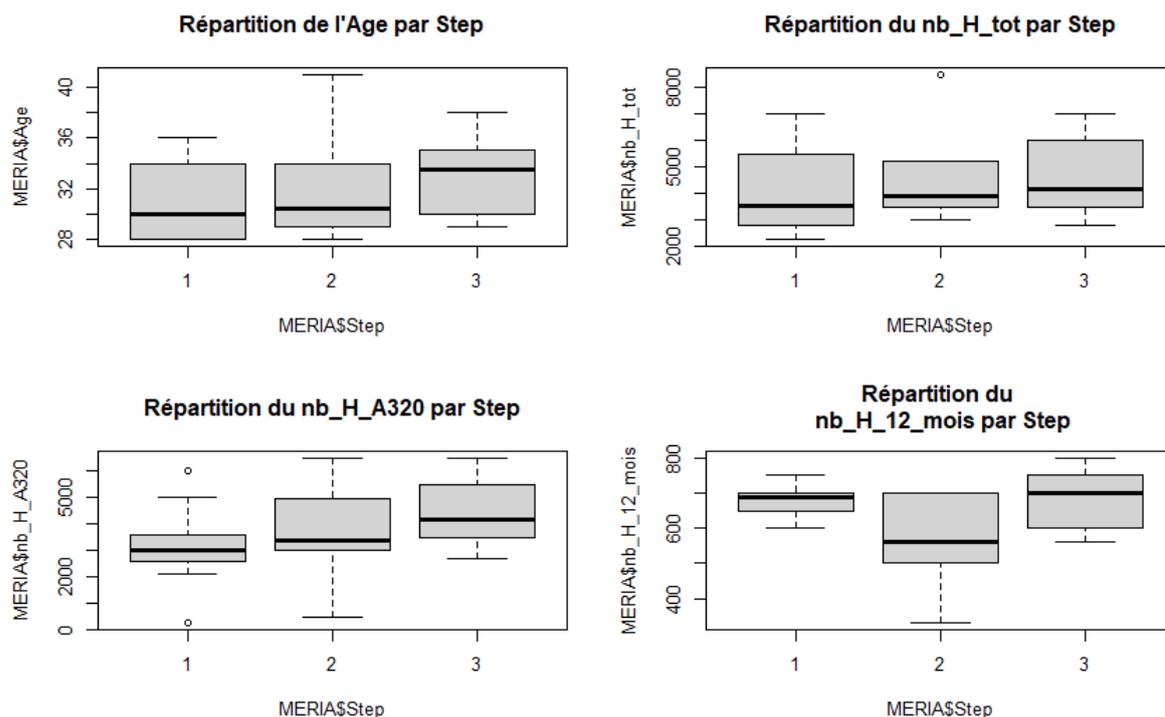
Afin de valider cette hypothèse, il nous faut prouver que ces variables (âge et expériences) ont la même distribution (soit par des tests paramétriques – hypothèse forte – soit à défaut par des tests non paramétriques – hypothèse faible). La Figure 66 reprend le processus de validation que nous réalisons dans cette section.



**FIGURE 66 – PROCESSUS DE VALIDATION DE LA SIMILARITÉ DES TROIS POPULATIONS**

### 9.5.1 Données démographiques :

Les données ayant déjà été présentées dans les chapitres précédents (Chapitre 6 pour Step1 et Chapitre 8 pour Step2&3), nous les représenterons uniquement graphiquement afin de disposer d'une vision synthétique pour les trois populations.



**FIGURE 67 – RÉPARTITIONS DES POPULATIONS DES TROIS STEPS SELON L'ÂGE (EN ANNÉES) ET L'EXPÉRIENCE EN HEURES DE VOL (AU TOTAL, SUR A320, SUR LES 12 DERNIERS MOIS).**

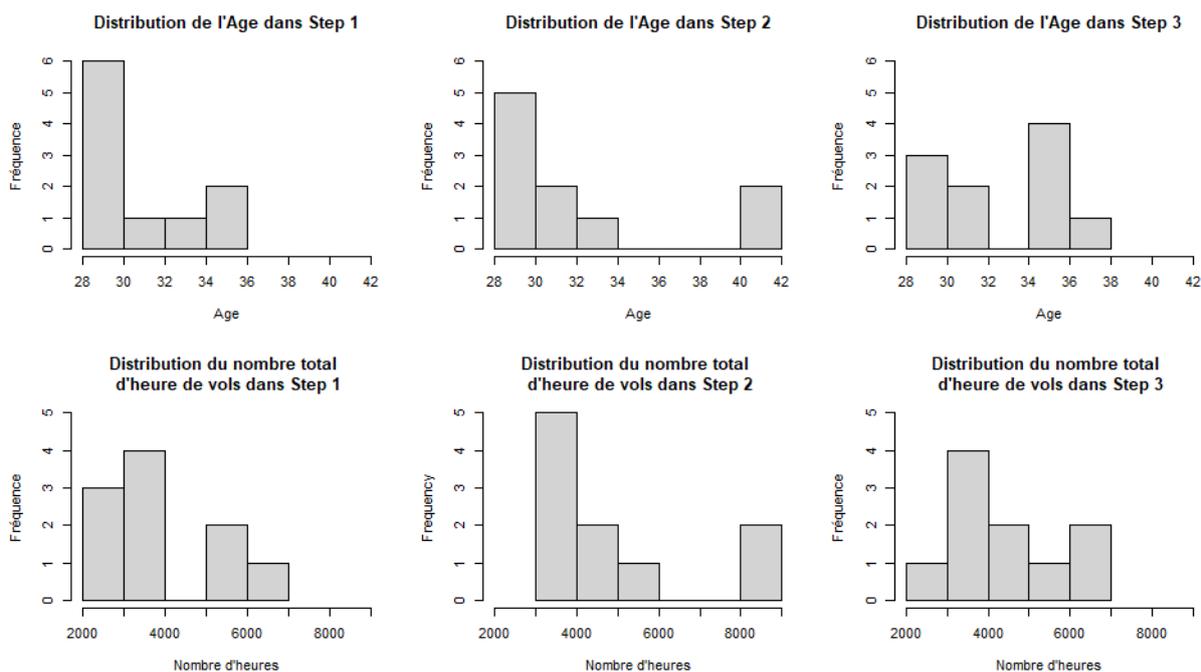
Graphique en boîte à moustaches : la « boîte » (rectangle gris) représente 50% des données comprises entre le 1<sup>er</sup> et 3<sup>ème</sup> quartile, la ligne noire au milieu de la boîte correspond à la médiane et les « moustaches » aux extrémités correspondent aux 1<sup>er</sup> et 99<sup>ème</sup> centiles, les points au-delà des moustaches correspondent aux données hors normes.

Les paramètres descriptifs pris en compte pour les trois populations apparaissent graphiquement homogènes en termes de distribution et variance. À l'exception du paramètre nb\_H\_12\_mois pour lequel la population Step2 semble avoir réalisé moins d'heures de vols dans les 12 derniers mois (Figure 67).

## 9.5.2 Validation des distributions des données démographiques

### 9.5.2.1 Distributions des paramètres Age et nb\_H\_tot

D'après la Figure 68, l'âge et l'expérience en nombre d'heure de pilotage ne répondent pas à une distribution normale pour les trois populations étudiées. Pour nous en assurer, nous avons effectué un test de Shapiro d'après l'algorithme de Royston (1995). D'après cet auteur, une valeur propre inférieure à 0,1 est significative, dans ce cas on ne peut pas rejeter l'hypothèse suivante : « L'échantillon ne suit pas une loi normale ».



**FIGURE 68 – DISTRIBUTIONS DE L'ÂGE ET DU NOMBRE D'HEURE TOTAL SUR LES TROIS POPULATIONS.**

Cependant, suite au test de Shapiro, nous mettons en évidence une distribution normale des deux variables étudiées pour Step3 et pour la variable « nombre d'heures total » dans Step1 (Tableau 21).

**TABLEAU 21 – VALEURS PROPRES DU TEST DE SHAPIRO POUR L'ÂGE ET LE NOMBRE D'HEURES DE VOL TOTAL**

Si cette valeur est supérieure à 0,1 la distribution est normale – vert, sinon il n'y a pas de distribution normale – orange.

	<b>STEP 1</b>	<b>STEP 2</b>	<b>STEP 3</b>
<b>AGE</b>	0.02086591	0.005703448	0.3276809
<b>NB_H_TOT</b>	0.12186996	0.007642047	0.1984650

La normalité n'étant pas établie pour toutes les populations, nous pouvons utiliser un test non paramétrique pour déterminer si les distributions sont similaires.

### 9.5.2.2 Test non-paramétrique, Wilcoxon pour *Age* et *nb\_H\_tot*

Nous effectuons un test non paramétrique afin de déterminer si les populations sont les mêmes médianes deux à deux. Le résultat des valeurs propres du test de Wilcoxon sont notés dans le tableau 23.

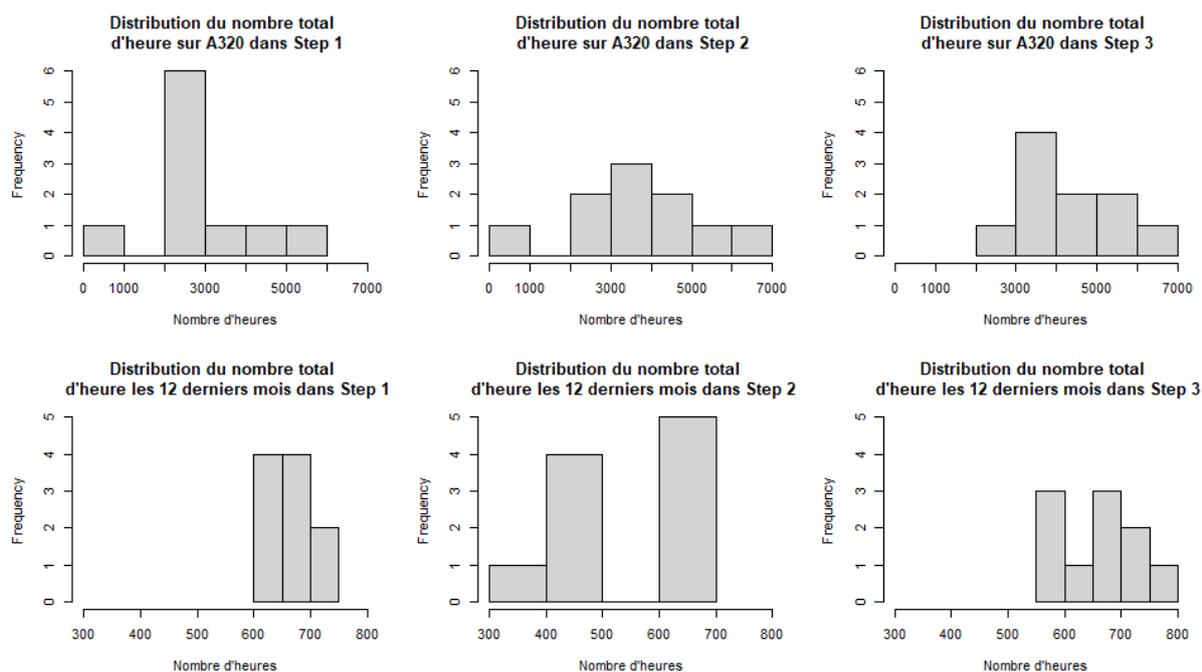
**TABLEAU 22 – VALEURS PROPRES DU TEST DE WILCOXON POUR L'ÂGE ET LE NOMBRE D'HEURES DE VOL TOTAL**  
(Si cette valeur est supérieure à 0,01 les deux échantillons ne sont pas significativement différents)

	<b>STEP 1/STEP 2</b>	<b>STEP 1/STEP 3</b>	<b>STEP 2/STEP 3</b>
<b>AGE</b>	0.68	0.68	0.38
<b>NB_H_TOT</b>	0.90	0.90	0.72

Nous observons que toutes les p-values sont largement supérieures au seuil alpha (1%), les échantillons sont donc identiques pour les variables *Age* et *nb\_H\_tot*. Les copilotes de Step1, Step2 et Step3 sont issus de la même population du point de vue de l'âge et l'expérience totale.

### 9.5.2.3 Distribution des paramètres *nb\_H\_A320* et *nb\_H\_12\_mois*

D'après la Figure 69, la représentation graphique de la distribution de l'âge et l'expérience en nombre d'heure de pilotage ne permet pas de statuer sur la normalité de la distribution.



**FIGURE 69 – DISTRIBUTIONS DE DU NOMBRE D’HEURE TOTAL SUR A320 ET DANS LES 12 DERNIER MOIS POUR LES TROIS POPULATIONS.**  
*(frequency – effectif en nombre de pilotes)*

Pour déterminer la normalité de la distribution de nos variables d’intérêt, nous effectuons un test de Shapiro. Les résultats permettent de révéler une distribution normale pour les deux variables et les 3 Steps (Tableau 23).

**TABLEAU 23 – VALEURS PROPRES DU TEST DE SHAPIRO POUR LE NOMBRE D’HEURE SUR A320 ET LE NOMBRE D’HEURE SUR LES 12 DERNIERS MOIS**  
 (Si cette valeur est supérieure à 0,1 la distribution est normale – vert)

	<b>STEP 1</b>	<b>STEP 2</b>	<b>STEP 3</b>
<b>NB_H_A320</b>	0.4425661	0.8775887	0.7115086
<b>NB_H_12_MOIS</b>	0.7271692	0.1820423	0.6591357

#### 9.5.2.4 Étude des variances et moyennes de *nb\_H\_A320* et *nb\_H\_12\_mois*

Afin de déterminer si les trois groupes sont issus de la même population, nous effectuons un test de Bartlett qui permet de vérifier l’homogénéité des variances de trois groupes qui suivent des lois normales.

**TABLEAU 24 – VALEURS PROPRES DU TEST DE BARTLETT POUR LE NOMBRE D’HEURE SUR A320 ET LE NOMBRE D’HEURE SUR LES 12 DERNIERS MOIS**

(Si cette valeur est supérieure à 0,01 les trois échantillons ont des variances homogènes – Vert, Sinon les variances sont différentes – Rouge)

	<b>STEP 1/STEP2/STEP 3</b>
<b>NB_H_A320</b>	0.5967
<b>NB_H_12_MOIS</b>	0.008318

Pour nb\_H\_A320 les trois populations présentent des variances similaires (car les p-value >>1%). Pour nb\_H\_12\_mois, les variances sont différentes (p-value <<1%), dans ce cas, nous effectuerons le test de Student qui tient compte de la différence de variances entre les populations.

Afin de valider l’égalité des moyennes entre les trois échantillons (comparaison des échantillons 2 à 2) nous effectuons un test de Student (Tableau 26).

**TABLEAU 25 – VALEURS PROPRES DU TEST DE STUDENT POUR LE NOMBRE D’HEURE SUR A320 ET LE NOMBRE D’HEURE SUR LES 12 DERNIERS MOIS**

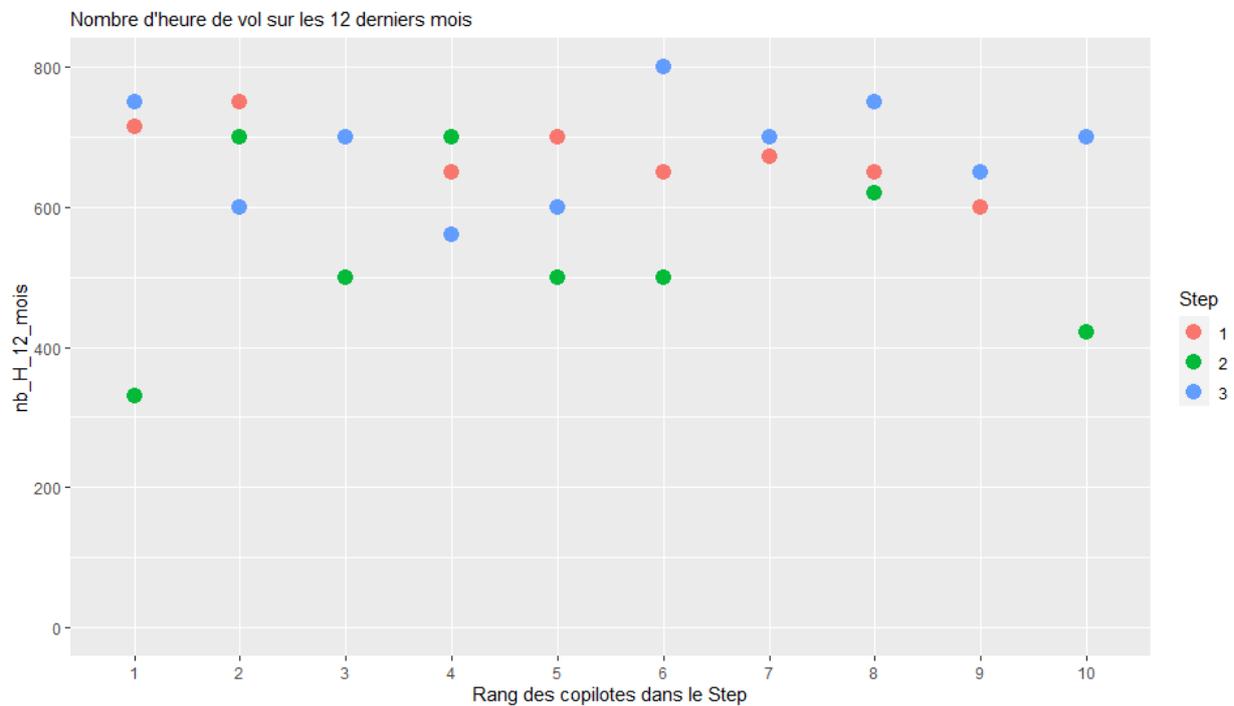
(Si cette valeur est supérieure à 0,01 les deux échantillons ne sont pas significativement différents)

	<b>STEP 1/STEP 2</b>	<b>STEP 1/STEP 3</b>	<b>STEP 2/STEP 3</b>
<b>NB_H_A320</b>	0.64	0.21	0.64
<b>NB_H_12_MOIS</b>	0.064	0.935	0.064

Pour alpha=1%, nous pouvons considérer que les trois populations ont la même expérience sur A320 *nb\_H\_A320* en moyenne et en variance.

Néanmoins sur les 12 derniers mois, le nombre d’heures de vols n’est pas strictement identiques entre des différentes populations. La population de Step 2 présente en moyenne 560h alors que les populations de Step 1 et Step 3 présentent en moyenne 680h de vol. Cette différence n’apparaît pas significative statistiquement (6.4% > 1%). Toutefois,

nous notons cet écart, il s'explique par le fait que deux individus ont un nombre d'heures faible (copilote 1 Step 2 : 330h, copilote 10 Step 2 : 421h) (Figure 70).



**FIGURE 70 – NOMBRES D’HEURE DE VOL SUR LES 12 DERNIERS MOIS POUR CHAQUE PILOTE DE CHAQUE STEP, ON REMARQUE QUE LE PREMIER (1) ET LE DERNIER (10) PILOTE DE STEP2 (VERT) SE DÉTACHENT LÉGÈREMENT DU RESTE DES PILOTES.**

### 9.5.3 Conclusion sur les trois populations

Les résultats de notre approche descriptive et statistique montrent que les trois groupes de copilotes sont issus de la même population.

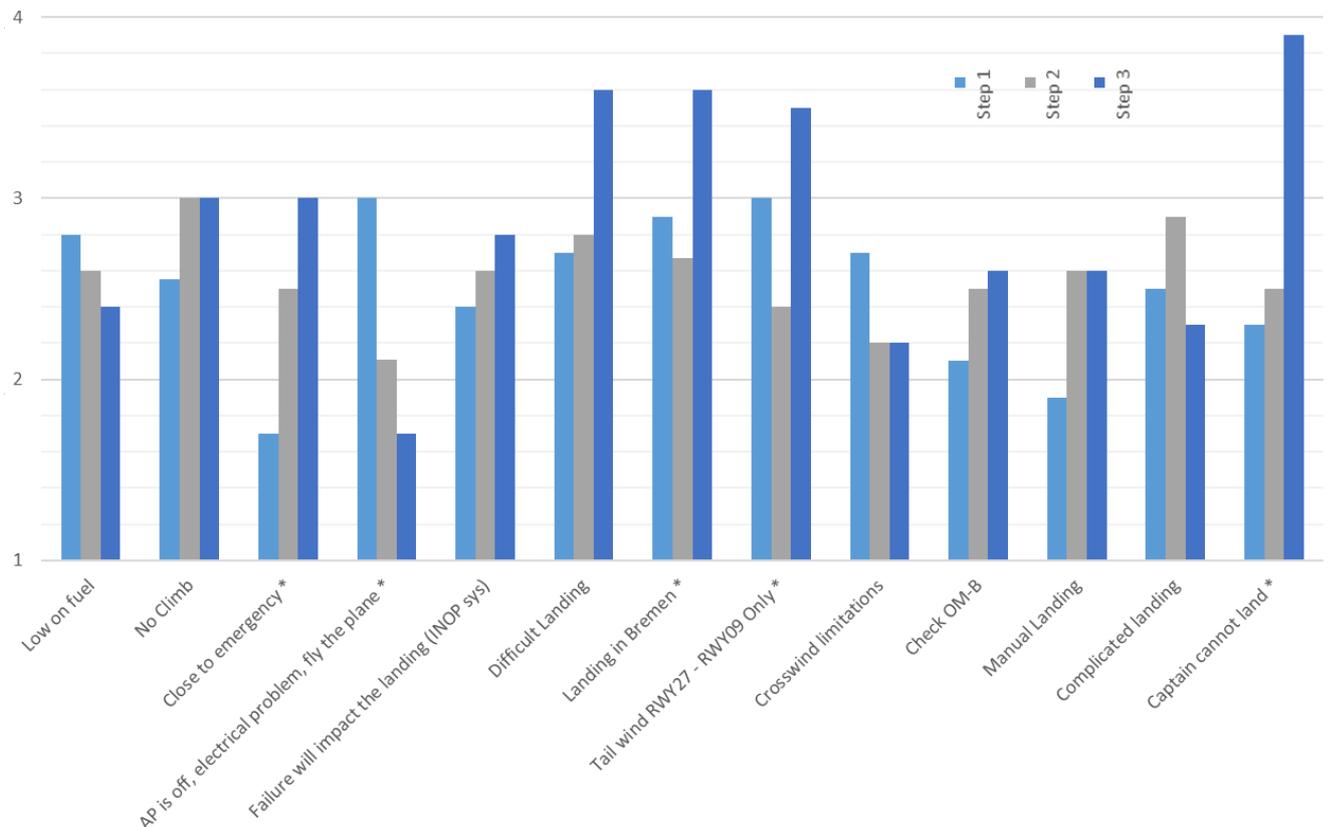
Ainsi, nous supposons que les différences en termes de qualité de la RM entre les trois expériences ne sont pas dues aux caractéristiques intrinsèques des populations.

## 9.6 Analyse comparative des différents Step.

Notre objectif est maintenant : 1) d’étudier les éventuelles différences entre les représentations mentales de Step1 et Step2 afin de d’évaluer l’influence du changement d’environnement de simulation sur nos résultats. 2) définir en quoi les améliorations apportées entre Step2 et Step3 sur la base des recommandations de Step1 permettent d’améliorer les représentations mentales et par conséquent la performance dans la pris de décision.

Concrètement, pour identifier les cas où la RM a été améliorée, nous utiliserons le test du rang signé de Wilcoxon dans des conditions d'échantillon non apparié avec une valeur propre de 5 %. Par cette approche, nous identifions cinq phases sur treize où la RM a évolué de manière significative entre au moins deux Steps (Figure 71) :

- Close to emergency (CloseEm)
- AP is off, electrical problem, fly the plane (APoff)
- Landing in Bremen (LandBremen)
- Tail wind RWY27 - RWY09 Only (TailWind)
- Captain cannot land (CaptNoLand)



**FIGURE 71 – COMPARAISON DES TROIS STEPS AU TRAVERS DES RM MOYENNE DES PILOTES PAR PHASE DE VOL.**

La valeur en abscisse correspond à la valeur de de la RM après conversion des couleurs (modalités) en valeurs numérique (4 correspondants à vert, 3 à bleu, 2 à orange et 1 à rouge). Ces valeurs ont pour objectif d'aider à se représenter les qualités « moyennées » des RM. Cette valeur n'entre pas en compte dans les analyses statistiques.

