



HAL
open science

Évaluation multidimensionnelle et dynamique de la maîtrise de la situation par l'opérateur : création d'un indicateur temps réel de charge mentale pour l'activité de supervision de drones

Alexandre Sviatoslave Kostenko

► **To cite this version:**

Alexandre Sviatoslave Kostenko. Évaluation multidimensionnelle et dynamique de la maîtrise de la situation par l'opérateur : création d'un indicateur temps réel de charge mentale pour l'activité de supervision de drones. Interface homme-machine [cs.HC]. Université de Bretagne Sud, 2017. Français. NNT : 2017LORIS438 . tel-01677692

HAL Id: tel-01677692

<https://theses.hal.science/tel-01677692>

Submitted on 8 Jan 2018

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

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



THESE / UNIVERSITE DE BRETAGNE-SUD
sous le sceau de l'Université Bretagne Loire

pour obtenir le titre de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE BRETAGNE-SUD

Mention :
Ecole doctorale:

Présentée par Alexandre KOSTENKO
Préparée à l'unité mixte de recherche
(n°) UMR CNRS 6285
Etablissement de rattachement : UBS
Nom développé de l'unité : Lab-STICC
STIC
SICMA

ÉVALUATION MULTIDIMENSIONNELLE ET DYNAMIQUE DE LA MAITRISE DE LA SITUATION PAR L'OPÉRATEUR

Création d'un indicateur temps réel de charge
mentale pour l'activité de supervision de drones

Thèse soutenue le 27/04/2017
devant le jury composé de :

Frédéric DEHAIS
Professeur des Universités, ISAE/ Examineur

Pascal BERRUET
Professeur des Universités, UBS/ Examineur

Julien CEGARRA
Professeur des Universités, UT2/ Rapporteur

Serge DEBERNARD
Professeur des Universités, UVHC/ Rapporteur

Christine CHAUVIN, Professeur des Universités, UBS
Co-directrice de thèse

Gilles COPPIN, Professeur des Universités, TB
Co-directeur de thèse

Philippe RAUFFET, Maître de Conférences, UBS
Co-encadrant de thèse

RESUME

L'évolution de la technologie se traduit par l'émergence de systèmes de plus en plus complexes et automatisés. Dans les situations dynamiques, l'activité de l'opérateur est désormais plus centrée sur la supervision que sur l'exécution. Ces situations sont caractérisées par la complexité, l'incertitude, un contrôle partiel et un risque important de perdre la maîtrise de la situation.

L'objectif principal des travaux présentés dans ce manuscrit est de créer un indicateur synthétique de charge mentale, qui servira à piloter une réallocation des fonctions en temps réel. Il s'agit, in fine, de permettre à l'opérateur de mieux réguler sa charge mentale, et de l'aider à garder ou à récupérer la maîtrise de la situation. Ces travaux sont appliqués à l'activité de supervision d'un essaim de drones étudiée sur une plateforme de simulation (la plateforme SUSIE).

Nous avons pour cela revisité et combiné le modèle de Hart et Staveland (1988), qui considère la charge mentale comme une construction multidimensionnelle et celui de Sperandio (1971), qui se focalise sur les régulations de l'activité. Cela nous a amené à proposer un modèle dynamique et tridimensionnel (basé sur l'analyse des contraintes, des effets de la charge sur la tâche et l'opérateur, et des régulations), sur lequel nous nous sommes appuyés pour construire une démarche de création d'un indicateur synthétique de charge mentale.

Cette démarche se décompose en quatre étapes. La première consiste à réaliser une analyse de la tâche en suivant la méthodologie de Sperandio (1988), afin de définir et d'identifier les descripteurs de la charge mentale suivant les trois catégories de notre modèle dynamique et tridimensionnel. La seconde étape s'appuie sur la réalisation d'une expérimentation, qui vise à valider ou exclure les indicateurs identifiés, en fonction de leur sensibilité aux variations de charge mentale (telle que définie par Cegarra et Chevalier (2008)). Les résultats montrent notamment que le diamètre pupillaire et l'observation des régulations permettent une mesure sensible. La troisième étape a pour objectif de créer un indicateur synthétique de charge mentale en fusionnant par réseaux bayésiens et logique floue les indicateurs retenus. Enfin, la dernière phase supporte la conception d'une allocation dynamique des fonctions, déclenchée à partir de l'indicateur synthétique de charge mentale. Une deuxième expérimentation a été menée afin d'évaluer l'apport de la réallocation. Elle montre que l'aide permet à l'opérateur de mieux réguler son activité ; elle modifie la charge de travail (contrainte), améliore la performance, mais ne réduit pas la charge mentale.

Mots clefs : charge mentale, coopération homme machine, allocation de fonctions, fusion d'informations

SUMMARY

Technological advancements have resulted in the emergence of increasingly complex and automated systems. In dynamic situations, the activity of operators is now more centred on supervision than on execution. These situations are characterized by complexity, uncertainty, partial control, and the significant risk of losing control of the situation.

The main purpose of the work presented in this manuscript is to create a synthetic mental workload indicator, which will be used to trigger a reallocation of functions in real time. The ultimate goal is to enable operators to regulate their mental workload more effectively and to help them maintain or regain control of the situation. This work is applied to the supervision activity of a drone swarm investigated on a simulation platform (the SUSIE platform).

We revisited and combined the model of Hart and Staveland (1988), which considers mental workload as a multidimensional construct, with that of Sperandio (1971), which focuses on activity regulation. This process then led us to propose a dynamic and three-dimensional model (based on the analysis of the constraints, the effects of the workload on the task and the operator, and the regulations), from which we developed a creative approach to a synthetic mental workload indicator.

This activity is divided into four stages. The first stage involves carrying out an analysis of the task, following the methodology of Sperandio (1988), to define and identify the descriptors of mental workload according to the three categories of our dynamic and three-dimensional model. The second stage is based on conducting an experiment designed to validate or exclude the indicators thus identified, depending upon their sensitivity to variations in mental workload (as defined by Cegarra and Chevalier (2008)). In particular, the results show that operators' pupillary diameter and compliance with the regulations allow an appreciable measurement. The third stage aims to create a synthetic indicator of mental load by merging the chosen indicators, using Bayesian networks and fuzzy logic. Finally, the last phase presents the design of a dynamic allocation of functions, triggered from the synthetic indicator of mental workload. A second experiment was carried out to evaluate the contribution of the function reallocation. It shows that the support provided enables operators to regulate their activity more effectively; it modifies the task workload (constraint) but does not reduce the mental workload.

Keywords: mental workload, human machine cooperation, function allocation, information fusion

A ma famille

REMERCIEMENTS

Je remercie tout d'abord mes encadrants de thèse, Christine CHAUVIN, Gilles COPPIN et Philippe RAUFFET pour leur disponibilité, leur soutien et leurs conseils qui ont été nombreux et importants tout au long de ces trois années de doctorat.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à Julien CEGARRA et Serge DEBERNARD, rapporteurs de ce mémoire, ainsi qu'à Frédéric DEHAIS et Pascal BERRUET, examinateurs de ce travail de thèse.

Je remercie également la DGA (Direction Générale de l'Armement) qui a financé ce travail de recherche, ainsi que Didier BAZALGETTE, mon référent DGA.

Je souhaite exprimer ma gratitude aux enseignants et au personnel du département Hygiène Sécurité Environnement de l'IUT de Lorient et de l'école d'ingénieur ENSIBS de Lorient, et plus particulièrement à Gaël MOREL et Clément GUERIN.

Ils m'ont ouvert la porte de leurs départements d'enseignement et permis de réaliser des expérimentations auprès de leurs étudiants. Je remercie également tous les étudiants qui se sont portés volontaires pour participer aux expérimentations ou aux pré-tests.

J'adresse également mes vifs remerciements à Baptiste LEROY et Julie LASSALLE pour leur expertise sur l'acquisition des données physiologiques et pour leur assistance sur la prise en main des appareils de mesures.

Je salue enfin mes collègues de bureau, Julien RECHARD, Cédric SEGUIN, Benoît LANGARD, Valère ALIBERT, Sophie PRAT, Soraya MESLI, Fanny GUENNOC, Amandine PORCHER, Thomas TOUBLANC et Sébastien GUILLET, pour tous ces bons moments de convivialité, de partage et d'amitié.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	1
PARTIE THEORIQUE.....	5
Chapitre I. La maîtrise des situations dynamiques : des contraintes et des capacités _____	7
A. La maîtrise de la situation, une question de fiabilité humaine	7
A.1. L'équilibre du couple homme/tâche.....	8
A.2. Le compromis cognitif pour maintenir l'équilibre.....	9
A.3. Vers une analyse fine des contraintes et des capacités de l'opérateur	10
B. Les contraintes, ou les exigences de la situation	11
B.1. Les propriétés des systèmes sociotechniques complexes	11
B.2. La tâche de supervision d'un système sociotechnique.....	15
B.3. Vers une typologie des tâches de supervision en situations dynamiques	17
C. L'opérateur, un agent cognitif adaptatif.....	23
C.1. Processus cognitif.....	23
C.2. Les ressources support des processus cognitifs	25
C.3. Mécanismes d'adaptation	26
D. Conclusion : pistes d'amélioration de la maîtrise de la situation.....	27
D.1. Détecter : vers une exploration du concept de charge mentale	27
D.2. Aider à réguler : vers une allocation adaptative des fonctions.....	28
E. Résumé.....	29
Chapitre II. La charge mentale : des approches conceptuelles et des méthodes d'évaluation à combiner _____	31
A. Cadre théorique : une approche multidimensionnelle de la charge mentale	31
A.1. Approche exogène : exigence et performance.....	32
A.2. Approche capacitaire	34
A.3. Approche énergétique	37
A.4. Approche holistique : synthèse et régulations	38
A.5. Conclusion : vers une évaluation multi-sources de la charge	50
B. Mesure de la charge mentale en temps réel : sensibilité, sélectivité et caractère diagnostic.....	52
B.1. Dimension cause.....	53
B.2. Dimension Médiateur.....	53
B.3. Dimension Effet.....	55
B.6. Conclusion : vers des indicateurs synthétiques « temps réel ».....	68
Résumé	71

Chapitre III. Les méthodes de fusion d'informations	73
A. La fusion d'informations.....	74
A.1 Les différentes étapes de la fusion d'informations	74
A.2 Les différents niveaux de la fusion d'informations : vers une modélisation structurée de la fusion d'informations	75
A.3 Imperfection des informations : imprécision et incertitude	76
A.4 Autres imperfections.....	77
B. Méthode de fusion d'informations	78
B.1 Théorie des probabilités et réseaux bayésiens	78
B.2 Théorie des croyances	83
B.3 Théorie des ensembles flous.....	86
B.4 Théorie des possibilités.....	88
C. Synthèse des méthodes	91
Résumé	93
Chapitre IV. La coopération homme machine	95
A. Coopération.....	96
A.1 La notion d'interférence.....	96
A.2 Formes de coopération.....	97
A.3 Structure de coopération.....	99
B. Automatisation.....	101
B.1. Niveau d'automatisation.....	101
B.2 Automatisation et processus de traitement de l'information	102
B.3 Evaluation des niveaux d'automatisation	104
C. L'allocation des fonctions.....	106
C.1 Allocation de fonction ou de tâche.....	106
C.2 Principe d'allocation de fonctions.....	107
C.3 Allocation statique et allocation dynamique.....	108
Conclusion	113
Résumé	114
Synthèse de la partie théorique et de la problématique	115
PARTIE EMPIRIQUE	119
Chapitre V. Analyse de l'activité de supervision d'un essaim de drones	123
A. Description de la tâche de supervision d'un essaim de drones	123
A.1. L'activité de pilotage de drone.....	123
A.2. Description de la tâche du système SUSIE.....	126
B. Modélisation de la charge et des boucles de régulation dans le cadre de la supervision de drones..	135
B.1. Modélisation de la contrainte.....	135

B.2. Modélisation de la performance.....	137
B.3. Modélisation des régulations	138
C. Conclusion.....	140
Résumé	142
CHAPITRE VI. Validation expérimentale du modèle multidimensionnel de la charge mentale ____	143
A. Méthode.....	143
A.1. Participants	143
A.2. Equipement.....	144
A.3. Scénario	145
A.4. Entraînement et consignes.....	145
A.5. Mesures.....	146
A.6. Hypothèses	149
B. Résultats	151
B.1. Préparation des données	151
B.2. Analyse des effets de la contrainte informationnelle et de la contrainte multitâche sur l'état de l'opérateur et sur la performance	152
B.3 Analyse des effets des régulations sur l'état de l'opérateur et sur la performance	156
B.4. Analyse des effets de la contrainte informationnelle et de la contrainte multitâche sur les régulations	159
B.5 Discussion	162
D. Conclusion	165
Résumé	167
Chapitre VII. Création d'un indicateur de charge mentale par fusion d'informations _____	169
A. Fusion d'informations pour l'estimation de la charge mentale.....	169
A.1 Identification des variables (informations) et de leur espace d'états, puis définition de la structure de fusion d'informations.....	169
A.3 Définition des tables de probabilité.....	175
A.4 Synthèse de la fusion.....	175
B. Validation de la fusion d'informations.....	176
B.1. Validation de la cohérence et de la sensibilité à partir d'un rejeu des données	176
B.2. Validation expérimentale du caractère diagnostique	184
B.3. Discussion.....	189
C. Conclusion	190
Résumé	192
Chapitre VIII. Création et validation de l'aide à l'opérateur _____	193
A. Aide à l'opérateur.....	193
A.1 Identification des tâches candidates pour l'automatisation.....	193
A.2 Identification des automatisations possibles	197
A.3 Sélection des automatisations par niveau de charge mentale	199

B.	Validation de l'aide à l'opérateur	202
B.1.	Méthode.....	202
B.2	Résultats.....	205
B.3	Discussion.....	213
C.	Conclusion.....	215
	Résumé	216
CONCLUSION GENERALE		217
Bibliographie.....		223
Annexes.....		243
A.	Autres indicateurs de charge mentale issus de l'activation du SNA.....	243
B.	Autres indicateurs issus du SNS : le balayage visuel.....	244
C.	Description de la tâche du système SUSIE.....	245
D.	Le log du démonstrateur SUSIE.....	249
E.	Questionnaire de la première expérience.....	251

TABLE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1 : Les typologies croisées des contraintes</i>	20
<i>Tableau 2 : Les typologies de contraintes, des points de vue externe et interne</i>	22
<i>Tableau 3 : un aperçu des mesures de charge mentale</i>	52
<i>Tableau 4 : Détection des régulations</i>	55
<i>Tableau 5 : Récapitulatif des types de mesures de charge mentale et évaluation de leur qualité</i>	69
<i>Tableau 6 : Imperfections traitées par les différentes théories.</i>	91
<i>Tableau 7 : Niveaux d'automatisation (Sheridan et al., 1978)</i>	101
<i>Tableau 8 : Niveaux d'automatisation (Endsley & Kaber, 1999)</i>	104
<i>Tableau 9 : Tâche réalisée par l'opérateur</i>	134
<i>Tableau 10 : Les différentes stratégies</i>	134
<i>Tableau 11 : Contrainte multi tâches (CT)</i>	137
<i>Tableau 12 : Mesure de RMOP</i>	138
<i>Tableau 13 : Modélisation des boucles de régulation</i>	140
<i>Tableau 14 : Comparaison de l'activité des contrôleurs aériens avec la supervision d'un essaim de drones sur SUSIE.</i>	140
<i>Tableau 15: Régulation</i>	148
<i>Tableau 16 : Synthèse de données retenues par type de mesures</i>	151
<i>Tableau 17: Indicateur retenu pour chaque dimension de la charge mentale</i>	166
<i>Tableau 18 : Informations brutes de bas niveau</i>	171
<i>Tableau 19 : Informations de bas niveau après traitement</i>	172
<i>Tableau 20 : Régulations</i>	173
<i>Tableau 21 : Informations représentant les dimensions de la charge mentale</i>	174
<i>Tableau 22 : Table des probabilités marginales</i>	175
<i>Tableau 23: Objectifs</i>	186
<i>Tableau 24 : Tâches réalisées par l'opérateur</i>	193
<i>Tableau 25 : Automatisations mises en œuvre au niveau 4 de charge mentale</i>	200
<i>Tableau 26 : Automatisations mises en œuvre au niveau 5 de charge mentale</i>	200
<i>Tableau 27 : Objectifs</i>	204
<i>Tableau 28 : la description du log</i>	249

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Plan du manuscrit	3
Figure 2 : La boucle de rétroaction et le délai de réponse	19
Figure 3 : Une classification des situations supervisées	21
Figure 4 : Le modèle de traitement de l'information (Wickens, 1984)	23
Figure 5 : L'exigence et la performance	33
Figure 6 : Le modèle des ressources multiples Wickens (2008)	36
Figure 7 : La triple représentation du modèle de Hart et Staveland (1988)	39
Figure 8 : Les boucles de régulation (Sperandio, 1971, adapté par Loft et al., 2007)	44
Figure 9 : le modèle de Hancock et Williams	45
Figure 10 : Les boucles de régulation sur le modèle de Hart et Staveland	48
Figure 11 : La place centrale de la perception, les critères et les boucles de régulation	49
Figure 12 : Une approche multidimensionnelle de la charge mentale	51
Figure 13 : Schéma d'une RED (Sequeira & D'Hondt, 2013)	59
Figure 14 : Une évaluation multi-sources de la charge mentale	68
Figure 15 : Les différents niveaux de fusion d'informations (martin, 2005)	76
Figure 16 : Graphe acyclique	81
Figure 17 : Exemple de Neapolitan (2004) : graph et tableau	83
Figure 18 : Différence entre logique classique et logique floue	87
Figure 19 : Fuzzification	87
Figure 20 : Exemple de distribution de masse	90
Figure 21 : Synthèse du lien entre la théorie	92
Figure 22 : Structure de coopération verticale (Millot, 1999)	99
Figure 23 : Structure horizontale de coopération (Millot, 1999)	100
Figure 24 : Traitement de l'information Parasuraman et al. (2000)	102
Figure 25 : Niveaux d'automatisation pour chaque fonction du traitement de l'information (Parasuraman et al., 2000)	103
Figure 26 : Distinction entre l'allocation statique et l'allocation dynamique de fonction	109
Figure 27 : Boucle de contrôle hiérarchique dans le cas de pilotage d'un drone (Cummings et al., 2007).	124
Figure 28 : Boucle de contrôle hiérarchique dans le cas de pilotage multi drones (Cummings et al., 2007).	124
Figure 29: Données géographiques et zone prédéfinie affichées sur la carte du système SUSIE	127
Figure 30 : Zone de contrôle	127
Figure 31 : drone	127
Figure 32 : La base	128
Figure 33 : Représentation des véhicules en fonction de leur statut	128
Figure 34 : Message indiquant la présence d'un véhicule prioritaire.	128
Figure 35 : Carte évolutive du système SUSIE	129
Figure 36 : Les différentes étapes de traitement d'un véhicule	130
Figure 37 : Une vue d'ensemble de l'activité de supervision de drones (SADT niveau 0)	131
Figure 38 : Panneau d'identification	133
Figure 39 : Corridor	133
Figure 40 : Le positionnement de l'activité de supervision d'un essaim de drones	141
Figure 41 : Modélisation des dimensions de la charge mentale et rappel des indicateurs	143
Figure 42 : Le dispositif expérimental	145
Figure 43 : Chronogramme illustrant les mesures de P1, P2, et P	147
Figure 44 : chronogramme illustrant la détection d'une régulation basée sur la performance	149
Figure 45 : Synthèse des mesures réalisées dans la 1ère expérience	149
Figure 46 : Les hypothèses de la première expérimentation	151
Figure 47 : Effet de la contrainte informationnelle sur le diamètre pupillaire (DP) et sur la fréquence de clignement (BLKf)	153

Figure 48: Effets de la contrainte informationnelle sur la performance relative au traitement des messages (P1) et sur la performance globale (P)	154
Figure 49 : Effet de la contrainte multitâche (CT) sur la fréquence de clignement (BLKf)	155
Figure 50 : Effets de la contrainte multitâches sur la performance relative au traitement des messages (P1), sur la performance relative au traitement de véhicules (P2) et sur la performance globale (P)	156
Figure 51 : Effet des régulations sur la performance	158
Figure 52 : Effet des régulations sur le diamètre pupillaire	158
Figure 53 : Analyse de la pérennité des effets des boucles de régulation	159
Figure 54: Effets de la contrainte informationnelle (CI) sur le respect des modes opératoires (RMOP)	160
Figure 55 : Nombre de régulations pour la phase A et la phase B et pour chaque boucle de régulation	161
Figure 56 : Effets de la contrainte multitâche sur le respect des modes opératoires	162
Figure 57 : Discrétisation de l'information P1 par logique floue	170
Figure 58 : Réseau bayésien pour estimer le niveau de charge mentale	175
Figure 59 : Effet de la contrainte (C) sur la performance (P)	178
Figure 60 : Effet de la contrainte (C) sur les régulations (Comp)	179
Figure 61 : Effet des régulations (Comp) sur la performance (P)	180
Figure 62 : Effet de la contrainte (C) sur la charge mentale (CM)	181
Figure 63 : Effet des régulations (Comp) sur la charge mentale (CM)	181
Figure 64 : Effet de la performance (P) sur la charge mentale (CM)	182
Figure 65 : Effet de l'activité physiologique (Physio) sur la charge mentale (CM)	183
Figure 66 : Dispositif expérimental	185
Figure 67 : Questionnaire	187
Figure 68 : Corrélations entre l'indicateur de charge mentale et l'évaluation subjective.	188
Figure 69 : Evaluation subjective du temps passé par type de tâche sur l'ensemble du scénario	194
Figure 70 : Evaluation objective du temps passé par type de tâche sur l'ensemble du scénario	195
Figure 71 : Effet de la phase (A - CI faible - / B - CI Forte) sur le temps de réalisation des tâches de traitement des véhicules et de gestion des zones (tests U de Mann-Whitney)	196
Figure 72 : Automatisation possible pour chaque tâche et sur chaque étape du traitement de l'information.	199
Figure 73 : Niveau d'automatisation sélectionné pour chaque étape du traitement de l'information	201
Figure 74 : le dispositif expérimental	203
Figure 75 : Effet de l'aide sur la performance relative au traitement des messages (P1), sur la performance relative au traitement de véhicules (P2) et sur la performance globale (P)	206
Figure 76 : Effet de l'aide sur le nombre de véhicules qui ont été détectés	207
Figure 77 : Effet de l'aide sur le respect de modes opératoires (RMOP)	208
Figure 78 : Effet de l'aide sur le temps consacré aux tâches de traitement des messages et de recherche de véhicule	209
Figure 79 : Effet de l'aide sur la charge mentale (CM)	210
Figure 80: Effet de l'aide sur le temps passé au niveau 4	211
Figure 81 : Effet de l'aide sur la durée moyenne de la phase au niveau 3	212
Figure 82 : La tâche T1 de lecture d'un message (SADT niveau 1)	245
Figure 83 : La tâche T2 de recherche de mobile (SADT niveau 1)	245
Figure 84 : Les actions relatives à la tâche T2 de recherche de mobiles (SADT niveau 2)	246
Figure 85: Les tâches T3 de traitement de mobile (SADT niveau 1)	246
Figure 86 : Les actions relatives au traitement du mobile T3 (SADT niveau 2)	247
Figure 87 : La tâche T4 de gestion des messages (SADT niveau 1)	247
Figure 88 : La tâche T5 de gestion de zones (SADT niveau 1)	248
Figure 89 : La tâche T6 d'inspection (SADT niveau 1)	248
Figure 90 : le log	249

ACRONYMES

ADF : Allocation dynamique de fonction
AED : Activité Electro-Dermale
BLKf : Fréquence des clignements
BLKd : Durée des clignements
CI : Contrainte Informationnelle
CT : Contrainte multi-Ttâche
DP : Diamètre Pupillaire
ECG : Electrocardiogramme
FC : Fréquence Cardiaque
FR : Fréquence respiratoire
HTA : Hierarchical Task Analysis (Annett & Duncan, 1967)
LF : Logique Floue
MO : Mode Opérateur
MOP : Mode Opérateur Prescrit
O : Objectif
RB : Réseaux Bayésiens
RBC : Régulation Basée sur la Conformité
RBCO : Régulation Basée sur le COût
RBP : Régulation Basée sur la Performance
RBPR : Régulation Basée sur la PRiorité
RMOP : Respect des Modes Opérateurs Prescrits
SADT : Structural Analysis and Design Technique (Ross, 1977)
SRK : typologie Skill-Rule-Knowledge (Rasmussen, 1986)
SNA : Système Nerveux Automatique
SNS : Système Nerveux Sympathique
SNsoma : Système Nerveux Somatique
T : Tâche
TCP : Température Cutanée Périphérique
TRM : Théorie des Ressources Multiples (Wickens, 1987, 2002, 2008)
UAV : Unmanned aerial Vehicul
VRC : Variabilité du Rythme Cardiaque
VSP : Volume Périphérique Sanguin

Introduction générale

L'évolution de la technologie au cours de ces dernières années s'est traduite par l'émergence de systèmes de plus en plus complexes et fortement, voire totalement automatisés. Cette forte autonomie peut limiter les capacités de réaction et d'anticipation de l'opérateur, et peut mener au phénomène de « human-out-of-the-loop ». Cependant, l'homme est toujours nécessaire en tant qu'acteur, certaines décisions ne pouvant être prises que par un opérateur humain. Cette évolution conduit donc à repenser les systèmes homme-machine, et à réfléchir à la manière dont les activités de supervision et de contrôle seront réparties entre l'homme et des composantes techniques dont l'autonomie est variable et ajustable (Hoc et al., 2004). Le contrôle aérien, le pilotage d'avion de combat ou encore le contrôle de processus industriel (Hoc, 1996) constituent de très bons exemples de ce type de systèmes homme-machine. Dans le cas du pilotage d'avion, le pilote coopère ainsi avec le pilote automatique et peut lui déléguer certaines tâches (maintien du cap, altitude, vitesse). Le pilote automatique a ici une autonomie variable dans le sens où il peut assumer la totalité, une partie ou aucune de ces tâches, l'opérateur ayant la faculté de reprendre la main sur le système.

Cette mutation s'accompagne en outre d'une évolution de l'activité de l'opérateur, laquelle est maintenant plus centrée sur la supervision que sur l'exécution. L'activité de supervision porte sur des systèmes qui ont leur propre dynamique et qui évoluent dans des environnements parfois turbulents. Ces situations sont donc dynamiques et sont caractérisées par la complexité, l'incertitude, le risque, et un contrôle partiel de l'opérateur puisque des changements surviennent indépendamment des actions de l'opérateur.

Ces mutations s'observent actuellement dans l'activité de pilotage de drone. Elle est de plus en plus automatisée ; l'automatisation concerne notamment les tâches de maintien de la stabilité et de navigation. L'activité de l'opérateur est maintenant centrée sur la supervision ; il intervient uniquement au niveau du management de la mission. Cette transformation du rôle de l'opérateur permet ainsi à ce dernier de superviser et de coordonner plusieurs drones autour de cette mission.