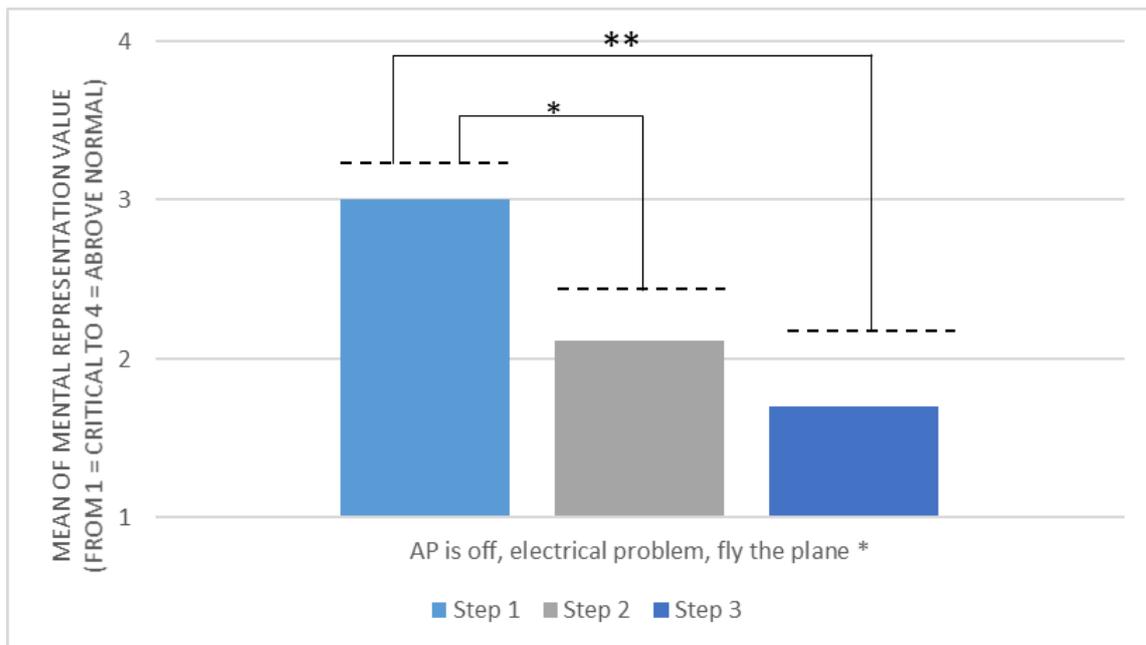
Lorsqu'une différence significative a été identifiée entre les Steps pour une phase donnée cette dernière est marquée d'un astérisque (\*).

Nous allons détailler chacune de ces phases.

#### 9.6.1 Phase : AP is off, electrical problem, fly the plane (APoff)

Nous commençons par traiter la phase "*AP is off, electrical problem, fly the plane*", (Figure 72) car c'est la seule phase où la RM se détériore lorsque l'on compare les expérimentations menées sur le simulateur AV2020 par rapport au cockpit *legacy*. Statistiquement, nous observons une différence entre Step1 et Step2&3, avec des valeurs propres pour le test de Wilcoxon de 0,003278 entre Step1 et Step2 et de 0,0006506 entre Step1 et Step3.

Lors de cette phase les copilotes doivent identifier que l'autopilote de l'avion se désactive au moment de la panne, et que les interfaces de pilotage du commandant de bord se désactivent également au même moment. Dans cette situation, le co-pilote doit prendre les commandes de l'avion et le piloter manuellement. Mais le commandant de bord (complice) demande, au cours des Step2&3, au copilote (sujet de l'expérience) de ne jamais prendre le contrôle de l'avion (simulateur) (du fait d'un problème de maniabilité du simulateur en vol manuel). De plus, l'alarme de déconnexion du pilote automatique (AP) informant de son état n'était pas présente lors de Step2&3. Ceci est l'explication la plus probable de la différence entre les Step1 et Step2&3 concernant la RM. Cette détérioration paraît donc liée à un problème de représentativité du simulateur utilisé. D'autant plus qu'il n'existe pas de différence significative entre Step2 et Step3.



**FIGURE 72 – DÉTAIL DE LA PHASE : "AP IS OFF, ELECTRICAL PROBLEM, FLY THE PLANE", COMPARAISON DES RM "MOYENNÉES" DES COPILOTES POUR CHACUN DES STEP. LES ASTÉRISQUE INDIQUENT LE NIVEAU DE SIGNIFICATIVITÉ DE LA VALEUR PROPRE DU TEST DE WILCOXON POUR L'ÉVALUATION DE L'ÉCART DES MÉDIANES, \* : P-VALUE < 1%, \*\* : P-VALUE < 0.1%.**

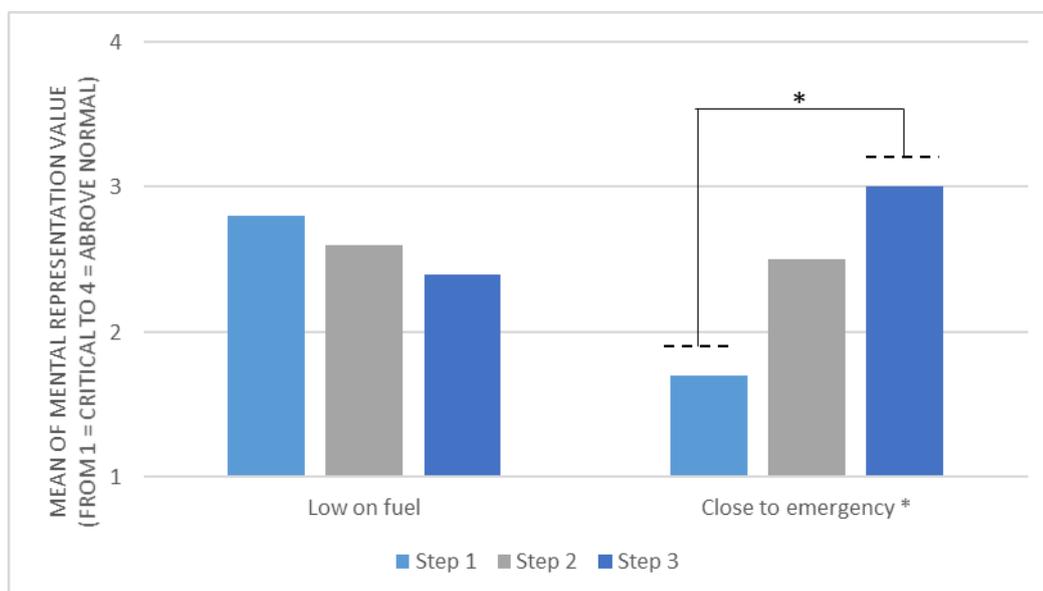
La valeur en abscisse correspond à la valeur de de la RM après conversion des couleurs (modalités) en valeurs numérique (4 correspondants à vert, 3 à bleu, 2 à orange et 1 à rouge). Ces valeurs ont pour objectif d'aider à se représenter les qualités « moyennées » des RM. Cette valeur n'entre pas en compte dans les analyses statistiques.

### 9.6.2 Phase : Close to emergency (CloseEm)

La première phase pour laquelle la RM mentale s'améliore est la phase "Close to emergency". Durant celle-ci, alors qu'il est supposé entamer une procédure de Go Around (c'est-à-dire une remise des gaz, pour se représenter pour l'atterrissage) le copilote doit comprendre que la faible quantité de carburant met l'équipage dans une situation critique et qu'ils doivent en avertir la tour de contrôle. La première phase du vol "Low on fuel" permet d'évaluer la compréhension de la quantité de carburant (dans l'absolu, sans lien avec les autres éléments en début de vol). Il est intéressant de noter que les représentations des copilotes des 3 Steps sont semblables au cours de cette phase ( Figure 73), il n'y a pas de différence statistique.

Toutefois, la phase "Close to emergency" présente des RM de bien meilleure qualité lors de Step 3 en comparaison à Step 1, la valeur propre est de 0.002983. En effet, lors de cette phase, la mesure de la RM du copilote par rapport au carburant s'améliore au moment où

il doit effectuer le *Go Around*, c'est-à-dire au moment où cette variable passe du statut de « à surveiller » à « nécessitant une action », en l'occurrence ici une planification d'action.

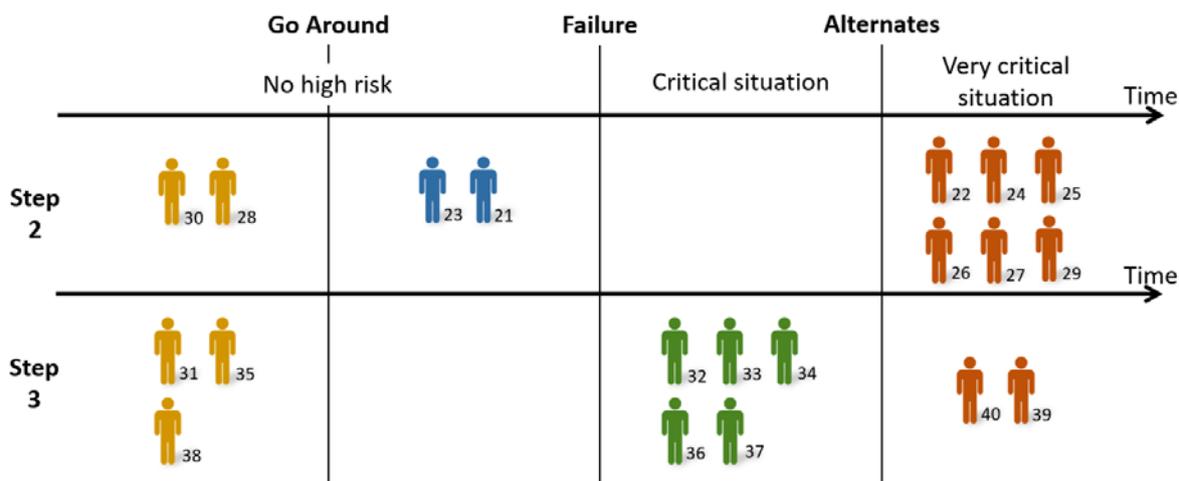


**FIGURE 73 – DÉTAIL DES PHASES "LOW ON FUEL" ET "CLOSE TO EMERGENCY", \* : VALEUR PROPRE < 1%.**

La valeur en abscisse correspond à la valeur de de la RM après conversion des couleurs (modalités) en valeurs numérique (4 correspondants à vert, 3 à bleu, 2 à orange et 1 à rouge). Ces valeurs ont pour objectif d'aider à se représenter les qualités « moyennées » des RM. Cette valeur n'entre pas en compte dans les analyses statistiques.

### 9.6.3 La compréhension de la criticité de la situation.

En croisant ces données avec le déroulement des événements, nous pouvons obtenir une représentation chronologique de la perception du niveau de carburant (Figure 74) en identifiant chaque copilote par phases du scénario. Lors de la première approche (avant le *GA*), le niveau de carburant n'est pas critique. En effet, au début du scénario, ils sont sur le point d'atterrir et le copilote sait qu'il a assez de carburant pour effectuer une remise des gaz si nécessaire. Le déroulé du scénario les oblige à faire un *Go Around*. Pendant celui-ci, une panne apparaît. Les procédures exigent du copilote de « piloter en priorité » avant de tenter la procédure de résolution de la panne. Ce n'est donc pas à ce moment-là que les nouvelles interfaces lui permettent de comprendre la situation critique concernant le carburant. Lorsque la situation commence à être (très) critique (entre la défaillance et l'évaluation des aéroports de détournement), nous observons que les interfaces de Step3 (en particulier les cercles orange et rouge), ont amélioré la RM du niveau de carburant.

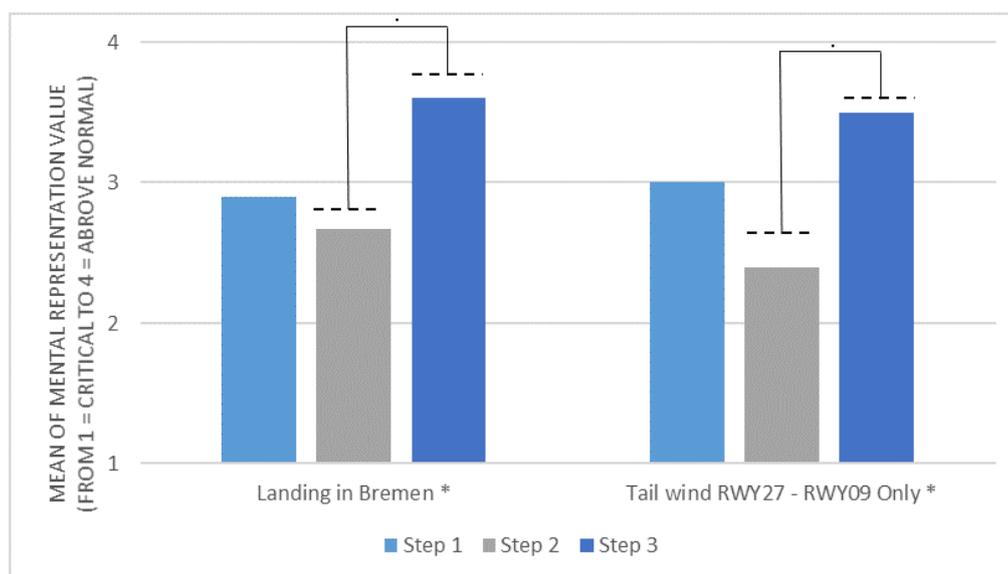


**FIGURE 74 – REPRÉSENTATION CHRONOLOGIQUE DU MOMENT OÙ LES COPILOTES CONSIDÈRENT QUE LE CARBURANT EST UNE VARIABLE QUI NÉCESSITE UNE ACTION IMMÉDIATE.**

Les copilotes qui prennent conscience que le niveau de carburant est bas uniquement après avoir évalué les aéroports de détournement (Alternates) sont en majorité informés de la situation par le commandant de bord.

Ceci est confirmé par les éléments traitant de la RM des aéroports disponibles (Figure 75).

#### 9.6.4 Phase : Landing in Bremen (LandBremen) et Tail wind RWY27 - RWY09 Only (TailWind)



**FIGURE 75 – DÉTAIL DES PHASES "LANDING IN BREMEN" ET "TAIL WIND RWY27 - RWY09 ONLY". : VALEUR PROPRE <5%.**

La valeur en abscisse correspond à la valeur de de la RM après conversion des couleurs (modalités) en valeurs numérique (4 correspondants à vert, 3 à bleu, 2 à Théodore Letouzé

orange et 1 à rouge). Ces valeurs ont pour objectif d'aider à se représenter les qualités « moyennées » des RM. Cette valeur n'entre pas en compte dans les analyses statistiques.

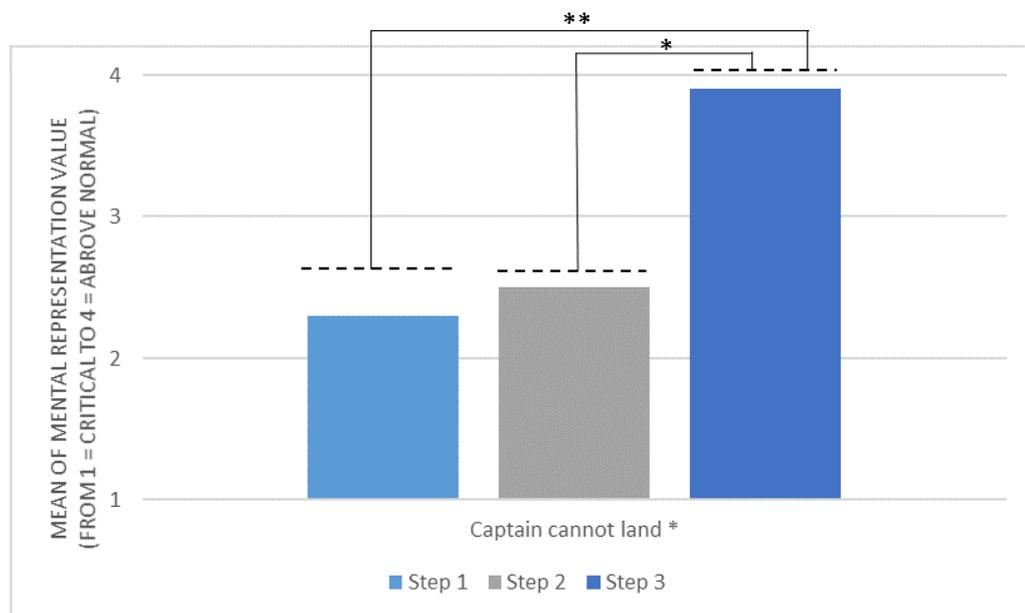
En plus de la représentation du carburant, les nouvelles interfaces utilisées lors de Step3 ont permis d'améliorer la représentation des aéroports disponibles (Figure 75) ( $p=0.04653$ ), identifiant ainsi Brême comme le seul aéroport possible pour l'atterrissage. Cette amélioration est également visible dans l'identification de la piste 09 comme étant la seule option ( $p= 0.04973$ ) (Figure 75). Mais nous devons garder à l'esprit que cette amélioration de la RM des pistes disponibles est très étroitement liée à une amélioration de la RM des conditions météorologiques.

L'hypothèse la plus probable pour expliquer l'amélioration de ces deux items est de considérer que les copilotes ont passé moins de temps à envisager des solutions inadéquates (réduction des possibles grâce aux cercles). De fait, les seules solutions probables ont pu être analysées en détail (autres aéroports à proximité, éliminés aussi rapidement, restent les deux pistes de Brême, la 27 et la 09). Les copilotes ont alors passé plus de temps à analyser ces deux options (pistes 27 et 09) et ont vérifié la météo et identifié rapidement la piste 09 comme seule option envisageable.

#### 9.6.5 Phase : Captain cannot land (CaptNoLand)

Un autre facteur à prendre en compte lors du choix de l'aéroport et de la piste est le fait que certains systèmes sont inopérants en raison de la panne. En effet, rappelons qu'à la fin du scénario, au moment où le pilote se prépare à prendre les commandes pour atterrir, sa vitre gèle et c'est au copilote d'effectuer manuellement cet atterrissage particulièrement complexe. Afin d'améliorer la RM de l'état réel de l'avion lorsqu'il est dans un état dégradé, une interface a été développée dans Step3. Elle permet au pilote de mieux comprendre les pannes et leurs répercussions. La phase "*Captain cannot land*" (Figure 76) est liée à la limitation : le capitaine ne peut pas atterrir à cause de la possibilité de formation de glace sur sa fenêtre. Cet indicateur nous permet de voir si les pilotes font le lien entre cette limitation et la panne qui a été expliquée précédemment par l'interface. L'amélioration apportée par cette interface est significative, autant dans le cas de Step1 ( $p=0.0006052$ ), que pour Step2 ( $p=0.006653$ ). Les pilotes gardent à l'esprit les limitations liées à la défaillance et font le lien entre la limitation et sa conséquence lorsque celle-ci

apparaît. Ce qui leur permet de prendre les commandes rapidement au moment de l'atterrissage, car ils sont préparés à cette éventualité depuis la panne.



**FIGURE 76 – DÉTAIL DE LA PHASE "CAPTAIN CANNOT LAND", \* : P-VALUE < 1%, \*\* : P-VALUE < 0.1%.**

## 9.7 Conclusions sur les IHM par rapport aux améliorations de RM.

Nous pouvons constater que les interfaces mises en œuvre permettent d'améliorer la RM dans la majorité des cas. Mais certains éléments de la RM des copilotes demeurent ou deviennent dégradés.

Prenons par exemple les cercles orange et rouge qui apparaissent sur la ND. Le cercle orange indique la distance de vol atteignable avec 30 min (1200 kg) de carburant restant dans les réservoirs. Lorsque les pilotes montent après le GA à 4000 pieds, il leur reste environ 1600 kg de carburant, soit 40 min de vol. Le cercle orange indique donc à ce moment la distance réalisable pour les 10 prochaines minutes, ce qui représente presque 35NM à 40NM. Or, à ce moment-là, ils sont à environ 7NM de Brême. L'échelle choisie pour l'affichage de la navigation à ce moment du vol se situe entre 5NM et 12NM (bien plus petite que le cercle). Le cercle orange est donc au-delà de l'échelle d'affichage, les copilotes ne le voient pas. La panne apparaît presque au même moment du vol, ce qui oblige les copilotes à rester concentrés entre l'écran ECAM (pour la compréhension et la résolution de la panne) et le PFD (pour piloter). L'écran de navigation présentant les

informations concernant le carburant (cercles) non visible dans cette phase du vol (Figure 77).



**FIGURE 77 – RAPPEL DE LA VUE DU ND EN DÉBUT DE SCÉNARIO, L'ELLIPSE ORANGE VA DISPARAITRE DANS QUELQUES MINUTES ET LE CERCLE ORANGE EST À PEINE VISIBLE MALGRÉ UNE ÉCHELLE TRÈS GRANDE.**

Les cercles orange/rouge permettent aux pilotes de déterminer quel est l'aéroport disponible et d'améliorer leur connaissance du niveau carburant, mais seulement au moment critique. La nouvelle IHM n'a pas permis de prendre conscience plus tôt dans le déroulé du scénario du niveau critique de carburant. Le cercle étant plus grand que la surface disponible sur l'écran ND, il n'était pas visible par les pilotes. L'IHM modifiée (Step3) apporte la bonne information améliorant la RM au moment critique de la prise de décision.

Si l'on considère les modifications apportées à l'interface sur la page des pannes et des systèmes inopérants, nous pouvons tirer plusieurs conclusions :

- La nouvelle page ECAM apporte une meilleure compréhension de la panne et de ses conséquences. Grâce à cela, les pilotes gardent l'information à l'esprit. Ils identifient d'un seul coup d'œil, en regardant les interfaces, tous les systèmes qui sont en panne.

- Cela améliore également le processus de calcul des performances d'atterrissage (LAPA) qui tient compte des pannes de l'avion. Mais le croisement de différentes sources d'information est encore mal compris (Vent latéral + manœuvrabilité de la roue sous le nez de l'avion + inversion du flux du moteur 1 non fonctionnel).
- Notons également que le fait de résoudre la panne via des cases à cocher directement sur l'écran permet de compléter rapidement la procédure. Mais ce changement de modalité d'interaction ne permet plus une bonne compréhension de la procédure par le second membre d'équipage. En effet, les copilotes ont l'habitude d'interpréter les actions réalisées par le pilote en identifiant les mouvements sur l'interface à des endroits précis de l'espace. Or ici tout se fait sur la même interface et les fonctions n'ont plus une place définie dans l'espace, qui serait facilement identifiable. Ils perdent ainsi une partie de la complexité de la procédure et donc de sa criticité.

Cette nouvelle IHM devrait également aider les pilotes à avoir une meilleure représentation de la météo, leur permettant de s'assurer que cette représentation colle à la réalité, notamment la météo au sol à l'aéroport de destination et aux escales. Le nouvel outil, qui présente les pistes disponibles, améliore leurs choix (réduction du temps de décision), mais 20% des pilotes ne comprennent pas la raison pour laquelle les pistes sont disponibles ou non (ce qui peut à terme réduire la confiance). Surtout si celles-ci ont changé au fil du temps entre deux contrôles.

Nous établissons qu'il existe une différence statistique significative entre les représentations mentales générées par les interfaces typiques des A320 *legacy* (d'origine) (Step1) et celles générées par l'interfaces type AV 2020 (Step2) mais également entre l'interface AV 2020 standard (Step 2) et celle « améliorées » (Step3) qui implémente nos recommandations d'interfaces.

## CONCLUSION

Les travaux de recherche menés dans le cadre de notre thèse de doctorat ont pour objectif l'étude des représentations mentales. Ces dernières procèdent d'images

intériorisées du monde. Nous les constituons afin de comprendre ce qui nous entoure, pour évaluer les effets et les conséquences des actions entreprises. Elles nous permettent de répondre automatiquement à certaines situations, ou au contraire de réfréner nos actes réflexes pour produire des comportements plus élaborés.

Pour mener à bien ce travail, nous avons choisi le contexte du domaine aéronautique et plus particulièrement de l'activité des pilotes de lignes. Ces derniers évoluent dans un environnement dynamique, où l'incertitude et le risque sont omniprésents. Pour y faire face, ils mettent en œuvre des stratégies d'adaptation et de compensation. Celles-ci varient d'un individu à l'autre en fonction du style cognitif de « coping » de chacun : ils acceptent de faire face à certains risques pour atteindre leurs objectifs, mais doivent également s'adapter aux risques inattendus, voire imprévisibles. Pour évoluer dans cet environnement, ils doivent en comprendre le fonctionnement, l'état, anticiper son évolution, se rappeler de ce qu'ils ont appris sur les éventuelles pannes (risques) qu'ils vont rencontrer et comment les résoudre.

Ces situations dynamiques, incertaines, risquées et à forte pression temporelle demandent au pilote de mobiliser toutes ses capacités cognitives. Chacune de ces capacités permet de traiter une partie de cette situation complexe. Néanmoins, elles présentent des limites qui affectent les possibilités d'adaptation. C'est, par exemple, le cas de la mémoire, de l'attention ou de l'anticipation. Ainsi, en dehors du champ de fonctionnement normal de ses facultés, le pilote se trouve dans un état dégradé. Il devient plus sensible aux perturbations de son environnement. Il perd sa résilience. L'état de la représentation mentale est un indicateur de l'état cognitif général d'un individu, mais il en est aussi l'un des déterminants.