Cependant ce suivi multitâche d'un essaim de drones peut également entraîner une augmentation de la charge de travail. Cette activité est, de plus, soumise à de fortes contraintes temporelles, et l'opérateur ne contrôle pas la totalité du système. Le risque de perdre la maîtrise de la situation est donc important, et pourrait conduire à un échec de la

mission (e.g. cibles manquées), voire à une dégradation du système (e.g. perte d'un drone). Dans le cas d'opérations militaires, la perte de maîtrise de la situation peut s'accompagner de dommages collatéraux et de victimes civiles. Ces risques génèrent un stress important chez l'opérateur qui, bien que physiquement éloigné de sa cible, est souvent moralement fortement engagé. Cet engagement moral est renforcé par les images que renvoient les caméras hautes définition, et qui lui permettent de voir les effets de son attaque (Sharkey, 2010).

L'enjeu, en termes de coopération homme-machine, est donc de pouvoir estimer la maîtrise de la situation de l'opérateur en temps réel, afin d'apporter une aide permettant son maintien ou son recouvrement. Il est en effet impératif de « garder l'homme dans la boucle ».

La notion de maîtrise de la situation renvoie au concept de fiabilité humaine (Leplat, 1985) élargi, ici, à la fiabilité sociotechnique. Il faut en effet assurer à tout instant un bon couplage homme-machine et une performance satisfaisante, par rapport à la tâche demandée et aux conditions de la situation dynamique. Pour maintenir ce couplage homme-machine, l'opérateur adapte son comportement. Ces mécanismes d'adaptation recouvrent différentes stratégies qui ont un coût cognitif différent et qui permettent à l'opérateur de maîtriser la situation (Hoc et al., 2004). La mise en œuvre de ces stratégies est souvent guidée par un critère d'efficacité, i.e. l'atteinte de performances satisfaisantes pour un coût acceptable. Cette notion est proche du concept de "compromis cognitif", défini par Amalberti (1996) comme la gestion du rapport entre les contraintes de la situation et les capacités cognitives de l'opérateur.

Il est impératif d'aider l'opérateur à gérer ce compromis cognitif, pour éviter une perte de maîtrise de la situation ou pour aider l'opérateur à rester « dans la boucle ». Une des solutions consiste à réaliser une réallocation des fonctions en temps réel. Les fonctions initialement attribuées à l'opérateur seront alors attribuées au système pour réduire sa charge de travail. L'une des principales difficultés de l'allocation dynamique de fonctions est de définir le ou les critères de réallocation (performance, charge de travail, activation physiologique, etc.). Ce qui nous renvoie à la question suivante : comment estimer la maîtrise de situation de l'opérateur en temps réel ?

Le concept de charge mentale semble particulièrement intéressant pour anticiper ou détecter une perte de contrôle de la situation. Pour certains auteurs (Mulder, 1986 ; Cegarra &

Chevalier, 2008) la charge mentale peut en effet être évaluée en temps réel, mais cette estimation doit reposer sur plusieurs sources de données et s'appuyer sur des techniques de fusion d'informations, garantissant sa robustesse. Il conviendrait donc de compléter les approches actuelles qui se focalisent principalement sur des mesures physiologiques et sur des mesures de la performance, et ne tiennent pas compte du comportement de l'opérateur et de la contrainte (Schulte, Donath, & Honecker, 2015).

C'est dans ce cadre que s'inscrit cette thèse. L'objectif principal est de créer un indicateur synthétique de charge mentale, qui servira ensuite à piloter une réallocation des fonctions en temps réel, pour permettre à l'opérateur de mieux réguler sa charge mentale, et à garder ou récupérer la maîtrise de la situation.

Les travaux présentés dans ce manuscrit se divisent en deux parties, une partie théorique de quatre chapitres et une partie empirique de quatre chapitres également. Nous pouvons noter un parallélisme entre ces deux parties (cf. Figure 1).

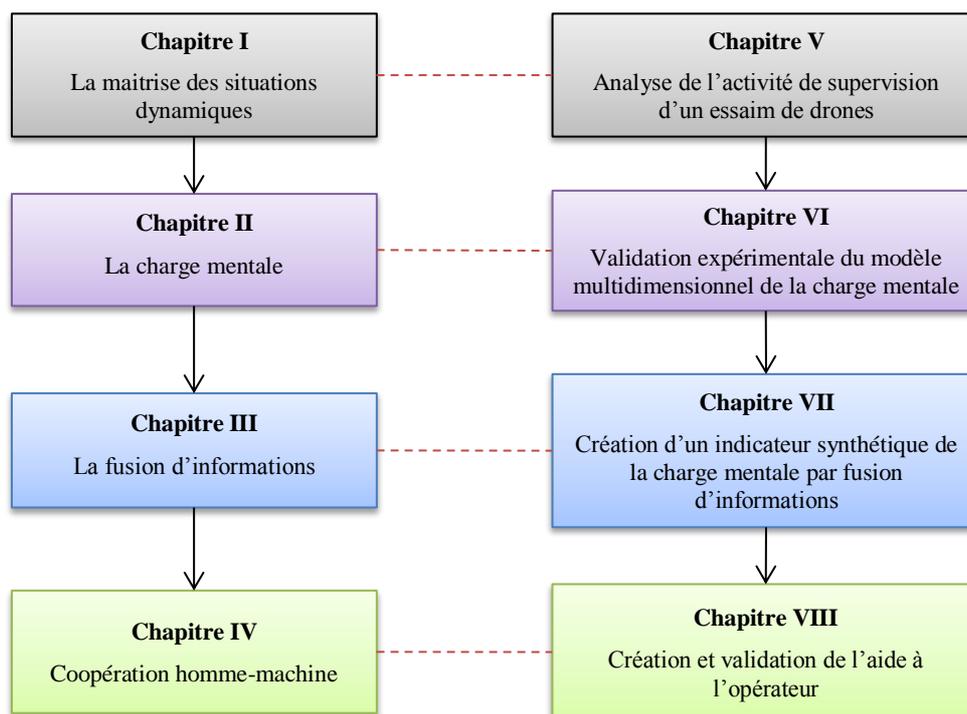


Figure 1 : Plan du manuscrit

Le chapitre I a pour but de répondre à la question : « **Comment caractériser la situation dynamique supervisée, et comment estimer la maîtrise de cette situation par un opérateur en temps réel ?** ». Pour répondre à cette question, nous expliciterons dans un

premier temps la notion de maîtrise d'une situation, ce qui nous amènera à explorer les notions de contrainte ainsi que les capacités cognitives d'un opérateur.

Le chapitre II vise à répondre à la question : « **Comment estimer la charge mentale de l'opérateur ?** ». Quatre grandes approches de la charge mentale sont abordées dans ce chapitre : l'approche exogène, l'approche capacitaire, l'approche énergétique et l'approche holistique. Un modèle tridimensionnel intégrant les causes (la contrainte), les médiateurs (régulation) et les effets (performance et état de l'opérateur) de la charge mentale est proposé, ainsi qu'une modélisation du comportement de l'opérateur basée sur les régulations de l'activité.

Le chapitre III a pour objectif de répondre à la question « **Quelle est la solution la plus adaptée pour fusionner les différents indicateurs de charge mentale ?** ». Nous présenterons quatre grandes théories de la fusion d'informations : la théorie des probabilités, la théorie de l'évidence, la théorie des ensembles flous et enfin la théorie des possibilités.

Le chapitre IV vise à répondre à la question : « **Comment aider l'opérateur à maîtriser la situation ?** ». Dans ce chapitre, nous parlerons de la coopération homme-machine, des niveaux d'automatisation et enfin de l'allocation dynamique de fonctions.

Ce cadre théorique nous permettra de proposer une méthode de construction d'aide à l'opérateur, pilotée à partir d'une mesure synthétique de la charge mentale en temps réel. Cette méthode, présentée dans la partie empirique, se divise en quatre étapes :

- La première (**chapitre V**) consiste à réaliser une analyse de l'activité dans le but d'identifier des indicateurs des trois dimensions de la charge mentale.
- La seconde étape (**chapitre VI**) repose sur la conduite d'une expérimentation permettant d'observer l'incidence de la contrainte sur les régulations, la performance et l'état de l'opérateur, et l'incidence de la dimension « médiateur » sur la dimension « effet », ainsi que de valider les indicateurs identifiés dans l'étape précédente.
- La troisième (**chapitre VII**) vise à créer un indicateur synthétique de charge mentale par fusion d'informations.

Enfin, la quatrième étape (**chapitre VIII**) expose et illustre les principes d'utilisation de cet indicateur synthétique de charge mentale pour configurer et piloter une allocation dynamique des fonctions en temps réel.

Partie théorique

*Modéliser, évaluer et maintenir la maîtrise de
la situation de l'opérateur*

Chapitre I. La maîtrise des situations dynamiques : des contraintes et des capacités

Les activités de supervision peuvent porter sur des processus à risques, comme le contrôle de la production d'une centrale nucléaire, le contrôle du trafic aérien, le pilotage d'un avion ou d'une voiture, etc.

Dans ces activités, il est crucial de limiter le risque d'incident ou d'accident et de s'assurer que l'opérateur maîtrise la situation : ce dernier doit ainsi maîtriser les processus dynamiques du système qu'il supervise, ainsi que les perturbations internes et externes que le système subit (panne technique, météo dégradée, etc.).

La première section (**A**) explicite la notion de maîtrise de la situation, et renvoie à la problématique d'évaluation et d'amélioration de la fiabilité humaine. Ce concept correspond à un équilibre entre les contraintes subies et les capacités cognitives de l'opérateur, équilibre souvent réalisé par un compromis cognitif de l'opérateur qui met en œuvre des mécanismes d'adaptation.

La seconde section (**B**) développe la notion de contrainte, qui conditionne la réalisation de la tâche et la maîtrise de la situation par l'opérateur. Nous chercherons ici à extraire les propriétés des tâches de supervision de systèmes sociotechniques dynamiques, pour ensuite réaliser une typologie de ces tâches de supervision.

La troisième section (**C**) s'intéresse aux capacités cognitives, et présente l'opérateur comme un agent cognitif adaptatif. Trois points clés seront abordés : les processus cognitifs de traitement de l'information, la mémoire et les connaissances qui supportent ce processus, et les mécanismes d'adaptation qui permettent à l'opérateur d'adapter son comportement et de maintenir un niveau acceptable de la maîtrise de la situation.

A. La maîtrise de la situation, une question de fiabilité humaine

Selon Hoc et al. (2004), un sujet maîtrise une situation : « *lorsqu'il la maintient dans un domaine où il peut satisfaire des exigences acceptables en y consacrant des ressources internes (connaissances et énergie) en quantité supportable* ». Ces auteurs nous renvoient à la question de la fiabilité humaine, définie comme « *comme l'expression de la qualité du couplage entre l'homme et sa tâche* » (Leplat, 1985).

Ces deux définitions mettent en avant deux points, que nous détaillons dans les sections A.1 et A.2 :

1. La considération du couple homme/tâche, où les exigences « acceptables » de la tâche doivent s'équilibrer avec l'investissement « supportable » de l'opérateur.
2. L'existence de mécanismes d'adaptation, qui permettent à l'opérateur de maintenir la maîtrise de la situation.

A.1. L'équilibre du couple homme/tâche

Selon Leplat (1985), on peut parler de dégradation de la fiabilité humaine si et seulement si on étudie de manière croisée les caractéristiques de l'opérateur et les exigences de la tâche qu'il effectue. Ainsi, une défaillance s'explique par une mauvaise adéquation entre les exigences de la tâche et l'état et les capacités de l'opérateur : les ressources réellement investies par l'opérateur ne seront pas suffisantes au regard de ce qui est requis par la tâche, car les objectifs sont trop élevés, l'opérateur pas assez formé ou pas assez vigilant, les contraintes de l'environnement trop fortes, etc.

Selon cet auteur, la fiabilité humaine peut être évaluée à partir des erreurs, ainsi que des conditions de fiabilité internes et externes à l'opérateur.

A.1.1. L'erreur humaine

Reason (1990) propose une définition de l'erreur humaine inspirée de la psychologie cognitive : « *le terme d'erreur sera pris en un sens générique, qui couvre tous les cas où une séquence planifiée d'activités mentales ou physiques ne parvient pas à ses fins désirées, et quand ces échecs ne peuvent être attribués à l'intervention du hasard* ». Cela traduit donc l'incapacité de l'opérateur à atteindre un objectif donné selon une procédure prévue.

Les erreurs peuvent être classées en plusieurs catégories qui permettent de les caractériser par des traits généraux. On distingue ainsi trois axes de classification des erreurs :

- Un premier axe s'intéresse aux mécanismes de production d'erreurs (Reason, 1990), selon le comportement involontaire ou délibéré de l'opérateur. On distingue ainsi :
 - les erreurs dues à des actions non-intentionnelles comme les ratés (défaillances dans l'exécution : inversion, désordre, omission du contrôle)

et les lapsus (défaillances dans la mémorisation : oubli des intentions ou des actions passées). Ici l'opérateur exécute des actions qui divergent de ce qu'il avait prévu.

- les erreurs dues à des actions intentionnelles, comme les fautes (mauvaise application d'une bonne règle, ou application d'une mauvaise règle) et les violations (les règles sont enfreintes de manière consciente). Ici l'opérateur réalise des actions qui correspondent à ce qu'il avait prévu.
- Un deuxième axe discrimine les erreurs détectées des erreurs non détectées. Seules les erreurs détectées parmi toutes les erreurs commises pourront être corrigées par des mécanismes de régulation ou d'adaptation (Leplat, 1985).
- Enfin, on peut aussi distinguer les erreurs récupérables et les erreurs irrécupérables (Leplat, 1985), en fonction des résultats obtenus après l'implémentation d'une régulation, d'un mécanisme d'adaptation, par l'opérateur.

Un opérateur humain produit donc régulièrement des erreurs. Elles sont souvent vues de manière négative, comme une non-performance, car elles signifient que l'opérateur n'a pas répondu aux exigences de la tâche. Cependant, les erreurs font également partie du processus d'apprentissage et les analyser permet de comprendre leur origine, et de trouver des mesures correctives propres à la prévention (Leplat, 1985).

A.1.2. Les conditions de fiabilité

La fiabilité humaine dépend de conditions internes à l'opérateur, ainsi que de conditions externes (Leplat, 1985). Les conditions de fiabilité externes sont les caractéristiques extrinsèques à l'opérateur qui peuvent influencer son activité, comme la prescription de la tâche, l'état des moyens techniques auxquels il a accès pour accomplir la tâche, l'organisation du domaine de travail (conçue par l'entreprise), la culture de sécurité, etc. Les conditions de fiabilité interne concernent les caractéristiques intrinsèques de l'opérateur qui ont une incidence sur son activité, comme son niveau d'apprentissage, sa représentation mentale, etc.

A.2. Le compromis cognitif pour maintenir l'équilibre

Selon Amalberti (1996), maîtriser la situation - ou maintenir un haut niveau de fiabilité humaine - consiste, pour l'opérateur, à gérer un compromis « cognitif » entre les ressources investies et les exigences de la tâche à traiter. Cela renvoie aussi à l'idée d'efficacité (Leplat, 1989), qui traduit l'atteinte du résultat à moindre coût (cognitif).

Selon Hoc et al., (2004) ce compromis cognitif se traduit par une adaptation, qui repose sur une représentation de la situation (des exigences et des ressources). Selon Piaget (1974) l'adaptation correspond à une équilibration entre deux mécanismes complémentaires :

- L'assimilation de la situation courante à une situation maîtrisée (connue). Ce mécanisme correspond à une simplification de la représentation des exigences afin qu'elle soit gérable avec les ressources disponibles (connaissances et énergies).
- L'accommodation des situations maîtrisées à la situation courante (inconnue). Ce mécanisme correspond à l'enrichissement de la représentation de l'opérateur, et vient accroître ses connaissances. Ce mécanisme correspond donc à un apprentissage, qui permet à l'opérateur de vérifier, d'infirmer ou d'améliorer les règles qu'il suit pour réaliser la tâche.

A.3. Vers une analyse fine des contraintes et des capacités de l'opérateur

En résumé, on peut, selon Leplat (1985), déterminer la maîtrise de la situation par l'opérateur en évaluant la fiabilité humaine. Deux moyens peuvent être utilisés :

- l'analyse des erreurs permet une observation a posteriori de la dégradation de la maîtrise de la situation ;
- l'analyse des conditions internes et externes de fiabilité permet de réaliser une estimation a priori, un diagnostic, de la maîtrise de la situation.

Cette deuxième voie nous paraît la plus prometteuse, si l'on veut anticiper, évaluer en temps réel la maîtrise de la situation, avant que les erreurs ne se produisent et qu'elles entraînent des incidents ou des accidents.

Il faut donc considérer que :

- l'opérateur possède des ressources internes qu'il met en œuvre pour répondre aux contraintes externes de la situation.
- l'opérateur s'adapte à partir de la perception de ses ressources et des exigences, dans le but de maintenir un niveau de fiabilité acceptable.

Nous allons donc nous pencher dans les prochains paragraphes, d'une part sur ce qui est externe et imposé à l'opérateur, à savoir les contraintes de la situation, et d'autre part sur ce

qui est interne à l'opérateur, à savoir les processus cognitifs qu'il met en œuvre, sa mémoire et ses connaissances, et ses mécanismes d'adaptation.

B. Les contraintes, ou les exigences de la situation

Selon Sperandio (1988) la contrainte correspond à : « *l'ensemble des exigences du travail relatives à un poste donné, dans des conditions de travail données. Elle ne dépend aucunement des caractéristiques de l'opérateur* ».

Nous allons dans cette partie nous intéresser à la tâche de supervision d'un opérateur sur les processus d'un système sociotechnique complexe et dynamique. Pour comprendre les contraintes de cette tâche, il faut donc déterminer celles qui sont relatives à la nature des systèmes sociotechniques complexes (B.1), et celles en lien avec les prescriptions données à un opérateur (B.2). Nous discuterons ensuite de ce que ces contraintes cognitives impliquent pour la maîtrise des situations dynamiques (B.3).

B.1. Les propriétés des systèmes sociotechniques complexes

La théorie des systèmes complexes est née du besoin de comprendre « l'infiniment complexe ». Les produits, les services et les organisations sont en effet de moins en moins simples¹, de moins en moins prédictifs. Wiener (1950), Von Bertalanffy (1950), de Rosnay (1975) et Le Moigne et Orillard (1990) ont été à travers ces dernières décennies les pionniers et les théoriciens de l'approche système. Ils ont cherché à caractériser ce qu'était un « système complexe », et à fournir des méthodes et des outils pour en permettre l'étude.

Cette théorie systémique a par ailleurs été spécifiée, dans le but de considérer les interactions de l'homme avec le système technique. Elle s'est ainsi enrichie d'une approche sociotechnique (Emery & Trist, 1960, Baxter & Somerville, 2011).

Les sections suivantes résument les concepts développés par ces deux approches, en cherchant à identifier des contraintes imposées à l'opérateur.

¹ Il ne faut pas confondre complexe et compliqué. Un système compliqué est un système difficile à comprendre car il est « embrouillé », désordonné : on pourrait donc le simplifier pour en améliorer le pilotage. Un système complexe est un système difficile à maîtriser du fait des multiples imbrications et des multiples interactions de ses composants. Un problème de mathématique est compliqué s'il est mal posé, et il est complexe s'il prend en compte de nombreux couplages entre variables. De la même manière, si simple est le contraire de complexe, simplifié est le contraire de compliqué.

B.1.1. Vue systémique : contraintes structuro-temporelles

Un système complexe est un système dynamique ouvert, caractérisé par un ensemble d'éléments dont les variations sont fortement couplées (Bertalanffy, 1951, De Rosnay, 1975).

D'après l'auteur du « Macrocospe », cette définition met en exergue six propriétés :

1. Un système complexe est « téléologique » ou « finalisé » : il a une finalité, un but.
2. Un système complexe est composé d'un ensemble d'éléments ou d'agents, physiques ou virtuels.
3. Un système complexe possède une structure, qui permet d'agencer ses composants, à l'aide de réseaux ou de hiérarchies.
4. Tout ou partie du système évolue en fonction d'un comportement non linéaire.
5. Les éléments du système complexe sont en interaction dynamique.
6. Le système complexe est apprenant et a une capacité d'auto-organisation.

Analyse

Ces deux définitions soulignent plusieurs éléments importants pour la compréhension des contraintes que va devoir traiter l'opérateur :

- **L'environnement** : la notion de système « ouvert » pose l'existence d'une frontière entre éléments. Il y a les éléments organisés qui appartiennent au système, et ceux qui lui sont extérieurs, organisés ou non. On appelle l'ensemble de ces éléments l'environnement.
- **La tâche** : l'opérateur utilise ou supervise le système pour mener à bien une mission, pour atteindre un objectif (point 1). Cela correspond à la tâche à laquelle il doit répondre. Nous reviendrons sur la notion de tâche dans la partie B.2.
- **La structure** : Les composants et les interactions entre composants sont cadrés par une structure, et ce sur plusieurs niveaux (points 2 et 3). Selon Flament (1965) : « *Une structure est un ensemble d'éléments entre lesquels existent des relations et telle que toute modification d'un élément ou d'une relation entraîne une modification des autres éléments ou relations* ».
- **Le comportement dynamique** : le système et ses composants ont des comportements dynamiques, non linéaires et pas forcément convergents (points 4 et 5). Ces variations des états des différents niveaux du système correspondent à des processus de transformations spatiales et temporelles.

- **L'émergence de nouvelles propriétés** : L'interdépendance des éléments composant le système entraîne, à un niveau holistique, l'émergence de nouvelles propriétés (point 6) et une évolution difficilement prédictible (Müller, 2002, Hassas, 2003). Le système est ainsi irréductible et non sommatif : les propriétés du « tout » sont plus que la somme des propriétés de ses « éléments ». Cette notion d'émergence s'articule autour de plusieurs critères (Georgé, Gleizes & Glize, 2003) caractérisant l'apparition d'un nouveau phénomène. Celui-ci doit être :
 - Ostensible : il n'est observable qu'au niveau macroscopique.
 - Radicalement nouveau : il n'est pas prévisible et n'est pas observable au niveau microscopique.
 - Cohérent : il a sa propre identité, mais il est fortement lié aux parties microscopiques.
 - Doté d'une dynamique particulière : il n'est pas prédéfini, il s'auto-crée et s'auto-maintient.

Synthèse

Selon Mèlèze (1972), tous ces points expliquent la notion de complexité ressentie par l'opérateur, définie comme « *l'incapacité que l'on a de décrire tout le système et de déduire son comportement à partir de la connaissance des comportements de ses parties* ». Cette incapacité est bien explicitée par la notion d'émergence.

L'opérateur qui supervise un système complexe est donc confronté à des aléas issus des interactions internes entre les différents niveaux de structure du système, mais aussi des interactions externes, entre le système et l'environnement. Le système et l'environnement génèrent donc des contraintes structuro-temporelles : la taille de la structure et le nombre d'interactions (contraintes structurelles), ainsi que le nombre et la fréquence des changements d'états des composants et du système (contraintes temporelles) amènent l'opérateur à prendre des décisions pour faire face à des situations dynamiques et incertaines.

B.1.2. Vue sociotechnique : contraintes de distances opérateur-système-environnement

L'approche systémique cherche à caractériser la capacité – émergente – d'auto-organisation, laquelle s'oppose à la production d'entropie (de désordre) au sein des systèmes complexes (Prigogine, 1988). Elle s'appuie notamment sur l'étude de la structure et des mécanismes cybernétiques (de régulation), qui permettent le maintien d'une stabilité dynamique (Chorley, 1962). Cette analyse peut être appliquée sur le cas particulier des systèmes sociotechniques

(Baxter & Sommerville, 2011) qui présentent à la fois des composantes humaines, techniques et organisationnelles.

Cette approche sociotechnique critique une vision et une utilisation trop techno-centrée de la théorie systémique, et propose d'étudier plus en détail les interactions entre les trois composantes du système sociotechnique. Sont distinguées :

- **La partie humaine** : elle correspond à tous les êtres humains qui interagissent avec le système. Dans le cas du pilotage d'avion, la partie humaine correspond au pilote, au copilote, au contrôleur, etc. Notons le rôle particulier de l'opérateur, à la fois composant et pilote du SST ; comme nous le verrons par la suite, il prend en compte la perception de son état pour adapter son comportement lors de l'activité de supervision. Les autres personnes sont des ressources de l'environnement de l'opérateur avec lesquelles il va pouvoir interagir.
- **La partie technique** : Cette partie correspond à la partie hardware et software du système. Dans le cas du pilotage d'avion, cette partie correspond à l'avion (fuselage, les gouvernes, les commandes, les systèmes embarqués, etc.).
- **La partie organisationnelle** : elle correspond aux règles, aux procédures, aux normes, aux standards qui viennent encadrer les relations entre opérateurs, et entre opérateurs et machines. Ceux-ci soutiennent les processus transactionnels et transformationnels de l'entreprise (Burns, 1978), la culture de sécurité, ...

Analyse

Cette décomposition des systèmes sociotechniques fait apparaître plusieurs points clés :

- **Des contraintes variées** : l'opérateur va devoir superviser et gérer des interactions hybrides (homme-homme, homme-machine, machine-machine), avec une pression plus ou moins forte des standards l'organisation.
- **Deux niveaux de conditions externes pour l'opérateur** : Selon Chauvin (2008) l'environnement désigne « *l'ensemble des conditions externes existant à un moment et à un endroit donnés. À l'intérieur de cet ensemble, on peut distinguer les faits qui sont pertinents pour l'activité et qui forment le contexte permettant d'agir, de communiquer et de raisonner* ». Si l'on prend le point de vue de l'opérateur, on

distingue alors deux niveaux de description des conditions externes de l'opérateur : un environnement interne et un environnement externe au système sociotechnique (Badham, Clegg & Wall, 2000). Dans le cas du pilotage d'avion, l'environnement externe correspond aux conditions météorologiques (vent, nuage, température, etc.), au relief, aux conditions réglementaires (priorité, altitude de vols), etc., et l'environnement interne correspond par exemple aux bruits à l'intérieur de cockpit.

Synthèse

Les deux niveaux de conditions externes supposent l'existence de deux frontières. On peut alors se poser des questions en termes de contraintes de distance, entre l'opérateur et le système sociotechnique auquel il appartient et qu'il supervise (environnement interne), et entre l'opérateur et l'environnement du système (environnement externe).

B.1.3. Des contraintes systémiques, et la piste de l'influence organisationnelle

L'approche systémique et sociotechnique permet donc une meilleure compréhension de l'influence des interactions entre composantes humaines, techniques et organisationnelles sur le maintien (ou la rupture) de la maîtrise de la situation par l'opérateur. Deux catégories de contraintes cognitives ont ainsi pu être identifiées : les contraintes structuro-temporelles d'une part, et les contraintes de distances entre l'opérateur, le système et l'environnement.

Par ailleurs, la propriété téléologique d'un système complexe (il a un but, il sert à une mission), et la composante organisationnelle du système sociotechnique amènent une réflexion sur le poids des règles, des normes, des procédures dans la définition des tâches confiées à l'opérateur. Nous allons aborder les contraintes relatives à la définition des tâches dans les paragraphes suivants.

B.2. La tâche de supervision d'un système sociotechnique

L'opérateur répond à une tâche de supervision d'un système sociotechnique complexe : il doit donc répondre à des contraintes liées aux objectifs de la tâche et aux procédures associées.

B.2.1. Distinction entre tâche et activité

Selon Leplat et Hoc (1983) une tâche est définie comme un but à atteindre dans certaines conditions.

- **Le but** : le but correspond au résultat final à atteindre.

- **Les conditions** : les conditions de travail concernant les états (état à parcourir avant l'atteinte de l'état final), les opérations que peut réaliser l'opérateur et les procédures (combinaison d'opérations).

Une tâche peut provenir d'un donneur d'ordre. Dans ce cas, elle correspond à ce que l'on attend du sujet et est appelée tâche prescrite. Par exemple, un mode d'emploi ou une recette de cuisine définissent des tâches prescrites. Une même tâche peut être décrite de différentes manières, avec plus ou moins de détails. Ce niveau de détail aura une incidence sur l'activité.

Selon ces mêmes auteurs, l'activité correspond à : « *ce qui est mis en œuvre pour réaliser la tâche* ». Ces auteurs distinguent deux types d'activités :

- **L'activité d'élaboration** : Cette activité correspond à l'élaboration des procédures à mettre en œuvre pour réaliser la tâche. Cette activité se situe au niveau cognitif, elle est donc inobservable directement.
- **L'activité d'exécution** : Cette activité correspond à la mise en œuvre des procédures élaborées, et peut être observée.

Le niveau de description de la tâche aura une incidence sur le niveau de l'activité d'élaboration. En effet, une tâche peu ou mal décrite demandera, en plus de l'activité d'exécution, une activité d'élaboration importante.

Il est possible qu'il y ait un écart entre la tâche prescrite et l'activité. Cet écart s'explique par le fait que :

- Le sujet n'a pas forcément le même objectif que celui de la tâche prescrite.
- La tâche prescrite se traduit dans la réalité, selon Guillevic et Chiva (1999), en tâche « induite » (le sujet subit les contraintes de l'environnement lors de la réalisation de la tâche) et en tâche « spécifiée » (le sujet peut lui-même introduire des contraintes propres à ses motivations, à son état).
- Le sujet adapte ses modes opératoires en fonction de l'exigence de la tâche.

La tâche réalisée n'est donc pas forcément la tâche prescrite, Leplat et Hoc (1983) parlent de tâche effective. Selon ces auteurs, la tâche effective est définie par le but et les conditions effectivement pris en compte par le sujet.

B.2.2. Des contraintes formelles : le niveau de prescription de la tâche

La définition de la tâche joue donc un rôle important dans les contraintes imposées à l'opérateur. Certains domaines de travail développent ainsi un niveau de prescription des tâches très élevé, afin de garantir des niveaux de performance et de sécurité suffisants et satisfaisants. On constate ainsi que les entreprises ou les secteurs d'activité visant la qualité totale ou le zéro accident mettent en place et diffusent de nombreux standards et de nombreuses procédures, qui nécessitent un apprentissage important de la part des opérateurs. On distingue ainsi, selon Amalberti (2007), Morel, Amalberti, et Chauvin (2008 ; 2009) et Falzon (2013), les domaines de travail « réglés », comme le contrôle aérien, le pilotage d'avions de ligne ou de chasse, ou la supervision de centrale nucléaire (très prescrit, avec peu de degrés de liberté dans les décisions prises par les opérateurs) et les domaines de travail « gérés », comme le secteur de la pêche (où l'on observe plus souvent des compromis entre sécurité et performance, voire parfois des violations du critère de sécurité).

Les tâches peuvent donc être caractérisées par un niveau de prescription, qui dépend souvent de la culture de sécurité et de qualité de l'entreprise. Fine et Wiley (1971) proposent ainsi, dans leur analyse fonctionnelle du travail (Functional Job Analysis), de mesurer le degré de « prescription » et de « discrétion » des tâches. La prescription renvoie aux aspects procéduraux de la tâche, l'opérateur n'est alors qu'un exécutant. La partie discrétionnaire de l'analyse est quant à elle liée aux aspects non prescrits de la tâche, l'opérateur est alors décideur, et exerce son libre arbitre.

Les contraintes peuvent être donc systémiques (liées aux propriétés intrinsèques des systèmes sociotechniques complexes) et formelles (liées à la manière dont la tâche est formalisée et prescrite à l'opérateur). Nous allons maintenant utiliser ces axes d'analyse pour classifier les tâches de supervision en situations dynamiques.

B.3. Vers une typologie des tâches de supervision en situations dynamiques

Selon Hoc et al., (2004) une situation est dynamique lorsque des événements non prédictibles surviennent de manière spontanée, générant des incertitudes, des processus de prises de décision (et donc d'éventuelles erreurs). C'est généralement le cas des systèmes ouverts, qui peuvent évoluer sans intervention de l'opérateur : la situation n'est alors que sous un contrôle partiel de l'opérateur. Par exemple, un navire peut se déplacer sous l'effet des courants, même

si les moteurs sont arrêtés et l'opérateur est inactif. Les paragraphes suivants présentent des critères de classification des situations dynamiques, puis exposent une synthèse des cadres théoriques présentés ci-avant.

B.3.1. Les dimensions cognitives des situations dynamiques

Hoc (1996, p.47) propose une liste non exhaustive des dimensions cognitives, lesquelles permettent de typer les situations dynamiques en fonction des caractéristiques du processus que l'opérateur supervise :

- **L'étendue du champ de supervision et de contrôle** : Dans une situation dynamique, l'opérateur ne contrôle pas toutes les variables qui affectent le processus. Le champ de contrôle peut être défini comme l'étendue de l'arborescence des causes d'évolution du processus. Si ce champ de contrôle est restreint (peu d'informations transmises et peu d'actions possibles), les possibilités d'anticiper et les possibilités de solution sont limitées.
- **La proximité du contrôle et le délai de réponse** : La proximité du contrôle concerne les possibilités d'action plus ou moins directe sur les variables cruciales du système (température d'un four, vitesse d'un avion...). L'opérateur peut avoir un contrôle direct (il peut modifier directement la variable) ou indirect (il doit agir sur une variable qui va ensuite modifier la variable souhaitée). On s'intéresse donc ici à la longueur des chaînes causales (nombre de variables intermédiaires), et au temps de réponse. Ceci nous amène à parler des boucles de rétroactions (cf. Figure 2). La figure 2 met en évidence trois types de délai **1.** le délai de réponse correspond au retard entre l'action et l'effet. **2.** Le délai de rétroaction correspond au retard entre l'effet de l'action et le moment où l'opérateur en prend connaissance. **3.** Dans certains cas, il peut y avoir en plus une étape d'analyse entre l'effet et le délai de rétroaction ; une analyse est nécessaire lorsque les effets des actions ne sont pas directement visibles. Ainsi, dans le cas de la conduite d'une aciérie (où l'opérateur doit transformer de la fonte en acier d'une certaine nuance), il est nécessaire de réaliser un prélèvement et une analyse laboratoire du produit toutes les 5 minutes, et les résultats sont transmis avec un retard de cinq minutes. Ce qui veut dire que l'opérateur connaît les effets de ces actions uniquement après la phase d'analyse.

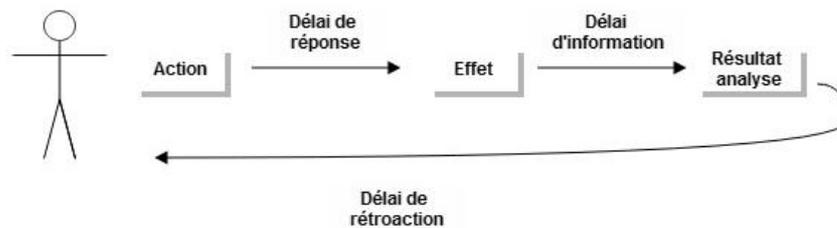


Figure 2 : La boucle de rétroaction et le délai de réponse

- **L'accessibilité du processus** : L'accès aux informations sur les variables peut être plus ou moins direct, suivant la transparence du système. Généralement les variables issues de capteurs sont à accès direct (il suffit d'afficher la valeur issue du capteur), alors que les variables fonctionnelles (qui se basent sur d'autres variables, par exemple $\text{Variable_fonctionnelle1} = \text{Variable_capteur1} + \text{Variable_capteur2}$) sont à accès indirect, car elles nécessitent une fusion de donnée, une interprétation... Selon Sarter et Woods (1992), l'une des conséquences de l'opacité du système est la réduction de prédictibilité. Dans le cas où le nombre d'informations (même pertinentes) est trop élevé, l'opérateur peut ne pas réussir à toutes les traiter. Les informations non pertinentes ne font que gêner l'opérateur en le surchargeant, tandis qu'une information transmise au mauvais moment perd en pertinence.
- **Continuité et discontinuité** : Cette dimension concerne les changements subis par les variables. Dans un processus continu, les variables évoluent de valeur en valeur voisine, alors que dans un processus discontinu, les variables prennent une valeur qui peut être éloignée de la précédente.
- **Vitesse du processus** : Chaque processus a sa propre dynamique, qui peut varier d'une milliseconde à plusieurs heures. Amalberti (1996, p.49) évalue la dynamique du processus à partir de « la durée moyenne des états de ce processus et la vitesse de transition d'un état à l'autre ». Il existe donc des processus rapides (pilotage d'avion) et des processus lents, mais il peut également y avoir des phases rapides dans un système lent et des phases calmes dans un système rapide. Plus la dynamique du système est lente, plus l'opérateur a de temps pour l'anticipation et la planification en temps réel. Amalberti (1996, p.50) parle de pression temporelle (temps dont l'opérateur dispose pour prendre une décision et agir sur le système en tenant compte du délai de réponse). Zakay et Wooder (1984), de même que Klein, Oranasu et Calderwood (1993) montrent que la pression temporelle réduit l'élaboration des stratégies en réduisant le nombre de solutions envisagées.

B.3.2. Synthèse théorique et positionnement de différents domaines de supervision

Dans cette partie nous avons exploré les différentes contraintes imposées à l'opérateur. Nous avons vu que les contraintes dépendent de différentes caractéristiques du SST que l'opérateur supervise et de la tâche qui définit cette activité de supervision. Le tableau 1 récapitule ces contraintes, en croisant la distinction entre contraintes systémiques et contraintes formelles d'une part, et la classification de Hoc et al. (2004) d'autre part.

Tableau 1: Les typologies croisées des contraintes

CONTRAINTES FORMELLES ET SYSTEMIQUES	Distances opérateur-système-environnement	Contraintes structuro-temporelles	Niveau de prescription
TYPOLOGIE DE HOC	<ul style="list-style-type: none"> - Accessibilité du processus. - Proximité de contrôle et délais de réponse. 	<ul style="list-style-type: none"> - Vitesse du processus. - Continuité. - Etendue du champ de contrôle et de supervision. 	<ul style="list-style-type: none"> - Performance / sécurité gérée ou réglée - Savoir et savoir-faire prérequis

Nous pouvons donc positionner différentes situations supervisées les unes par rapport aux autres, en fonction des axes d'analyse ci-dessus (cf. Figure 3).

Par exemple, le pilotage de sous-marin est caractérisé par :

- des distances importantes entre l'opérateur, le système et l'environnement (le barreur ne voit pas le milieu dans lequel le sous-marin évolue, il ne voit pas le mouvement des barres qu'il contrôle, et il y a une latence entre l'intention imprimée sur le palonnier et le changement de direction du navire) ;
- des contraintes structuro-temporelles moyennes (la structure des variables supervisées est relativement complexe, surtout dans le cas de sous-marins de type barre en X, mais la dynamique du système est assez lente) ;
- et un niveau de prescription important (des routines sont apprises par cœur pour chaque situation critique et récitées sous forme de « litanies »).

Situations de supervision ou de pilotage	Distance opérateur-système-environnement	Contrainte Structuro-temporelles du système	Niveau de prescription de la tâche de pilotage
Sous-marin militaire	Fort	Moyen	Fort
Avion de chasse (Rafale)	Faible	Fort	Fort
Avion de ligne	Faible	Fort	Fort
Bateau marine marchande	Moyen	Moyen	Moyen
Bateau de pêche	Faible	Moyen	Faible
Voiture	Faible	Moyen	Faible
F1	Faible	Fort	Moyen
Vélo	Faible	Faible	Faible
Contrôle aérien	Fort	Fort	Fort
Centrale nucléaire	Fort	Fort	Fort
Production industrielle agro-alimentaire	Moyen	Moyen	Moyen
Production nautique (petit chantier)	Moyen	Faible	Faible

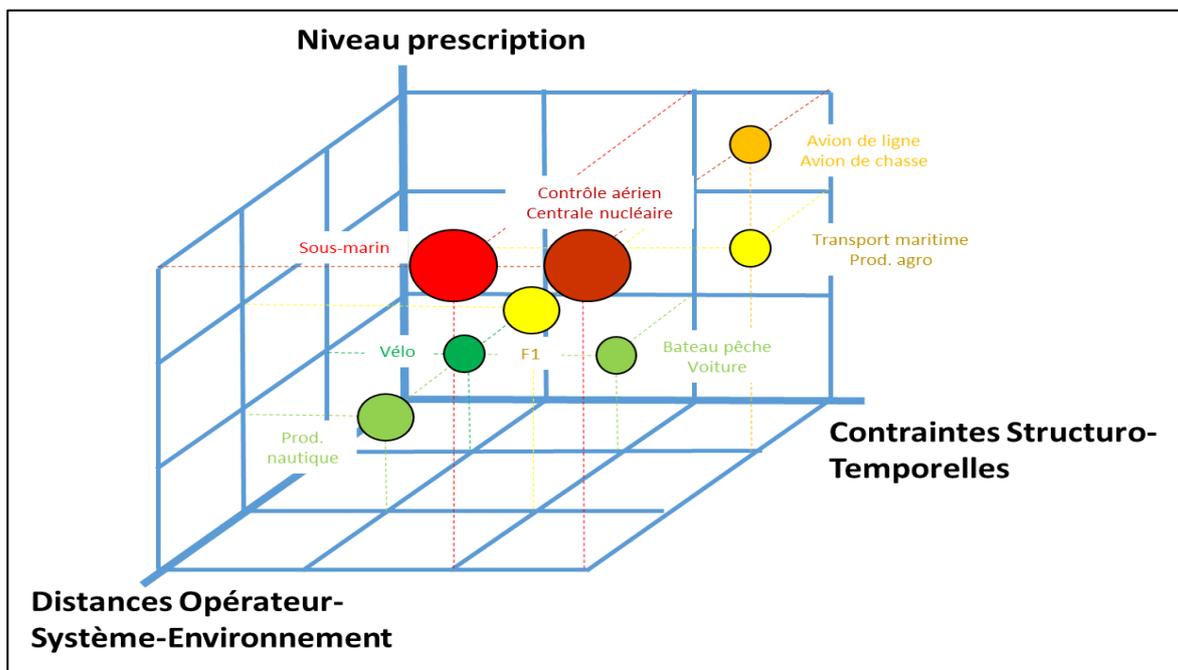


Figure 3 : Une classification des situations supervisées

Selon Sperandio, les contraintes de la situation, qu'elles soient systémiques ou formelles, ont des incidences sur le processus cognitif et le niveau de compétences requis chez l'opérateur. On peut alors regrouper en trois autres catégories les contraintes :

1. *relatives à la prise d'informations* : nombre d'items, difficultés éventuelles de détection et d'identification des signaux, redondance ou lacune d'information, etc.
2. *relatives aux traitements* : degré d'élaboration des actions, difficulté de raisonnement, temps de traitement, etc.

3. *relatives à l'expertise* : savoir et savoir-faire prérequis, degré de formation nécessaire. Gladwell (2008) propose à ce sujet une règle des 10000 heures d'apprentissage, nécessaire à certains opérateurs pour maîtriser complètement leur domaines de travail et les règles associées : sportifs, joueurs d'échec, instrumentistes, aviateur, etc.

La contrainte, vue par un observateur externe de la situation de travail (typologie de Hoc, contraintes systémiques et formelles), se traduit donc par une contrainte subie par l'opérateur (typologie de Sperandio). Le tableau 2 illustre ces deux points de vue :

- La prescription joue sur les contraintes relatives au traitement (une tâche peu prescrite obligera l'opérateur à élaborer lui-même une stratégie d'exécution) et sur les contraintes relatives à l'expertise (certains systèmes très procéduraux nécessitent un long apprentissage de règles et de procédures. Seuls quelques experts sont habilités à la supervision de tels systèmes)
- Les distances opérateur-système-environnement (accessibilité, proximité) et les contraintes structuro-temporelles (étendue, vitesse, continuité) ont une incidence évidente sur les contraintes relatives à la prise d'information et au traitement cognitif.

Tableau 2 : Les typologies de contraintes, des points de vue externe et interne

CONTRAINTES FORMELLES ET SYSTEMIQUES	Distances opérateur-système-environnement	Contraintes structuro-temporelles	Niveau de prescription
TYPOLOGIE DE HOC	- Accessibilité du processus. - Proximité de contrôle et délais de réponse.	- Vitesse du processus. - Continuité. - Etendue du champ de contrôle et de supervision.	- Performance / sécurité gérées ou réglées - Savoir et savoir-faire prérequis
TYPOLOGIE DE SPERANDIO	Prise d'information		
	Traitement		
		Niveau d'expertise requis	

La contrainte n'aura pas le même effet d'un opérateur à un autre. La maîtrise de la situation ne peut pas être évaluée uniquement à partir de la contrainte, mais il faut également tenir compte des caractéristiques de l'opérateur qui réalise l'activité. Dans la prochaine partie, nous

nous intéresserons donc à l'opérateur, à ses ressources internes et aux processus de traitement de l'information et de régulation qu'il met en œuvre.

C. L'opérateur, un agent cognitif adaptatif

Pour mieux comprendre le fonctionnement d'un opérateur, nous allons nous intéresser à ses ressources et à son état, ainsi qu'aux processus de traitement des informations et aux mécanismes d'adaptation.

C.1. Processus cognitif

Wickens (1984) propose un modèle de traitement de l'information (cf. Figure 4) divisé en trois étapes (perception, décision, réponse), et dans lequel apparaissent les ressources de l'opérateur. Nous allons maintenant détailler ces trois étapes.

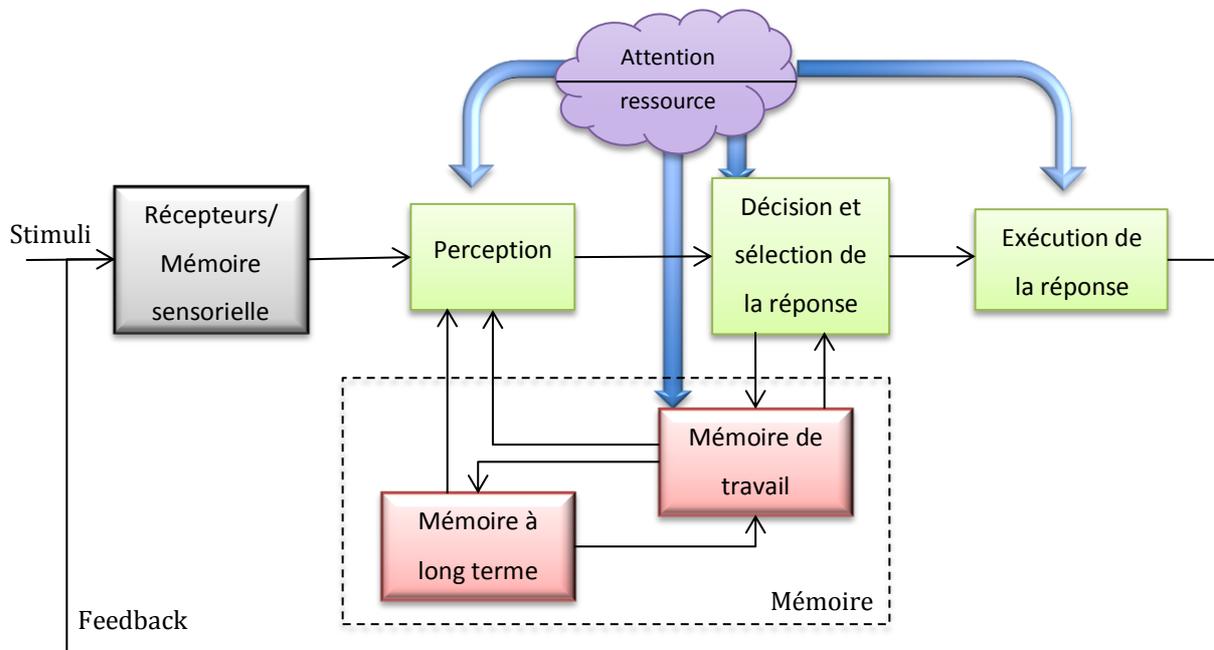


Figure 4 : Le modèle de traitement de l'information (Wickens, 1984)

C.1.1. Perception

La phase de perception permet de créer une représentation mentale de la situation. Endsley (1988) parle de la conscience de la situation: *“situation awareness is the detection of the elements in the environment within a volume of space and time, the comprehension of their meaning, and the projection of their status in the near future”*. Endsley (1988) propose un modèle de la conscience de la situation qui se divise en trois niveaux :

- **La perception (L1) :** à ce niveau l'opérateur recueille des informations de l'environnement. D'après le modèle de Wickens les informations perçues sont stockées dans la mémoire sensorielle pour y être codées, puis envoyées en mémoire de travail. Les informations en mémoire de travail seront ensuite interprétées (Endsley 1988). Il faut également noter que la mémoire de travail ne contient pas uniquement les informations perçues de l'environnement, mais également des informations empruntées à la mémoire à long terme, qui peuvent être utiles à la compréhension des informations perçues.
- **L'interprétation (L2) :** à ce niveau l'opérateur interprète les informations perçues. Selon Amalberti (1996) comprendre permet de donner une cohérence aux faits, d'expliquer et de prédire. La compréhension dépend de notre objectif et de nos connaissances.
- **L'anticipation (L3) :** à ce niveau l'opérateur prédit l'état futur de la situation.

La représentation mentale est donc construite à partir de l'interprétation des informations perçues et de la prédiction de leurs évolutions. C'est à partir de cette représentation que l'opérateur prendra ses décisions.

C.1.2. Décision

La représentation mentale guide l'opérateur dans la sélection ou la création de stratégies (activité d'élaboration). Pour réaliser une même tâche, plusieurs stratégies peuvent être mises en place, mais chacune de ces stratégies aura un coût différent (Chanquoy, Tricot & Sweller, 2007). Comme la phase de perception, la phase de décision est fortement influencée par l'expertise. En effet, l'expertise permet à l'opérateur de sélectionner une stratégie en tenant compte de l'efficacité (rapport entre efficacité et coût) et d'autres critères (sécurité, etc.) (Chanquoy et al., 2007). C'est donc à ce niveau de décision que l'opérateur peut gérer le compromis entre exigences et ressources investies.

C.1.3. Réponse

La réponse de l'opérateur correspond à l'activité d'exécution définie par Leplat. Les actions de l'opérateur engendreront des résultats (performance, erreur).

À chaque étape du traitement de l'information, des ressources sont mobilisées. Quand l'opérateur n'est plus en mesure d'investir une quantité de ressources suffisantes pour traiter

les exigences, il peut y avoir une perte de contrôle de la situation. L'opérateur peut essayer de faire face à cette perte de contrôle en s'adaptant, en changeant de stratégie.

C.2. Les ressources support des processus cognitifs

Un être humain possède différentes ressources (physique, cognitive, connaissances, etc.) pour supporter les processus cognitifs décrit ci-dessus. Nous nous intéresserons ici uniquement aux connaissances, aux mémoires et à leurs limites.

C.2.1. Connaissances et mémoires

Nous pouvons distinguer deux types de connaissances : Les connaissances acquises tout au long de la vie de l'opérateur (son expérience), ainsi que des connaissances qui concernent l'activité en cours de l'opérateur. Ces connaissances sont stockées en mémoire à court et à long terme. Atkinson et Shiffrin (1969) présentent ces deux types de mémoire, ainsi que la mémoire sensorielle :

- **Mémoire sensorielle** : Cette mémoire contient les informations brutes (non traitées donc sans sens) issues des récepteurs sensoriels. Ces informations y sont codées sous une forme qui pourra être traitée par la mémoire à court terme. C'est une mémoire à très courte durée (centaine de millisecondes).
- **Mémoire à court terme** : Cette mémoire reçoit les informations issues de la mémoire sensorielle, mais elle peut également utiliser des informations stockées en mémoire à long terme. Pour Baddeley et Hitch (1974) la mémoire à court terme ne peut pas se limiter au stockage passif des informations. Baddeley et Hitch proposent donc une modélisation dans laquelle les informations sont stockées et traitées : la mémoire à court terme devient la mémoire de travail. Cette mémoire de travail est impliquée dans la plupart des tâches cognitives. Les deux principales caractéristiques de cette mémoire sont la capacité, qui est de 7 +/- 2 items (Miller, 1956) et la durée de persistance des informations, qui est de 15 à 30 secondes. Les informations peuvent néanmoins rester plus longtemps en mémoire de travail si elles sont répétées.
- **Mémoire à long terme** : C'est une mémoire permanente, elle contient des traces des expériences précédentes et des apprentissages. Cette mémoire reste difficile d'accès. La facilité d'accès repose sur la planification et l'anticipation.

C.2.2. Limites cognitives

Paubel (2011) propose de faire le lien entre mémoires et limites cognitives. Ainsi les capacités « finies » de la mémoire à court terme expliquent parfois la difficulté de l'opérateur de réaliser plusieurs traitements en parallèle. A l'opposé, la mémoire à long terme, relative à l'expertise de l'opérateur, issue de processus d'apprentissage et avec laquelle la mémoire de travail communique, permettrait de limiter et de simplifier les processus de traitement, et donc d'optimiser l'utilisation de la mémoire à court terme.

Nous allons maintenant aborder les mécanismes d'adaptation, qui permettent de faire face à ces limites cognitives afin de répondre aux exigences de la situation.

C.3. Mécanismes d'adaptation

Pour gérer le compromis entre exigences et ressources, l'opérateur peut mettre en place différentes stratégies. Nous allons ici présenter quelques-unes de ces stratégies.