In fine, ils doivent être en mesure de piloter l'avion en toutes circonstances et de le maintenir en état de fonctionnement nominal. Ils doivent être résilients face aux perturbations et apprendre de leurs erreurs. À cette fin, les pilotes doivent se construire une représentation mentale de la situation qui déterminera leur aptitude à la prise de décision. Ils doivent être attentifs à l'environnement et son évolution, mémoriser les caractéristiques de la situation, planifier les actions futures.

Au cours de notre apprentissage de la bibliographie, nous avons pu constater qu'il est difficile de décrire une représentation mentale. Nous avons démontré que les théories et méthodes issues de l'ingénierie cognitive et plus particulièrement des « human factor » anglo-saxons, ne sont pas suffisantes pour ce faire. De même, les méthodes associées aux différents modèles de prise de décision développés en ingénierie cognitive ne permettent pas une compréhension fine de la prise de décision.

Devant ce constat, nous nous sommes donné pour objectif de développer une méthodologie adaptée : MERIA. Elle permet l'analyse des représentations mentales des opérateurs et cela de manière chronologique, ce qui nous permet d'en suivre l'évolution y compris au sein d'un processus complexe. Grâce à cette méthode et aux différentes expériences de validation mises en œuvre, nous pouvons quantifier l'impact de telle ou telle interface sur les représentations mentales. Cette méthode présente l'avantage non négligeable de permettre une évaluation écologique de l'activité cognitive de l'individu. Ainsi, nous pouvons évaluer l'usage d'une interface par rapport à une activité prescrite, mais également la comparer à d'autres interfaces. Il est possible d'en déceler les lacunes et d'identifier les sources responsables (souvent en termes d'IHM). C'est pourquoi notre méthode est particulièrement bien adaptée aux besoins de prototypage rapide pour la conception de nouvelles interfaces. Elle est applicable en environnement de recherche comme en milieu industriel pour la conception de produits.

Précisons toutefois que cet outil est synthétique et utilise un vocabulaire très technique. La lisibilité n'est donc accessible que pour un expert du domaine tant pour la lecture des résultats d'analyses que pour leur application. La vulgarisation des termes utilisés dans le modèle le rendrait évidemment plus accessible aux non-experts, mais compliquerait la modélisation et surtout réduirait son caractère synthétique.

Par ailleurs, il faut noter que le « coût » de l'application de cette méthode est non négligeable, même pour un expert. La création du scénario nécessite des compétences avancées (aéronautique comme dans la conduite d'expérimentation). Mais la véritable complexité de la méthode vient de l'aspect « chronophage » des observations, des entretiens et de leur traitement. D'autant plus que l'analyse nécessite l'implication d'au moins deux experts en facteur humain.

Afin de valider la méthode MERIA, nous avons procédé à une série de 3 expérimentations menées en simulateur. Elles s'appuient sur un cas d'usage illustré par un scénario complexe d'atterrissage à l'aéroport de Brême (Allemagne). Elle repose sur trois cohortes de 10 copilotes. La première expérience a mis en jeu les équipages dans le cadre d'un cockpit d'Airbus A320 « legacy » (Step1). Grâce à l'application de MERIA, à l'issue de cette première étape, nous avons pu analyser les représentations mentales des copilotes et en tirer des préconisations nous permettant de développer (partenariat Thales Avionics) de nouvelles interfaces Homme-Système supposées améliorer le processus de prise de décision.

Puis, nous avons conduit deux autres expérimentations (Step2 et Step3) sur un simulateur (AV2020-Thales) dans lequel nous avons intégré des modifications d'IHS sur la base des préconisations issues de Step1. Par une approche descriptive puis statistique des résultats, nous avons pu démontrer que cette nouvelle IHM permettait d'améliorer la représentation mentale des pilotes. Par exemple : 1) la nouvelle IHM aide les pilotes à avoir une meilleure représentation de la météo, notamment la météo au sol à l'aéroport de destination et aux escales ; 2) le nouvel outil, qui présente les pistes disponibles, améliore leurs capacité de choix (réduction du temps de décision) ; 3) Le gestion du carburant est mieux prise en compte grâce à la matérialisation du temps et la distance de vol restant possible ; 4) La compréhension des pannes est améliorée grâce à l'explication de leurs impacts sur la situation.

Ainsi, nos travaux apportent un nouvel outil d'étude des processus cognitifs aux praticiens du domaine. Nous considérons que MERIA contribue à remplir un vide méthodologique dans l'analyse des processus cognitifs.

## PERSPECTIVES

L'amélioration de notre méthode et la démonstration de son intérêt pour des contextes expérimentaux ou opérationnels variés constituent l'un des enjeux à venir. Ainsi, plusieurs projets auxquels nous sommes associés nous permettront d'explorer de nouveaux domaines d'application : conduite automobile de véhicules autonomes (projet

SUAAVE, H2020), maintenance aéronautique (Projet HDG), contrôle aérien des opérations militaires (projet ANTICIPE), collaboration humain-intelligence artificielle (Projet Peh-PITE), réduction des équipages et assistance au Pilote Flying (Projet CO2TEAM, H2020-Clensky2), etc.

A titre d'exemple, le projet Co2Team fait partie du programme CleanSky 2 de l'Union Européenne. Il a pour objectif d'évaluer les limites et opportunités du concept de SPIC/SPO (Single Pilot In Command/Single Pilot Operation). Autrement dit, la problématique est de définir les contraintes et limites en ce qui concerne la prise de décision pour le pilotage d'un avion de ligne, dans le cas où il n'y a plus qu'un seul pilote aux commandes, voire dans le cas où n'y a qu'un pilote dans l'avion. C'est pourquoi le projet a pris le parti de tester la possibilité de pallier l'absence de copilote par le biais d'une assistance de type système expert ou intelligence artificielle.

Ce projet donne l'opportunité d'améliorer la méthode MERIA en rationalisant le recueil de données. Par exemple, nous envisageons de standardiser la grille d'analyse avant l'expérimentation, en fonction de l'activité prescrite. Il sera également intéressant d'assister la récolte des données et la modélisation de la représentation mentale par le biais d'un outil logiciel. Nous voudrions également automatiser le traitement des résultats pour obtenir plus rapidement les éléments de connaissance concernant les liens entre les interfaces et RM.

# BIBLIOGRAPHIE

- Adams, M. J., Tenney, Y. J., & Pew, R. W. (1995). Situation awareness and the cognitive management of complex systems. *Human Factors*, 37(1), 85-104. <https://doi.org/10/c3bxwn>
- Altrichter, H. (2008). *Teachers investigate their work : An introduction to the methods of action research* (2nd ed). London ; New York: Routledge.
- Amalberti, R. (1996). La conduite de systèmes à risques. *Le Travail Humain. PUF, Paris*, 24, 26.
- Amalberti, R. (2001). La maîtrise des situations dynamiques. *Psychologie française*, 46(2), 107-118.
- Amalberti, R., & Hoc, J.-M. (1998). Analyse des activités cognitives en situation dynamique : Pour quels buts? Comment? *Le travail humain*, 209-234.
- Anaut, M. (2005). Le concept de résilience et ses applications cliniques. *Recherche en soins infirmiers, N° 82*(3), 4-11.
- Annett, J. (2004). Hierarchical Task Analysis. In Neville A. Stanton, A. Hedge, K. Brookhuis, E. Salas, & H. W. Hendrick (Éds.), *Handbook of human factors and ergonomics methods* (p. 329-337). Boca Raton, FL: CRC press.
- Awh, E., & Pashler, H. (2000). Evidence for split attentional foci. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 26(2), 834. <https://doi.org/10/cw895b>
- Baddeley, A. (2000). The episodic buffer : A new component of working memory? *Trends in cognitive sciences*, 4(11), 417-423. <https://doi.org/10/d4tmh>
- Baddeley, A. (2001). The magic number and the episodic buffer. *Behavioral and Brain Sciences*, 24(1), 117-118. <https://doi.org/10/dtwrxc>
- Baddeley, A. D., & Hitch, G. (1974). Working Memory. In G. H. Bower (Éd.), *Psychology of Learning and Motivation* (Vol. 8, p. 47-89). Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0079-7421\(08\)60452-1](https://doi.org/10.1016/S0079-7421(08)60452-1)
- Baddeley, A., Logie, R., Bressi, S., Sala, S. D., & Spinnler, H. (1986). Dementia and working memory. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 38(4), 603-618. <https://doi.org/10/cxtwpm>

- Bailly, B. (2004). *Conscience de la situation des conducteurs : Aspects fondamentaux, méthodes, et application pour la formation des conducteurs* (PhD Thesis). Université Lumière-Lyon II.
- Bartlett, F. C. (1932). *Remembering : A study in experimental and social psychology* (p. xix, 317). New York, NY, US: Cambridge University Press.
- Beau, C. (2011). *Du Calepin visuo-spatial aux traitements visuo-spatiaux de l'information. Résolution de l'épreuve de Corsi par des patients Alzheimer* (Phdthesis, Université de Provence - Aix-Marseille I). Université de Provence - Aix-Marseille I. Consulté à l'adresse <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00645278>
- Bellet, T. (1998). *Modélisation et simulation cognitive de l'opérateur humain : Une application à la conduite automobile* (These de doctorat, Paris 5). Paris 5. Consulté à l'adresse <https://www.theses.fr/1998PA05H032>
- Bellet, T., Bailly, B., Mayenobe, P., & Georgeon, O. (2007). Cognitive Modelling and Computational Simulation of Drivers Mental Activities. In *Modelling Driver Behaviour in Automotive Environments* (p. 315-343). Springer, London. [https://doi.org/10.1007/978-1-84628-618-6\\_18](https://doi.org/10.1007/978-1-84628-618-6_18)
- Bellet, T., Bailly-Asuni, B., Mayenobe, P., & Banet, A. (2009). A theoretical and methodological framework for studying and modelling drivers' mental representations. *Safety Science*, 47(9), 1205-1221. <https://doi.org/10/fbp75c>
- Ben Azouz, O., Dellagi, L., Kebir, O., & Tabbane, K. (2009). The concept of attention. *La Tunisie Medicale*, 87(10), 680-684.
- Bey, C. (2016). *Gestion des ressources cognitives et stratégies d'adaptation court terme chez les pilotes d'aéronefs* (PhD Thesis, Bordeaux). Bordeaux. Consulté à l'adresse <http://www.theses.fr/2016BORD0428>
- Blanc, B. L. (2018). Cognition et cognitique. *Hermes, La Revue*, n° 80(1), 37-38.
- Blättler, C., Ferrari, V., Didierjean, A., & Marmèche, E. (2011). Representational momentum in aviation. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 37(5), 1569-1577. <https://doi.org/10.1037/a0023512>
- Bowlby, J. (1969). *Attachment and loss*.
- Brannick, M. T., Salas, E., & Prince, C. (1997). *Team performance assessment and measurement : Theory, methods, and applications* (p. xii, 370). Mahwah, NJ, US:

<https://doi.org/10.4324/9781410602053>

- Broadbent, D. E. (1957). A mechanical model for human attention and immediate memory. *Psychological review*, 64(3), 205. <https://doi.org/10/d5srnr>
- Broadbent, D. E. (1958). *Perception and communication*. Elmsford, NY, US. Pergamon Press. <http://dx.doi.org/10.1037/10037-000>.
- Cadet, B., & Kouabénan, D. R. (2005). Évaluer et modéliser les risques : Apports et limites de différents paradigmes dans le diagnostic de sécurité. *Le travail humain*, Vol. 68(1), 7-35. <https://doi.org/10/bgksch>
- Cahour, B. (2010). 11. Émotions, affects et confort comme nouveaux déterminants de l'activité et de l'usage. In G. Valléry, M.-C. Le Port, & M. Zouinar, *Ergonomie, conception de produits et services médiatisés* (p. 273). Presses Universitaires de France. <https://doi.org/10.3917/puf.lepo.2010.01.0273>
- Carreras, O., Cellier, J.-M., Valax, M.-F., & Terrier, P. (2001). Ajustement temporel à la dynamique des situations. *Psychologie Française*, 46(2), 119-129.
- Castelli, I., Baglio, F., Blasi, V., Alberoni, M., Falini, A., Liverta-Sempio, O., ... Marchetti, A. (2010). Effects of aging on mindreading ability through the eyes : An fMRI study. *Neuropsychologia*, 48(9), 2586-2594. <https://doi.org/10/fb7jqh>
- Cellier, J.-M. (1996). Exigences et gestion temporelle dans les environnements dynamiques. In J.-M. Cellier, V. de Keyser, & C. Valot (Éds.), *La gestion du temps dans les environnements dynamiques* (p. 19-48). Paris: Presses Universitaires de France.
- Chalandon, X. (2007). *Conscience de la situation : Invariants internes et invariants externes* [Research Report]. Cnam. Consulté à l'adresse Cnam website: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00824020>
- Chalandon, X. (2013). *Conscience de la situation : Invariants internes et invariants externes*.
- Chapon, A., Bruyas, M., Lelekov-Boissard, T., Letisserand, D., Deleurence, P., Chanut, O., ... Garcia-Larrea, L. (2004). *Conséquence de l'utilisation des nouvelles technologies de l'information et de la communication pendant la conduite automobile : Rapport final COUNTIC*. Consulté à l'adresse <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00546233>
- Chartier, D., & Lautrey, J. (1992). Peut-on apprendre à connaître et à contrôler son propre fonctionnement cognitif? *Orientation Scolaire et Professionnelle (L')*, 21(1), 27-46.

- Chauvin, C., Letirand, F., & Delhomme, P. (2007). Corrélats sociocognitifs de la prise de décision en situation d'interaction dynamique. *Le travail humain*, Vol. 70(1), 33-65. <https://doi.org/10/dc2447>
- Cherry, E. C. (1953). Some Experiments on the Recognition of Speech, with One and with Two Ears. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 25(5), 975-979. <https://doi.org/10/d4m87v>
- Choi, S. (2005). Universal Design : A Practical Tool For a Diverse Future. *International Journal of the Diversity*, 6, 116-124.
- Clément, A., Marmier, F., Kamissoko, D., Gourc, D., Wioland, L., Govaere, V., & Cegarra, J. (2018). Robustesse, résilience : Une brève synthèse des définitions au travers d'une analyse structurée de la littérature. *MOSIM'18 - 12ème Conférence internationale de Modélisation, Optimisation et SIMulation*, 8. Toulouse, France: ISAE and IMT Mines Albi. Consulté à l'adresse <https://hal-mines-albi.archives-ouvertes.fr/hal-01852093>
- Cohen, J. (1960). A Coefficient of Agreement for Nominal Scales. *Educational and Psychological Measurement*, 20(1), 37-46. <https://doi.org/10/dghsrr>
- Condorcet, J.-A.-N. de C. (1785). *Essai sur l'application de l'analyse à la probabilité des décisions rendues à la pluralité des voix, par M. le marquis de Condorcet, ...* Paris: Impr. royale.
- Conrath, D. W. (1967). Organizational Decision Making Behavior under Varying Conditions of Uncertainty. *Management Science*, 13(8), B487-B500. JSTOR. <https://doi.org/10/drbrv5w>
- Conway, M. A. (1997). *Recovered memories and false memories*. Oxford University Press on Demand.
- Cowan, N. (1993). Activation, attention, and short-term memory. *Memory & Cognition*, 21(2), 162-167. <https://doi.org/10.3758/BF03202728>
- De Battisti, F., Salini, S., & Crescentini, A. (2006). Statistical Calibration of Psychometric Test. *Statistica & Applicazioni*, 4(2), 1-25.
- Decety, J. (2010). The Neurodevelopment of Empathy in Humans. *Developmental Neuroscience*, 32(4), 257-267. <https://doi.org/10/cx8q36>
- Denis, M. (1989). *Image et cognition* (1. éd). Paris: Presses universitaires de France.

- Deutsch, J. A., & Deutsch, D. (1963). Attention : Some theoretical considerations. *Psychological Review*, 70(1), 80-90. <https://doi.org/10/dgtnmv>
- Diamond, A. (2013). Executive Functions. *Annual Review of Psychology*, 64(1), 135-168. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-113011-143750>
- Duncan, R. B. (1972). Characteristics of organizational environments and perceived environmental uncertainty. *Administrative science quarterly*, 313-327. <https://doi.org/10/d3k2mv>
- Durso, F. T., & Gronlund, S. D. (1999). Situation awareness. *Handbook of applied cognition*, 283-314.
- Durso, F. T., Hackworth, C. A., Truitt, T. R., Crutchfield, J., Nikolic, D., & Manning, C. A. (1998). Situation Awareness as a Predictor of Performance for En Route Air Traffic Controllers. *Air Traffic Control Quarterly*, 6(1), 1-20. <https://doi.org/10.2514/atcq.6.1.1>
- Duval, C., Piolino, P., Bejanin, A., Laisney, M., Eustache, F., & Desgranges, B. (2011). La théorie de l'esprit : Aspects conceptuels, évaluation et effets de l'âge. *Revue de neuropsychologie*, 3(1), 41-51. <https://doi.org/10/gfjx3n>
- Edwards, T. (2013). *Human performance in air traffic control* (Thesis (University of Nottingham only), University of Nottingham). University of Nottingham. Consulté à l'adresse <http://eprints.nottingham.ac.uk/28623/>
- Ehrlich, M.-F., Tardieu, H., & Cavazza, M. (1993). *Les Modèles mentaux : Approche cognitive des représentations*. Paris: Masson ;
- Endsley, M. R. (1988). Situation awareness global assessment technique (SAGAT). *Aerospace and Electronics Conference, 1988. NAECON 1988., Proceedings of the IEEE 1988 National*, 789-795. IEEE.
- Endsley, M. R. (1993). A survey of situation awareness requirements in air-to-air combat fighters. *The International Journal of Aviation Psychology*, 3(2), 157-168. <https://doi.org/10/c6t2w3>
- Endsley, M. R. (1995). A taxonomy of situation awareness errors. *Human factors in aviation operations*, 3(2), 287-292.
- Endsley, M. R. (2000). Direct measurement of situation awareness : Validity and use of SAGAT. *Situation awareness analysis and measurement*, 10, 14.

- Endsley, M. R., Hoffman, R., Kaber, D., & Roth, E. (2007). Cognitive Engineering and Decision Making : An Overview and Future Course. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 1(1), 1-21. <https://doi.org/10.1177/155534340700100101>
- Ericsson, K. A., & Kintsch, W. (1995). Long-term working memory. *Psychological review*, 102(2), 211. <https://doi.org/10/dcbb25>
- Eriksen, C. W., & St James, J. D. (1986). Visual attention within and around the field of focal attention : A zoom lens model. *Perception & Psychophysics*, 40(4), 225-240. <https://doi.org/10/chcgjq>
- Eustache, F., & Desgranges, B. (2003). Concepts et modèles en neuropsychologie de la mémoire : Entre théorie et pratique clinique. *Évaluation et prise en charge des troubles mnésiques. Solal. Marseille*, 9-45.
- Eustache, Francis, & Desgranges, B. (2010). *Les chemins de la mémoire*. Paris: Pommier.
- Eyrolle, H., Mariné, C., & Mailles, S. (1996). La simulation des environnements dynamiques : Intérêts et limites. In Cellier, JM., De Keyser, V., & Valot, C. (Éds.), *La gestion du temps dans les environnements dynamiques*. (p. 103-121). Paris: Presses Universitaires de France.
- Fillmore, C. J. (1977). *Scenes-and-frames-semantics*. A. Zampolli (ed.) *Linguistic Structures Processing* (pp. 55-81). North-Holland: Amsterdam.
- Flach, J. M. (2015). Situation awareness : Context matters! A commentary on Endsley. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 9(1), 59-72.
- Flach, J. M., Tanabe, F., Monta, K., Vicente, K. J., & Rasmussen, J. (1998). An Ecological Approach to Interface Design. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 42(3), 295-299. <https://doi.org/10/fxjs5j>
- Flavell, J. H. (1976). Metacognitive Aspects of Problem Solving. *The nature of intelligence*, 232.
- Fleming, M., Flin, R., Mearns, K., & Gordon, R. (1998). Risk perceptions of offshore workers on UK oil and gas platforms. *Risk Analysis*, 18(1), 103-110. <https://doi.org/10/b65p3k>
- Frith, C. d., Wolpert, D. m., Frith, U., & Frith, C. D. (2003). Development and neurophysiology of mentalizing. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 358(1431), 459-473. <https://doi.org/10/b3rv9w>

- Garniez, C., & Sauvé, L. (1999). Apport de la théorie des représentations sociales à l'éducation relative à l'environnement – Conditions pour un design de recherche. *Éducation relative à l'environnement : Regards - Recherches - Réflexions*, 1, 65-77.
- Gibson, J. J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Boston: Houghton Mifflin.
- Giddens, A. (1999). Risk and responsibility. *The modern law review*, 62(1), 1-10.
- Grau, J. Y., Menu, J. P., & Amalberti, R. (1996). La conscience de la situation en aéronautique de combat. *Situation Awareness: Limitations and Enhancement in the Aviation Environment*, 9.
- Guilbert, L., & Lancry, A. (2007). L'analyse des activités des cadres : L'intérêt de la triangulation des méthodes. *Le travail humain*, 70(4), 313-342. <https://doi.org/10/fm327w>
- Helmreich, R. L., Merritt, A. C., & Wilhelm, J. A. (1999). The evolution of Crew Resource Management training in commercial aviation. *The International Journal of Aviation Psychology*, 9(1), 19-32. <https://doi.org/10/fk5tq4>
- Hoc, J.-M. (1987). *Psychologie cognitive de la planification*. Presses universitaires de Grenoble.
- Hoc, J.-M. (1996). *Supervision et contrôle de processus: La cognition en situation dynamique*. Grenoble, France: Presses universitaires de Grenoble.
- Hoc, J.-M., & Amalberti, R. (1995). Diagnosis : Some theoretical questions raised by applied research. *Current psychology of cognition*, 14(1), 73-101.
- Hoc, J.-M., Young, M. S., & Blosseville, J.-M. (2009). Cooperation between drivers and automation : Implications for safety. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 10(2), 135-160. <https://doi.org/10/cp8dxd>
- Hollnagel, E. (2011). RAG-The resilience analysis grid. *Resilience engineering in practice. A guidebook*. Farnham, UK: Ashgate.
- Hollnagel, E. (2012). *FRAM, the functional resonance analysis method : Modelling complex socio-technical systems*. Ashgate Publishing, Ltd.
- Hollnagel, E., Mancini, G., & Woods, D. D. (Éds.). (1988). *Cognitive engineering in complex dynamic worlds*. London ; San Diego: Academic Press Professional, Inc.
- Hollnagel, E., & Woods, D. D. (1983). Cognitive Systems Engineering : New wine in new bottles. *International Journal of Man-Machine Studies*, 18(6), 583-600. <https://doi.org/10/dzmpjs>

- Hynes, C. A., Baird, A. A., & Grafton, S. T. (2006). Differential role of the orbital frontal lobe in emotional versus cognitive perspective-taking. *Neuropsychologia*, 44(3), 374-383. <https://doi.org/10/ddxhzs>
- Ibos, G. (2009). *Orientation volontaire de l'attention visuelle chez l'homme et le macaque Rhésus* (Phdthesis, Université Claude Bernard - Lyon I). Université Claude Bernard - Lyon I. Consulté à l'adresse <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00653876>
- Inkinen, H. (2016). Review of empirical research on knowledge management practices and firm performance. *Journal of knowledge management*.
- International Civil Aviation Organization. (2020). *2020 Annual ICAO Safety Report* (p. 64). Montréal, Quebec, Canada. Consulté à l'adresse [https://www.icao.int/safety/Documents/ICAO\\_SR\\_2020\\_final\\_web.pdf](https://www.icao.int/safety/Documents/ICAO_SR_2020_final_web.pdf)
- James, W. (1890). Attention. In *American Science Series - Advanced Course: Vol. 1. The principles of psychology* (Henry Holt and Company, p. 403-404). New York.
- Johnson-Laird, Philip N. (1983). A computational analysis of consciousness. *Cognition & Brain Theory*.
- Johnson-Laird, Philip Nicholas, & Byrne, R. M. J. (1991). *Deduction* (p. xii, 243). Hillsdale, NJ, US: Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Kahneman, D. (1973). *Attention and Effort*. Englewood Cliffs, N.J: Prentice-Hall.
- Kalbe, E., Schlegel, M., Sack, A. T., Nowak, D. A., Dafotakis, M., Bangard, C., ... Kessler, J. (2010). Dissociating cognitive from affective theory of mind : A TMS study. *Cortex*, 46(6), 769-780. <https://doi.org/10/dvjvtf>
- Kantowitz, B. H., & Knight Jr, J. L. (1976). Testing tapping timesharing, II: Auditory secondary task. *Acta Psychologica*, 40(5), 343-362. <https://doi.org/10/bdnbkv>
- Kieras, D. (1997). A guide to GOMS model usability evaluation using NGOMSL. In *Handbook of human-computer interaction* (p. 733-766). Elsevier.
- Kirwan, B., Wies, M., Charles, R., Dormoy, C.-A., Letouze, T., Lemkadden, A., ... Schmidt-Moll, C. (2019). Charting the Edges of Human Performance. *MATEC Web of Conferences*, 304, 06007. <https://doi.org/10/ghgp78>
- Klein, G. A. (1989). *Recognition-primed decisions*. National Emergency Training Center.
- Klein, G. A. (1993). A recognition-primed decision (RPD) model of rapid decision making. *Decision making in action: Models and methods*, 5(4), 138-147.
- Knight, F. H. (1971). *Risk, uncertainty and profit, 1921*. Library of Economics and Liberty.