C.3.1. Mécanismes de réduction de la complexité

La réduction de la complexité consiste à réduire sa représentation, en filtrant les informations perçues pour ne tenir compte uniquement que de celles qui sont pertinentes pour la réalisation de la tâche (Hoc et al., 2004). Cette méthode permet de ne pas traiter des éléments inutiles pour diminuer le coût cognitif (Amalberti 1996, p.101). Par exemple, Boudes (1997) a montré que les contrôleurs aériens peuvent filtrer les avions qui ne posent aucun problème dans la traversée du secteur. La réduction de la complexité est notamment utilisée en cas de surcharge de travail, quand l'opérateur simplifie la réalité, pour se focaliser sur un aspect de la situation.

C.3.2. Mécanismes de planification et anticipation

Selon Hoc et al., (2004), l'anticipation dans sa composante « prévision » : « *nécessite la connaissance des paramètres adéquats à la compréhension de l'état du processus et ses tendances d'évolution* ». L'anticipation permet à l'opérateur de détecter des phases à venir, dans lesquelles la charge de travail pourrait être élevée. Dans ce cas, pour éviter de se retrouver en surcharge dans cette phase, l'opérateur pourra anticiper le traitement de certaines tâches. Selon Bainbridge (1981) ce type d'anticipation est très coûteux pour l'opérateur.

C.3.3. Automatisation des mécanismes d'adaptation

Les stratégies de l'opérateur peuvent être planifiées ou réalisées de manière consciente, mais elles peuvent également être mises en œuvre de manière inconsciente (Chanquoy et al.,

2007). Schneider et Shiffrin (1977), ainsi qu'Evans (2003), proposent une modélisation de ces mécanismes. Ces auteurs formalisent ainsi la distinction entre les processus « contrôlés » et les processus « automatiques ». Ces deux types de processus possèdent des propriétés radicalement opposées.

Les processus « contrôlés » sont conscients, manipulables, et se retrouvent en particulier chez les novices. Ils nécessitent une forte mobilisation de ressources cognitives, ce qui peut se traduire par une forte sollicitation de la mémoire de travail et des capacités attentionnelles, empêchant des traitements parallèles.

À l'opposé, nous trouvons les processus automatisés qui, eux, se développent à la suite d'un apprentissage prolongé. L'acquisition d'une expertise dans une activité implique le développement de processus automatisés. Ces derniers sont définis comme étant quasi-inconscients, de durée réduite. Ils soulagent ainsi la mémoire de travail, ce qui permet l'exécution d'autres traitements en parallèle.

D. Conclusion : pistes d'amélioration de la maîtrise de la situation

Nous avons dans ce chapitre, exploré les composantes de la maîtrise de la situation, en nous concentrant sur la notion de fiabilité humaine, puis en identifiant les contraintes de la situation (contraintes systémiques et formelles), et en déterminant les propriétés cognitives idiosyncrasiques d'un opérateur (mémoire, connaissance, mécanismes d'adaptation supportant le processus de traitement de l'information).

Deux concepts saillants émergent de cette étude :

- le rapport entre contraintes et capacités, qui, lorsqu'il n'est pas équilibré, peut entraîner des erreurs, voire une perte de la maîtrise de la situation ;
- la notion de compromis cognitif ou d'efficience, qui est le fruit de régulations de la part de l'opérateur permettant d'atteindre l'équilibre entre les contraintes et les capacités.

Ces éléments nous amènent à explorer deux nouvelles pistes, pour évaluer et améliorer la maîtrise de la situation.

D.1. Détecter : vers une exploration du concept de charge mentale

Le rapport entre contraintes et capacités a été exploré au niveau cognitif depuis plusieurs décennies, et la communauté des chercheurs qui s'intéressent à ce sujet est de plus en plus

active, surtout depuis l'avènement des capteurs physiologiques et de l'oculométrie dans le domaine de la psychologie et de l'ergonomie.

La notion de charge mentale a ainsi été formalisée à partir des travaux sur l'attention menés en neurophysiologie (Wickens, 1987 et 2008), des travaux portant sur la physiologie instrumentale (Sanders, 1983 ; Cegarra, 2012) et sur les mécanismes de régulation (Sperandio, 1971).

Ce concept est particulièrement intéressant à étudier en temps réel pour détecter les modifications de l'état de l'opérateur qui vont avoir une incidence sur la maîtrise de la situation dynamique. Nous étudierons ce point dans les chapitres II et III.

D.2. Aider à réguler : vers une allocation adaptative des fonctions

Par ailleurs, le compromis cognitif peut être observé chez les opérateurs, mais peut également être favorisé et optimisé grâce à certaines techniques.

On peut ainsi travailler en amont, en proposant des règles de conception d'interfaces ou de présentation d'information, des modalités d'apprentissage (voir la Cognitive Load Theory - ou CLT - de Sweller et Chandler, 1991 et l'Ecological Interface Design - ou EID - de Vicente, 1999).

On peut également agir « online », en proposant des assistances cognitives à l'opérateur pour l'aider à mieux réguler la charge mentale. Cela permet d'aider l'opérateur à adopter les mécanismes d'adaptation - conscients ou automatisés, nécessitant des comportements différents, basés sur des habiletés, des routines ou des connaissances, (Rasmussen, 1986) - les plus appropriés. On s'intéressera alors à l'allocation adaptative des fonctions, appelée aussi allocation dynamique (Parasuraman et al., 2000 ; Dearden, Harrison & Wright, 2000 ; Kaber & Endsley, 2004 ; Lagu & Landry, 2011).

Nous étudierons cette deuxième piste dans le chapitre IV.

E. Résumé

La maîtrise d'une situation renvoie à l'équilibre du couple homme/tâche, où les exigences « acceptables » de la tâche doivent s'équilibrer avec un investissement des ressources cognitives « supportable » pour l'opérateur.

La maîtrise de la situation par l'opérateur est donc conditionnée d'une part par la contrainte, et d'une autre part par les capacités de l'opérateur. La contrainte peut être systémique (liée aux propriétés intrinsèques des systèmes sociotechniques complexes) ou formelle (liée à la manière dont la tâche est formalisée et prescrite à l'opérateur). Par ailleurs, les capacités de l'opérateur (à traiter les informations) sont limitées, notamment par les capacités « finies » de la mémoire à court terme, ce qui explique la difficulté de l'opérateur à réaliser plusieurs traitements en parallèle, et peut entraîner un déséquilibre du couple homme/tâche.

Ce rapport déséquilibré entre contraintes et capacités peut entraîner des erreurs, voire une perte de la maîtrise de la situation. Pour assurer cet équilibre entre les contraintes et les capacités, l'opérateur régule son activité et réalise un compromis cognitif. Aider l'opérateur à atteindre cet équilibre suppose de mesurer la charge mentale pour pouvoir détecter une perte de maîtrise de la situation (voir ch. II et ch. III), et pour implémenter une allocation dynamique de fonctions pour faciliter la gestion du compromis cognitif (voir ch. IV).

Chapitre II. La charge mentale : des approches conceptuelles et des méthodes d'évaluation à combiner

La charge mentale est une notion très employée, mais également très controversée. Cegarra (2012) distingue trois sources de désaccord :

- Le concept de charge mentale est un concept pluridisciplinaire. Il a été étudié dans plusieurs disciplines (l'ingénierie, la psychologie et la physiologie) avec des approches différentes.
- C'est un concept ancien qui a beaucoup évolué, suite à l'arrivée de nouveaux courants de pensée et d'objets d'étude.
- Ce concept a été appliqué à de multiples domaines, ce qui a mené à une diversité de conceptualisation.

L'objectif de ce chapitre est de comprendre la notion de charge mentale, puis d'identifier des techniques de mesure fiables et utilisables « on-line ».

La première partie (**A**) vise à présenter la notion de charge mentale. Quatre grandes approches seront abordées dans ce chapitre : l'approche par évaluation de l'exigence de la tâche (identifier les dimensions qui composent la charge mentale de l'opérateur), l'approche capacitaire (capacité et limite de traitement de l'information), l'approche énergétique (effort, éveil, activation) et l'approche holistique (synthèse des précédentes approches intégrant la régulation de l'activité).

La seconde partie (**B**) est consacrée aux mesures de la charge mentale. Nous aborderons cinq types de mesures : les mesures de l'exigence de la tâche, l'analyse des variations des comportements opératoires, les mesures de performance, les mesures subjectives et, pour finir, les mesures de l'activité physiologique et oculaire. L'objectif est d'identifier des indicateurs qui permettraient d'observer la charge mentale en temps réel.

A. Cadre théorique : une approche multidimensionnelle de la charge mentale

Meshkati (1988, p.309) considère la charge mentale comme une construction multidimensionnelle, et la définit comme une grandeur « reflétant l'interaction d'éléments tels que les exigences des tâches et du système, les capacités de traitement et d'effort de

l'opérateur, les critères de performance subjectifs, le processus de traitement de l'information, les stratégies de l'opérateur, ainsi que sa formation et son expérience antérieure ».

Cette définition met en avant les différences approches qui permettent d'aborder la charge mentale. Celles-ci sont présentées de manière chronologique, sous la forme d'une progression : l'approche suivante complète et enrichit l'approche précédente. Tout d'abord centrées sur les dimensions exogènes de l'activité de supervision de l'opérateur, elles ont ensuite intégré de plus en plus de dimensions intrinsèques. On distingue ainsi :

1. Une approche exogène centrée sur l'exigence de la tâche, qui explique la charge mentale comme le résultat de la charge de travail, i.e. les contraintes de la situation de travail (les caractéristiques de la tâche prescrite et du système à superviser, les moyens disponibles dans l'environnement pour y répondre, les aléas...).
2. Une approche capacitaire centrée sur les ressources attentionnelles de l'opérateur.
3. Une approche énergétique centrée sur l'effort fourni par l'opérateur.
4. Une approche holistique, synthétisant les approches précédentes et centrée sur la perception et les changements de stratégies de l'opérateur.

A.1. Approche exogène : exigence et performance

Les premiers travaux sur la charge mentale se sont focalisés sur une évaluation objective de la complexité de la tâche à réaliser (Knowles, 1963, Hawkes et al., 1964). Dans cette lignée, Sperandio (1988) propose une méthode d'analyse de la tâche, qui se déroule en plusieurs étapes. Tout d'abord, il est nécessaire de délimiter le système homme-machine étudié (l'opérateur humain, la machine, les informations transmises et reçues, ainsi que les actions possibles). Il faut ensuite identifier les exigences du travail. Enfin la troisième étape consiste à diagnostiquer les dysfonctionnements de la machine ou de l'opérateur.

Nous nous intéresserons ici plus particulièrement à la deuxième étape. L'analyse de l'exigence de la tâche a pour objectif d'identifier les variables contribuant à la charge de travail, mentale et physique de l'opérateur. Sperandio distingue ainsi la cause et l'effet : la contrainte et l'astreinte.

La contrainte correspond aux exigences de la tâche ; elle ne tient pas compte des caractéristiques de l'opérateur. Elle peut être évaluée à partir de différents facteurs (voir chapitre I, section B).

L'astreinte correspond aux conséquences de la contrainte sur l'opérateur et peut donc être considérée comme la charge mentale.

Évaluer l'exigence de la tâche ne consiste finalement qu'à mettre un « capteur » sur ce qui induit la charge mentale. Cette approche ne permet donc pas de mesurer directement l'astreinte, et le postulat sous-jacent selon lequel une variation de la contrainte augmenterait l'astreinte est questionnable. Certains auteurs ont tenté de résoudre ce problème, en proposant de coupler l'évaluation de l'exigence de la tâche à une mesure de la performance afin d'estimer l'astreinte. Ainsi, De Waard (1996)² montre, à partir des travaux de Meister (1976) et Mulder (1986), une corrélation entre la performance et l'exigence (cf. Figure 5): une mauvaise performance signifierait une surcharge mentale chez l'opérateur.

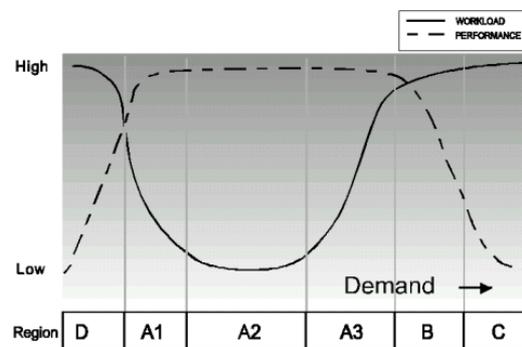


Figure 5 : L'exigence et la performance

Cependant, ces tentatives se heurtent à la réalité : l'effet de la contrainte n'est pas le même d'un individu à un autre. Il faut donc tenir compte des propriétés idiosyncrasiques de l'opérateur.

La charge mentale (l'astreinte) devrait donc être vue comme un « taux de charge », c'est-à-dire que l'on ne peut pas séparer l'étude de la charge de travail (l'exigence de la tâche, la contrainte) de celle des capacités de l'opérateur. Ce constat constitue l'origine de l'approche capacitaire.

² La zone D correspond à une surcharge due à une perte de contrôle de l'opérateur (par exemple les tâches répétitives diminuent la capacité d'adaptation). La zone A2 est optimale : l'opérateur peut facilement répondre à la demande. Les zones A1 et A3 représentent le maintien de la performance au prix d'un coût cognitif plus élevé. Enfin, les zones B et C correspondent à une surcharge progressive qui aboutit à une performance minimale.

A.2. Approche capacitaire

L'approche capacitaire s'intéresse aux capacités et aux limites de traitement de l'information. Selon Cegarra (2012) la notion de capacité a été utilisée pour désigner la borne maximale du traitement de l'information (Wickens, 1992). Autrement dit, la capacité correspond à la quantité maximale de ressources que peut mobiliser l'opérateur pour répondre aux tâches qui lui sont confiées.

La notion de ressource représente ici « l'énergie mentale disponible pour un individu particulier, à un instant donné et pour un traitement particulier » (Chanquoy et al., 2007).

En reprenant la métaphore hydraulique de Chanquoy et al. (2007), les ressources représentent donc « l'essence » qui est consommée par le « moteur cognitif » lors de la réalisation d'une tâche. La capacité constitue par conséquent le « réservoir » de cette énergie mentale.

Dans cette approche, la charge mentale est alors vue comme le rapport entre les exigences de la tâche et la capacité disponible pour réaliser la tâche. Selon Welford (1977, p.284) « la charge de travail peut être exprimée comme le rapport des exigences de la tâche à la capacité maximale moyenne de l'opérateur, ou comme le pourcentage de capacité requis pour répondre aux exigences ». Audley et al. (1977) propose une équation qui va dans ce sens : $w_i = d_i/c_i$, où i représente une tâche, w_i la charge mentale impliquée par la tâche, c_i la capacité de l'opérateur et d_i l'exigence de la tâche. Si l'exigence d_i est supérieure à la capacité c_i , alors l'opérateur sera en surcharge.

Cette approche capacitaire a notamment été utilisée dans les travaux réalisés sur la double tâche, où l'opérateur doit réaliser une tâche secondaire en parallèle d'une tâche primaire. Lors de la réalisation d'une double tâche, la capacité qui n'est pas utilisée dans la tâche principale peut être utilisée dans la tâche secondaire. Ce qui veut dire que plus la tâche principale est exigeante, plus le pourcentage de la capacité mise en jeu sera important et moins la capacité disponible (restante) pour la tâche secondaire sera importante. Si la capacité investie dans la tâche secondaire diminue, on pourra remarquer une dégradation de la performance associée. Il est donc possible d'observer la charge mentale relative à la tâche principale en observant la performance associée à la tâche secondaire (Piolat, Olive, Roussey, Thunin & Ziegler, 1999).

Une analyse fine des ressources mobilisées sur une tâche primaire ou secondaire a été réalisée par Wickens (1988). Elle permet de mieux comprendre la notion de capacité à l'aide d'une

théorie des ressources attentionnelles multiples, qui défend l'existence de plusieurs « réservoirs » de ressources. Cette théorie s'appuie sur un modèle de processus cognitif, qui contient trois étapes : la perception, la cognition (impliquant la mémoire de travail et ses échanges avec la mémoire à long terme) et la réponse (sélection et exécution d'une action). Wickens propose alors une classification des ressources attentionnelles (la Théorie des Ressources Multiples, ou TRM), en jouant sur quatre dichotomies, dont il affirme la plausibilité neuro-physiologique en les associant à des parties distinctes du cerveau (Wickens, 2008) :

- **Différence selon les phases de traitement de l'information** : les ressources mobilisées dans les phases de « perception » et de « cognition » sont différentes de celles utilisées pour la phase de « réponse ».
- **Différence selon la codification de l'information** : les ressources mobilisées diffèrent en fonction de la nature de l'information traitée (quelle que soit la phase du traitement de l'information) : on distingue alors les activités cognitives verbales des activités cognitives spatiales.
- **Différence selon les modalités de perception** : cette dichotomie ne concerne que la phase de perception. La perception auditive utilise des ressources différentes de celles mobilisées par la perception visuelle.
- **Différence selon les types de vision** : une dernière dichotomie a été ajoutée récemment à la théorie de 1987. Elle ne porte que sur la perception visuelle, et distingue les ressources liées à la vision fovéale (requérant une grande acuité, et utilisées pour la reconnaissance d'objets ou la lecture), et celles liées à la vision périphérique (cette vue d'ensemble de l'environnement est utilisée pour la recherche d'objets, par exemple lors du contrôle de la trajectoire d'un véhicule).

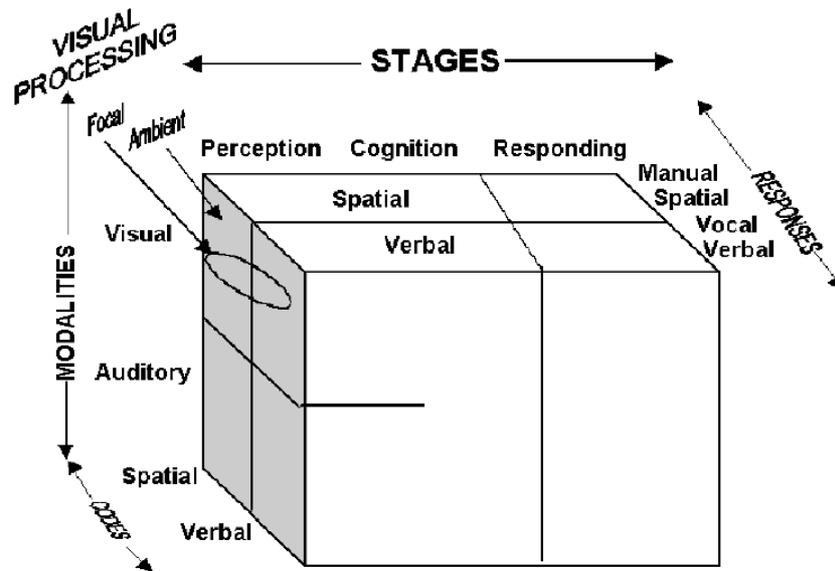


Figure 6 : Le modèle des ressources multiples Wickens (2008)

La modélisation de ces différents « réservoirs » de ressources montre ainsi l'existence de « capacités » distinctes, et fait apparaître des charges de natures différentes. Un opérateur peut donc être en surcharge sur certaines ressources, et être en sous-charge sur d'autres. Pour éviter une surcharge, il faut donc que les ressources nécessaires à la réalisation de la tâche secondaire ne soient pas les mêmes que celles nécessaires pour la tâche primaire (par exemple, on peut jouer sur les modalités de perception, en proposant une tâche visuelle et une autre tâche auditive).

Anderson, Lebiere, Lovett et Reder (modèle ACT-R, 1998), ainsi que Lavie, Hirst, De Fockert, et Viding (théorie de l'attention sélective, 2004), ont eux aussi étudié la charge en termes d'architecture cognitive et de ressources attentionnelles. Tous distinguent également plusieurs réservoirs de ressources, et font notamment une distinction entre les ressources perceptives et sensorielles d'une part (dédiées à la recherche et sélection d'informations), et les ressources cognitives d'autre part (mobilisées pour le calcul, la planification, la prise de décision). On pourrait ainsi distinguer une charge cognitive, liée à la mémoire de travail, et une charge perceptive, voire visuelle si l'on ne considère que cette modalité sensorielle (Engstrom, Johansson & Östlund, 2005). Cette distinction théorique a notamment été validée de manière expérimentale par Recarte, Pérez, Conchillo, et Nunes (2008) et Chen et Epps (2014).

Pour conclure, la capacité de travail d'un opérateur ne peut être définie par une valeur fixe. En effet, la capacité varie en fonction des caractéristiques du système, de l'environnement et des

caractéristiques à court ou long terme de l'opérateur (Sperandio 1988). Ceci rend la capacité de l'opérateur difficilement mesurable. L'approche capacitaire a le mérite de mettre en évidence les limites de l'opérateur en matière de traitement de l'information. Mais elle ne tient pas compte de la volonté de l'opérateur de s'investir plus dans une tâche que dans une autre. Selon Moray (1979) l'opérateur possède une « volonté d'employer la capacité », et donc de fournir un effort plus ou moins important. Dans les années 1970, l'ergonomie et la psychologie du travail apportent deux notions qui ont fortement fait évoluer le concept de charge mentale : la notion d'effort et de stratégie (Chanquoy et al., 2007). Nous parlerons dans les prochaines sections d'une approche basée sur la notion d'effort et d'une approche basée sur les stratégies de régulation.

A.3. Approche énergétique

Leplat (1977) définit la charge mentale comme les ressources cognitives mobilisées par l'opérateur lui permettant de répondre aux exigences de la tâche qu'il réalise. Cette définition montre que l'opérateur n'est pas passif à l'égard de la charge mentale (Sperandio, 1977) et qu'il peut moduler la quantité de ressources utilisée pour réaliser la tâche. Cette modulation volontaire de la quantité de ressources investie par l'opérateur dans une tâche donnée correspond à la notion d'effort mental (Delignières & Deschamps, 2000). Certains auteurs sautent le pas, et relient directement la charge mentale à celle d'effort mental. Ainsi, pour Sheridan et al. (1979, p. 235) la charge mentale correspond à « l'effort mental que l'opérateur humain mobilise [...] en relation avec la capacité disponible pour produire cet effort », et pour Tricot et Chanquoy (1996) la charge est vue comme le niveau d'effort mental investi par l'opérateur.

Selon Mulder (1986) et Kahneman (1973) l'effort peut être observé de manière objective à travers différents indicateurs physiologiques, comme la fréquence cardiaque ou le diamètre pupillaire (voir section B.5).

Le niveau d'effort mental investi a une influence sur le traitement de l'information. Kahneman (1973) propose un modèle intégrant la notion d'effort au traitement de l'information, qui permet de faire une transition entre les modèles capacitaires et énergétiques. Il intègre ainsi aux modèles capacitaires la notion de modulation : l'opérateur est libre de distribuer ses ressources attentionnelles entre les différentes tâches à réaliser. Pour cet auteur, l'effort renvoie donc à un potentiel énergétique, qui permet d'activer les structures

de traitement et de contrôler leur fonctionnement. En effet, selon lui, un processus cognitif a besoin en entrée d'informations spécifiques à traiter et d'un apport énergétique (appelé effort, capacité ou attention).

Pribram et McGuinness (1975) distinguent trois sources énergétiques (activation, éveil et effort). À partir de cette distinction, Sanders (1983) propose une évolution du modèle de Kahneman, dans lequel il relie les sources énergétiques aux différentes étapes du traitement de l'information. Selon Barry, Clarke, Carthy, Selikowitz et Rushby (2005), le niveau d'éveil correspond à l'état énergétique du moment (niveau de base) et l'activation à la mobilisation énergétique liée à la tâche. Ici, l'éveil représente le niveau énergétique tonique à l'état de repos et l'activation correspond à l'augmentation du niveau tonique lors d'une tâche, par rapport au niveau de repos. Ces auteurs disent également que la performance est corrélée au niveau d'activation. Selon le modèle de Sanders, l'extraction des informations pertinentes dépend de l'éveil, la mobilisation énergétique (coordination sensori-motrice) dépend de l'activation, et l'effort coordonne les niveaux d'éveil et d'activation, en régulant les entrées et les sorties du système cognitif à partir de feedbacks.

Cette vision énergétique est intéressante : elle introduit le principe d'effort, c'est-à-dire une modulation énergétique de l'utilisation des ressources attentionnelles réalisée par l'opérateur. Par ailleurs, elle ouvre la voie aux mesures physiologiques de la charge mentale. Selon Barrouillet (1996) cet effort mental, qui module l'utilisation des ressources et donc la charge, ne dépend pas uniquement de l'exigence de la tâche. Il faut également tenir compte de l'expertise de l'opérateur, de son expérience et des stratégies qu'il adopte. Nous devons donc remonter à un niveau plus macroscopique pour aborder la charge mentale, et comprendre ce qui motive un opérateur à investir un effort mental plus ou moins important. Autrement dit, il faut modéliser la façon dont l'opérateur régule sa charge mentale à partir de l'évaluation subjective de son activité.

A.4. Approche holistique : synthèse et régulations

Sperandio (1988) estime que l'analyse de la charge mentale doit également tenir compte de « la façon dont on s'y prend », c'est à dire de la stratégie mise en œuvre par l'individu (Sperandio, 1988). Plusieurs auteurs ont montré qu'un opérateur adapte une stratégie en fonction de la charge mentale ressentie ou anticipée (Sperandio, 1977 ; Kuk, Arnold & Ritter,

Hart et Staveland (1988) construisent leur modèle de la charge mentale en s'appuyant sur :

a) Une représentation du processus primaire (en rouge sur la figure 7) :

Le processus primaire correspond à l'activité d'un opérateur (perception et conduite), qui répond à une demande (entrée du processus : charge de travail imposée) en produisant des résultats (sortie du processus : performance). Détaillons les trois dimensions du modèle de Hart et Staveland qui caractérisent ce processus primaire :

- La charge de travail imposée : elle correspond à ce que Sperandio (1988) appelle "exigence de la tâche", ou contraintes. Cette charge dépend à la fois de la tâche prescrite (objectifs, contraintes temporelles, etc.) et du contexte de travail de l'opérateur (ressources disponibles, pannes et autres aléas, etc.).
- L'activité (Perception et Conduite) : la perception de l'opérateur guide sa conduite³. Il y a ainsi d'une part un processus d'évaluation de la situation, où sera également évaluée la charge de travail imposée, puis d'autre part un processus de sélection et d'implémentation de stratégies⁴. On retrouve cette dualité de l'activité dans les travaux

³ Rasmussen (1988) identifie trois types de perception des informations : les signaux (indicateurs continus et quantitatifs du comportement spatio-temporel de l'environnement), les signes (rattachés à une situation, à un comportement approprié par convention ou à une expérience passée) et les symboles (concept lié aux propriétés fonctionnelles de l'environnement, et qui peuvent être utilisés pour raisonner). Le comportement de l'opérateur ne sera pas le même en fonction du type de perception.

⁴ À partir des informations perçues, l'opérateur construit une représentation mentale de la situation. Selon Amalberti (1996, p.128) « si l'on admet que notre cerveau ne sait travailler que sur des représentations, la compréhension consiste à construire la bonne représentation du monde pour l'objectif fixé ». Cet auteur affirme également que la compréhension dépend des objectifs assignés et des connaissances, et qu'elle permet de donner une cohérence aux faits, d'expliquer et de prédire. La représentation mentale est donc à la base de la compréhension, qui permet à l'opérateur de sélectionner les stratégies. Mais cette construction de la représentation est également à la base des conséquences psycho-physiologiques et de l'expérience subjective de la charge de travail.

En situation dynamique, quand l'opérateur doit sélectionner une stratégie, il procède à partir de la représentation et des attentes disponibles à ce moment. Il doit donc réactualiser sa représentation en permanence, pour pouvoir comprendre la situation. Cela renvoie au concept de la conscience de la situation. Selon Endsley (1988): "situation awareness is the detection of the elements in the environment within a volume of space and time, the comprehension of their meaning, and the projection of their status in the near future".

de Rasmussen (1986) qui distingue diagnostic et planification de l'action, et Wickens (1984) qui sépare des phases de perception/cognition avec une phase d'exécution.

- La performance : il faut ici comprendre le terme de performance comme les résultats de l'activité de l'opérateur. On peut caractériser cette performance en termes de vitesse, de précision, etc...

Boucle de rétroaction : Sur le modèle de Hart et Staveland, une boucle de rétroaction apparaît entre la performance et la charge de travail imposée. Cela traduit l'effet « objectif » de la performance sur la charge de travail imposée. Prenons un exemple : un opérateur doit monter 4 pneus en 20 min (soit 1 pneu/5 min), dans un garage où se trouvent plusieurs chantiers de réparation en cours. 2 pneus sont montés au bout de 12 min, le retard s'expliquant par le fait que le cric était utilisé par un autre opérateur. La nouvelle charge imposée est donc de monter 2 pneus en 8 min (soit 1 pneu/4min). Le cric est maintenant disponible, ce qui diminue la charge imposée (les ressources sont moins contraintes). A l'inverse, le retard pris a augmenté la contrainte temporelle et par conséquent la charge de travail imposée.

b) Une représentation du processus support (en bleu sur la figure 7) :

Ce processus correspond au contrôle - à la supervision - du processus primaire (notamment étudié par Hoc, 1996). Nous allons expliciter les relations entre charge, performance et perception, et leurs effets sur la conduite de l'opérateur :

- La charge perçue et la performance perçue : L'opérateur réactualise son évaluation de la situation en permanence, en tenant compte des changements de la charge imposée et du niveau de performance atteint. Cette évaluation est subjective, elle dépend à la fois des attentes, des capacités, de l'expérience, et de l'expertise de l'opérateur.
- Les modifications de la conduite (effort engagé, changement de stratégie) : Cette évaluation continue amène l'opérateur à réguler l'effort investi dans l'activité, et à adopter des stratégies alternatives, dont le coût cognitif pourra par exemple être plus faible.
- Un phénomène d'apprentissage : la perception de la charge et de la performance permet également d'évaluer les nouvelles stratégies mises en place, contribuant ainsi à un enrichissement de l'expérience et des capacités de l'opérateur.

c) **Une représentation de l'effet de l'activité sur la charge mentale (en vert sur la figure 7)**

La perception est un concept central du modèle de Hart et Staveland : elle permet à l'opérateur de définir (lors de l'évaluation initiale de la situation et de la charge imposée) puis de superviser et réguler son activité. Les auteurs défendent l'hypothèse selon laquelle c'est l'évaluation subjective de l'activité qui entraîne les variations de la charge mentale ressentie par l'opérateur. Cette charge mentale peut être estimée à partir de :

- L'expérience subjective de la charge de travail : Hart et Staveland proposent un questionnaire, le NASA-TLX, qui vise à estimer sur 6 aspects la charge mentale ressentie par un opérateur. Ces aspects caractérisent l'évaluation subjective des dimensions : « **charge de travail imposée** » (3 aspects : « exigence temporelle », « exigence mentale », « exigence physique »), « **performance** » (aspect « performance ») et « **conduite** » (l'aspect « effort » caractérise l'engagement des ressources de l'opérateur dans l'activité). Un dernier aspect concerne la « frustration », et aborde l'effet des émotions sur la charge mentale.
- Les conséquences psycho-physiologiques : l'effort investi - l'engagement des ressources cognitives et physiques – peut générer une activation physiologique, et des comportements non conscients (notamment visuels). La variabilité de la fréquence cardiaque, la sudation, le diamètre pupillaire et les clignements des yeux sont donc d'autres indices, plus objectifs, pour compléter l'estimation de la charge mentale ressentie proposée par le NASA-TLX.

A.4.1.2. Observations : charge de travail, charge mentale et charge mentale ressentie

Notons tout d'abord que nous pouvons distinguer trois types de charge :

- La charge de travail réelle (une caractéristique de l'activité, qui pourrait être évaluée avec un point externe et objectif, celui d'un ergonome par exemple). C'est ce que Hart et Staveland appellent la charge de travail imposée et ce que Sperandio définit comme la contrainte (nous garderons ce dernier terme pour les chapitres suivants).
- La charge mentale (l'effet de l'activité sur l'opérateur, comprenant le processus primaire et le processus de supervision). C'est ce que Sperandio appelle l'astreinte.
- La charge mentale ressentie (le point de vue subjectif de l'opérateur sur la charge mentale et les conséquences psycho-physiologiques). Ce sont les effets observables de l'astreinte.

Par ailleurs, dans la perspective d'évaluer la charge mentale, il est intéressant de remarquer que certaines dimensions du modèle sont observables et mesurables :

- Évaluation de la charge de travail réelle : La contrainte est dynamique, et on peut en faire une évaluation objective à partir de 3 dimensions du modèle de Hart et Staveland (cf. sections B.1 à B.3). On peut en effet soit mesurer directement à un instant la contrainte de la tâche (nombre d'informations, pressions temporelles, etc.), soit on mesure la conduite ou la performance qui vont, par transitivité, et de par la boucle de rétroaction, avoir un effet sur cette contrainte (une stratégie inappropriée peut entraîner une performance réduite, et donc créer une charge de travail réelle plus élevée dans le futur).
- Évaluation de la charge mentale ressentie : les 2 dimensions relatives aux effets du processus de supervision permettent de caractériser et de mesurer, de manière subjective ou objective, la charge mentale ressentie (cf. sections B.4 et B.5).

Au contraire, la dimension « perception » est difficilement explicitable (il faudrait passer par d'éventuelles techniques de verbalisation). Or cette dimension est centrale à ce modèle, car elle permet d'expliquer la charge mentale en fonction des régulations de l'activité induite par l'évaluation subjective de la charge de travail réelle.

Pour tenter de mieux comprendre, modéliser et évaluer cette boîte noire « perception », nous allons donc nous pencher sur l'existence de boucles de régulation, présentes dans le processus de supervision de l'opérateur.

A.4.2. Modèle de Sperandio (1971)

A.4.2.1. Analyse du modèle : émergence de boucles de régulation

La sélection de la stratégie est une étape importante dans l'activité de l'opérateur. En effet, pour réaliser une même tâche plusieurs stratégies peuvent être mises en place et chacune de ces stratégies aura un coût cognitif spécifique (Chanquoy et al., 2007). Sperandio (1977) lors d'une étude sur les contrôleurs aériens montre l'importance des stratégies dans la régulation de la charge mentale. Cet auteur observe que les contrôleurs adaptent leurs stratégies en fonction de la charge mentale ressentie, pour maintenir un niveau de charge mentale acceptable. Cela signifie qu'un opérateur peut réaliser une tâche avec différents modes opératoires (qui ne génèrent pas le même coût), et qu'il choisit celui qui est le plus approprié

en fonction de ses capacités. Quand la charge mentale ressentie est faible, l'opérateur ne choisit pas forcément la stratégie la plus économique. En revanche quand la charge mentale ressentie augmente, l'opérateur a tendance à utiliser des stratégies économiques (Sperandio 1988).

Le modèle de Sperandio (1971) décrit des mécanismes de régulation de la charge mentale. L'auteur distingue 2 boucles (cf. Figure 8):

- Boucle 1 : Le ressenti des variations de charge mentale résultant des choix de stratégies a un effet sur la sélection des futures stratégies. Ainsi, une conduite de la tâche trop sophistiquée, avec un coût cognitif élevé, pourra être modifiée par l'opérateur, lequel changera notamment le niveau de traitement cognitif (basé sur les habiletés, les règles, ou les connaissances, cf. Rasmussen, 1986).
- Boucle 2 : Les stratégies mises en place pour répondre au niveau d'exigence perçue permettent de réguler le futur niveau d'exigence de la tâche. La conduite de l'opérateur répondra ainsi de manière plus ou moins efficace à la demande, augmentant ou diminuant l'exigence (la charge de travail imposée).

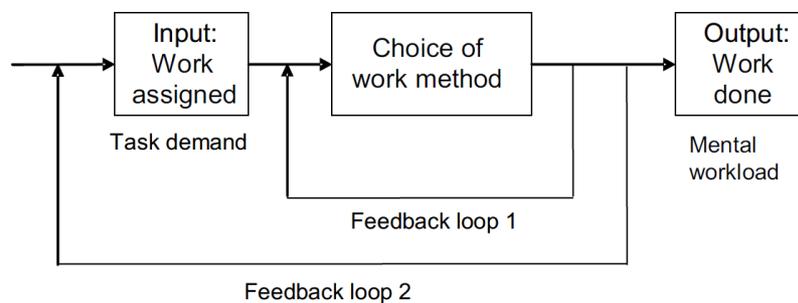


Figure 8 : Les boucles de régulation (Sperandio, 1971, adapté par Loft et al., 2007)

A ce modèle une 3^e boucle de régulation, présentée par Leplat (2006) et reprise par Cegarra (2012), peut être ajoutée.

- Boucle 3 : La différence entre le niveau de performance atteint et le niveau attendu aura une incidence sur la sélection des futures stratégies.

Ces différents auteurs mettent ainsi en avant des critères de régulation : on modifie la conduite de la tâche en fonction de la charge mentale ressentie (boucle 1), du niveau d'exigence perçue (boucle 2) et de la performance (boucle 3).

Lors d'une défaillance d'une de ces boucles, l'opérateur peut se retrouver en surcharge ou en sous-charge mentale. La charge mentale peut être divisée en trois zones (Hancock & Williams 1993) : une zone de sous-charge (faible coût cognitif, peut entraîner une somnolence), une zone de surcharge (dépassement des capacités de l'opérateur), et une zone de charge acceptable (charge ressentie acceptable).

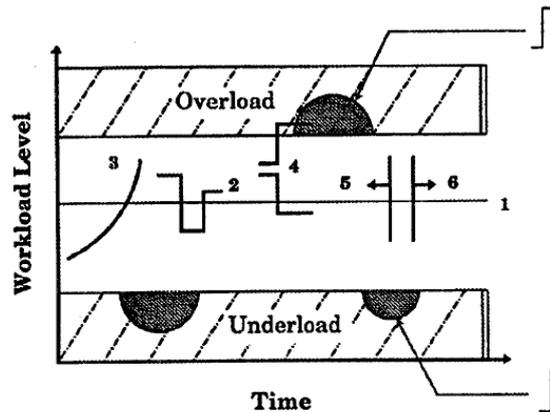


Figure 9 : le modèle de Hancock et Williams

A.4.2.2. Le rôle de l'expertise dans la régulation

L'expertise joue également un rôle important dans la sélection d'une stratégie (Chanquoy et al., 2007). Elle permet à l'opérateur de sélectionner une stratégie en tenant compte de l'efficacité, l'efficience et d'autres critères (sécurité, etc.). Les stratégies peuvent être planifiées ou réalisées de manière consciente, mais elles peuvent également être mises en œuvre de manière inconsciente. En effet, la manière dont l'opérateur perçoit les informations (signal, signe ou symbole) et construit sa représentation de la situation n'engendrera pas le même type de processus cognitif.

Cela nous ramène à la dichotomie de Schneider et Shiffrin (1977) sur les processus « contrôlés » (conscients et manipulables, avec un fort coût cognitif) et les processus « automatisés » (quasi-inconscients et résultant du développement de l'expertise, avec un faible coût cognitif). On peut aussi évoquer la taxonomie SRK (Rasmussen, 1986), qui distingue trois niveaux de comportement (basés sur les automatismes, sur les règles et sur les connaissances) qui vont conditionner le coût cognitif de la mise en œuvre des boucles de régulation.⁵ L'expertise doit alors permettre de rester au niveau de comportement basé sur les automatismes ou sur les règles.

⁵ La taxonomie SRK est composée de 3 niveaux :

A.4.2.3. Observations : centralité de la perception

Les théoriciens des boucles de régulation de l'activité soulignent ainsi que la régulation de l'activité permet à l'opérateur de maintenir un niveau de charge mentale et un niveau de performance acceptables. Nous pouvons constater des similitudes avec le modèle de Hart et Staveland :

- Cohérence des modèles : Le modèle de régulation utilise les trois dimensions du processus primaire du modèle de Hart et Staveland. L'exigence de la tâche correspond à la charge de travail imposée, le choix de la méthode correspond à la conduite de l'opérateur, et les résultats correspondent à la performance. Notons également que la charge mentale est vue comme une sortie « collatérale » de l'activité (i.e. des stratégies mises en œuvre par l'opérateur).
- Apparition de nouvelles boucles : La boucle 2 peut être interprétée comme la boucle de rétroaction exposée sur le modèle de Hart et Staveland (il y a une réactualisation de l'exigence de la tâche de par l'activité de l'opérateur). Cependant, deux nouvelles boucles voient le jour, permettant de mieux apprécier les mécanismes de régulation : a) la boucle 1 évoque une régulation en fonction de la charge mentale ressentie ; b) la boucle 3 expose une régulation à partir de la comparaison entre performance atteinte (la sortie du processus primaire) et niveau d'exigence attendu (la sortie du processus).
- Centralité de la perception : la perception est implicite, mais elle est intégrée dans les boucles (charge mentale « ressentie », niveau d'exigence « perçue », etc.).

- *Comportement basé sur les automatismes (Skill based)* : les informations sont ici perçues comme des signaux. Cela se traduit par la mise en œuvre d'automatismes cognitifs, de manière inconsciente et nécessitant donc un faible coût cognitif. Schneider et Shrifin (1977) ont montré que des automatismes pouvaient être mis en œuvre simultanément sans perte de performance.

- *Comportement basé sur des règles (Rule Based)* : cela correspond à la détection et à la compréhension de signes, sans qu'il y ait nécessité d'une interprétation profonde. L'opérateur met alors en œuvre des règles déjà établies, de type SI « telle condition » ALORS « Action ».

- *Comportement basé sur les connaissances (Knowledge Based)* : à ce niveau les informations sont perçues comme des symboles. La situation est considérée comme un problème inédit, inattendu (hors des schémas généraux), pour lequel aucune solution préparée n'est disponible. Il est coûteux sur le plan cognitif, car il nécessite une forte attention et des connaissances sur les lois et principes fondamentaux du système.

Comme dans le modèle de Hart et Staveland, la perception est donc ce qui guide les régulations de l'activité.

A.4.3. Synthèse

A.4.3.1. Articulation des deux modèles

Nous cherchons maintenant à intégrer les boucles de régulation dans le modèle de Hart et Staveland.

Boucle 2 : Nous avons vu précédemment que la boucle 2 mise en exergue par Sperandio correspond à la boucle de rétroaction soulignée en rouge sur la figure 10.

Boucle 1 : Selon Leplat (2006) et Cegarra et Chevalier (2008), l'opérateur modifie son activité à partir de la comparaison entre la performance perçue et les exigences perçues (si la différence est significative, une stratégie alternative peut être choisie). Cette comparaison était implicite dans le modèle de Hart et Staveland, au niveau du processus de supervision (la performance et la charge imposée sont des entrées de la perception, qui guide la conduite de l'opérateur). La boucle 1 est donc déjà modélisée en bleue sur la figure 10.

Boucle 3 : Sperandio met quant à lui en avant une boucle de régulation qui est dépendante de la charge mentale perçue par l'opérateur. Dans le cadre du modèle de Hart et Staveland, nous pensons que cette perception de la charge mentale est rattachée à la « conduite de l'opérateur » (elle correspond en fait à l'évaluation de l'effort investi et des capacités, i.e. les ressources engagées et disponibles pour la conduite du processus), et non à « l'expérience subjective de la charge de travail » (cf. figure 10). Ainsi, la prise en compte de cette boucle de régulation sera modélisée par l'introduction d'une flèche en pointillé entre conduite et perception, en guise d'entrée du processus de supervision.

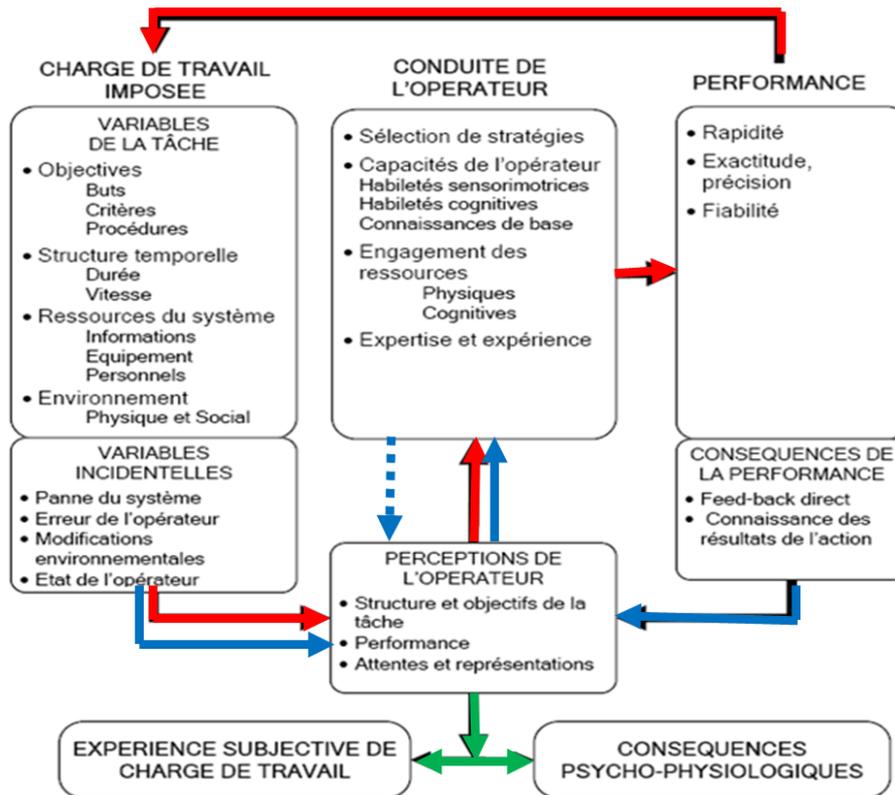


Figure 10 : Les boucles de régulation sur le modèle de Hart et Staveland

A.4.3.2. Critères de régulation : efficacité, pertinence et efficience

Au final, la charge mentale résulte donc de l'activité de l'opérateur, et principalement de l'évaluation de la situation, représentée sur le modèle de Hart et Staveland par la perception des dimensions « charge de travail imposée », « conduite » et « performance ». Cette perception est relative : l'opérateur évalue une dimension de la charge mentale par rapport à une autre dimension. À partir de la comparaison deux à deux des trois dimensions, nous pouvons ainsi identifier trois boucles reposant sur trois critères distincts de régulation (cf. Figure 11) :

- La boucle de l'efficacité (Régulation basée sur la performance : **RBP**) : L'opérateur compare sa performance perçue avec les exigences perçues. Le résultat de la comparaison doit répondre à la question : ai-je atteint mes objectifs ? Si l'écart est trop grand, cela signifie que le comportement n'est pas efficace. Dans ce cas, l'opérateur pourra modifier sa conduite en implémentant des stratégies plus efficaces.
- La boucle de la pertinence : L'opérateur compare l'exigence perçue avec la conduite perçue (stratégie mise en œuvre / effort investi). Deux comparaisons peuvent être

A.5. Conclusion : vers une évaluation multi-sources de la charge

Ce cadre théorique met en avant plusieurs points utiles pour la mesure de la charge mentale :

- Tout d'abord, le modèle de Hart et Staveland a montré que la charge de travail réelle (la contrainte) peut être estimée à partir de mesures objectives de l'exigence de la tâche. De plus, le comportement et la performance modifient de manière dynamique la contrainte.
- De même, les effets observables de l'activité sur la charge mentale (l'astreinte) peuvent être mesurés de manière subjective (expérience de la charge), ou de manière objective (conséquences physiologiques).
- Sur l'évaluation objective des effets de l'astreinte, nous retiendrons également la notion de réservoirs multiples proposée par Wickens (1987) et Lavie et al. (2004), en distinguant notamment la charge cognitive (calculs, décisions, raisonnements) de la charge perceptive (recherche visuelle d'informations par exemple) comme composantes de la charge mentale.

Par ailleurs, l'intégration de boucles de régulation dans le modèle de Hart et Staveland permet de :

- Catégoriser les stratégies de l'opérateur selon les trois critères de régulation identifiés : efficacité, pertinence, efficacité (une stratégie mise en œuvre s'explique par l'évaluation subjective d'un critère).
- Modéliser et estimer de manière objective les déclencheurs de changement de stratégies. La conduite observable (les actions mises en œuvre) et les facteurs de perception qui peuvent être perçus par l'opérateur seraient ainsi reliés sous la forme de règles si-alors (la valeur d'un critère explique la mise en œuvre d'une stratégie).

La charge mentale est donc un concept abstrait (non observable), relatif (à la notion de capacité), et subjectif (de par la singularité de chaque opérateur). Cependant, la charge mentale peut être vue comme un construit multidimensionnelle : **causes** (contraintes), **effets** (conséquences de l'astreinte) et **médiateur** (boucles de régulation) (cf. Figure 12). La

modélisation de ces dimensions permettrait de mesurer des propriétés et des phénomènes observables, et ainsi d'estimer cette charge mentale⁶.

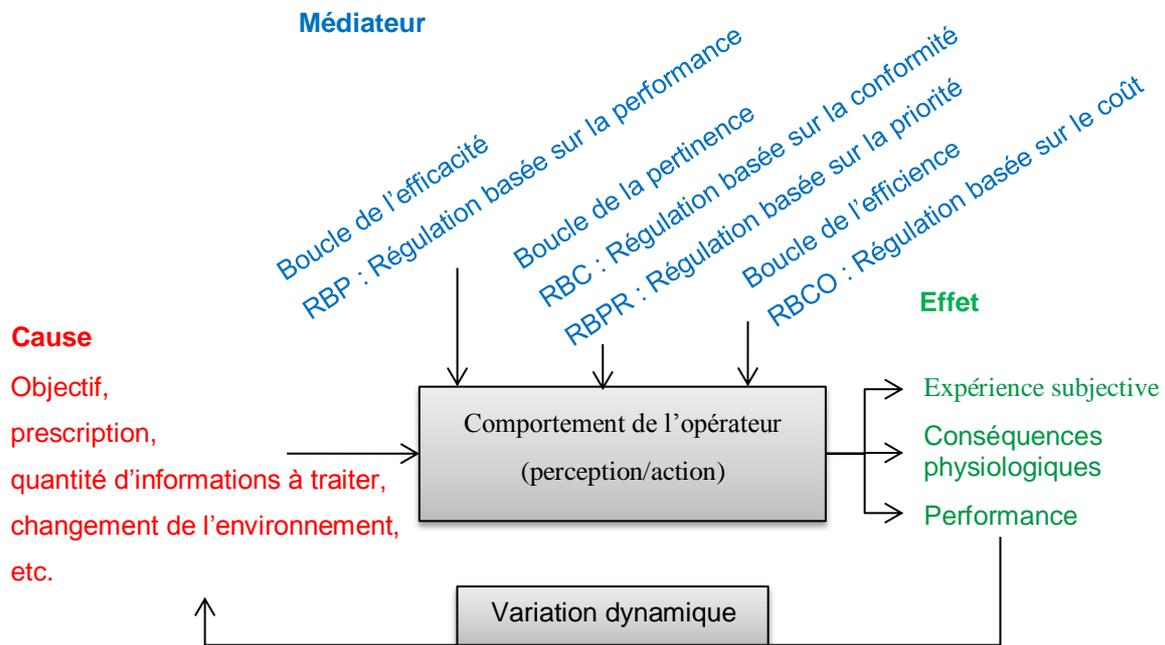


Figure 12 : Une approche multidimensionnelle de la charge mentale

Nous allons maintenant présenter les moyens de mesure en temps réel de ces différentes dimensions observables.

⁶ La dimension conduite apparaît deux fois. On analyse la conduite, qui peut amener de nouvelles contraintes (et modifie donc la charge de travail réelle), mais qui est également la partie visible des boucles de régulation.

B. Mesure de la charge mentale en temps réel : sensibilité, sélectivité et caractère diagnostic

Sperandio (1971, 1988) propose d'évaluer l'astreinte à partir des exigences de la tâche et de l'analyse des variations de comportement opératoire. Par ailleurs, d'autres auteurs (Cegarra & Chevalier, 2008 ; Young et al., 2015) identifient trois autres types de mesures : a) les mesures physiologiques, qui consistent à relever les variations de l'activité physiologique (fréquence cardiaque, sudation, respiration...) et oculaire (dilatation pupillaire, clignements, saccades...); b) les mesures subjectives, qui consistent à questionner directement l'opérateur et c) les mesures de performance, qui utilisent notamment le paradigme de la double tâche.

Ces cinq types de mesures convergent ainsi vers les trois dimensions de la charge mentale identifiée dans la partie précédente. Nous dressons ci-dessous un tableau synthétique de ces mesures par dimension de la charge mentale, que nous détaillerons dans la suite de cette partie.

Tableau 3 : un aperçu des mesures de charge mentale

Dimension de la charge mentale	Catégories	Exemple de mesures
Cause	L'exigence de la tâche	Variables influençant la complexité de la tâche : <ul style="list-style-type: none"> • Nombre d'information à traiter • Contraintes temporelles • Ressources disponibles
Méiateur	Conduite de l'opérateur	Partie observable du comportement : <ul style="list-style-type: none"> • Stratégie mise en œuvre (action visuelle, motrice, verbale) • Changement de stratégie
Effet	Performance	Critère de performance : <ul style="list-style-type: none"> • Rapidité • Précision. • Réussite ou échec.
	L'expérience subjective	Questionnaires : <ul style="list-style-type: none"> • NASA-TLX
	Les conséquences physiologiques	Physiologique : <ul style="list-style-type: none"> • Fréquence cardiaque • Activité électrodermale • Dilatation pupillaire Oculaire : <ul style="list-style-type: none"> • Fixation du regard (durée) • Clignements des yeux (durée et fréquence) • Saccades

Selon Cegarra et Chevalier (2008) la qualité d'une mesure de la charge mentale s'étudie à partir de trois critères :

- 1) la **sensibilité** concerne la capacité à discriminer des niveaux d'exigence différents à l'intérieur d'une même tâche.
- 2) la **sélectivité** renvoie à la stabilité de la mesure quand la charge ne varie pas.
- 3) le **caractère diagnostique** concerne la capacité de la mesure à identifier la cause des effets observés (en l'occurrence, il faut qu'on puisse lier la mesure à une variation de la charge mentale).