- Koella, W. P. (1982). A modern neurobiological concept of vigilance. *Experientia*, 38(12), 1426-1437. <https://doi.org/10/dkrsk5>
- Kouabenan, D. R. (2007). Des facteurs structurants aux biais ou illusions dans la perception des risques. In D. R. Kouabenan, B. Cadet, & D. Herman, *Psychologie du risque identifier, évaluer, prévenir* (De Boeck Université, p. 126-145). Bruxelles.
- LaBerge, D. (1983). Spatial extent of attention to letters and words. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 9(3), 371. <https://doi.org/10/cs7nhk>
- Ladouceur, R., Gosselin, P., & Dugas, M. J. (2000). Experimental manipulation of intolerance of uncertainty: A study of a theoretical model of worry. *Behaviour Research and Therapy*, 38(9), 933-941. <https://doi.org/10/dh9xm7>
- Lakoff, G., & Johnson, M. (1980). Conceptual Metaphor in Everyday Language. *The Journal of Philosophy*, 77(8), 453-486. <https://doi.org/10/cbx4nh>
- Lancry, A. (2007). Incertitude et stress. *Le travail humain*, 70(3), 289-305. Cairn.info. <https://doi.org/10/bkn3sg>
- Lazarus, R. S., & Folkman, S. (1984). *Stress, appraisal, and coping*. Springer publishing company.
- Leplat, J. (2006). La notion de régulation dans l'analyse de l'activité. *Perspectives interdisciplinaires sur le travail et la santé*, (8-1). <https://doi.org/10/gf7tbm>
- Letouzé, T., Créno, L., Diaz-Pineda, J., Dormoy, C.-A., Hourlier, S., & André, J.-M. (2020). Mental Representation Impact Analysis (MERIA), a method for analyzing mental representations for the design of HMI. A case study in aeronautics. *Le travail humain*, Vol. 83(1), 61-89. <https://doi.org/10/ghgp7w>
- L'image opérative : Actes d'un séminaire (1-5 juin 1981) et recueil d'articles de D. Ochanine.* (1981).
- Lini, S. (2013). *L'anticipation et sa représentation dans les IHS en aéronautique civile.* Bordeaux 1.
- Lipshitz, R., & Shaul, O. B. (1997). Schemata and mental models in recognition-primed decision making. In *Expertise: Research and applications. Naturalistic decision making* (p. 293-303). Hillsdale, NJ, US: Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Lithfous, S., Després, O., & Dufour, A. (2018). *Le vieillissement neurodégénératif: Méthodes de diagnostic différentiel.*

- Luriiã, A. R. (1978). *Les fonctions corticales supérieures de l'homme* (N. Heissler & G. Semenov-Ségur, Trad.). Paris: Presses universitaires de France.
- Luriiã, A. R. (1995). *L'homme dont le monde volait en éclats* (N. Rausch de Traubenberg & F. Mariengof, Trad.). Paris: Seuil.
- Marescaux, P. J. (2007). Exigences, incertitude et ajustement des conduites. *Le travail humain*, 70(3), 251-270. <https://doi.org/10/b7fpff>
- Mariage, A. (2001). Stratégies de coping et dimensions de la personnalité : Étude dans un atelier de couture. *Le travail humain*, Vol. 64(1), 45-59.
- Martin, C., Hourlier, S., & Cegarra, J. (2013). La charge mentale de travail : Un concept qui reste indispensable, l'exemple de l'aéronautique. *Le travail humain*, Vol. 76(4), 285-308. <https://doi.org/10/ggr64z>
- Miermont, J. (1997). Pour une Théorie de l'Esprit : Cognitions, passions et communications. *Résonances*, 10(11), 64-71.
- Miller, W. R., & Rose, G. S. (2009). Toward a theory of motivational interviewing. *American Psychologist*, 64(6), 527-537. <https://doi.org/10/fdjmn3>
- Milliken, F. J. (1987). Three types of perceived uncertainty about the environment : State, effect, and response uncertainty. *Academy of Management review*, 12(1), 133-143.
- Minsky, M. (1974). *A Framework for Representing Knowledge*. Consulté à l'adresse <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/6089>
- Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., Howerter, A., & Wager, T. D. (2000). The Unity and Diversity of Executive Functions and Their Contributions to Complex "Frontal Lobe" Tasks : A Latent Variable Analysis. *Cognitive Psychology*, 41(1), 49-100. <https://doi.org/10.1006/cogp.1999.0734>
- Mnésis, un modèle pour cinq mémoires. (2007). *Les Grands Dossiers des Sciences Humaines*, N°7(6), 12-12.
- Moisset, J. J., & Couture, A. (2001). Changement, incertitude et gestion en éducation regards sur la réforme scolaire au Québec. *Education et Francophonie, revue de l'ACELF*, (XXIX), 31.
- Morawetz, C., Holz, P., Baudewig, J., Treue, S., & Dechent, P. (2007). Split of attentional resources in human visual cortex. *Visual Neuroscience*, 24(6), 817-826. <https://doi.org/10/dr5hfs>

- Moray, N. (1967). Where is capacity limited ? A survey and a model [Journal Article]. *Acta Psychologica*, 27, 84-92. [https://doi.org/Doi: 10.1016/0001-6918\(67\)90048-0](https://doi.org/Doi: 10.1016/0001-6918(67)90048-0)
- Morel, G., Amalberti, R., & Chauvin, C. (2008). Articulating the differences between safety and resilience : The decision-making process of professional sea-fishing skippers. *Human factors*, 50(1), 1-16. <https://doi.org/10/cf45c8>
- Morel, G., Amalberti, R., & Chauvin, C. (2009). How good micro/macro ergonomics may improve resilience, but not necessarily safety. *Safety science*, 47(2), 285-294. <https://doi.org/10/bkc6f8>
- Morineau, T. (2010). La méthode TMTA d'analyse écologique de la tâche et son application à une tâche praxique. *Le travail humain*, Vol. 73(2), 97-122. <https://doi.org/10/d4vdnq>
- Mouchet, A., Amans-Passaga, C., & Gréhaigne, J.-F. (2010). Chapitre 9 -L'approche technologique. In M. Musard, M. Loquet, & G. Carlier, *Sciences de l'intervention en EPS et en sport résultats de recherche et fondements théoriques* (p. 201-221). Paris: Éditions EP & S.
- Müller, N. G., Bartelt, O. A., Donner, T. H., Villringer, A., & Brandt, S. A. (2003). A physiological correlate of the "zoom lens" of visual attention. *Journal of Neuroscience*, 23(9), 3561-3565. <https://doi.org/10/ggt5k2>
- Nathan, M. J., Kintsch, W., & Young, E. (1992). A theory of algebra-word-problem comprehension and its implications for the design of learning environments. *Cognition and instruction*, 9(4), 329-389. <https://doi.org/10/dqcsps>
- Navon, D., & Gopher, D. (1979). On the economy of the human-processing system. *Psychological review*, 86(3), 214. <https://doi.org/10/ccz3hs>
- Neisser, U. (1976). *Cognition and reality: Principles and implications of cognitive psychology* (p. xiii, 230). New York, NY, US: W H Freeman/Times Books/ Henry Holt & Co.
- Neyns, V. (2011). *Les modalités du contrôle cognitif en situation dynamique : Anticipation et gestion des dérives. Le cas de l'anesthésie* (Phdthesis, Université Toulouse le Mirail - Toulouse II). Université Toulouse le Mirail - Toulouse II. Consulté à l'adresse <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00628433/document>

- Niebergall, R., Khayat, P. S., Treue, S., & Martinez-Trujillo, J. C. (2011). Multifocal Attention Filters Targets from Distracters within and beyond Primate MT Neurons' Receptive Field Boundaries. *Neuron*, 72(6), 1067-1079. <https://doi.org/10/fxvfr>
- Norman, D.A. (1986). Cognitive engineering. In Norman, D. A., Draper, S. W. (Eds.), In D.A Norman & S. W. Draper, *User-centered system design* (p. 31-61). Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Norman, Donald A. (1981). Categorization of action slips. *Psychological review*, 88(1), 1. <https://doi.org/10/b8zwhb>
- Norman, Donald A. (1983). Some observations on mental models. *Mental models*, 7(112), 7-14.
- North, R. A. (1977). Task functional demands as factors in dual-task performance. *Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting*, 21(5), 367-371. SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA.
- Ochanine, V. A. (1977). Concept of operative image in engineering and general psychology. *Engineering psychology. Moscow: Science Publisher.*
- Organisation Internationale de Normalisation. (2010). ISO 9241-210 : Ergonomics of human-system interaction—Part 210 : Human-centered for interactive systems. In *International Organization for Standardization*. Geneva, Switzerland.
- Outbound flight to the future. (2014, avril). *Magazine of DLR, the German Aerospace Center* ·DLR.de/En, (140/140), 36-39.
- Ozcan, O. (2012). *Exploring the effects of working memory capacity, attention, and expertise on situation awareness in a flight simulation environment.*
- Paris, J.-C. (2014). *Ingénierie cognitive pour l'aide à la conduite automobile de la personne âgée : Analyse et modélisation de l'activité de conduite en situation naturelle pour la conception de fonctions de monitoring* (Bordeaux). Bordeaux. Consulté à l'adresse <http://www.theses.fr/2014BORD0425>
- Pelayo, S., Loiselet, A., Beuscart-Zéphir, M. C., Rogalski, J., & Anceaux, F. (2010). Proposition méthodologique pour l'Analyse de la coopération dans une planification distribuée des actions. *Le travail humain*, Vol. 73(4), 361-383. <https://doi.org/10/d5pvdz>
- Perret, V. (2018). *Elaboration et validation de critères ergonomiques pour les Interactions Homme Système Simplexe*. Toulouse 2, Toulouse, France.

- Petersen, S. E., & Posner, M. I. (2012). The Attention System of the Human Brain : 20 Years After. *Annual Review of Neuroscience*, 35(1), 73-89. <https://doi.org/10/f3j3vw>
- Pew, R. (1994). An introduction to the concept of situation awareness. *Situational Awareness in complex systems*, 17-23.
- Piaget, J. (1960). Les praxies chez l'enfant. *Revue Neurologique*, 102, 551-564.
- Piaget, J. (1974). *La prise de conscience. [The dictates of conscience.]* (p. 282). 75006 Paris, France: Presses Universitaires de France.
- Piaget, J., & Inhelder, B. (1971). Mental Imagery in the Child : A Study of the Development of Imaginal Representation. *British Journal of Educational Studies*, 19(3), 343-344. <https://doi.org/10/d6hgfs>
- Posner, M. I. (1978). *Chronometric explorations of mind* (p. xiii, 271). Oxford, England: Lawrence Erlbaum.
- Posner, M. I. (2016). Orienting of Attention : Then and Now. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 69(10), 1864-1875. <https://doi.org/10.1080/17470218.2014.937446>
- Posner, M. I., Snyder, C. R., & Davidson, B. J. (1980). Attention and the detection of signals. *Journal of experimental psychology: General*, 109(2), 160. <https://doi.org/10/bx38cr>
- Prioret, M. (2008). *Enseignement et apprentissage de la résolution de problèmes mathématiques. Le cas des problèmes numériques au cycle 3 de l'école primaire en France. Approches didactique et ergonomique.* (Theses, Université Lumière Lyon 2). Université Lumière Lyon 2. Consulté à l'adresse <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01640085>
- Rabbitt, P. (1997). Introduction : Methodologies and models in the study of executive function. *Methodology of Frontal and Executive Function*, 1-38.
- 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. <https://doi.org/10/gfkwdc>
- Rasmussen, J. (1986). A cognitive engineering approach to the modelling of decision making and its organization in process control, emergency management, CAD/CAM, office systems, library systems. In *Advances in Man-Machine System Research*. JAI Press Inc.

- Raymond, C., Prun, D., & Cegarra, J. (2016). Associer l'ingénierie système et le Cognitive Work Analysis pour soutenir l'intégration Homme-Système. *Ergo'IA 2016*. Présenté à Bidart, France. Bidart, France. Consulté à l'adresse <https://hal-enac.archives-ouvertes.fr/hal-01626011>
- Reusser, K. (1989). Anmerkungen zur Vermittlung von "Theorie" in der Lehrerbildung. *Beiträge zur Lehrerinnen-und Lehrerbildung*, 7(3), 425-438.
- Richard, J.-F. (1990). Les activités mentales. *Comprendre, raisonner, trouver des solutions*. Paris: Armand Colin.
- Rochon, P. (2011). Rythme de la vigilance et de la cognition (Thesis, Bordeaux 2). Bordeaux 2. Consulté à l'adresse <http://www.theses.fr/2011BOR21782>
- Rogalski, J. (2016). Niveaux de représentation opérative du risque dans la gestion d'environnement dynamique (feux de forêt). *Bulletin de psychologie*, Numéro 546(6), 479-484. <https://doi.org/10/ggr647>
- Ross, K. G., Shafer, J. L., & Klein, G. (2006). Professional judgments and "naturalistic decision making". *The Cambridge handbook of expertise and expert performance*, 403-419. <https://doi.org/10/ggxkf6>
- Roth, E. M., & Woods, D. D. (1988). AIDING HUMAN PERFORMANCE I: COGNITIVE ANALYSIS. *Le Travail Humain*, 51(1), 39-64. JSTOR. Consulté à l'adresse JSTOR.
- Roy, J., Breton, R., & Rousseau, R. (2007). Situation awareness and analysis models. *Concepts, Models, and Tools for Information Fusion*, 27-67.
- Royston, P. (1995). Remark AS R94 : A Remark on Algorithm AS 181: The W-test for Normality. *Applied Statistics*, 44(4), 547. <https://doi.org/10.2307/2986146>
- Saad, F. (1988). Prise de risque ou non perception du danger? *Recherche Transports Sécurité*, (18/19).
- Salmon, P. M., Lenne, M. G., Walker, G. H., Stanton, N. A., & Filtner, A. (2014). Using the Event Analysis of Systemic Teamwork (EAST) to explore conflicts between different road user groups when making right hand turns at urban intersections. *Ergonomics*, 57(11), 1628-1642. <https://doi.org/10/gdskzr>
- Salmon, P. M., Stanton, N. A., Walker, G. H., Jenkins, D. P., & Rafferty, L. (2010). Is it really better to share? Distributed situation awareness and its implications for collaborative system design. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 11(1-2), 58-83. <https://doi.org/10.1080/14639220903009953>

- Samurcay, R., & Hoc, J.-M. (1988). De l'analyse du travail à la spécification d'aides à la décision dans des environnements dynamiques. *Psychologie Française*, 33(3), 187-196.
- Sanford, A. J., & Garrod, S. C. (1981). *Understanding written language : Explorations of comprehension beyond the sentence*. Chichester; New York: Wiley.
- Sarter, N. B., & Woods, D. D. (1991). Situation Awareness : A Critical But Ill-Defined Phenomenon. *The International Journal of Aviation Psychology*, 1(1), 45-57.  
<https://doi.org/10/bp6p75>
- Schacter, D. L., & Scarry, E. (2001). *Memory, brain, and belief* (Vol. 2). Harvard University Press.
- Schank, R. C. (1999). *Dynamic memory revisited*. Cambridge University Press.
- Schank, R. C., & Abelson, R. P. (2013). *Scripts, Plans, Goals, and Understanding : An Inquiry Into Human Knowledge Structures*. Hoboken: Taylor and Francis. Consulté à l'adresse [http://www.123library.org/book\\_details/?id=107631](http://www.123library.org/book_details/?id=107631)
- Schmidt, R. A., & Lee, T. D. (2005). *Motor control and learning : A behavioral emphasis, 4th ed* (p. vi, 535). Champaign, IL, US: Human Kinetics.
- Sebillotte, S. (1984). La résolution de problème en situation de diagnostic. Un exemple : Le diagnostic médical. [Problem solving in diagnostic situations: An example: Medical diagnostics.]. *Psychologie Française*, 29(3-4), 273-277.
- Sebillotte, S. (1991). Théories et méthodologies, décrire des tâches selon les objectives des opérateurs de l'interview à la formalisation. *Projet de Psychologie Ergonomique pour l'Informatique, INRIA, Domaine de Voluceau, Rocquencourt, Le Chesnay Cedex, France*.
- Selcon, S. J., & Taylor, R. M. (1990). Evaluation of the Situational Awareness Rating Technique(SART) as a tool for aircrew systems design. *AGARD, Situational Awareness in Aerospace Operations 8 p(SEE N 90-28972 23-53)*.
- Sen, D., Fashokun, A., Angelotti, R., Brooks, M., Bhaumik, H., Card, C., ... Chung, C. (2018). An Artificial Intelligence Platform for Asset Management Contributes to Better Decision-making Tools for Operations, Maintenance, and Utility Management : Sen et al. *Water Environment Research*, 90(4), 355-375.

- Sève, C., Saury, J., Theureau, J., & Durand, M. (2002). La construction de connaissances chez des sportifs de haut niveau lors d'une interaction compétitive. *Le travail humain*, Vol. 65(2), 159-190. <https://doi.org/10/b4wrw2>
- Shamay-Tsoory, S. G., & Aharon-Peretz, J. (2007). Dissociable prefrontal networks for cognitive and affective theory of mind : A lesion study. *Neuropsychologia*, 45(13), 3054-3067. <https://doi.org/10/fnwjq9>
- Sharma, A., Nazir, S., & Ernstsen, J. (2019). Situation awareness information requirements for maritime navigation : A goal directed task analysis. *Safety Science*, 120, 745-752. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.08.016>
- Shepherd, A. (2001). *Hierarchical task analysis*. London ; New York: Taylor & Francis.
- Sieroff, É. (2008). Chapitre 18. L'attention. In *Traité de neuropsychologie clinique* (p. 263-293). De Boeck Supérieur. Consulté à l'adresse <https://www-cairn-info.docelec.u-bordeaux.fr/traite-de-neuropsychologie-clinique--9782804156787-page-263.htm>
- Slovic, P. (1999). Trust, Emotion, Sex, Politics, and Science: Surveying the Risk-Assessment Battlefield. *Risk Analysis*, 19(4), 689-701. <https://doi.org/10/dkk2c3>
- Slovic, P., Kunreuther, H., & White, G. F. (1974). *Decision processes, rationality and adjustment to natural hazards*. Earthscan Publications. Consulté à l'adresse <https://scholarsbank.uoregon.edu/xmlui/handle/1794/22308>
- Smith, K., & Hancock, P. A. (1995). Situation awareness is adaptive, externally directed consciousness. *Human factors*, 37(1), 137-148. <https://doi.org/10/cz2rgs>
- Sohlberg, M. M., & Mateer, C. A. (1987). Effectiveness of an attention-training program. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 9(2), 117-130. <https://doi.org/10.1080/01688638708405352>
- Sohlberg, M. M., & Mateer, C. A. (1989). Training use of compensatory memory books : A three stage behavioral approach. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 11(6), 871-891. <https://doi.org/10.1080/01688638908400941>
- Sperandio, J.-C. (1984). *L'ergonomie du travail mental*. Paris: Masson.
- Stanton, N. A., Stewart, R., Harris, D., Houghton, R. J., Baber, C., McMaster, R., ... Green, D. (2006). Distributed situation awareness in dynamic systems: Theoretical development and application of an ergonomics methodology. *Ergonomics*, 49(12-13), 1288-1311. <https://doi.org/10.1080/00140130600612762>

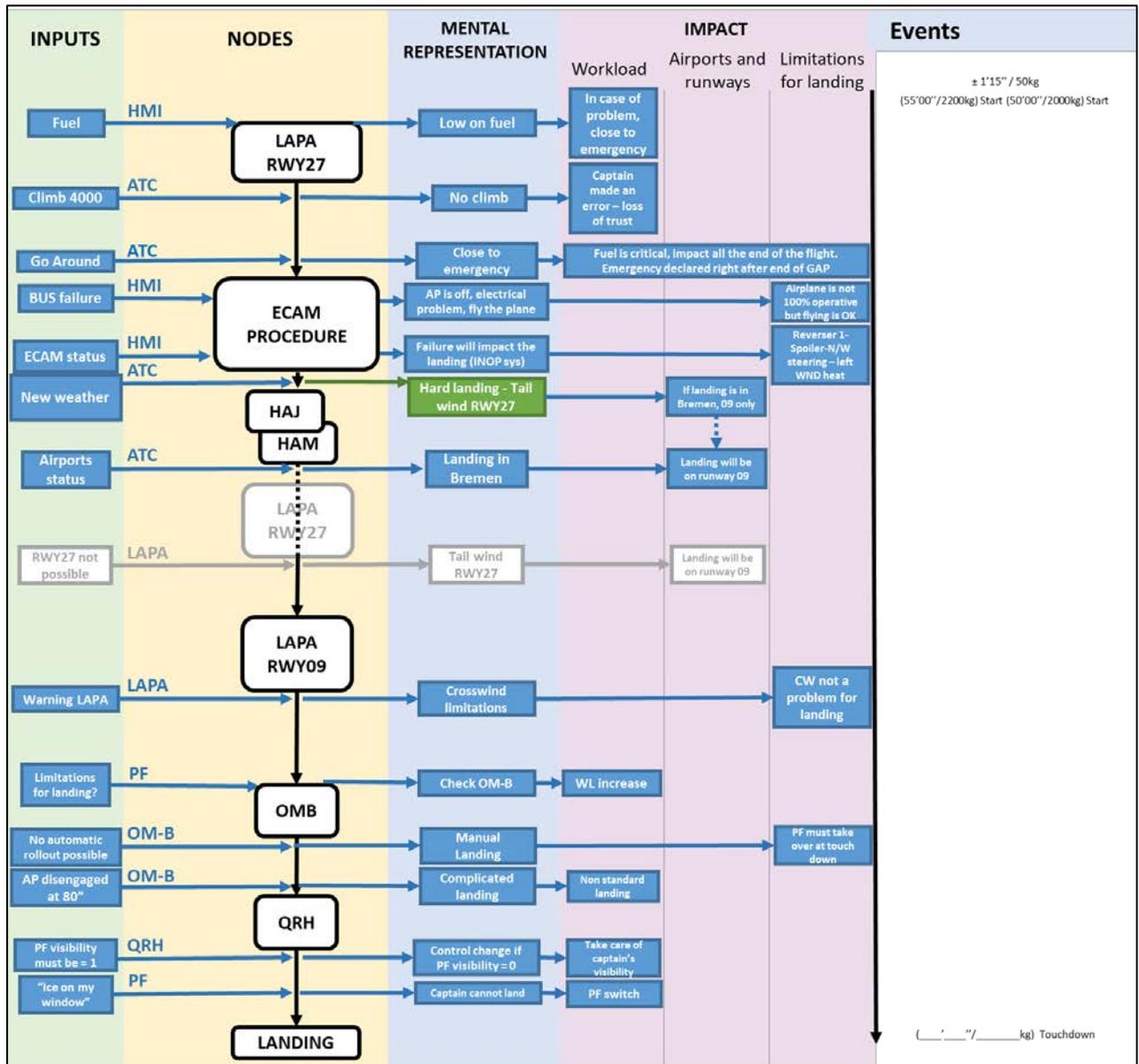
- Stanton, Neville A. (2013). *Human factors methods : A practical guide for engineering and design*. Burlington, VT: Ashgate Publishing Company.
- Stanton, Neville A., Baber, C., & Harris, D. (2008). *Modelling Command and Control : Event Analysis of Systemic Teamwork* (1st Edition). Londre: CRC Press. Consulté à l'adresse <https://www.taylorfrancis.com/books/e/9781317094876>
- Staub, F. C., & Reusser, K. (1995). Understanding and Solving Mathematical. *Discourse comprehension: Essays in honor of Walter Kintsch*, 285.
- Sullivan, S., & Ruffman, T. (2004). Social understanding : How does it fare with advancing years? *British Journal of Psychology*, 95(1), 1-18. <https://doi.org/10/fhktzv>
- Terraneo, F., Seferdjeli, L., & Diby, M. (2010). Le « tour de lit » aux soins intensifs : Représentations et prise d'information. *Le travail humain*, Vol. 73(4), 339-359. <https://doi.org/10/dkvfch>
- Theureau, J. (2006). *Le cours d'action : Méthode développée*.
- Treisman, A. M. (1964). Selective attention in man. *British medical bulletin*. <https://doi.org/10/ggt4xg>
- Tulving, E. (1972). Episodic and semantic memory. *Organization of memory*, 1, 381-403.
- Tulving, E. (1995). Organization of memory : Quo vadis? In *The cognitive neurosciences* (p. 839-853). Cambridge, MA, US: The MIT Press.
- Tulving, E. (2001). Episodic memory and common sense : How far apart? *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B*, 356(1413), 1505-1515. <https://doi.org/10/cd63zx>
- Tulving, E. (2002). Episodic memory : From mind to brain. *Annual review of psychology*, 53(1), 1-25. <https://doi.org/10/fc26mg>
- Tulving, E., Eustache, F., Desgranges, B., & Viader, F. (2004). La mémoire épisodique : De l'esprit au cerveau. *Revue neurologique*, 160(4), 9-23. <https://doi.org/10/ds2tjs>
- Van Daele, A. (1992). La réduction de la complexité par les opérateurs dans le contrôle de processus continus. Contribution à l'étude du contrôle par anticipation et de ses conditions de mise en oeuvre. *Liège: Université de Liège*.
- Van Daele, Agnès, & Carpinelli, F. (2001). La planification dans la gestion des environnements dynamiques : Quelques apports récents de la psychologie ergonomique. *Psychologie française*, 46(2), 143-152.