Cette partie présente donc les cinq types de mesures et évalue leur qualité. Nous les présenterons par dimension de la charge mentale.

B.1. Dimension cause

L'évaluation de cette dimension consiste en une évaluation de l'exigence de la tâche, ce qui permet d'identifier la contrainte, c'est-à-dire la cause principale de la charge mentale, de l'astreinte de l'opérateur.

Par exemple, dans le domaine du contrôle du trafic aérien, différents indicateurs d'exigence de la tâche sont utilisés comme estimateur de la charge du contrôleur (Boag, Neal, Loft & Halford, 2006) : le nombre d'aéronefs à surveiller (Arad, 1964), le nombre d'interactions entre avions, i.e. le nombre de conflits à gérer (Hilburn, 2004) ou l'accroissement de leur proximité temporelle (Chatterji & Sridhar, 2014).

En tant que cause de l'astreinte, la mesure de la contrainte possède un fort caractère diagnostique, et elle permet de contextualiser les autres mesures (Guérin, Leroy, Chauvin & Coppin, 2014 ; Lassalle et al., 2014). Les deux autres critères de qualité (sensibilité et sélectivité) ne sont pas pertinents, car l'évaluation de l'exigence n'est pas une mesure de la charge mentale : elle ne pourra pas révéler une variation de l'astreinte.

B.2. Dimension Médiateur

Nous avons vu précédemment que l'opérateur adapte ses stratégies pour répondre à la charge mentale ressentie, en mettant notamment en œuvre les solutions les moins coûteuses en situation de surcharge.

La mesure consiste dans un premier temps à identifier les différentes manières d'accomplir une même tâche, et à estimer leur coût. Dans un second temps, on relève les changements de comportements opératoires au cours de l'activité.

Sperandio (1988) a notamment établi les règles suivantes dans le cadre de l'activité de supervision du trafic aérien : a) quand un contrôleur aérien doit gérer entre 1 et 3 avions, il utilise des stratégies qui tiennent compte de la sécurité, la rapidité de l'écoulement du flux, la consommation, le confort, etc. ; b) quand le nombre d'avions augmente entre 4 et 8, les stratégies tiennent compte uniquement des critères de sécurité et de la rapidité de l'écoulement du flux ; c) à partir de 8 avions, le seul critère est la sécurité.

On peut également considérer le comportement visuel de recherche d'informations en utilisant la notion de zones d'intérêts et de transition entre ces zones (dans le domaine du contrôle aérien : Crawford et al., 1993 et Willems et Truitt, 1999, Kopardekar et Magyarits, 2003), ainsi que le comportement moteur de l'opérateur, en enregistrant les actions tactiles ou les actions de la souris (déplacement, clics).

Selon Sperandio la principale difficulté pour observer les modifications de stratégie est de discriminer les changements dus à une régulation de la charge mentale et ceux qui sont dus à un changement des conditions de travail.

Cependant ces changements de stratégies (régulations) peuvent être interprétés comme l'une des régulations identifiées précédemment (RBP, RBC, RBPR, RBCO). En effet, à partir de ces boucles de régulation, nous pouvons créer des règles de type si/alors. Par exemple, **SI** nous observons que l'opérateur change son comportement en passant des stratégies les moins efficaces au plus efficaces **ET SI** nous observons que la performance est plus faible que les objectifs prescrits, **ALORS** nous pouvons interpréter le changement de stratégie comme une régulation basée sur la performance. De cette manière nous pouvons déduire le diagnostic réalisé par l'opérateur. Le tableau 4 synthétise les règles permettant d'interpréter un changement de stratégie (colonne régulation) en terme de régulations.

Tableau 4 : Détection des régulations

Évaluation objective de la situation perçue Comparaison de deux critères		Diagnostic	Régulation
Contrainte (objectifs)	Performance (résultats)	Le résultat est en dessous de l'objectif	PBR: Les stratégies les plus efficaces sont implémentées
Contrainte (stratégies prescrites)	Comportement (stratégie implémentée)	La stratégie implémentée ne correspond pas à la stratégie prescrite	CBR: Les stratégies prescrites sont implémentées
Contrainte (demande dynamique)	Comportement (coût cognitif)	Le comportement est trop coûteux	PRBR: Les stratégies les moins coûteuses sont implémentées
Performance (résultats)	Comportement (coût cognitif)	Le comportement pourrait être moins coûteux	COBR: Les stratégies les moins coûteuses sont implémentées

L'observation des changements de mode opératoire permet donc une mesure sensible, mais moyennement sélective et dotée d'une capacité moyenne de diagnostic.

B.3. Dimension Effet

B.3.1 Évaluation de la performance

Il s'agit de mesurer de manière objective les variations de performance, à travers différents indicateurs de performances (réussite ou échec des objectifs assignés à l'opérateur, durée de réalisation des tâches, etc.) préalablement définies. Une dégradation de la performance peut, en effet, être associée à une surcharge mentale (Chanquoy et al., 2007).

Cette mesure utilise également le paradigme de la double tâche. Le principe est d'utiliser une tâche secondaire pour solliciter la capacité qui n'est pas utilisée par la tâche principale. Ensuite on fait varier la difficulté de la tâche primaire et on observe les dégradations de performance de la tâche secondaire. Selon Sperandio (1988) les principales difficultés de cette méthode sont liées au fait que la tâche secondaire ajoutée peut entraîner des modifications dans les stratégies habituellement utilisées pour la tâche principale.

Cegarra et Chevalier (2008) montrent que ce type de mesure peut être très ou peu sensible en fonction de l'exigence de la tâche primaire. Cette évaluation est par ailleurs très sélective, mais possède une très faible capacité de diagnostic.

B.3.2 Évaluation subjective de la charge mentale ressentie

La mesure subjective consiste à questionner directement l'opérateur sur son activité, dans le but d'appréhender la charge mentale ressentie. Plusieurs questionnaires ou échelles standardisés ont été utilisés et validés dans la recherche en ergonomie et dans le domaine des « Facteurs Humains ». On peut notamment citer le NASA-TLX (Hart & Staveland 1988), le SWAT ou le MCH.

Le questionnaire NASA-TLX découle du cadre théorique présenté dans la partie A. Il est composé de six aspects (exigence temporelle, exigence physique, exigence mentale, effort, performance, frustration). Chaque aspect est formulé sous la forme d'une question explicite, et est évalué sur une échelle de Likert. Les auteurs proposent un indice de charge mentale, en demandant à chaque opérateur de pondérer les aspects et en réalisant la moyenne pondérée des scores. Une autre version, le NASA-rtlx, fait simplement la moyenne arithmétique des scores, sans pondération. Byers, Bittner, et Hill (1989) ont démontré une forte corrélation entre les deux indices.

Les résultats obtenus avec ce type de méthode ne sont pas toujours en adéquation avec les mesures objectives. Selon Sperandio (1988), cela s'explique par le fait que « le sentiment d'astreinte est fortement influencé par d'autres facteurs, notamment par les motivations du sujet et la satisfaction qu'il retire de son travail ». De plus ce type de mesure n'est pas réalisée « online », mais après l'expérience. Il peut cependant apporter des compléments utiles aux mesures objectives.

Selon Cegarra et Chevalier (2008), la mesure de la charge mentale par le Nasa-TLX est très sensible dans le cas d'une comparaison entre plusieurs tâches, mais peu sensible si on étudie les variations au sein d'une même tâche. De plus, cette mesure est peu sélective, mais possède une très bonne capacité de diagnostic.

B.3.3 Évaluation de l'activation physiologique et de l'activité oculaire

L'activité physiologique et oculaire répond aux variations de l'état psychologique (stress, émotion, charge mentale, etc.) de l'opérateur humain. Leurs mesures permettent d'obtenir des indicateurs objectifs de ces variations.

Le système nerveux (SN) est l'un des systèmes les plus complexes du corps humain. Son rôle est d'acheminer les informations sensorielles, de les traiter et de fournir une réponse. Il représente l'un des plus importants moyens de communication de l'organisme. Le SN est notamment composé du SNSoma (système nerveux somatique) et du SNA (Système Nerveux Automatique) :

- **Le SNSoma** transmet les informations sensorielles (issues des récepteurs sensitifs) au SNC (système nerveux central) et les commandes volontaires du SNC jusqu'aux muscles et organes. Le SNSoma est dit « volontaire », car son contrôle peut être réalisé de manière consciente.
- **Le SNA** transmet les informations internes au SNC (système nerveux central) et les commandes du SNC aux muscles impliqués dans le système végétatif (régulation cardiaque, transpiration...). Selon Critchley (2002), son rôle est de maintenir une stabilité interne, en fonction des demandes de la situation. Le SNA permet donc l'adaptation de l'organisme à la situation. Le SNA se divise lui-même en deux sous parties. Le SNS (Système Nerveux Sympathique) et le SNP (Système Nerveux Parasympathique). Ces deux systèmes sont dits opposés, car quand l'un augmente l'autre diminue, mais aucun des deux n'est jamais inactif. On parle ici de dominance parasympathique ou sympathique. Une domination du SNS est plutôt associée à des états d'activation (effort, stress), alors qu'une domination du SNP est plutôt associée à des situations de repos.

Lassalle (2013) fait une synthèse des indicateurs relatifs au SNSoma (système nerveux somatique) et au SNA (Système Nerveux Automatique) ayant été validés et régulièrement utilisés dans des études liées à la fatigue et à l'effort mental. Ces différents indicateurs seront détaillés dans cette partie.

B.3.3.1. Indicateurs d'activation physiologique

Ces indicateurs physiologiques sont issus d'une activation du SNA (Système Nerveux Automatique). On considérera qu'il y a un effort mental lorsque le SNS (Système Nerveux Sympathique) est en activité. On distingue notamment l'activité électrodermale (AED), l'activité cardiaque (notamment la fréquence cardiaque FC) et la dilatation du diamètre pupillaire (DP).

B.3.3.1.1 Indicateurs de l'activité électrodermale (AED)

L'AED peut être utilisée pour évaluer l'activité cognitive d'un opérateur (Siddle, 1991). La peau est impliquée dans la thermorégulation de l'organisme, par l'intermédiaire des phénomènes de sudation. La sudation produite par les glandes eccrines modifie le niveau électrique de la peau. La mesure de l'AED consiste à observer ces variations électriques. Selon Dawson, Schell et Filion (2007), les glandes eccrines sont uniquement influencées par le SNS (Système Nerveux Sympathique) ; plus l'activation sera forte, plus la production de sudation sera importante.

Pour mesurer ces variations électriques, la méthode consiste à faire passer un petit courant I à travers une paire d'électrodes placées sur la surface de la peau. On mesure ensuite - à partir de la loi d'ohm ($R = U/I$) - la conductance de la peau. U est maintenu constant, ce qui permet de mesurer les variations de I , qui reflète les variations de la conductance, mesurée en μS (Dawson et al., 2007).

Selon Boucsein (1992), l'AED peut être étudiée de manière phasique ou tonique. L'étude tonique consiste à analyser le niveau de l'activité électrodermale (NED), en calculant une valeur moyenne du NED sur un segment, de 10 à 30 secondes : le but étant ensuite de comparer les valeurs moyennes de chaque segment ou bien de les comparer avec le NED au repos. Une augmentation du NED est liée à une domination sympathique (Hastrup 1979).

L'étude phasique consiste à étudier les réponses électrodermales (RED). Voici une description d'une RED (cf. Figure 13):

- **Temps latent** : selon Venables et Mitchell (1996), cette phase correspond au délai entre le moment du stimulus et la RED, de une à trois secondes.

- **Phase d'ascension** : cette phase est assez rapide, de 0.5 à 5s selon Boucsein (1992). Selon Clarion (2009), elle correspond au temps entre le début de la RED et le point d'amplitude maximum.
- **Phase de récupération** : cette phase est plus lente que la phase d'ascension, elle correspond au retour au niveau de pré-stimulation. En pratique le retour à la valeur initiale ne se fait pas toujours (Clarion, 2009). On étudie donc le temps de demi-récupération (retour à la moitié de la valeur initiale).

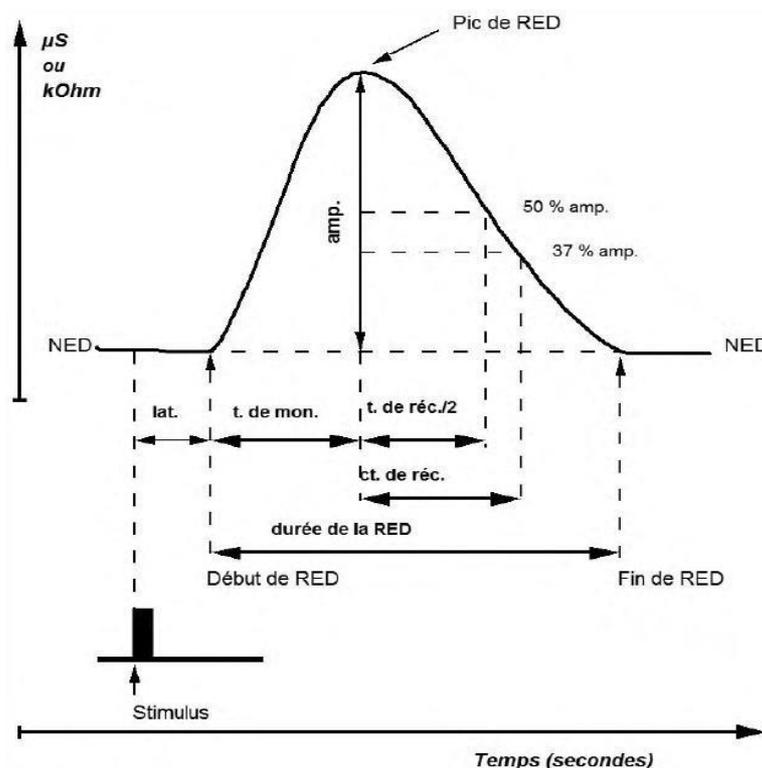


Figure 13 : Schéma d'une RED (Sequeira & D'Hondt, 2013)

Plusieurs auteurs relient directement les caractéristiques d'une RED (réponses électrodermales) à l'activation sympathique. Selon Clarion (2009), l'amplitude d'une RED est d'autant plus grande que l'activation est importante. Par ailleurs, l'indicateur de pente (coefficient directeur de la phase d'ascension) pourrait « attester du caractère soudain de l'activation sympathique et donc l'urgence de la réaction ». Selon Venables et Christie (1980), la présence d'une RED dans les 1 à 3 secondes suivant un stimulus traduit une réponse de l'organisme (activation sympathique). Selon Vernet-Maury, Robin, et Dittmar (1995) la durée de la RED (durée entre le début de la réponse et le retour au niveau initial) correspondrait à la durée pendant laquelle l'opérateur est sous l'influence du stimulus.

Un autre phénomène appelé RED-NS peut perturber les mesures. Une RED-NS correspond à une réaction similaire au RED, mais qui n'est pas le résultat d'un stimulus particulier. Selon Dawson et al. (2007) ce phénomène apparaît toutes les une à trois minutes au repos, et selon Clarion (2009) ce phénomène peut augmenter lors d'émotions négatives ou lors d'évaluation subjective (préoccupation...).

Les indicateurs présentés dans cette partie reflètent des dominations du SNS (Système Nerveux Sympathique), qui peuvent être dues à un effort mental, à des émotions (colère et peur) (Gil, 2009), ou au stress. Le nombre de facteurs auquel répond l'AED (activité électrodermale) réduit sa sélectivité et sa capacité de diagnostic de la charge mentale.

B.3.3.1.2 Indicateurs de l'activité cardiaque (FC)

Le système cardiovasculaire est un système physiologique complexe. Le cœur a pour rôle d'envoyer le sang dans les poumons et dans le reste du corps. Il est sous le contrôle du SNS (Système Nerveux Sympathique) et du SNP (Système Nerveux Parasympathique), qui exercent des actions opposées. Le SNP ralentit en permanence le cœur, alors que le SNS l'accélère. Le SNS a aussi pour rôle la redistribution du sang dans le corps. Par exemple lors d'un exercice physique intense, le sang est redirigé vers les muscles (jusqu'à 75% du sang au lieu de 15% au repos) au détriment d'autres organes (Stern, Ray & Quigley, 2001). Le SNS et le SNP permettent de réguler les activités cardiovasculaires en fonction des besoins de l'organisme.

Ainsi, selon Kramer (1991), l'étude de la fréquence cardiaque peut également s'avérer pertinente. Selon lui, elle augmenterait en fonction de l'effort mental. En effet, la fréquence cardiaque augmente avec une activation du SNS (Système Nerveux Sympathique) et diminue avec une activation du SNP (Système Nerveux Parasympathique).

La mesure de la variabilité du rythme cardiaque (**VRC**) peut se faire par différentes méthodes, les plus utilisées sont la mesure du volume sanguin périphérique (**VSP**), et la mesure de l'électrocardiogramme (**ECG**).

- La VSP consiste à étudier les variations de volume sanguin périphérique. Le principe utilisé est celui de la photopléthysmographie. Il s'agit d'envoyer un rayon infrarouge dans le sang et de mesurer la quantité de lumière rouge réfléchi. La quantité de lumière rouge réfléchi sera d'autant plus grande, que le volume sanguin sera élevé.

- L'ECG consiste à étudier l'activité électrique du cœur, généralement à l'aide de trois électrodes placées sur le thorax.

La mesure de la VRC est l'une des plus utilisées dans la psychophysiology. De ce fait, de multiples indicateurs ont été créés. Une Task Force réunissant les sociétés savantes européennes et américaines de cardiologie et d'électrophysiologie a été créée dans le but de synthétiser ces indicateurs et de développer des standards. Un rapport (1996) présente deux approches pour étudier la VRC : par le domaine temporel et par le domaine fréquentiel.

Domaine temporel

L'intervalle RR représente le temps entre deux battements. Hon et Lee (1965) ont montré que l'on pouvait observer des changements de l'intervalle RR, avant même de pouvoir observer des changements notables de la fréquence cardiaque. À partir de l'intervalle RR, il est possible de calculer directement ou indirectement plusieurs indicateurs. Dans le rapport de la Task Force (1996), trois indicateurs statistiques sont recommandés :

- **SDNN** : cet indicateur représente la déviation standard de l'intervalle RR sur toute la période d'enregistrement ou sur des intervalles plus courts (période T : quelques dizaines de secondes, quelques minutes). Elle se calcule en ms au moyen de la formule suivante : $\text{sqrt} \left(\frac{\sum_{i=1}^N (RR_i - mRR)^2}{N-1} \right)$. Il renseigne sur la variabilité globale. Il peut donc être utilisé pour les observations à court et à long terme.
- **SDANN** : cet indicateur représente la déviation standard de la moyenne des intervalles RR des intervalles temporels de période T. Il exprime la variabilité globale des cycles de période T, et est donc un indicateur à long terme.
- **RMSSD** : cet indicateur représente la racine carrée de la moyenne des différences au carré des intervalles RR successifs. Il se calcule en ms au moyen de la formule suivante : $\text{sqrt} (\text{mean}((RR_{i+1} - RR_i)^2))$. Il permet une estimation à court terme de la VRC.

Domaine fréquentiel

Le spectre de fréquence humain s'étend de 0Hz à 0.4 Hz et se divise en quatre bandes : les ultrabasses Fréquences (**UBF**) de 0.0001 à 0.003 Hz, les très Basses Fréquences (**TBF**) de 0.003 à 0.04 Hz, les Basses Fréquences (**BF**) de 0.04 à 0.15 Hz et les Hautes Fréquences (**HF**) de 0.15 à 0.4 Hz (Souza Neto et al., 2003).

L'étude de ces différentes bandes de fréquence peut se faire en étudiant leur puissance en ms, ou en les exprimant en unité normalisée (puissance de la bande étudiée/puissance totale du spectre multipliée par 100, exprimée en pourcentage). Ces différentes approches ont permis de développer différents indicateurs.

Les auteurs de la Task Force (1996) concluent que les HF reflètent les variations du SNP (Système Nerveux Parasympathique), et seraient influencées par le système respiratoire. L'interprétation des BF, quant à elle, reste encore très controversée. Pour certains auteurs les BF normalisées reflètent les modulations du SNS (Système Nerveux Sympathique) et pour d'autres les BF sont sous l'influence du SNS et du SNP. Les auteurs de la Task Force (1996) concluent également que le rapport BF/HF permet d'observer les dominances sympathiques ou parasympathiques. Boonnithi et Phongsuphap (2011) arrivent à la même conclusion. Selon eux, les critères les plus pertinents pour évaluer les VRC sont : les BF normalisées et la dB_{HF} ($n_{LF} - n_{HF}$) qui augmentent lors d'une dominance sympathique et le SVI (Symphatovagal balance index) qui représente le rapport BF/HF et reflète les modulations sympathiques.

Les indicateurs présentés dans cette partie reflètent des dominations du SNP (Système Nerveux Parasympathique) ou du SNS (Système Nerveux Sympathique). Ces dominations peuvent, entre autre, être dues à un effort physique ou mental, à la valence des émotions (positive ou négative) (Gil, 2009), au stress. Le nombre de facteurs auquel répond le système cardiovasculaire réduit sa sélectivité et sa capacité de diagnostic.

B.3.3.1.3 Diamètre pupillaire (DP)

La pupille dispose d'une ouverture (de 2 à 8mm de diamètre) qui permet à la lumière de rentrer. Les variations du diamètre de la pupille sont contrôlées par le SNA (Système Nerveux Automatique). Le SNS (Système Nerveux Sympathique) dilate la pupille, alors que le SNP (Système Nerveux Parasympathique) la contracte. La réponse pupillaire suite à un stimulus est l'une des mesures les plus populaires pour observer les variations de charge mentale. Cette réponse est appelée Task Evoked Pupillary Response (TEPR), et se caractérise par une dilatation des pupilles (de 0.2 à 0.5mm), qui apparaît de 100 à 200 ms après un stimulus et se termine rapidement après la fin du traitement du stimulus.

Plusieurs auteurs ont montré des liens entre la TEPR et les processus cognitifs. Polt (1964) a montré une augmentation du diamètre pupillaire lors d'une tâche difficile et le fait que le diamètre diminue immédiatement à la fin de la tâche. Greef, Lafeber, Van Oostendorp et Lindenberg (2009) montrent que le diamètre pupillaire moyen est plus élevé dans les phases de charge mentale élevée que dans les phases de sous charge. Pour Andreassi (2013) des variations inférieures à 0.5 mm peuvent refléter l'activité cognitive. Beatty (1982) identifie, dans un article de synthèse, plusieurs processus cognitifs ayant une influence sur le diamètre pupillaire : processus attentionnels, de raisonnement, de mémoire, de traitement du langage et de détection sensorielle.

Backs et Walrath (1992) ont trouvé lors d'une expérience que le diamètre pupillaire est sensible à l'exigence du traitement de l'information dans une tâche visuelle. Dehais Van Orden, Limbert, Makeig, et Jung (2001) ont trouvé que le diamètre pupillaire, la fréquence des clignements et la fréquence des fixations sont les indicateurs les plus performants pour observer les variations de densité de la cible (« target density »).

L'analyse spectrale du diamètre de la pupille peut également être utilisée pour l'étude de la charge mentale. Murata et Iwase (1998) ont montré que lors d'une tâche arithmétique (division mentale) et lors d'une tâche de mémoire (Sternberg memory search), le rapport puissance des basses fréquences sur hautes fréquences augmente avec la difficulté de la tâche.

Beatty et Lucero-Wagoner (2000) présentent les deux mesures les plus utilisées :

- **La valeur moyenne de la dilatation** consiste à calculer la valeur moyenne du diamètre pupillaire, puis à soustraire la valeur obtenue à la valeur de référence (baseline). Selon Wang (2011) la valeur moyenne de la dilatation est corrélée avec la charge mentale, si on la mesure sur une période particulière de la tâche, mais ne l'est pas toujours si on la mesure sur toute la période de la tâche. Pour Iqbal, Zheng et Bailey (2004) il faut diviser les tâches en sous-tâches et étudier la charge mentale durant les périodes relatives aux sous-tâches. Quand les périodes à étudier se chevauchent, Beatty et Lucero-Wagoner recommandent l'utilisation du pic de dilatation.
- **Le pic de dilatation** représente la valeur maximale du diamètre pupillaire enregistré sur un intervalle donné, à laquelle on soustrait la valeur de référence. Le fait que cette mesure soit basée sur une seule valeur la rend plus vulnérable aux variations aléatoires. En revanche, elle est indépendante du nombre de points enregistrés.

Marshall (2002) propose une autre méthode de mesure basée sur les réactions réflexes des pupilles lors d'un effort cognitif : l'ICA (Index of Cognitive Activity). Son principe est de mesurer les variations brusques discontinues dans le signal de l'enregistrement du diamètre pupillaire.

L'algorithme proposé par Marshall distingue les réflexes photo-moteurs (dus à des variations lumineuses) et les réflexes psychomoteurs (dus à l'activité cognitive ou aux émotions), et ce en temps réel. On peut donc avoir une image de la charge mentale, quelles que soient les conditions de luminosité.

Selon Cegarra et Chevalier (2008), la mesure de la dilatation de la pupille est très sensible, peu sélective et elle possède une faible capacité de diagnostic.

B.3.3.1.4 Synthèse des indicateurs physiologiques

D'une manière générale, les indicateurs sous le contrôle du SNA (Système Nerveux Automatique) permettent une mesure sensible de l'effort mental, mais peu sélective et avec une faible capacité de diagnostic.

Il existe d'autres indicateurs comme la température cutanée ou l'ICA (basé sur le diamètre pupillaire) qui n'ont pas été abordés dans cette partie (voir annexe C.1).

B.3.3.2 Indicateurs d'activité oculaire

Les indicateurs présentés dans cette partie sont sous le contrôle du SNSoma (système nerveux somatique), ils sont donc sous un contrôle volontaire. Nous aborderons ici uniquement des indicateurs issus des mouvements oculaires. Holmqvist et al. (2011) présentent des mesures de mouvements suivant différentes propriétés (direction, amplitude, durée, vitesse et accélération). Nous parlerons des clignements, des fixations et des stratégies de balayage.

Les mouvements oculaires sont contrôlés par six muscles, qui sont innervés par le troisième, quatrième et cinquième nerf cardinal. Ces six muscles travaillent par paire, et permettent des mouvements oculaires sur trois axes : horizontal, vertical, et circulaire.

B.3.2.1.1 Saccade

La saccade correspond à un saut volontaire d'un point de fixation à un autre. Ce mouvement rapide est caractérisé par une forte accélération, puis une forte décélération.

Amplitude : une séquence de saccade de faible amplitude dans une observation de scène indique que l'opérateur inspecte en détail une zone (Taler & Vicent, 2008). L'amplitude des saccades est plus petite lors de recherches visuelles difficiles (Zelinsky & Sheinberg, 1997). L'amplitude des saccades diminue lors de tâches cognitives (calcul) (May, Kenedy, Williams, Dunlap, & Brannan, 1990). Le nombre de saccades avec une amplitude supérieur à 9.5° diminue quand la durée de la tâche augmente (Ceder, 1977).

Durée : selon (Carpenter, 1988) la durée d'une saccade est reliée à son amplitude par la formule suivante : $\text{durée} = 2,2 * \text{amplitude} + 21$.

Vélocité : lors d'un faible niveau de vigilance, la vélocité des saccades est réduite (Galley, 1989). La vélocité des saccades augmente avec la difficulté de la tâche (Galley 1993), et décroît avec l'augmentation de la durée de la tâche (McGregor & Stern, 1996). Cependant Di Stasi et al. (2010) ont montré lors d'une expérience sur les contrôleurs aériens que le pic de vélocité diminue avec l'augmentation de la difficulté de la tâche.

Fréquence : La fréquence des saccades décroît avec l'augmentation de la difficulté de la tâche (Nakayama, Takahashi & Shimizu, 2002). Selon Van Orden et al. (2000) la fréquence des saccades diminue avec la fatigue.

Étendue : l'étendue des saccades (zone dans laquelle ont lieu les saccades) diminue lors d'une tâche de calcul ou d'une tâche visuo-spatiale, dans le cadre de la conduite de véhicule (Recarte & Nunes 2000).

Les indicateurs issus des saccades répondent à un grand nombre de facteurs, comme la fatigue, la charge visuelle, la charge cognitive (Holmqvist et al. 2011), ce qui réduit leur sélectivité et leur capacité de diagnostic.

B.3.2.1.2. Fixation

Selon Just et Carpenter (1984), un point de fixation permet de traiter les informations sur lesquelles se porte le regard. Habituellement une fixation est définie pour une durée supérieure à 100 à 200 ms.

Durée : selon Greef et al., (2009), le temps de fixation augmenterait avec la charge mentale. Cependant Chi et Lin (1997) ont trouvé à partir d'expériences réalisées sur des conducteurs dans diverses situations de conduite, que les fixations indiquent surtout une charge visuelle. Goldberg et Kotval (1999) interprètent une longue fixation comme un indicateur de la difficulté pour l'opérateur à extraire les informations affichées.

Dans une expérience de double tâche de conduite de voiture et d'addition « auditive », Tsai et al. (2007) ont trouvé que la fixation qui précède une mauvaise réponse (lors de l'addition de nombres entendus par le conducteur) est plus courte que la fixation qui précède une bonne réponse.

B.3.2.1.3 Clignements

Le clignement correspond à la fermeture (partielle ou totale) des paupières suivie très rapidement de leur réouverture. Un clignement dure environ 0.2 à 0.4 seconde, et surviendrait environ 10 à 20 fois par minute (Tecce 1992). Orchard et Stern (1991) présentent trois types de clignement : réflexe (protection de l'œil), volontaire et endogène associé au traitement de l'information, à l'effort mental, à la fatigue.

Fréquence : plusieurs auteurs relient la fréquence de clignement avec la charge mentale (Wolkoff et al., 2005 ; Tsai et al., 2007). Selon Brooking et al. (1996), la fréquence de clignement augmente avec la charge mentale. Cependant, pour plusieurs auteurs, la fréquence de clignement serait plus un indicateur de charge visuelle que de charge mentale (Veltman & Gaillard, 1996 ; Chen & Epps, 2014).

Durée : la durée des clignements apparaît comme un bon indicateur de la charge visuelle. Selon Veltman et Gaillard (1996) la durée des clignements est plus fonction de l'exigence visuelle de la tâche, que de la charge cognitive. Morris et Miller (1996) ont montré que la durée des clignements augmente avec la durée de la tâche.

Chen et Epps (2014) ont trouvé que les caractéristiques des clignements (fréquence, durée, etc.) sont plus sensibles à la charge visuelle qu'à la charge cognitive ou aux transitions entre deux tâches. Ces auteurs affirment également que quand la charge visuelle est forte, le niveau de charge cognitive ne peut pas être perçu.

B.3.2.1.4 Synthèse des indicateurs d'activité oculaire

D'une manière générale, les indicateurs de l'activité oculaire permettent une mesure sensible de la charge mentale, mais le nombre important de facteurs auxquels réagissent ces indicateurs réduit la sélectivité et la capacité de diagnostic.

Il existe d'autres indicateurs, comme le balayage visuel, qui n'ont pas été abordés dans cette partie (voir annexe C.2).

B.3.3.3. Autres indicateurs : analyse de l'activité respiratoire

Il existe par ailleurs d'autres activités physiologiques qui sont à la fois sous le contrôle du SNA (Système Nerveux Automatique) et du SNSoma (Système Nerveux Somatique). Citons notamment l'activité respiratoire.

Dans l'histoire de la psychophysiology, le système respiratoire a été moins étudié que la VRC (Variabilité du Rythme Cardiaque), ou l'AED (Activité Electrodermale). Ceci s'explique par le fait que la respiration est couplée avec les variations du rythme cardiaque ; elle est donc vue comme une variable qui influe sur d'autres variables.

Pour Collet, Deschaumes-Molinario, Delhomme, Dittmar, et Vernet-Maury (1994), le système respiratoire agit pour moduler l'air nécessaire au langage et agit pour anticiper les demandes métaboliques de l'activité cognitive et musculaire. La respiration est sous le contrôle volontaire (l'opérateur peut volontairement modifier sa fréquence respiratoire) et involontaire de l'individu. Sa mesure est simple et directe ; elle se réalise en mesurant les changements de volume du thorax et de l'abdomen.

Lorgis (2007) présente, dans un article de synthèse, deux visions différentes des effets respiratoires. Ils peuvent être vus comme un artefact ou comme une conséquence de l'influence psychologique.

- **D'un point de vue artefact** : la respiration a une influence sur la conductance de la peau et sur le cœur. On observe, par exemple, une accélération du rythme cardiaque lors de l'inspiration.
- **D'un point de vue psychologique** : les variations respiratoires peuvent être une réponse à différents stimuli, comme des émotions. Selon Gil (2009) une respiration rapide et profonde correspond à de la colère ou de la peur, une respiration lente et profonde correspond à du calme ou de la relaxation et une respiration lente et peu

profonde correspond à un repli comme une dépression. Par ailleurs, une grande respiration volontaire peut signifier une préparation à une action.

Cette mesure possède une sensibilité moyenne (il est difficile de distinguer les grandes respirations dues à un effort de concentration des artefacts). De plus cette mesure réagit à un grand nombre de facteurs (émotion, effort physique et mental, etc.) ce qui réduit sa sélectivité et sa capacité de diagnostic.

B.6. Conclusion : vers des indicateurs synthétiques « temps réel »

Nous avons donc cartographié dans cette partie les différentes méthodes de mesure associées aux différentes dimensions de la charge mentale (cf. Figure 14).

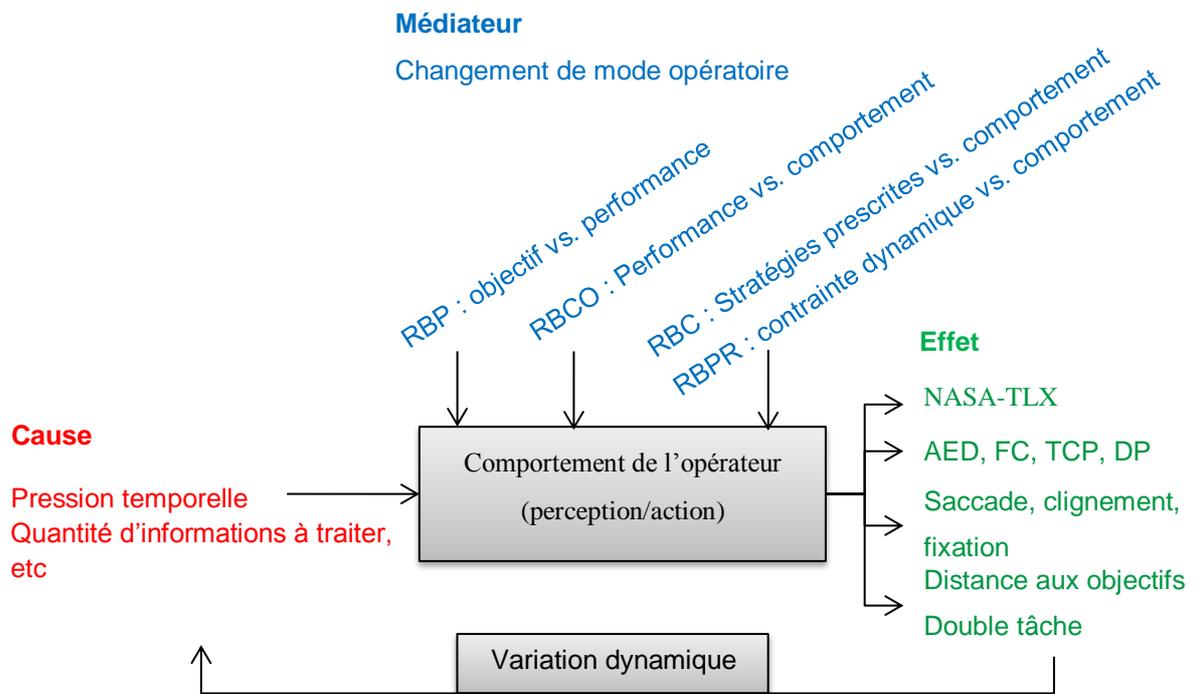


Figure 14 : Une évaluation multi-sources de la charge mentale

Nous avons regardé comment les indicateurs issus de ces mesures évoluent avec la charge mentale ou ses composantes (visuelle ou cognitive), et évalué leur sensibilité, leur sélectivité et leur caractère diagnostic. Le tableau 5 synthétise ces éléments.

Tableau 5 : Récapitulatif des types de mesures de charge mentale et évaluation de leur qualité

Indicateur	Interprétation	Sensibilité	Sélectivité	Diagnostic
Exigence				
Nombres d'informations, pression temporelle	Une contrainte forte entraînerait une charge mentale élevée	Non Applicable	Non Applicable	Fort
Performance				
Double tâche	L'échec de la tâche secondaire traduit une charge mentale élevée	Fort ou Faible (selon la tâche principale)	Fort	Faible
Autres critères (relatifs à la tâche principale)	Une performance faible serait due à une charge mentale élevée	Moyen	Moyen	Faible
Conduite				
Variation des modes opératoires	Des changements comportementaux traduiraient une charge mentale élevée	Fort	Moyen	Moyen
Expérience subjective				
NASA-TLX	Un indice élevé traduit une charge mentale élevée	Fort (inter tâche) Faible (intra tâche)	Faible	Fort
Conséquences physiologiques et oculaires				
AED				
Niveau de conductance (NED)	Le NED augmente avec la charge mentale	Fort	Faible	Faible
Amplitude des RED	L'amplitude augmente avec la charge mentale	Fort	Faible	Faible
Présence d'une RED	Réaction de l'AED à un stimulus	Fort	Faible	Faible
Temps de montée d'une RED	temps court associé à une situation urgente.	Fort	Faible	Faible
Temps de moitié de récupération	Augmente sous l'effet d'une charge mentale intense et/ou soutenue	Fort	Faible	Faible
Activité cardiaque				
Fréquence cardiaque	Augmente avec la charge mentale	Fort	Faible	Faible
SDNN	Renseigne sur la variabilité globale.	Fort	Faible	Faible
RMSSD	exprime la variabilité en HF, modulé par la respiration.	Fort	Faible	Faible
BF, nBF, dLHF, SVI	Augmente avec la charge mentale	Fort	Faible	Faible
Diamètre pupillaire				
Valeur moyenne du diamètre pupillaire	Augmente avec la charge cognitive	Fort	Faible	Faible
Pic de dilatation	Associé à une forte charge cognitive	Fort	Faible	Faible
Saccade				
Durée	Augmente à l'opposé de la charge mentale	Fort	Faible	Faible
Fréquence	Augmente à l'opposé de la charge mentale	Fort	Faible	Faible
Vélocité	Augmente avec la charge mentale	Fort	Faible	Faible
Fixation				
Durée	Augmente avec la charge visuelle	Fort	Faible	Faible
Clignement				
Durée	Augmente à l'opposé de la charge visuelle	Fort	Faible	Faible
Fréquence	Augmente à l'opposé de la charge visuelle	Fort	Faible	Faible
Activité respiratoire				
Grande respiration	Préparation d'un effort mental	Moyen	Faible	Faible

Nous retiendrons notamment que :

- l'exigence de la tâche est le seul indicateur ayant une capacité de diagnostic élevée ;
- les variations de conduite de l'opérateur fournissent un des seuls indicateurs possédant une sélectivité moyenne ;
- la fréquence cardiaque, l'activité électrodermale et le diamètre pupillaire sont des mesures très sensibles ;
- les clignements (fréquences et durée), les durées des fixations et les saccades (durée et fréquence) sont de bons indicateurs de charge visuelle (à distinguer de la charge cognitive, l'autre composante de la charge mentale).

Tous les indicateurs ci-dessus ont souvent été étudiés les uns indépendamment des autres ; il convient de noter, cependant, que certains auteurs ont réalisé des études portant sur la combinaison ou la fusion de plusieurs données.

Pour Cegarra et Chevalier (2008) la combinaison de différentes méthodes se justifie par le fait que chaque méthode possède des avantages et des inconvénients et qu'aucune ne peut prétendre mesurer parfaitement la charge mentale. Cette « fusion » des évaluations peut ainsi améliorer la qualité de l'indicateur de charge mentale. Cela contribuerait à un gain de sensibilité, car les mesures peuvent se compléter, les unes mesurant des aspects que les autres ne peuvent pas aborder. Cette combinaison permettrait également d'améliorer la sélectivité, car certaines mesures (notamment physiologiques) sont difficilement contrôlables. Elle faciliterait enfin l'interprétation et renforcerait le caractère diagnostique (en croisant notamment les mesures physiologiques, les questionnaires subjectifs, et les éléments de contextualisation sur l'activité et les exigences de la tâche).

Nous allons suivre cette voie dans le prochain chapitre, en explorant les combinaisons de mesures de la charge mentale et les méthodes de fusion de données qui permettraient d'aboutir à des indicateurs synthétiques « temps réel » de qualité.

Résumé

Quatre grandes approches de la charge mentale ont été abordées : L'approche exogène, l'approche capacitaire, l'approche énergétique, et enfin l'approche holistique. Les trois premières approches ne traitent qu'un seul aspect de la charge mentale, seule l'approche holistique, qui regroupe les trois autres approches, permet une représentation plus complète de la charge mentale. À partir du modèle de Hart et Staveland (1988) de charge mentale (approche holistique) et du modèle de régulation de l'activité de Sperandio (1971), nous avons proposé un modèle tridimensionnel (contrainte, comportement et l'état de l'opérateur et la performance) de la charge mentale.

Nous avons également proposé une grille d'analyse du comportement de l'opérateur basée sur les régulations mises en œuvre. Nous avons fait l'hypothèse que la comparaison par paire de la contrainte, du comportement et de la performance permet à l'opérateur de réguler son activité. Nous avons ainsi identifié quatre régulations : régulation basée sur la performance (objectif vs performance), régulation basée sur la conformité (stratégies prescrites vs stratégies mises en œuvre), régulation basée sur la priorité (exigence vs coût) et régulation basée sur le coût (performance vs coût).

Enfin, une étude des moyens de mesure de la charge mentale nous permet de remarquer que l'exigence de la tâche est le seul indicateur ayant une capacité de diagnostic élevée, que les variations de stratégies mises en œuvre fournissent un des seuls indicateurs possédant une sélectivité moyenne, et que les mesures physiologiques (notamment la fréquence cardiaque, l'activité électrodermale et le diamètre pupillaire) sont des mesures très sensibles.

Chapitre III. Les méthodes de fusion d'informations

La charge mentale peut être observée à partir de différentes mesures (physiologiques, comportementales, etc.). Chacune de ces mesures fournit des informations différentes, redondantes ou encore complémentaires, mais toutes sont nécessaires pour avoir une représentation complète de la charge mentale. Pour évaluer le niveau de cette charge en temps réel, il est donc nécessaire de fusionner les différentes informations.

Plusieurs auteurs ont tenté de modéliser l'opérateur humain en utilisant différentes méthodes de fusion d'informations. Shaw (1993) utilise la logique floue pour modéliser l'opérateur lors d'une tâche de poursuite. Qiang (2006) a recours aux réseaux bayésiens pour estimer en temps réel la fatigue de l'opérateur. Yeung et al. (2006) modélisent un opérateur prenant une décision dans un environnement statique en utilisant les réseaux de neurones. Rachedi (2015) utilise les chaînes cachées de Markov pour modéliser le comportement de l'opérateur et les réseaux bayésiens pour modéliser son état.

L'objectif de ce chapitre est d'identifier une technique de fusion d'informations permettant de créer un indicateur synthétique de la charge mentale en temps réel.

La première partie (**A**) s'intéresse à la fusion d'informations. Nous verrons qu'elle se réalise en trois étapes, et qu'elle peut être menée à différents niveaux. Nous nous intéresserons également aux imperfections des informations.

La deuxième partie (**B**) s'intéresse aux différentes méthodes de fusion d'informations. Quatre grandes théories seront abordées : la théorie des probabilités, la théorie des croyances, la théorie des ensembles flous et la théorie des possibilités.

A. La fusion d'informations

La fusion d'informations est plus généralement appelée fusion de données. Nous préférons ici le terme d'information pour éviter toute confusion avec le terme de données, que nous considérons comme un type d'information (cf. A.1).

Initialement, la fusion d'information est apparue dans le domaine militaire (Hall 1992, Hall & Linas 1997, Rouchouze 1994), dans le but de traiter un grand nombre d'informations. Elle s'est ensuite répandue dans de nombreux domaines comme l'imagerie (médicale, satellite, etc.), la robotique, l'intelligence artificielle ou encore les radars et sonars (Reynaud 1994).

Selon Bloch (2003) : « La fusion d'informations consiste à combiner des informations issues de plusieurs sources afin d'aider à la prise de décision ». La fusion d'informations est donc multi sources, et elle est réalisée afin d'obtenir une représentation d'un phénomène plus complète que si l'on étudie ce phénomène en regardant chaque source séparément. Cette nouvelle représentation, synthétique, aidera la prise de décision.

Dans cette partie, nous allons nous intéresser aux différentes étapes de fusion. Nous parlerons ensuite des différents niveaux de fusion et, enfin, nous aborderons la question de l'imperfection des informations. Dans un premier temps, nous allons introduire quelques notations, qui seront utilisées tout au long de ce chapitre :

- Ω représente l'ensemble de toutes nos solutions $\Omega = \{ \theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_N \}$.
- N représente le nombre de solutions.
- θ_i représente un singleton de Ω .
- A, B, C représente des sous-ensembles de Ω .

A.1 Les différentes étapes de la fusion d'informations

La fusion d'informations se divise en trois étapes (Bloch & Maitre, 1994) :

Modélisation : Cette étape consiste à choisir le formalisme (la manière de représenter) les informations à fusionner. Elle concerne donc la transformation d'une information brute en une représentation mathématique.

Combinaison : Cette étape consiste à fusionner les informations, dans le but de créer une nouvelle information.

Décision : Cette étape consiste à choisir à quelle classe appartient l'information issue de la fusion.

A.2 Les différents niveaux de la fusion d'informations : vers une modélisation structurée de la fusion d'informations

La fusion d'informations est classiquement divisée en trois niveaux (Dasarathy, 1997) :

- **Niveau des données (bas niveau)** : Les données représentent les informations issues directement des capteurs et sont de type numérique. Une fusion d'informations à ce niveau correspond à fusionner plusieurs données pour créer de nouvelles données, dans le but de former des hypothèses partielles.
- **Niveau des caractéristiques (niveau intermédiaire)** : À ce niveau les données obtenues au premier niveau sont fusionnées dans le but d'abstraire les données et de fournir une interprétation symbolique du phénomène observé. Les caractéristiques sont donc des informations symboliques.
- **Niveau de décision (haut niveau)** : Ce niveau correspond à la fusion et à l'interprétation des caractéristiques, dans le but de fournir une décision, une classification, etc.

La fusion d'informations peut être réalisée à ces trois niveaux. Dasarathy (1997) identifie cinq processus de fusion I/O (I : input et O : output) :

- **DAI-DAO fusion** : cette fusion a en entrée des données et en sortie une donnée.
- **DAI-FEO fusion** : cette fusion a en entrée des données et en sortie une caractéristique.
- **FEI-FEO fusion** : cette fusion a en entrée des caractéristiques et une caractéristique en sortie.
- **FEI-DEO fusion** : cette fusion a en entrée des caractéristiques et une décision en sortie.
- **DEI-DEO fusion** : cette fusion a en entrée des décisions et en sortie une décision.

Martin (2005) représente ces différents niveaux et processus de fusion, en y ajoutant la possibilité d'avoir des entrées de niveaux différents (cf. Figure 15):

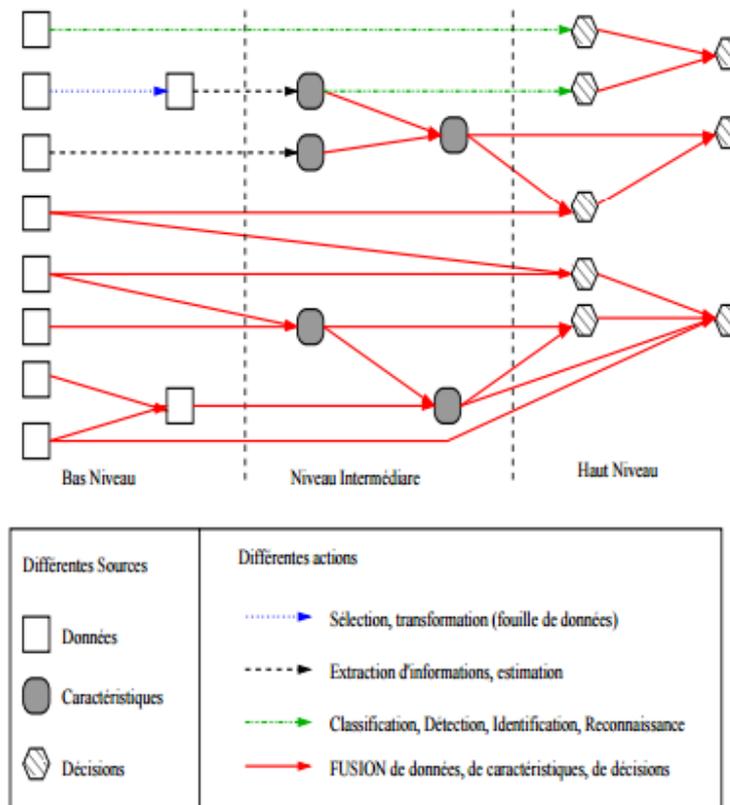


Figure 15 : Les différents niveaux de fusion d'informations (martin, 2005)

La fusion d'informations peut donc être réalisée à trois niveaux différents. Au niveau le plus bas, les informations issues des capteurs sont rarement parfaites. En effet, les signaux peuvent être bruités, les capteurs peuvent manquer de fiabilité, etc. De plus, le traitement ou même la fusion d'informations aux niveaux supérieurs peuvent créer des imperfections dans les données. Dans la partie suivante, nous nous intéresserons à ces différentes imperfections.

A.3 Imperfection des informations : imprécision et incertitude

Les données que nous recueillons sur un phénomène nous permettent de le représenter, mais ces données ne sont pas parfaites. On parle généralement de deux types d'imperfections (Smets, 1997 ; Florea et al. 2007) : l'imprécision et l'incertitude. Selon Smets (1997), l'incertitude est une propriété de la relation entre l'information et les connaissances du phénomène observé, alors que l'imprécision est une propriété de l'information elle-même. Selon Martin (2005), l'imprécision est un défaut quantitatif de la connaissance, alors que l'incertitude est un défaut qualitatif de la connaissance. Par exemple soit un ensemble de solution $\Omega = \{\theta_1, \theta_2\}$ et les deux cas suivants :

1. La solution est soit θ_1 soit θ_2 et j'en suis sûr.
2. La solution est θ_1 , mais je n'en suis pas sûr.

Dans le premier cas, la solution n'est pas précise (θ_1 ou θ_2), mais certaine. Alors que dans le second cas, la solution est précise (θ_1), mais incertaine.

A.3.1 L'incertitude et l'imprécision

L'incertitude : L'incertitude reflète l'incapacité à dire que l'information est entièrement vraie ou fausse ; on peut seulement affirmer qu'elle est vraie avec un coefficient de confiance appartenant à l'intervalle $[0,1[$. Lorsque le coefficient de confiance est égal à 1, l'information est alors certaine. Sinon, l'information sera seulement probable. Par exemple : *Il mesure 1m82, j'en suis sûr à 80%*. L'information est donc précise, mais incertaine (indice de confiance de 0.8).

L'imprécision : L'imprécision reflète l'incapacité à donner précisément une solution, on peut seulement affirmer que la solution appartient à un sous-ensemble. Par exemple :

- *Il mesure 1m80 ou 1m81*. Les deux solutions sont possibles, l'information est donc imprécise.
- *Il mesure entre 1m80 et 1m90*. Ici on donne un intervalle, la taille peut être n'importe quelle valeur comprise dans $[1,80\ 1,90]$, l'information est donc imprécise.

Une information peut être à la fois imprécise et incertaine. Par exemple, prenons l'assertion suivante : *il mesure 1m81 ou 1m82, j'en suis sûr à 80%*. Ici l'information est imprécise (1m81 ou 1m82) et incertaine (coefficient de confiance inférieur à 1). Une information peut également être précise et certaine : *il mesure 1m82, j'en suis sûr à 100%*.

L'imprécision peut être source d'incertitude et inversement. Mais l'imprécision et l'incertitude peuvent également être dues à d'autres types d'imperfections.

A.4 Autres imperfections

Il existe également d'autres types d'imperfections comme l'incomplétude, l'ambiguïté, etc. ; elles sont généralement source d'imprécision et/ou d'incertitude.

Information vague : l'information n'est pas bien définie. Reprenons l'exemple de la taille d'un individu, prenons l'assertion *il est grand*. Ici la notion de grandeur est une notion vague, car ses bornes ne sont pas bien définies. Une information vague est source d'imprécision.

L'incomplétude : L'incomplétude correspond au fait que l'information fournie par la source n'est pas complète. Par exemple, dans le cas d'une adresse postale, si l'on donne le nom de la rue, mais pas le numéro, alors l'information est incomplète. Une information incomplète peut donc créer de l'imprécision et de l'incertitude.

La contradiction : Des informations sont en contradiction, si leurs interprétations sont contradictoires. Leur fusion peut souvent mener à des conclusions incohérentes.

L'ambiguïté : Une information est ambiguë, si elle peut être interprétée de différentes manières. Ce serait le cas, dans la reconnaissance de cible, si un système était incapable de différencier un camion et une voiture.