- Van Dijk, T. A., & Kintsch, W. (1983). *Strategies of discourse comprehension*. New York: Academic Press.
- Vermersch, P. (1996). Problèmes de validation des analyses psycho-phénoménologiques. *Expliciter*, (14), 1-12.
- Vicente, K. J. (1999). *Cognitive work analysis: Toward safe, productive, and healthy computer-based work*. CRC Press.
- Vicente, K. J., Mumaw, R. J., & Roth, E. M. (2004). Operator monitoring in a complex dynamic work environment: A qualitative cognitive model based on field observations. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 5(5), 359-384. <https://doi.org/10/frbtvz>
- Vidulich, M. A., & Hughes, E. R. (1991). Testing a Subjective Metric of Situation Awareness. *Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting*, 35(18), 1307-1311. <https://doi.org/10.1177/154193129103501812>
- Weill-Fassina, A. (2016). L'image opérative de Dimitri Ochanine en contexte. *Perspectives interdisciplinaires sur le travail et la santé*, (18-1). Consulté à l'adresse <http://journals.openedition.org/pistes/4655>
- Welford, A. T. (1952). The psychological refractory period and the timing of high-speed performance-a review and a theory. *British Journal of Psychology*, 43(1), 2.
- Wickens, C. D. (1976). The effects of divided attention on information processing in manual tracking. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 2(1), 1. <https://doi.org/10/dcp6rv>
- Wickens, C., Derrick, W., Berringer, D., & Micalizzi, J. (1980). The Structure of Processing Resources : Implications for Task Configuration and Workload. *Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting*, 24(1), 253-256. <https://doi.org/10/ggwrhh>
- Woods, D. D., & Hollnagel, E. (2006). *Joint Cognitive Systems : Patterns in Cognitive Systems Engineering* (0 éd.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420005684>
- Woods, D. D., Leveson, N., & Hollnagel, E. (2017). *Resilience Engineering : Concepts and Precepts*. Boca Raton: CRC Press. Consulté à l'adresse <https://public.ebookcentral.proquest.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=5118484>

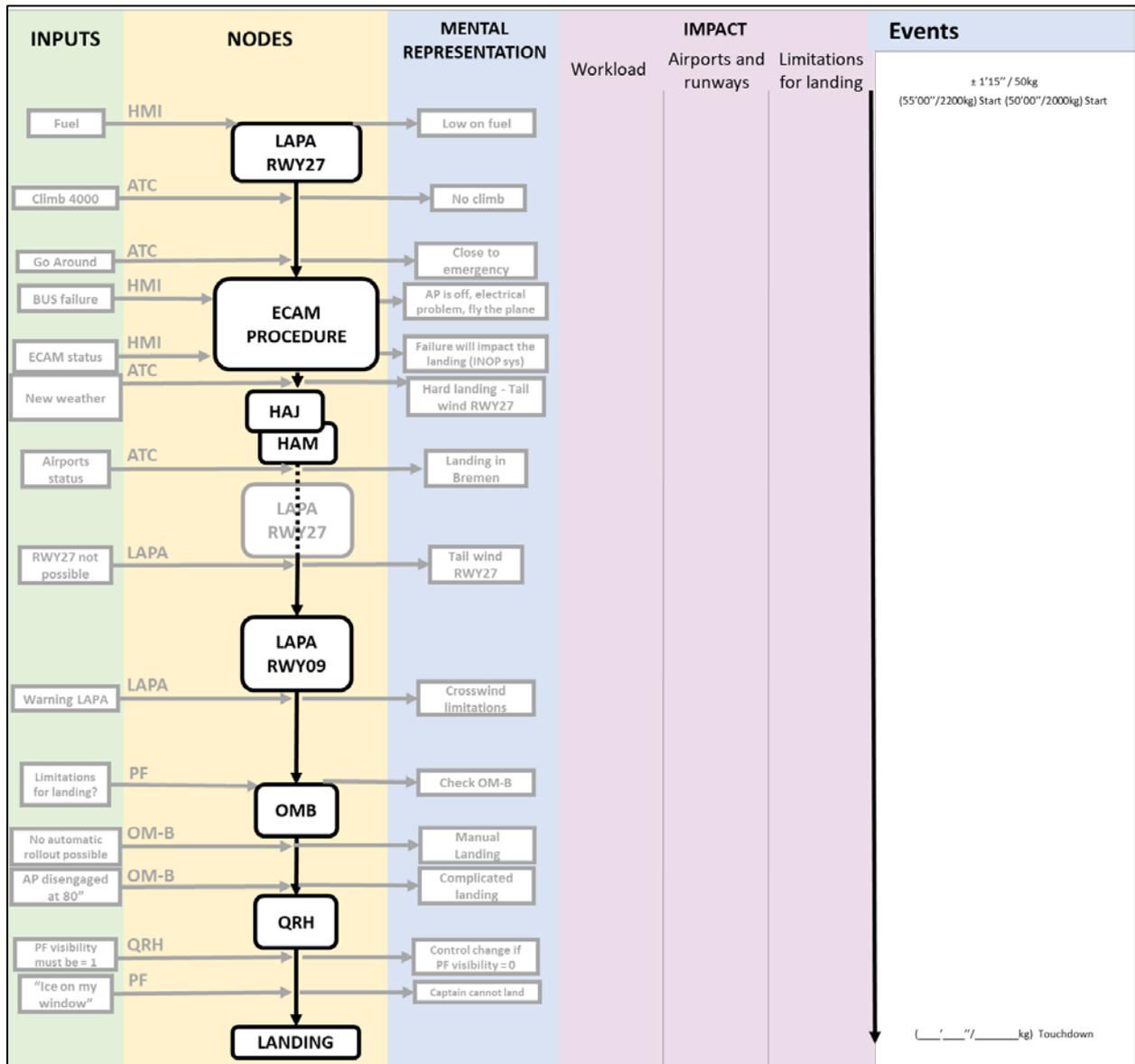
- Yerkes, R. M., & Dodson, J. D. (1908). The relation of strength of stimulus to rapidity of habit-formation [Journal Article]. *Journal of Comparative Neurology and Psychology*, 18(5), 459-482. <https://doi.org/10.1002/cne.920180503>
- Zanto, T. P., & Gazzaley, A. (2014). Attention and ageing. In *Oxford library of psychology. The Oxford handbook of attention* (p. 927-971). New York, NY, US: Oxford University Press.
- Zsombok, C. E., & Klein, G. (1997). *Naturalistic decision making* (p. xix, 414). Hillsdale, NJ, US: Lawrence Erlbaum Associates, Inc.

# ANNEXE 1 – GRILLES MERIA STEP 1

Grille activité prescrite :

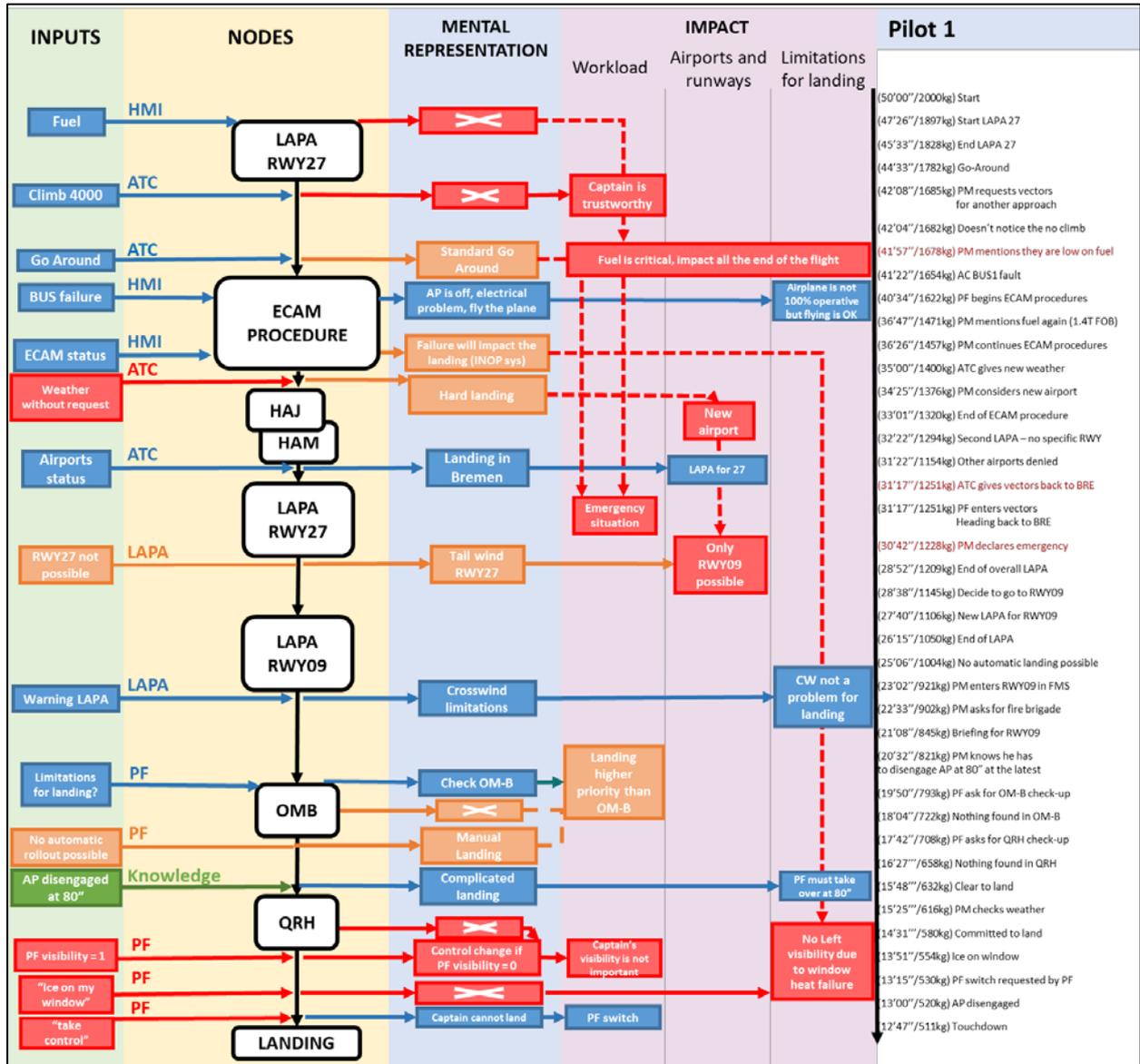


Grille vierge, pour les observations :

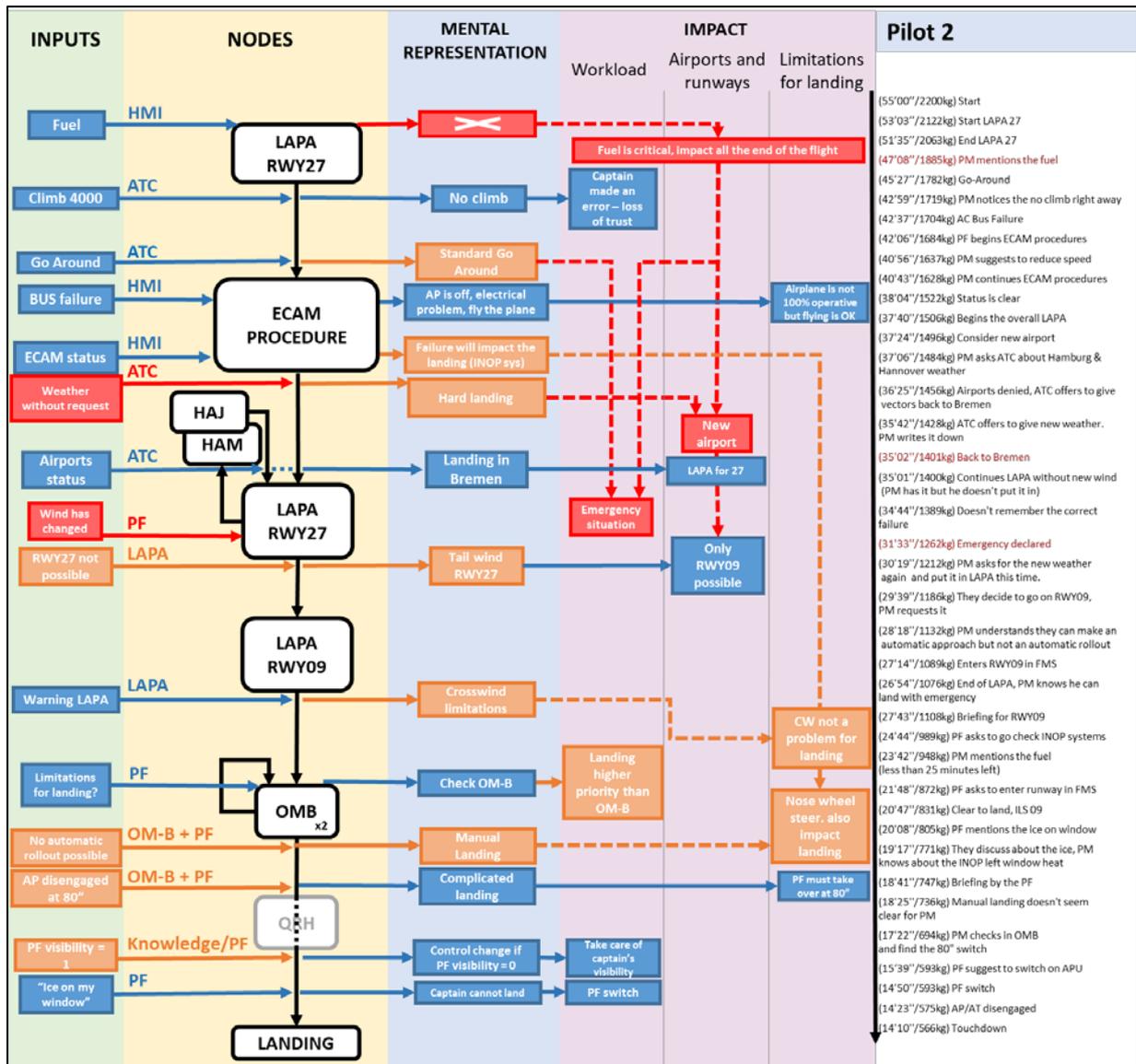


Grilles complétées avec l'activité réalisée par les 10 copilotes impliqués dans la phase Step1 :

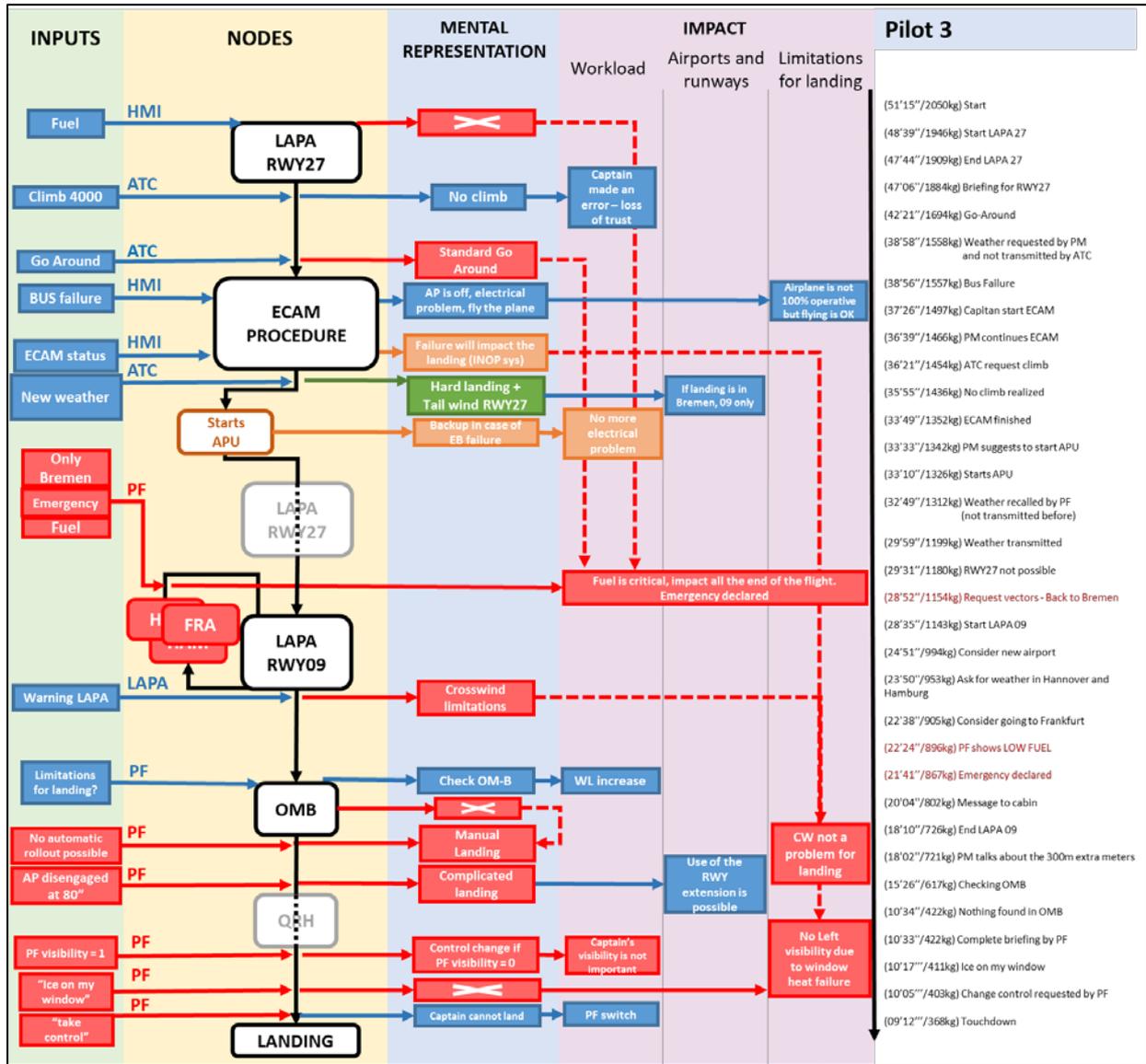
**Copilote 1 :**



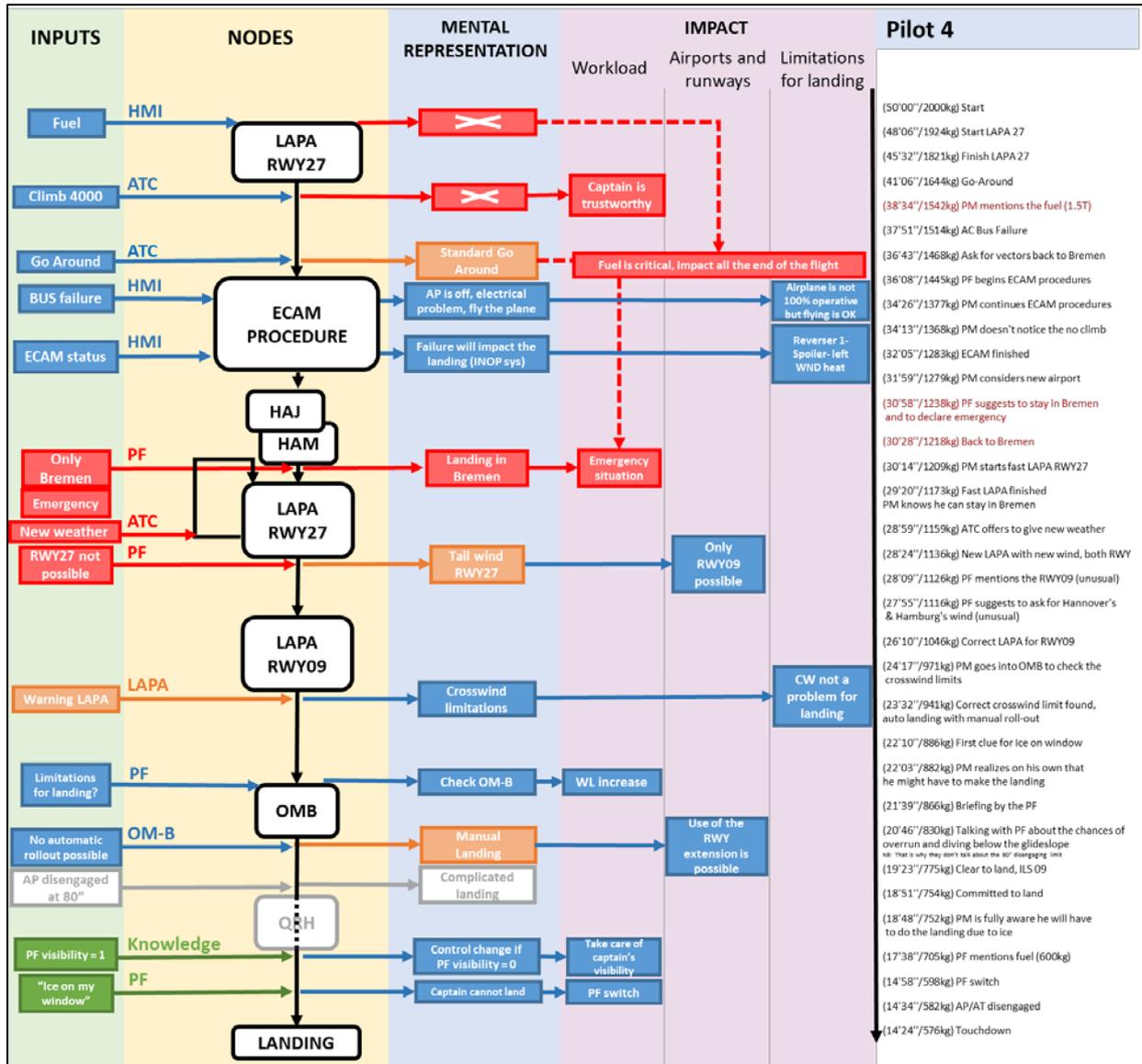
## Copilote 2 :



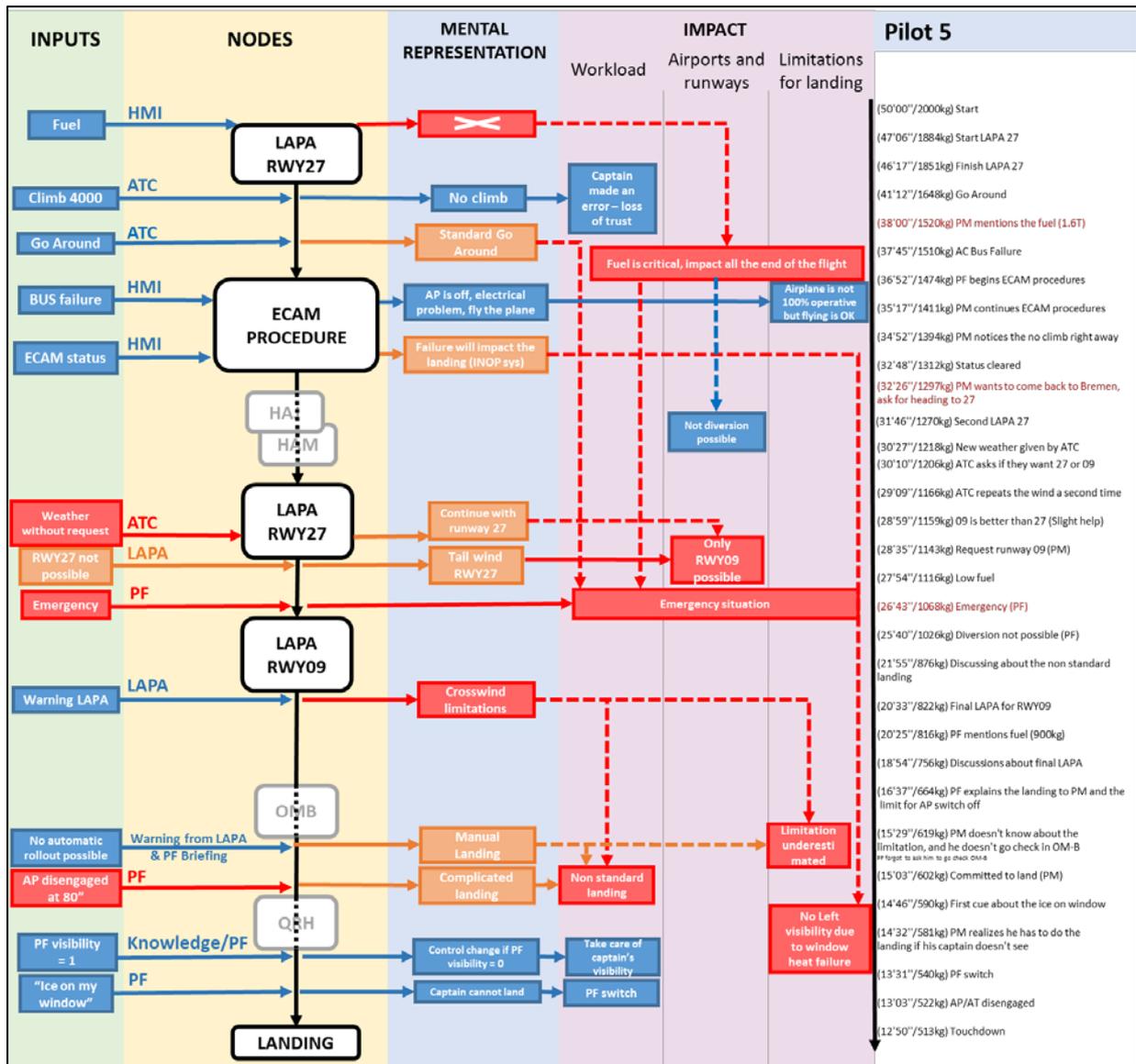
### Copilote 3 :



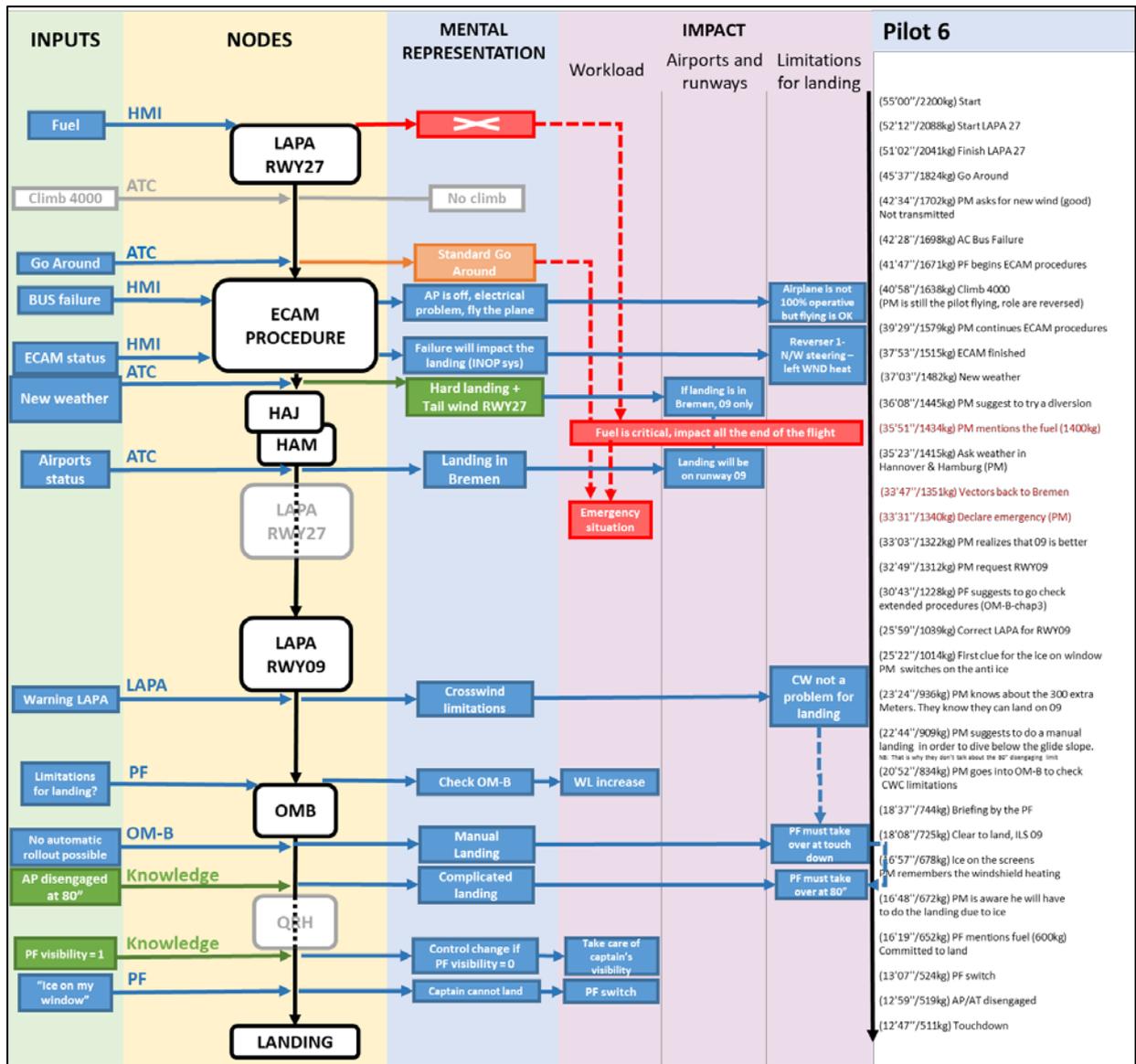
# Copilote 4 :



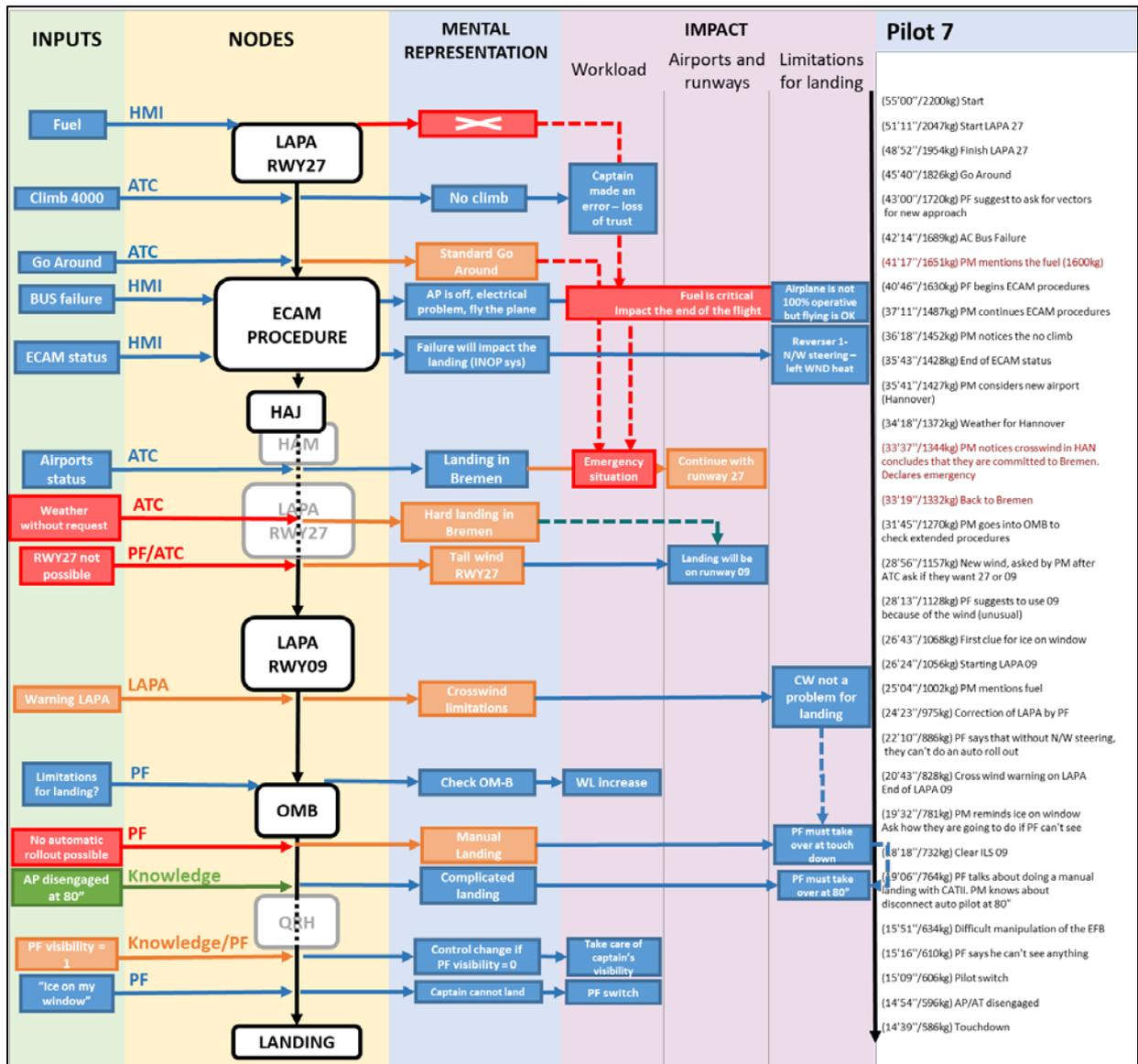
# Copilote 5 :



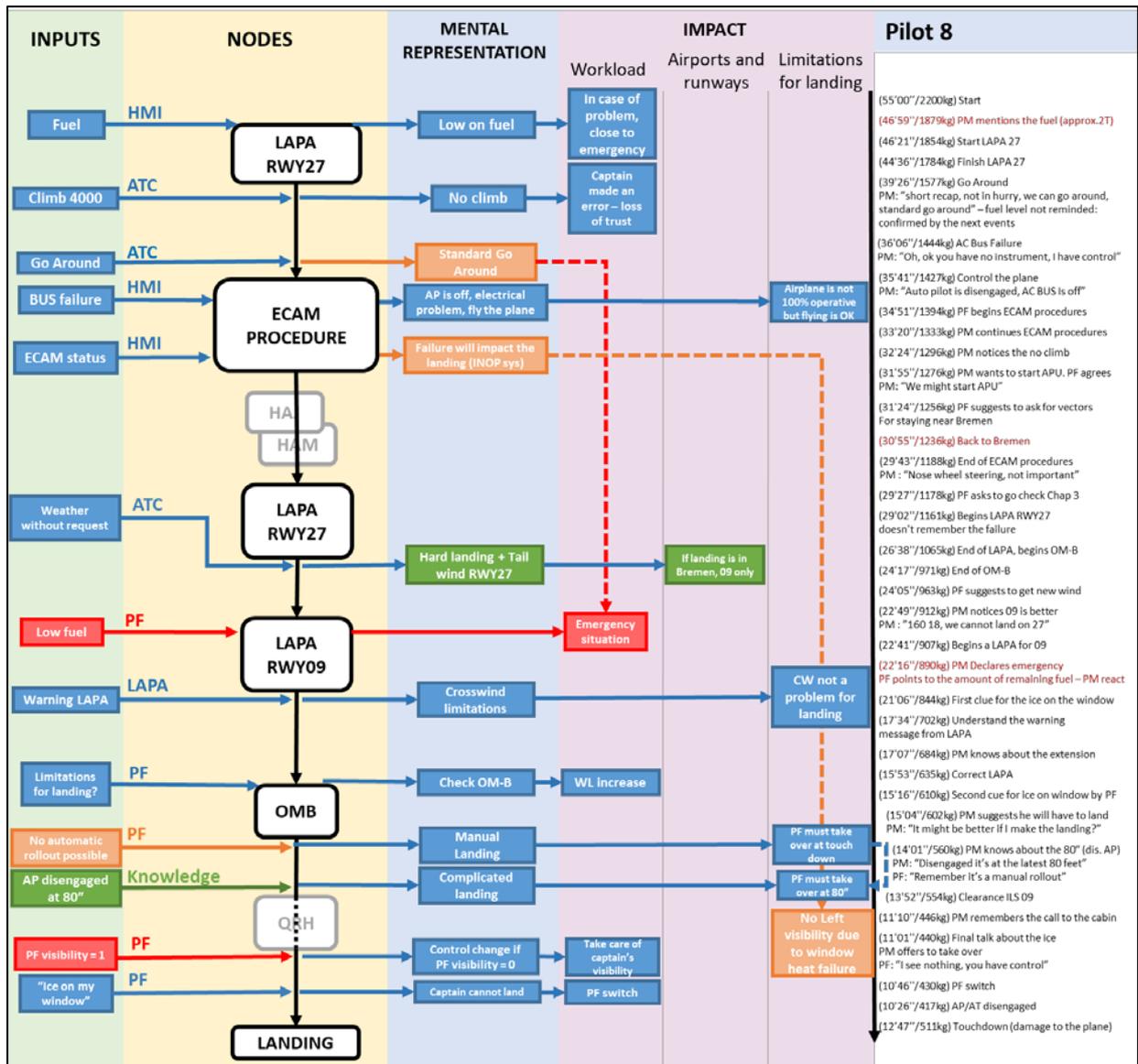
# Copilote 6 :



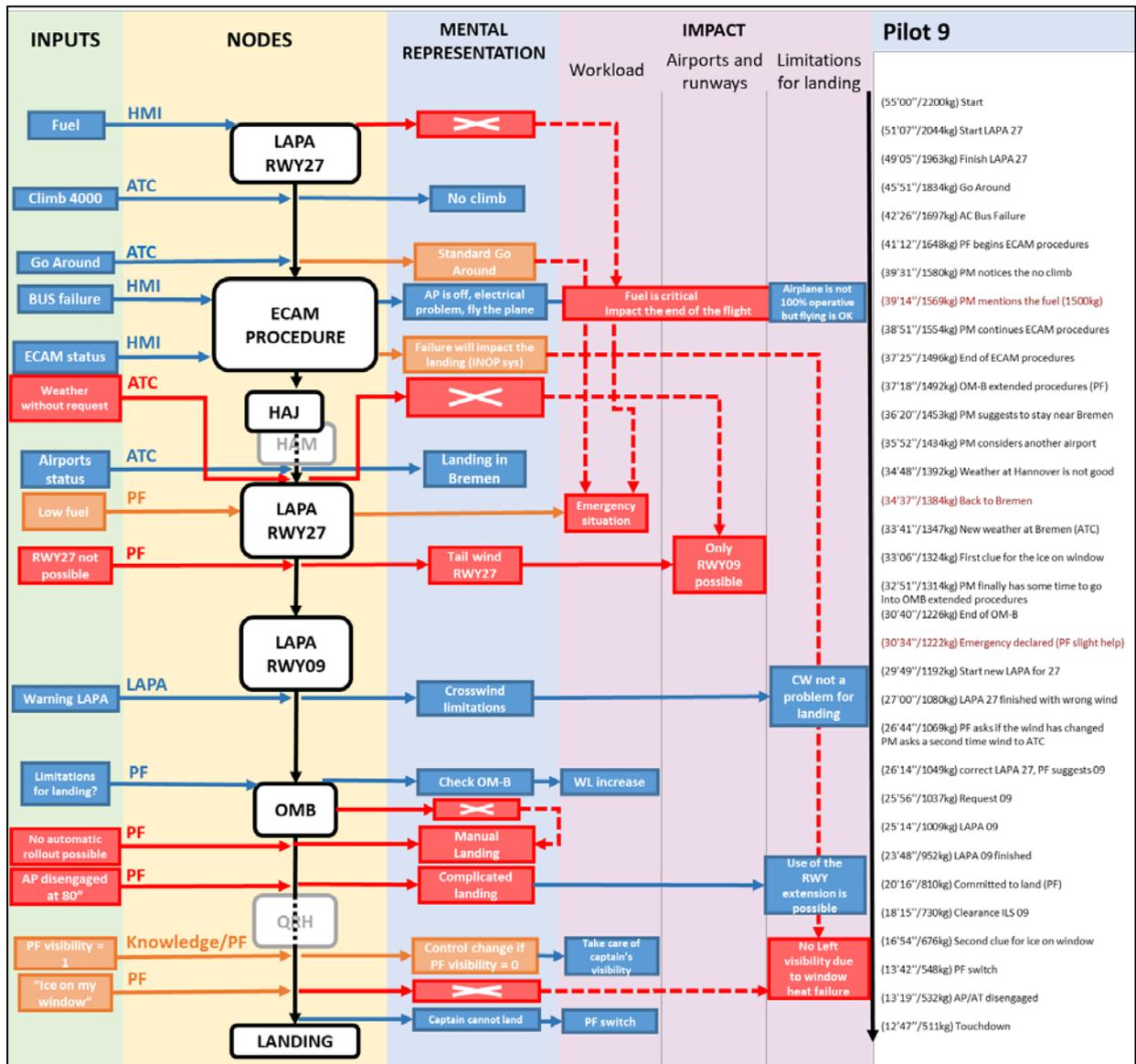
# Copilote 7 :



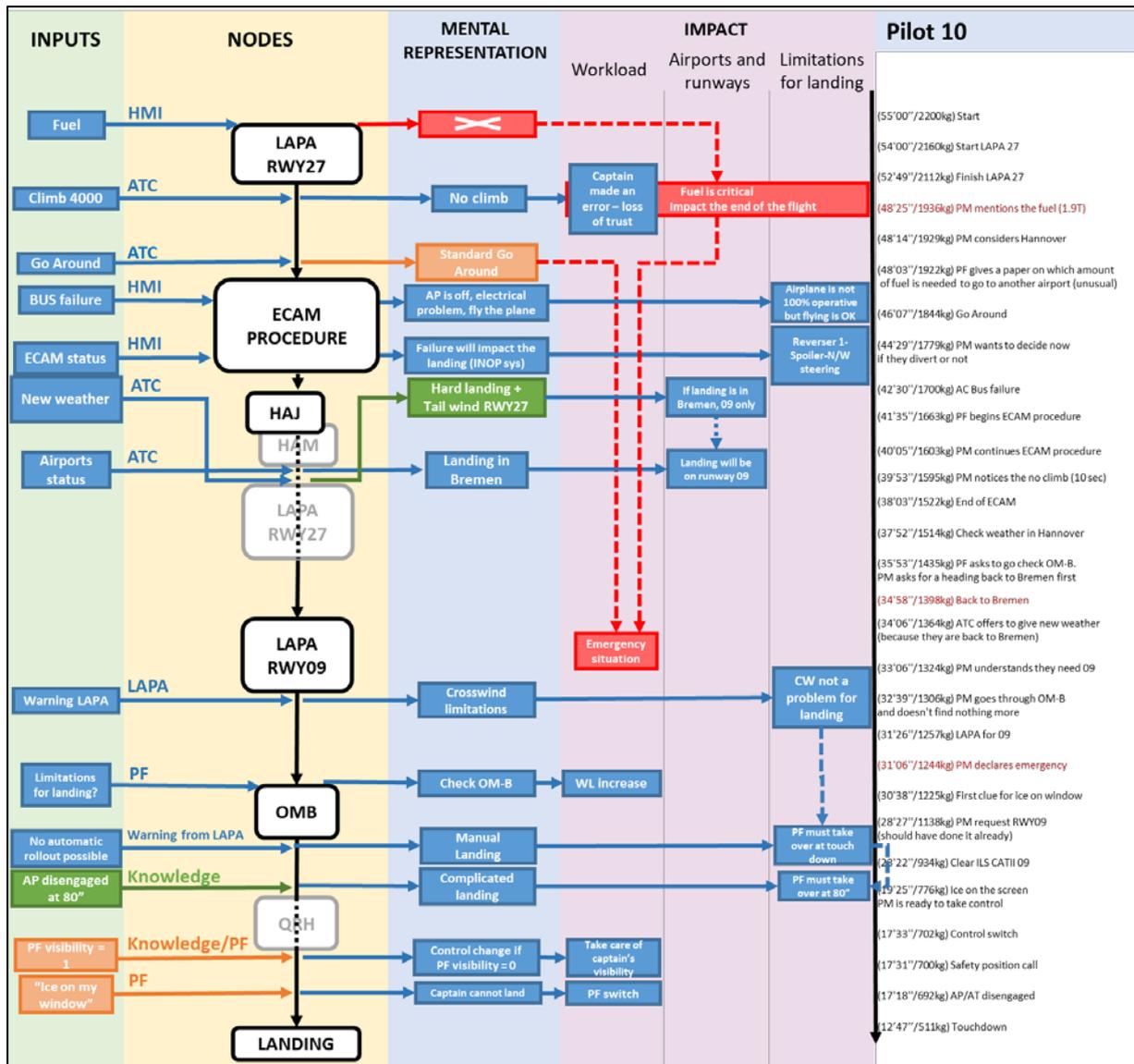
# Copilote 8 :



# Copilote 9 :



# Copilote 10 :



## ANNEXE 2 – GRILLES MERIA STEP 2 ET 3

Grilles complétées avec l'activité réalisée par les 10 copilotes impliqués dans la phase Step2 :

**Copilote 21 :**

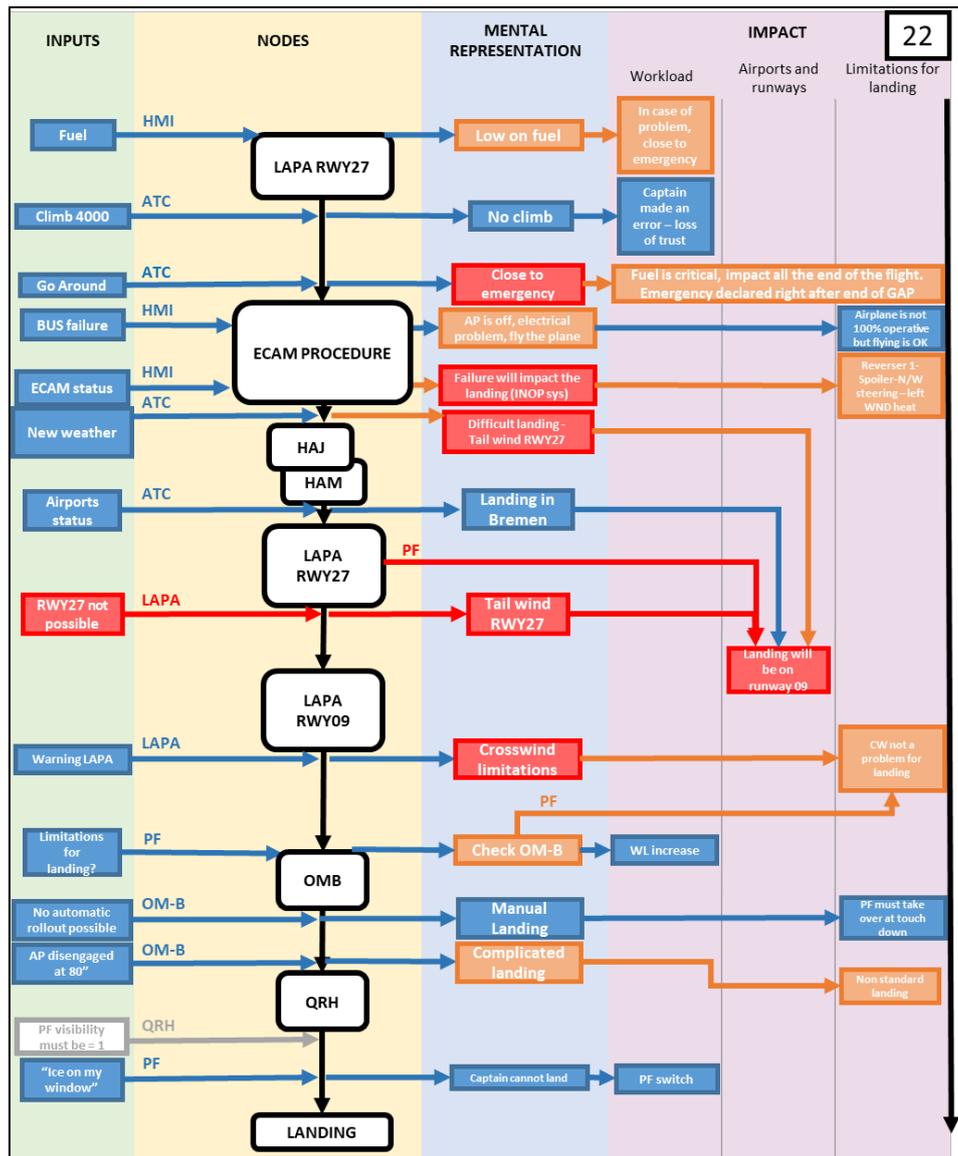


Le copilote a bien compris l'impact de certains systèmes Inop après la panne, mais ne s'est pas souvenu de tous.

Le copilote a rapidement compris l'impact de la nouvelle météo à l'atterrissage et a entamé une discussion avec le commandant de bord.

Le copilote a mentionné la quantité de carburant à deux reprises avant de discuter avec le commandant de bord de la déclaration de la situation Mayday à 1,1T de carburant restant.

## Copilote 22 :

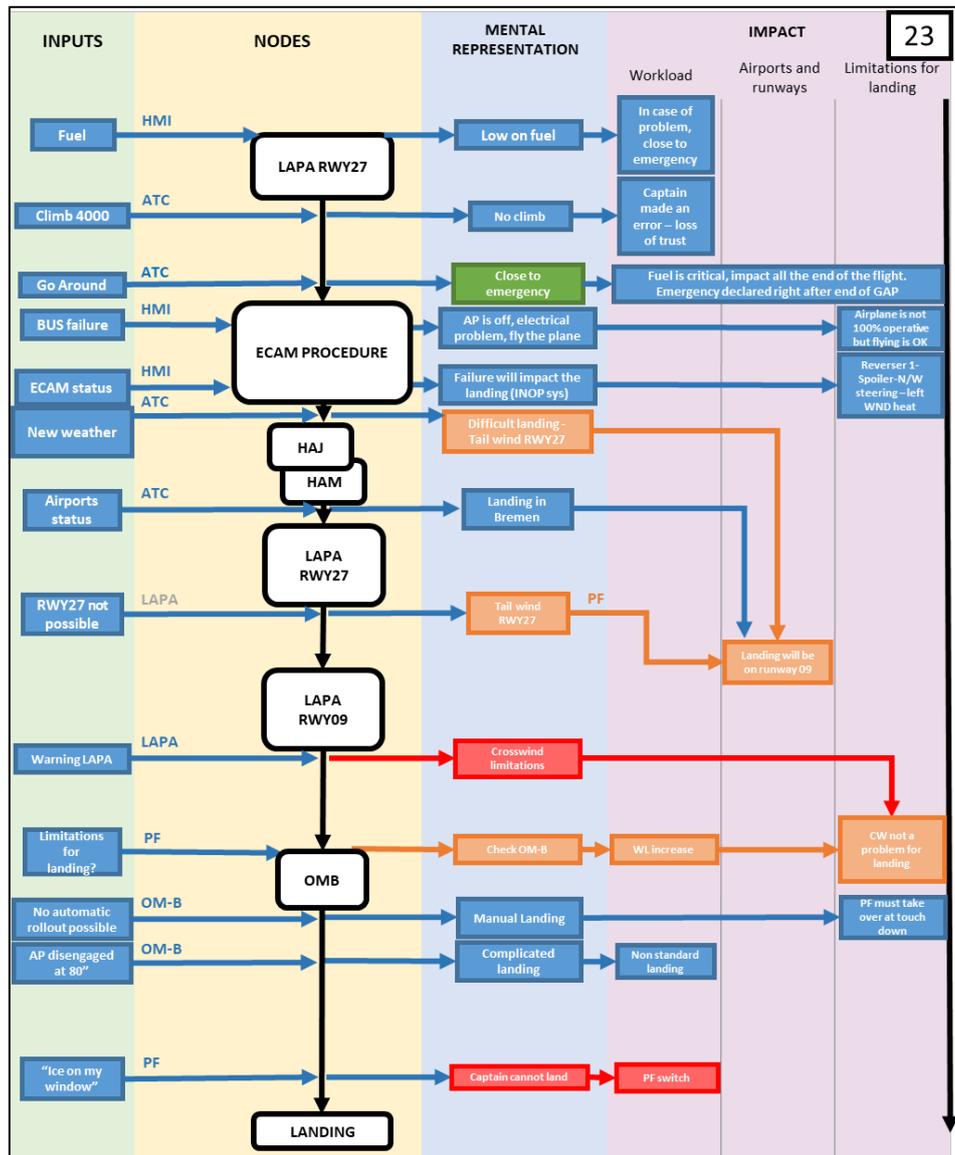


Le copilote a eu des difficultés avec les calculs du LAPA et s'est concentré sur ceux-ci, ce qui a pris du temps et donc du carburant.

Le copilote n'a pas réalisé l'impact de la plupart des systèmes Inop sur l'atterrissage.

Le copilote s'est rendu compte tardivement qu'il manquait de carburant et n'a pensé qu'à se poser le plus rapidement possible, quelles que soient les conditions et les risques encourus. Ce qui explique pourquoi "Landing in Bremen" est en bleu et la plupart des éléments autour sont en orange ou en rouge.

## Copilote 23 :



Le copilote a noté que le débit de carburant était assez élevé et qu'ils étaient à court de carburant et a déclaré un Mayday tôt dans le scénario.

Le copilote n'a pas pris en compte les aéroports de dégagement mais seulement la piste 27 de Brême et a essayé de trouver des solutions pour raccourcir la distance d'atterrissage.

Le copilote ne s'est pas rendu compte que les nouvelles conditions météorologiques, combinées à l'état de l'avion, rendaient l'atterrissage sur la piste 27 impossible, bien que l'impact des systèmes inopérants ait été globalement compris.

## Copilote 24 :

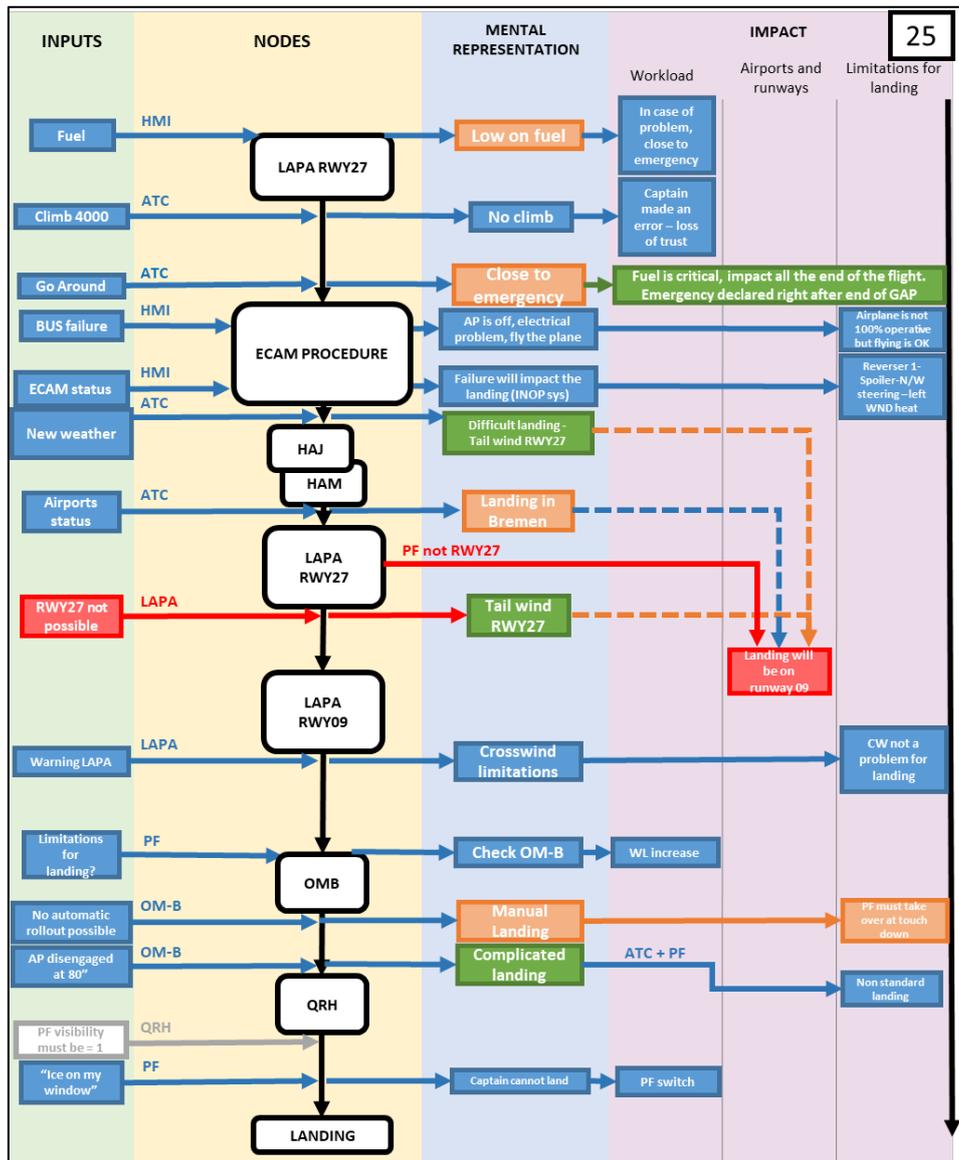


Le premier officier a proposé de démarrer l'APU pour fournir une seconde source d'énergie.

Pour la seconde approche (RWY 09), après avoir contacté la tour, le premier officier a indiqué qu'il n'y avait plus de carburant pour s'assurer que l'information était copiée par l'ATC et a préparé l'approche pour économiser le carburant.

Le copilote s'est rappelé que le chauffage des fenêtres et du pare-brise du commandant de bord était inopérant.

## Copilote 25 :



Le premier officier a identifié l'important système inop spécialement pour le court RWY de Brême et a demandé les dernières informations sur le vent en raison de la direction de la roue avant inop et du fort vent de travers.

Avec les nouvelles conditions météorologiques, le copilote a évalué les aéroports de dégagement, a demandé à rentrer à Brême et a proposé la RWY 09. Le commandant de bord a demandé d'évaluer la piste 27 auparavant.

Après avoir vérifié les limites de vent de travers, le copilote confirme que le déploiement manuel est possible et informe la tour qu'il restera sur la RWY.

## Copilote 26 :

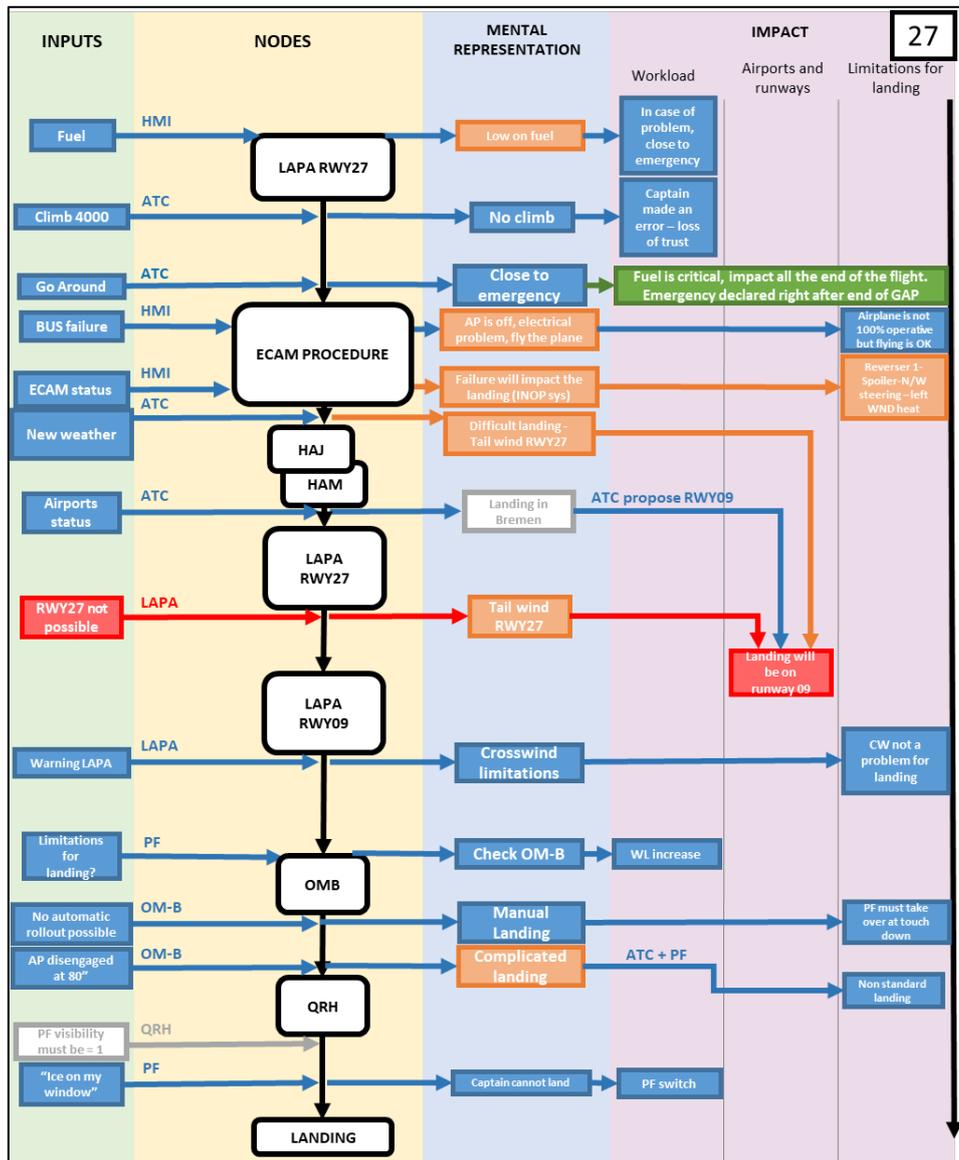


Le copilote a demandé à l'ATC de lui indiquer des aéroports de dégagement, ce qui lui a été refusé en raison des conditions météorologiques et du trafic à l'arrivée.

Juste après avoir réalisé qu'ils étaient à court de carburant, le copilote a voulu déclarer l'urgence à Hambourg, pour avoir la priorité sur le trafic entrant.

Le copilote a compris la limitation du vent de travers dans l'OMB et qu'il devait faire un roulage manuel, mais il n'a pas fait le lien avec l'orientation du train avant en haut.

## Copilote 27 :

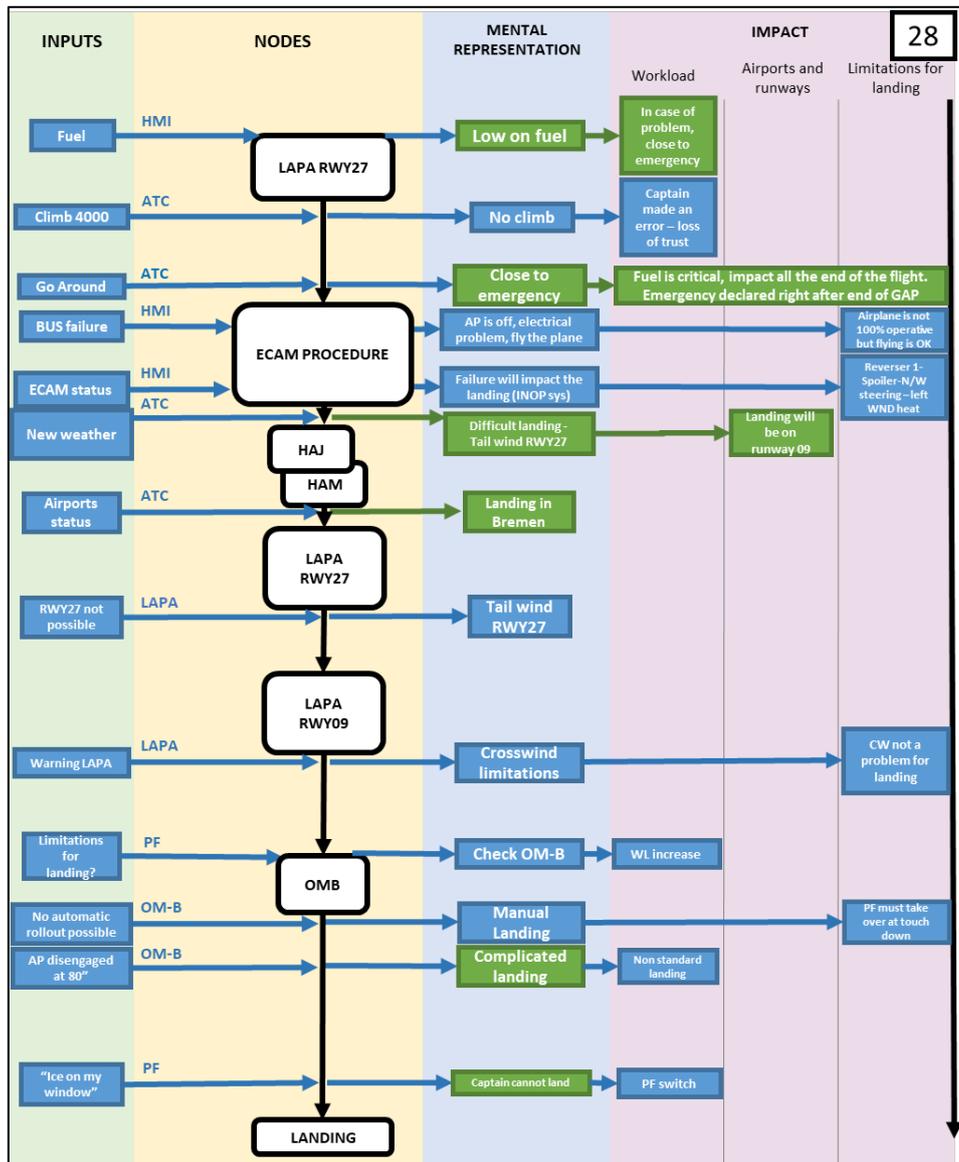


Le copilote a déclaré un Mayday après les demandes du commandant de bord, mais n'a pas donné la raison de la situation d'urgence à l'ATC.

Le copilote a proposé de prendre le contrôle avec la RWY en vue, quand le capitaine a dit qu'il avait des cristaux de glace sur la fenêtre.

Le copilote a fait trois calculs LAPA RWY 27 pour la 2e approche avant que le commandant de bord ne demande d'autres options (substituts).

## Copilote 28 :

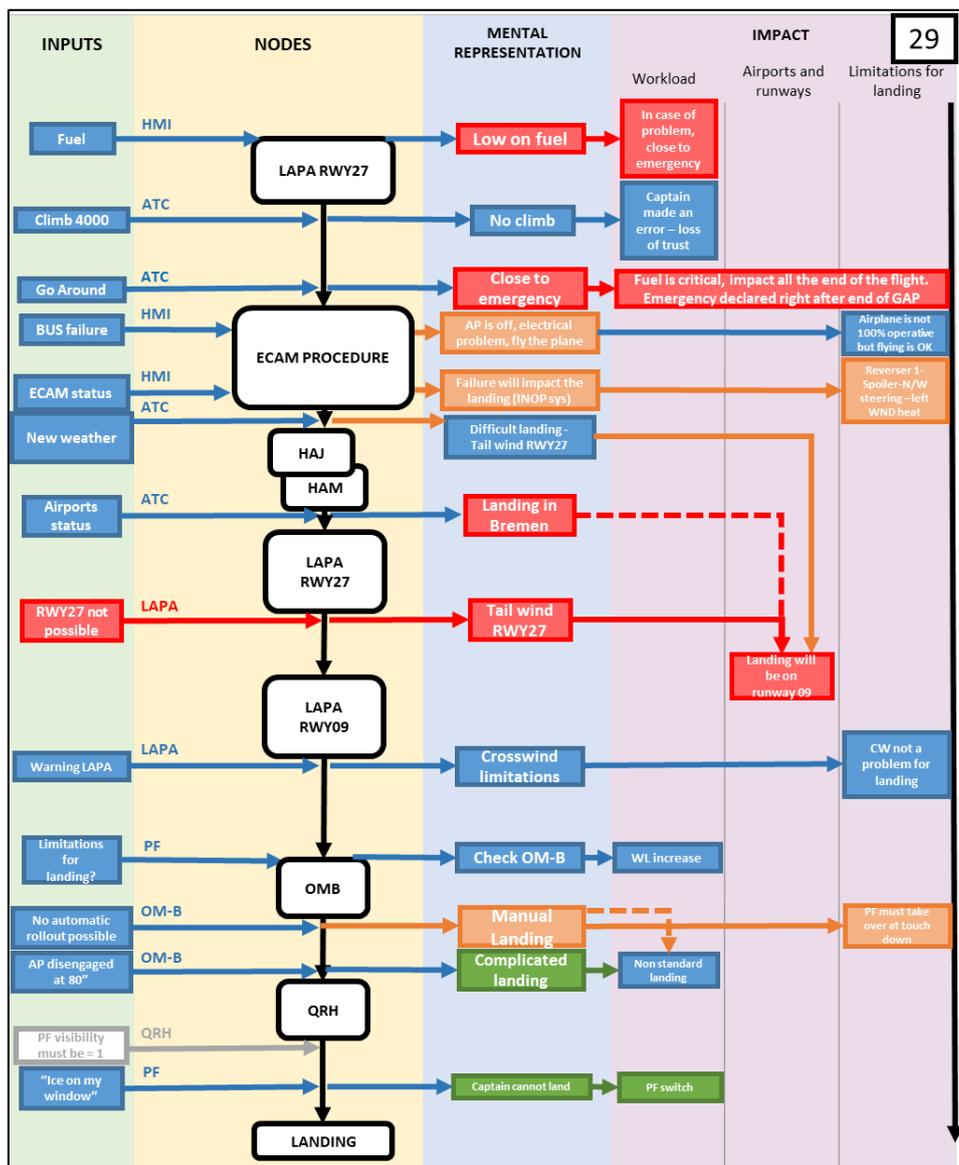


Le copilote a identifié la composante vent arrière avec le nouvel ATIS K. sur la RWY 27 et a donc demandé si la RWY09 était disponible.

Le copilote a cherché les substituts et a décidé de déclarer un Mayday et a informé l'ATC de la panne également.

Le copilote se souvient qu'un inverseur est en place, ordonne aux pompiers et à la dépanneuse (roue avant directrice en place) et vérifie que l'ATC est conscient de la situation d'urgence à quelques reprises.

## Copilote 29 :



Le premier officier a remarqué que le nouveau vent impliquerait un vent de tai sur la RWY 27 mais n'a pas demandé la RWY 09.

Le copilote a identifié qu'ils quittaient l'Altitudes minimales de secteur assurant une marge de franchissement d'obstacles d'au moins 1000 pieds dans un rayon de 25 NM autour de Brême, sachant que le GPWS (Ground Proximity Warning System) était inopérant.

Après le calcul de la LAPA RWY 09, le copilote a demandé une assistance complète au sol, pour après l'atterrissage.

## Copilote 30 :



Le copilote a remarqué quelques éléments sur le PFD, comme la vitesse au sol n'était pas correcte, le vent était le même qu'au sol, et le carburant était inférieur à 2T.

Lors de la lecture des systèmes Inop, le copilote a immédiatement visualisé leur impact sur le reste du vol et pour l'atterrissage, à l'exception de la chaleur de la fenêtre et du pare-brise.

Le copilote a remarqué qu'ils s'éloignaient de Brême, a demandé à revenir et à effectuer la RWY09 en raison de nouvelles conditions météorologiques.

Grilles complétées avec l'activité réalisée par les 10 copilotes impliqués dans la phase Step3 :

**Copilote 31 :**

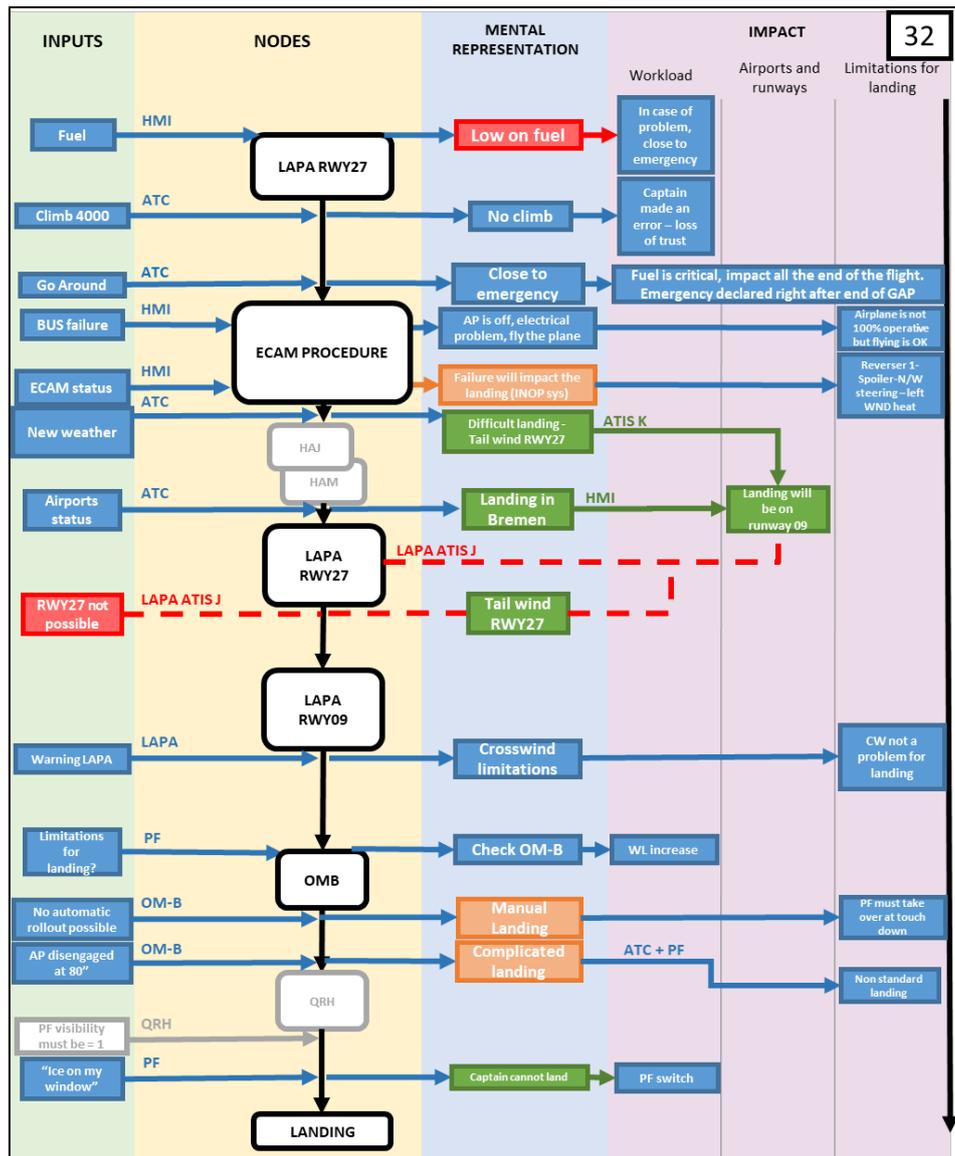


Le copilote a vu très tôt qu'ils avaient peu de carburant et s'est projeté sur un éventuel Go Around et aucune diversion possible.

Le copilote a continué à demander des aéroports de dégagement et est resté bloqué sur l'idée d'atterrir sur la piste 27 malgré les nouvelles conditions météorologiques et l'état du CA et la possibilité de dépassement de piste

Le copilote a fait le lien entre les systèmes inop et les limites d'atterrissage.

## Copilote 32 :



Le commandant de bord a montré au copilote que le cercle orange (30 minutes de carburant restant) était petit, ce qui (le copilote) a décidé de déclarer une urgence.

Avec le nouvel ATIS, le copilote a proposé la piste RWY09 et a confirmé son choix en vérifiant dans l'IHM les pistes disponibles à Brême.

Le copilote n'a pas fait le lien entre l'orientation de la roue avant inopérante et la sortie manuelle et, à 800 pieds au-dessus du sol juste avant l'atterrissage, il s'est rendu compte que l'inverseur 1 était inopérant mais s'est souvenu que les vitres et le chauffage du pare-brise étaient inopérants. Bremen" est en bleu et la plupart des éléments autour sont en orange ou en rouge.

## Copilote 33 :



Le copilote a remarqué la quantité de carburant après avoir vérifié le cercle orange de l'IHM.

Le copilote a lu les systèmes inop et leurs impacts et a tout de suite compris que le commandant de bord ne serait pas en mesure d'effectuer l'atterrissage.

Le copilote a vérifié les disponibilités des RWYs à Brême et a ensuite vu que les aéroports de dégagement étaient en dehors du cercle et les élimine donc des possibilités directes.

## Copilote 34 :

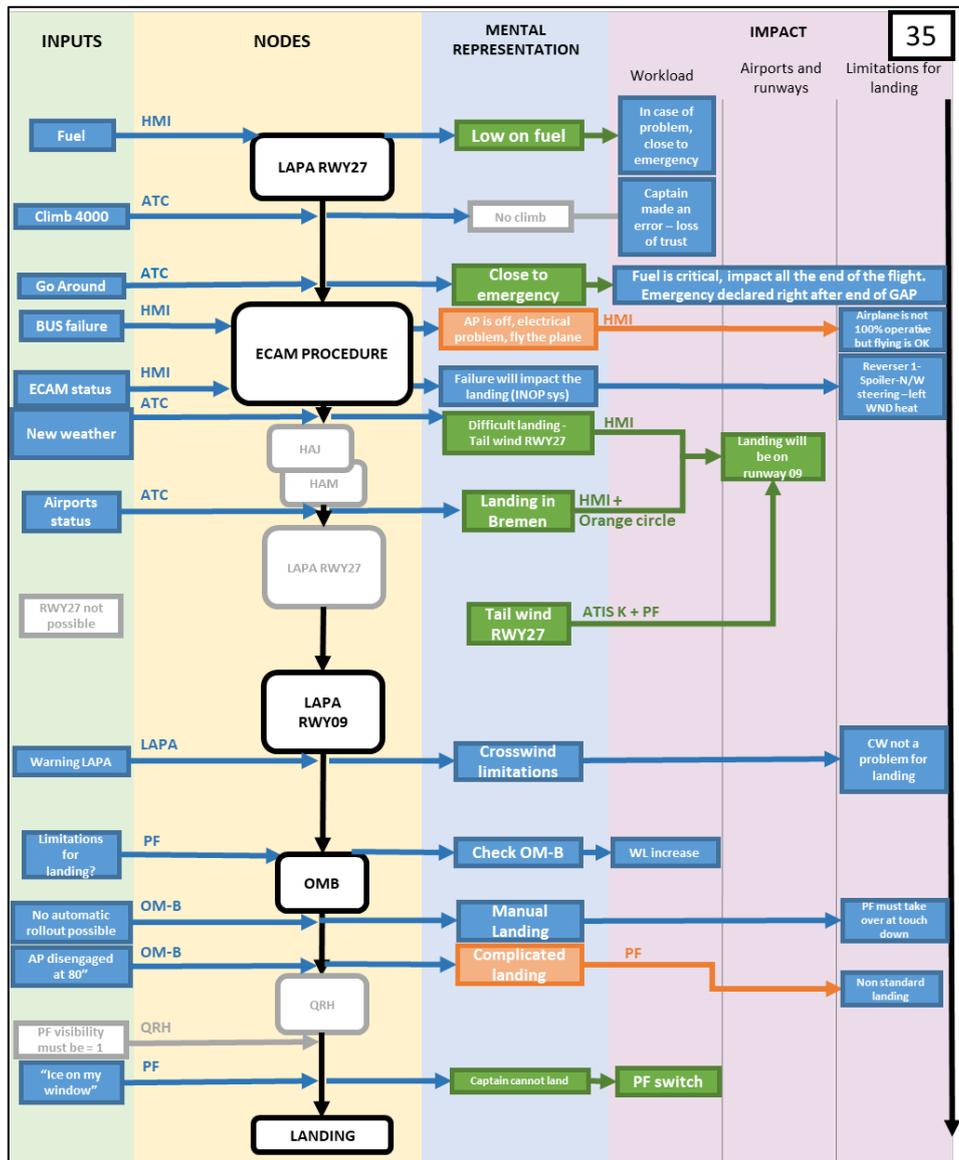


Le copilote a lu à haute voix les systèmes inop et leurs impacts pour l'atterrissage. L'information dans l'OMB "Fuel consumption increased" a fait que le copilote a regardé la quantité de carburant sur le PFD.

Le commandant de bord a demandé d'autres options, ce qui a fait que le copilote a regardé sur l'écran de navigation et a utilisé le cercle orange (30min de carburant restant) et a donc déclaré Mayday.

Le copilote a déclaré Mayday pour le problème électrique, et a demandé le RWY09. Après que l'ATC ait donné le cap 260, le copilote a informé qu'il restait 30 minutes de carburant.

## Copilote 35 :

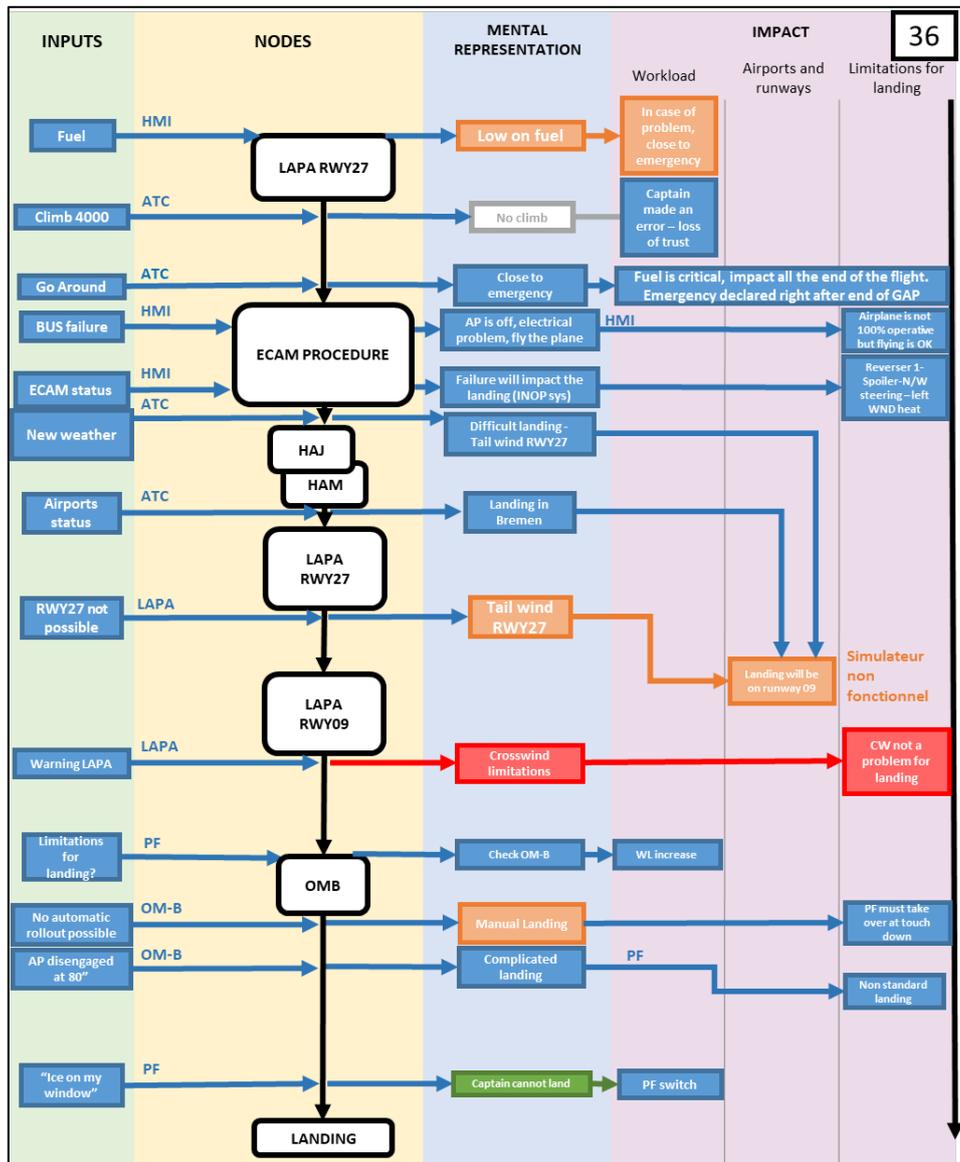


Le premier officier a vu la quantité de carburant au début du scénario.

Le copilote a remarqué que les aéroports de dégagement se trouvaient en dehors du cercle orange et a pris la décision de déclarer Mayday.

Grâce aux nouvelles interfaces, le copilote a très vite vu que seule la piste 09 était disponible pour l'atterrissage.

## Copilote 36 :

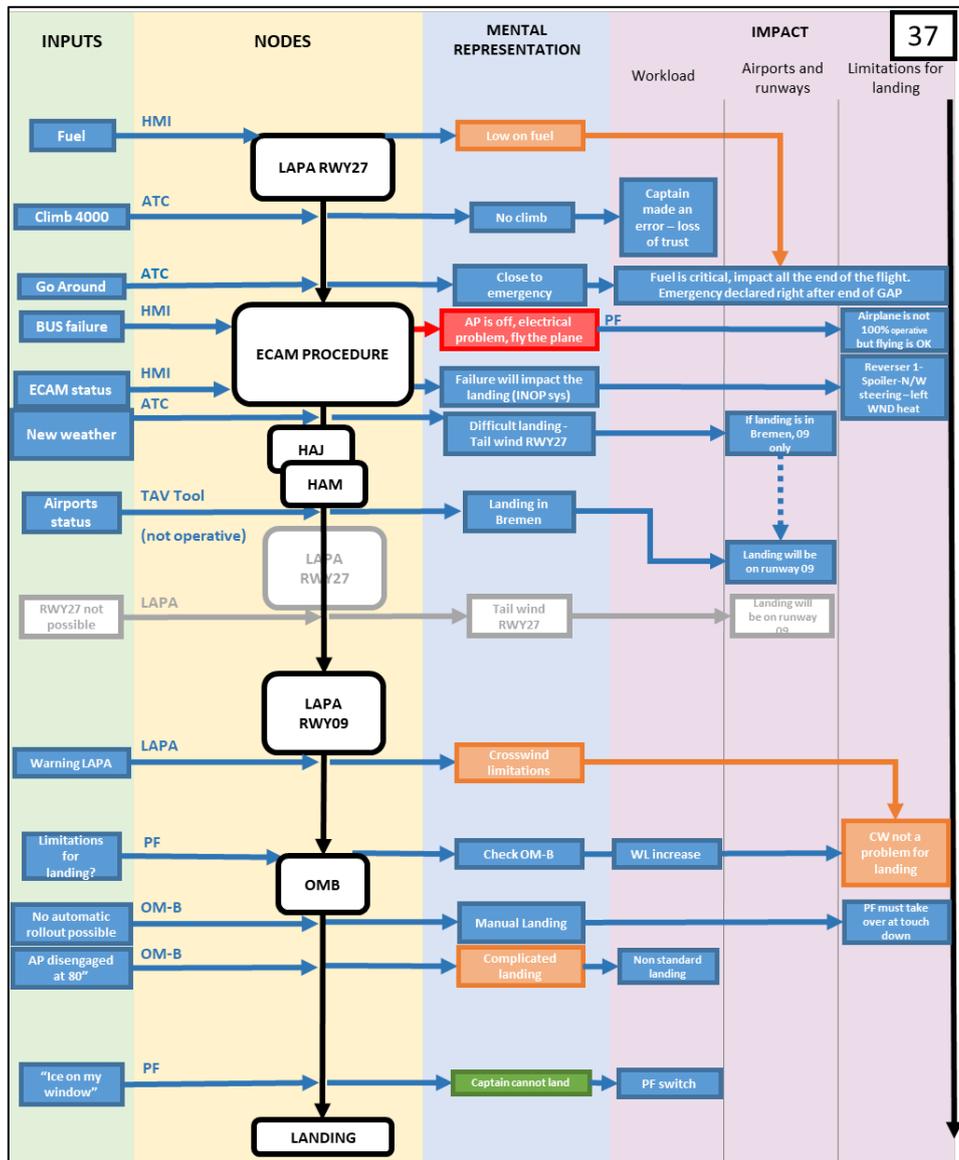


Le premier officier a évalué les options avec le cercle orange (30min de carburant restant) et a donc décidé d'atterrir à Brême

Le co-pilote a déclaré Mayday avec 30min de carburant restant parce que c'est une règle (Final Reserve Fuel Mayday Rule).

En raison d'un dysfonctionnement du simulateur, le copilote n'a pas compris pourquoi l'IHM indiquait que le RWY27 était disponible, alors que le calcul de la LAPA indiquait le contraire.

## Copilote 37 :

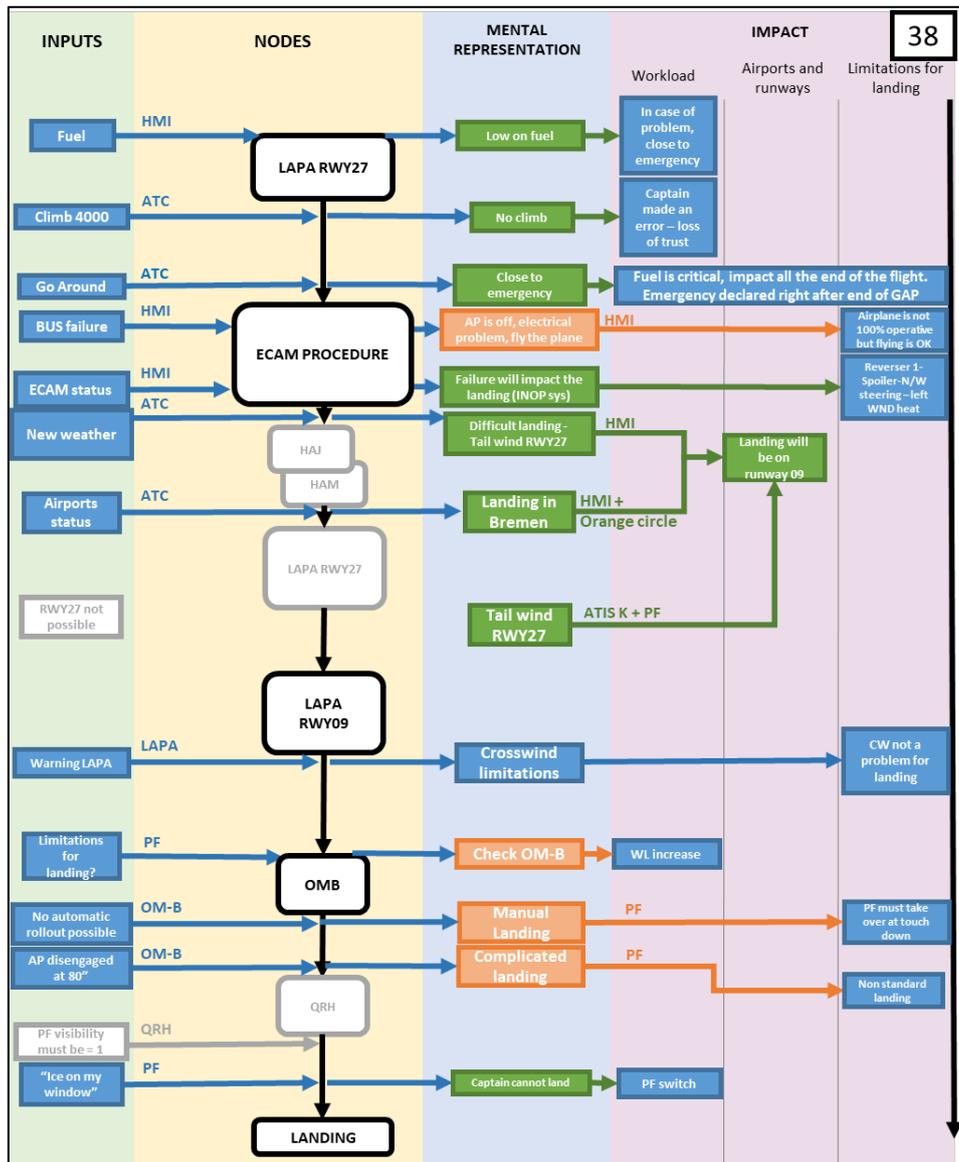


Après l'échec, le copilote a vérifié les RWY disponibles à Brême, Hambourg, Hanovre et, de nouveau à Brême et a choisi le RWY 09 grâce aux IHM.

Le copilote a bien compris qu'il pouvait effectuer un Autoland et déconnecter l'Auto Pilot et faire un Déploiement Manuel.

Le copilote a pris les commandes lors de la dernière approche, en finale, à la demande du commandant de bord et, a essayé d'effectuer un atterrissage manuel.

## Copilote 38 :

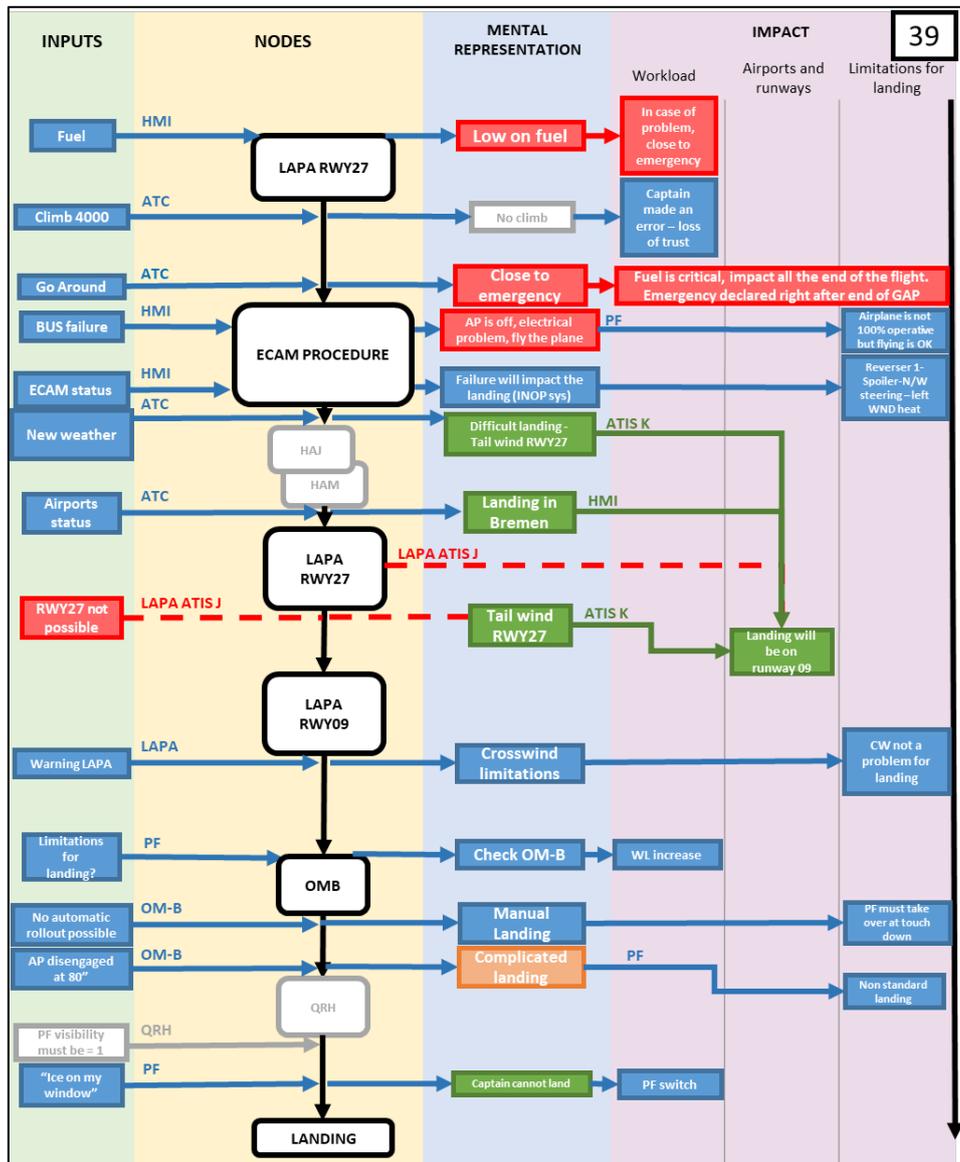


Le copilote a remarqué du carburant avant la première approche, il l'a mentionné pendant le GA.

Le copilote a décidé assez rapidement après le GA d'atterrir sur la RWY 09 à Brême grâce à l'IHM et, a décidé de déclarer Mayday et échec avec 33min de carburant restant. Le calcul du LAPA pour la RWY27 a fait comprendre au copilote pourquoi seule la RWY 09 était disponible.

Le copilote a trouvé les indications dans les systèmes de bord de route "Direction avant, par vent de travers, prévoir un problème de contrôle latéral" mais n'a pas fait le lien plus tard avec le déploiement manuel.

## Copilote 39 :



Le copilote a vu qu'ils étaient à court de carburant lorsque le commandant de bord a montré la jauge sur le PFD.

Le copilote a compris que la piste 09 devait être utilisée lors de la lecture du nouveau bulletin météo.

Le copilote a vérifié la disponibilité des aéroports de dégagement par le biais de l'IHM et non en demandant à l'ATC.

## Copilote 40 :



Le premier officier a mis en marche l'APU après la panne comme générateur de secours, pour garder la redondance.

En raison des conditions météorologiques, le copilote a demandé au début du scénario de chercher des aéroports de remplacement.

Le copilote s'est référé trois fois au cercle orange (30 minutes de carburant restant) et, ne voyant pas d'options faciles, a décidé de déclarer Mayday.

Le copilote s'est souvenu, lors d'une précédente formation sur simulateur, que la capacité réelle d'Airbus, après une panne du AC BUS 1, est de CAT I, ce qui aurait rendu l'atterrissage impossible.

Le copilote a proposé au commandant de bord d'atterrir un peu à gauche de la piste en raison du vent de travers et d'un inverseur de marche en place.