Les liens entre chaque type d'imperfection sont difficilement explicables de manière exhaustive. Une imperfection peut être due à d'autres imperfections, mais pas forcément. Le type d'imperfection aura une forte incidence sur le choix de la méthode de la fusion. La prochaine partie vise à présenter différentes méthodes de fusion d'informations.

B. Méthode de fusion d'informations

Il existe différentes méthodes de fusion d'informations, et aucune méthode ne permet une fusion optimale dans tous les cas. Dans cette partie, nous présenterons quatre grandes théories, et nous verrons quel type d'imperfections chaque théorie permet de traiter. Nous mettrons également en avant leurs avantages et inconvénients.

B.1 Théorie des probabilités et réseaux bayésiens

B.1.1. Théorie des probabilités

La théorie des probabilités est la plus ancienne et l'une des plus utilisées. Il existe de nombreux travaux utilisant cette technique, ainsi qu'un nombre important d'outils informatiques pour son développement. Cette théorie permet de prendre en compte uniquement l'incertitude.

B.1.1.1 Modélisation

Cette approche repose sur un cadre mathématique rigoureux. Ici l'information est modélisée à partir d'une distribution de probabilité $p : \Omega \rightarrow [0, 1]$ sur tous les singletons de Ω , avec la condition de normalisation :

$$\sum_{\theta \in \Omega} p(\theta) = 1$$

À partir de cette distribution, nous pouvons définir une mesure de probabilité P d'un événement A (sous-ensemble de Ω) comme une fonction $P : 2^\Omega \rightarrow [0, 1]$, laquelle suit les trois propriétés suivantes (Florea & Jusselme, 2007) :

(P1) $P(\emptyset) = 0, P(\Omega) = 1$

(P2) $0 \leq P[A] \leq 1, \forall A \subseteq \Omega$

(P3) $P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B), \forall A, B \subseteq \Omega$

La mesure de probabilité se calcule par la formule suivante :

$$P[A] = \sum_{\theta \in A} p(\theta)$$

La propriété **P1** montre que l'on se situe dans un monde fermé. La probabilité qu'une solution n'appartienne pas à Ω est nulle.

La propriété **P3** montre que la mesure de probabilité est additive. Si un événement est entièrement probable, son contraire est improbable :

$$P[A] = 1 - P[\bar{A}]$$

Dans cette théorie, l'ignorance totale correspond aux cas où la distribution de probabilité est équiprobable entre tous les singletons.

Exemple :

Soit un ensemble $\Omega = \{\text{petit, moyen, grand}\}$, représentant les différentes tailles possibles d'un être humain. L'information *il est grand*, avec un indice de confiance de 0.9, serait modélisée par :

$$P[\text{Grand}] = 0.9$$

On peut donc en déduire que :

$$P[\text{petit}] + P[\text{moyen}] = P[\overline{\text{Grand}}] = 1 - 0.9 = 0.1$$

Le cas de l'ignorance totale serait modélisé par :

$$P[\text{Petit}] = P[\text{Moyen}] = P[\text{grand}] = 0.33$$

B.1.1.2 Combinaison

Ici la combinaison consiste à combiner les distributions de probabilités de chaque information en une seule distribution de probabilités. L'une des méthodes de combinaison les plus utilisées est la combinaison bayésienne ; elle utilise la règle de Bayes.

$$P[A|B] = \frac{P[B|A]P[A]}{P[B]}$$

B.1.1.3 Décision

Dans cette théorie, le singleton ayant la probabilité la plus forte est sélectionné comme solution.

Plusieurs méthodes de fusion de données reposent sur cette théorie, la plus utilisée est celle des réseaux bayésiens.

B.1.2 Réseaux bayésiens

Les Réseaux bayésiens (RB) ont été utilisés dans de nombreux domaines, comme la télémédecine (Bellot, 2002), la robotique (Mechraoui, Thiriet, & Gentil, 2010), la

classification automatique, l'analyse d'image, etc. Dans cette partie nous allons présenter ce qu'est un RB, en reprenant les trois étapes de la fusion d'informations.

B.1.2.1 Modélisation

Les RB permettent de modéliser les informations, par des relations de cause à effet. Cette modélisation est basée sur des probabilités conditionnelles et sur la théorie des graphes. Selon Naïm et al. (2011), un RB peut être défini par :

- un graphe orienté sans circuit (acyclique) $G = (V, E)$, où V est l'ensemble des nœuds de G , et E l'ensemble des arcs de G ;
- un espace probabiliste fini (Ω, Z, p) ;
- un ensemble de variables aléatoires associées aux nœuds du graphe et définies sur (Ω, Z, p) , tel que :

$$p(V_1, V_2, \dots, V_n) = \prod_{i=1}^n p(V_i | C(V_i))$$

où $C(V_i)$ est l'ensemble des causes (parents) de V_i dans le graphe G

Ici les informations sont donc modélisées sous forme de graphe, un nœud représente une information. Ces nœuds sont reliés entre eux par des arcs, lesquels représentent les relations entre les informations sous la forme de probabilités conditionnelles. Les arcs peuvent être soit déterministes, soit probabilistes. Ce qui veut dire que l'observation d'une ou plusieurs causes, n'entraîne pas forcément l'effet ou les effets qui en dépendent, mais modifie la probabilité de les voir apparaître. Puisque ce sont des graphes acycliques, ils ne peuvent pas contenir de boucle (cf. Figure 16) :

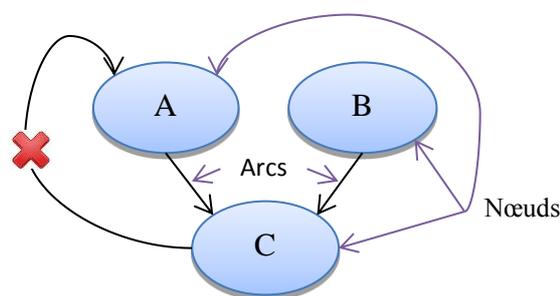


Figure 16 : Graphe acyclique

La construction d'un RB se déroule en trois phases (Naïm et al. 2011) :

- 1. Identification des variables et de leurs espaces d'états :** Cette phase consiste à identifier l'ensemble des informations du phénomène observé. Une fois les informations identifiées, il faut préciser leur espace d'états (ensemble continu/discret, ensemble fini/infini, etc.). La majorité des logiciels disponibles pour traiter les RB ne permettent de traiter que des variables discrètes et finies.
- 2. Définition de la structure de réseau bayésien :** Cette phase consiste à identifier les liens de cause à effet entre les informations. Cette étape peut être réalisée par un expert, ou par apprentissage.
- 3. Définition des tables de probabilité conjointe :** Cette phase consiste à élaborer les tables de probabilités associées aux différentes informations. Si l'information n'a pas de parent, il faut préciser sa loi de probabilité marginale. Si l'information possède des variables parentes, il faut établir la table de probabilités conditionnelles. Les tables de probabilité conditionnelles peuvent être créées par expert ou par apprentissage.

Exemple :

Pour illustrer un réseau bayésien, nous reprendrons l'exemple de Neapolitan (2004) ; dans cet exemple cinq informations ont été identifiées (cf. Figure 17):

- H : les antécédents de fumeur.
- L : la présence d'un cancer des poumons.
- B : la présence d'une bronchite.
- F : le ressenti de la fatigue.
- C : résultat d'un examen aux rayons X.

Pour chaque information, l'espace d'états a été défini (cf. Figure 17). Par exemple, l'information H est discrète et finie ; il y a, en effet, deux solutions possibles (h1 et h2).

La structure a ensuite été définie (cf. Figure 17). On peut voir par exemple que la présence d'une bronchite (B) et la présence d'un cancer des poumons (L) ont une incidence sur la présence de la fatigue.

Les tables de probabilité conjointe ont ensuite été déterminées. Par exemple, la table de l'information F est une combinaison des distributions des informations B et L. L'information H n'ayant pas de parent, sa loi de probabilité marginale a été définie : $P(h1) = 0.2$ donc $P(h2) = P(\bar{h1}) = 0.8$.

Le modèle présenté dans cet exemple permet de modéliser le risque de voir de la fatigue apparaître, à partir des antécédents de fumeur.

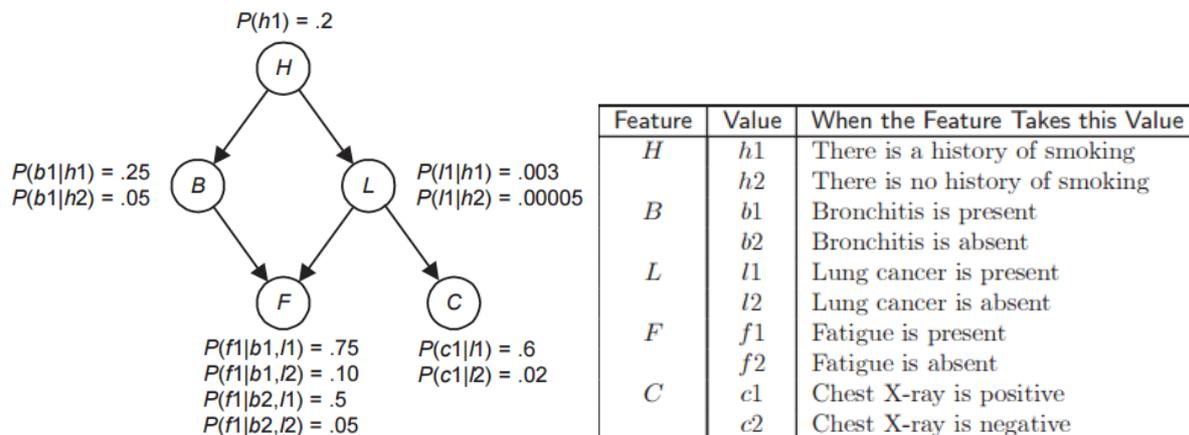


Figure 17 : Exemple de Neapolitan (2004) : graph et tableau

B.1.2.2 Combinaison (Inférence bayésienne)

L'inférence consiste à calculer la probabilité des solutions d'une information à partir des probabilités des solutions des informations parentes, en utilisant la règle de Bayes.

B.1.2.3 Décision

Une fois l'inférence réalisée, le singleton avec la probabilité la plus forte est sélectionné comme solution.

B.1.3 Synthèse

La théorie des probabilités présente l'avantage de reposer sur des lois mathématiques solides. Elle a été utilisée dans de nombreux travaux et il existe de nombreux outils permettant sa mise en œuvre. De plus, elle permet l'apprentissage des modèles. Cette théorie permet notamment une bonne représentation de l'incertitude, mais ne permet pas de représenter l'imprécision des informations (Bloch & al., 1994). Cette méthode fait l'hypothèse d'un monde fermé, ce qui nécessite que toutes les solutions possibles soient connues et que toutes les informations puissent être représentées par des fonctions probabilistes, ce qui n'est pas toujours possible si la base de données n'est pas suffisante (Benavoli et al., 2007).

B.2 Théorie des croyances

La théorie des croyances, également appelée théorie de Dempster-Shafer a été proposée par Shafer (1976). Elle est basée sur les travaux de Dempster (1967). Cette théorie permet de modéliser l'incertitude et l'imprécision.

B.2.1 Modélisation

Ici les informations sont modélisées à partir de fonctions de masses, de croyance et de plausibilité.

B.2.1.1 Fonction de masse

Une mesure de masse est une fonction $m : 2^\Omega \rightarrow [0, 1]$, qui suit les trois propriétés suivantes (Florea & Jousselme, 2007 ; Masson 2005) :

- (P1) $m[\emptyset] = 0$
- (P2) $0 \leq m[A] \leq 1 \quad \forall A \subseteq \Omega$
- (P3) $\sum_{A \subseteq \Omega} m(A) = 1$

Contrairement à la théorie de probabilité, la distribution de masse est définie non seulement sur des singletons, mais également sur des sous-ensembles. Nous pouvons donc affecter une masse à un sous-ensemble, sans nous prononcer sur les éléments de cet ensemble (Riquebourg et al., 2008). La théorie de probabilité peut donc être vue comme un cas particulier de la théorie de l'évidence (Masson, 2005). Cette théorie permet de gérer à la fois l'imprécision et l'incertitude (Masson, 2005) :

- Une connaissance **précise** et **certaine** se traduit par l'affectation de toute la masse sur un singleton : $m(\theta_1) = 1$.
- Une connaissance **imprécise** et **certaine** se traduit par l'affectation de toute la masse sur un sous ensemble qui n'est pas un singleton : $m(\theta_1, \theta_2) = 1$.
- Une connaissance **imprécise** et **incertaine** se traduit par l'affectation d'une partie de la masse sur plusieurs sous-ensembles ou singletons : $m(\theta_1) = 0.3$; $m(\theta_1, \theta_3) = 0.6$; $m(\theta_2) = 0.1$.

B.2.1.2 Fonction de croyance

La croyance d'un sous-ensemble A est la somme des masses des éléments de ce sous-ensemble et est définie comme une fonction $\text{Bel} : 2^\Omega \rightarrow [0, 1]$:

$$\text{Bel}(A) = \sum_{B \subseteq A} m(B) \quad \forall A \subseteq \Omega$$

Cette fonction suit les trois propriétés suivantes (Florea & Jousselme, 2007) :

$$(P1) \quad \text{Bel}(\emptyset) = 0 \text{ et } \text{Bel}(\Omega) = 1$$

$$(P2) \quad 0 \leq \text{Bel}(A) \leq 1 \quad \forall A \in 2^\Omega$$

$$(P3) \quad \text{Bel}(A \cup B) \geq \text{Bel}(A) + \text{Bel}(B) - \text{Bel}(A \cap B) \quad \forall A, B \in 2^\Omega$$

B.2.1.3 Fonction de plausibilité

La plausibilité d'un sous-ensemble A est égale à la somme des masses attribuées aux sous-ensembles qui ne contredit pas A (sous ensemble dont l'intersection avec A n'est pas nulle) ; la plausibilité est définie comme une fonction $Pl : 2^\Omega \rightarrow [0, 1]$:

$$Pl(A) = \sum_{B \cap A \neq \emptyset} m(B) \quad \forall A \subseteq \Omega$$

La mesure de croyance et celle de plausibilité sont duales :

$$\text{Bel}(A) = 1 - Pl(\bar{A})$$

Selon Bouguelid (2007), l'intervalle $[\text{Bel}(A) \text{ Pl}(A)]$ peut être considéré comme un encadrement d'une probabilité $P(A)$ mal connue.

$$\text{Bel}(A) \leq P(A) \leq Pl(A)$$

B.2.2 Combinaison

La combinaison d'informations consiste ici à calculer une fonction de masse unique, à partir de fonctions de masses de plusieurs informations. Ce calcul peut être réalisé à l'aide de différentes méthodes : règle orthogonale de Dempster-Shafer (Shafer, 1976), règle de Smets (1990), règle de Yager (1987), etc.

B.2.3 Décision

Il existe plusieurs méthodes de décision, comme le maximum de plausibilité, ou encore le maximum de probabilité pignistique « BetP ».

B.2.4 Synthèse

Selon Beler (2008), cette théorie permet de gérer l'incertitude et l'imprécision, mais également l'ambiguïté et l'incomplétude, en donnant la possibilité d'affecter des masses sur toutes les solutions possibles (singleton et sous-ensemble). De plus, la théorie de l'évidence ne nécessite pas de connaissance a priori sur le phénomène observé. En revanche, l'un de ces principaux inconvénients est qu'il n'existe pas de méthodes génériques pour l'affectation des masses.

B.3 Théorie des ensembles flous

La théorie des ensembles flous a été introduite par Zadeh (1965) pour représenter des informations vagues.

B.3.1 Modélisation

En logique classique, le degré d'appartenance d'un élément à un ensemble ne peut prendre que deux valeurs : 0 (n'appartient pas) ou 1 (appartient).

$$\mu_A(\theta) = 0 \text{ ou } \mu_A(\theta) = 1 \quad \forall \theta \in \Omega$$

Alors qu'en logique floue, le degré d'appartenance d'un élément à un ensemble peut prendre n'importe quelle valeur comprise entre 0 et 1.

$$\mu_A(\theta) \in [0, 1] \quad \forall \theta \in \Omega$$

Prenons l'exemple de la Figure 18. Dans le cas de la logique classique (en bleu), on appartient entièrement à la classe des grands (pour une taille au-dessus de 1m75), ou on n'appartient pas du tout à la classe des grands (pour une taille en dessous de 1m75). En logique floue, pour une taille de 1m82, on n'appartient pas entièrement à la classe des grands, mais seulement à 90%.

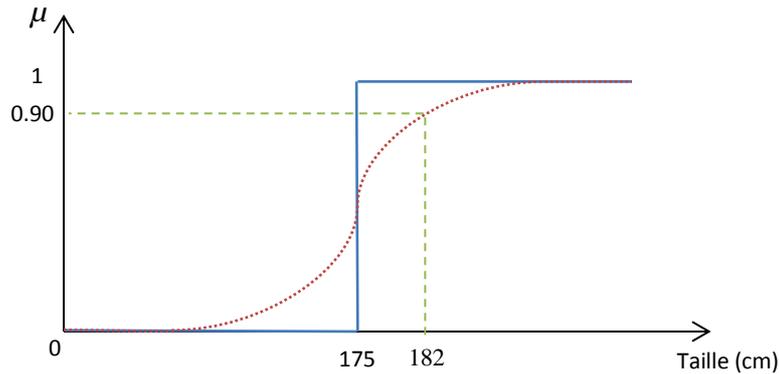


Figure 18 : Différence entre logique classique et logique floue

Dans le cas de la logique floue, une information peut appartenir à plusieurs ensembles en même temps, avec un degré d'appartenance différent. Par exemple (cf. Figure 19), si l'on mesure 1m78, nous appartenons à 66% à la classe des grands et à 33% à la classe des petits.

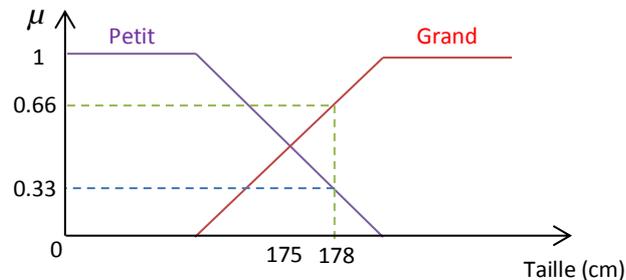


Figure 19 : Fuzzification

B.3.2 Combinaison

La fusion d'informations consiste à créer des lois de fusion. Ces lois sont de la forme **Si condition alors conclusion**. Ces lois peuvent également contenir plusieurs conditions : **Si condition1 et condition2 alors conclusion**. Différents opérateurs logiques peuvent être utilisés ET, OU, NON. Ensuite, à partir des degrés d'appartenance des informations à fusionner, et des règles de fusion, les degrés d'appartenance aux classes de l'information de sortie sont déterminés.

B.3.3 Décision

La classe avec le degré d'appartenance le plus fort sera choisie comme solution.

B.3.4 Synthèse

L'un des principaux avantages de la logique floue est que les règles de fusion sont énoncées en langage naturel, donc sur des variables qualitatives (loin, proche, etc.). Mais ces règles

peuvent être contradictoires et cette théorie ne peut pas garantir que la solution soit optimale et précise. Selon Floreal et al. (2007) la logique floue permet de traiter les informations vagues. Selon Dubois et Prade (1993), une transformation peut être faite entre la théorie des ensembles flous et celle des probabilités en utilisant la formule suivante :

$$\mu_A(\Omega) = P[A/\Omega]$$

où $P[A/\Omega]$ est la probabilité conditionnelle de A sachant θ et $\mu_A(\Omega)$ est le degré d'appartenance à la classe A.

B.4 Théorie des possibilités

La théorie des possibilités a été introduite par Zadeh (1978) et développée par Dubois et Prade (1985). Dans cette théorie, des informations imprécises et incertaines peuvent coexister et être traitées conjointement (Bloch et al., 1994).

B.4.1 Modélisation

Cette théorie est basée sur la théorie des ensembles flous et repose sur des mesures de degré de possibilité et de nécessité d'un événement.

B.4.1.1 Distribution de possibilité

Ici l'information est modélisée à partir d'une distribution de possibilité $\pi : 2^\Omega \rightarrow [0, 1]$ sur tous les singletons de Ω .

Zadeh (1978) définit le degré de possibilité qu'un élément X soit la solution θ , noté $\pi_X(\theta)$, comme le degré d'appartenance de θ à un ensemble flou A de Ω :

$$\pi_X(\theta) = \mu_A(\theta).$$

Reprenons l'exemple de la partie précédente : Si le degré d'appartenance de la taille 1m78 à la classe grand est de 0.66, alors la possibilité que la taille soit grand est de 0.66.

B.4.1.2 Mesure de possibilité

À partir de la distribution de possibilité, une mesure de possibilité peut être calculée. La mesure de possibilité correspond à la possibilité qu'un événement A (sous-ensemble de Ω)

soit possible. Cette mesure est égale au plus grand coefficient de possibilité des éléments de A :

$$\Pi(A) = \max_{\theta \in A} \{\pi_X(\theta)\} \quad \forall A \subseteq \Omega$$

Mais cette mesure de possibilité n'est pas suffisante pour représenter l'information. En effet, la possibilité d'un événement A n'implique pas l'impossibilité de son événement contraire \bar{A} . A et \bar{A} peuvent donc tous les deux être tout à fait possibles, ce qui représente une situation d'ignorance totale. Il est donc nécessaire d'introduire un degré de nécessité.

B.4.1.3 Mesure de nécessité

La mesure de nécessité indique le degré de certitude qu'un événement apparaisse :

$$N(A) = \min_{\theta \notin A} \{1 - \pi_X(\theta)\} \quad \forall A \subseteq \Omega$$

Si un événement est entièrement nécessaire, son contraire n'est pas du tout nécessaire.

$$\text{Si } N(A) = 1 \text{ alors } N(\bar{A}) = 0$$

Les mesures de possibilité et de nécessité sont liées par la formule suivante :

$$N(A) = 1 - \Pi(\bar{A}) \quad \forall A \subseteq \Omega$$

Dans cette théorie, l'imprécision et l'incertitude sont modélisées par un couple de mesure de possibilité et de crédibilité $(\Pi(A), N(A))$. Selon Bouchon-Meunier (2007), l'intervalle $[\Pi(A), N(A)]$ encadre la probabilité inconnue $P(A)$.

Exemple :

Soit l'ensemble $\Omega = \{0, \dots, 50\}$ représentant le nombre de clients susceptibles de déjeuner dans un restaurant. D'après la taille et la réputation du restaurant, nous pouvons établir la distribution de possibilité suivante (cf. Figure 20) :

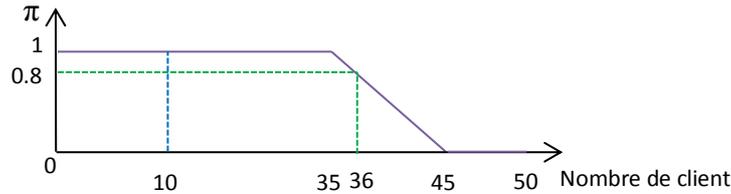


Figure 20 : Exemple de distribution de masse

D'après cette distribution :

- Il est tout à fait possible que le nombre de client soit égal à 10.
- La possibilité attribuée au nombre de clients = 36 est de 0.8.
- Il est tout à fait possible que le nombre de client soit compris entre [0 30] :

$$\Pi([0 30]) = \max (\pi(0), \dots, \pi(30)) = 1$$

- Il est également tout à fait possible que le nombre de client soit compris entre [31 50] :

$$\Pi([31 50]) = \max (\pi(31), \dots, \pi(50)) = 1$$

- En revanche, il est impossible que le nombre de client soit compris entre [40 50] :

$$\Pi([40 50]) = \max (\pi(45), \dots, \pi(50)) = 0$$

On peut donc ensuite calculer la nécessité d'un événement, par exemple, la nécessité que le nombre de client soit compris entre [31 50] est égale à :

$$N(D) = 1 - \Pi(\bar{D}) = 1 - \Pi([31 50]) = 1 - \max (\pi(36), \dots, \pi(50)) = 1 - 0.8 = 0.2.$$

B.4.2 Combinaison

La fusion consiste ici à fusionner une distribution de possibilités de plusieurs informations dans le but de calculer une distribution de possibilités sur l'information de sortie. Les distributions de possibilités sont combinées de la même manière que dans la théorie des ensembles flous.

B.4.3 Décision

La solution ayant le coefficient de possibilité le plus élevé est sélectionnée comme solution.

B.4.4 Synthèse

Cette théorie basée sur la théorie des ensembles flous permet de traiter les informations vagues et les informations imprécises, mais également les informations incertaines (Bouchon-Meunier, 2010). Selon Florea et al. (2007), cette théorie permet notamment de gérer les informations incomplètes. Néanmoins, étant basée sur la théorie des ensembles flous, elle présente également des inconvénients.

C. Synthèse des méthodes

Nous avons vu ici différentes méthodes de fusion d'informations. Chacune de ces méthodes permet de traiter des informations de natures différentes (cf. Tableau 6), mais elles présentent également des points communs. La théorie de l'évidence peut être vue comme la plus généraliste, et la théorie des probabilités et des possibilités apparaissent comme des cas particuliers de la théorie de l'évidence (Bouchon-Meunier, 2007).

Tableau 6 : Imperfections traitées par les différentes théories.

Méthode	Incertitude	Imprécision	Conflit
Théorie des probabilités	✓	✗	✗
Théorie de l'évidence	✓	✓	✓
Théorie floue	✗	✓	✗
Théorie des possibilités	✓	✓	✗

Dans la théorie de l'évidence, si la répartition des masses porte uniquement sur des singletons, les valeurs des degrés de plausibilité et de croyance sont égales, et correspondent à une mesure de probabilité (Bouchon-Meunier, 2007). Exemple : soit la distribution de masse suivante : $m(\theta_1) = 0.5$, $m(\theta_2) = 0.3$ et $m(\theta_3) = 0.2$ sur $\Omega = \{\theta_1, \theta_2, \theta_3\}$.

$$\text{Bel}(\{\theta_1, \theta_2, \theta_3\}) = \text{Pl}(\{\theta_1, \theta_2, \theta_3\}) = 0.8$$

En revanche, si la répartition des masses porte sur des éléments focaux emboîtés, les degrés de plausibilité et de croyance ont respectivement les mêmes propriétés qu'une mesure de possibilité et de nécessité (Bouchon-Meunier, 2007).

Une distribution de probabilité et une distribution de possibilité peuvent également être comparées. Selon Bouchon-Meunier (2007), on se situe dans la théorie des possibilités quand

notre connaissance des évènements est incomplète et qu'elle n'est pas suffisante pour déterminer la probabilité d'occurrence d'un évènement.

Cavalcante (2012) propose une synthèse des liens entre la théorie des probabilités, des possibilités et celle de la croyance (cf. Figure 21).

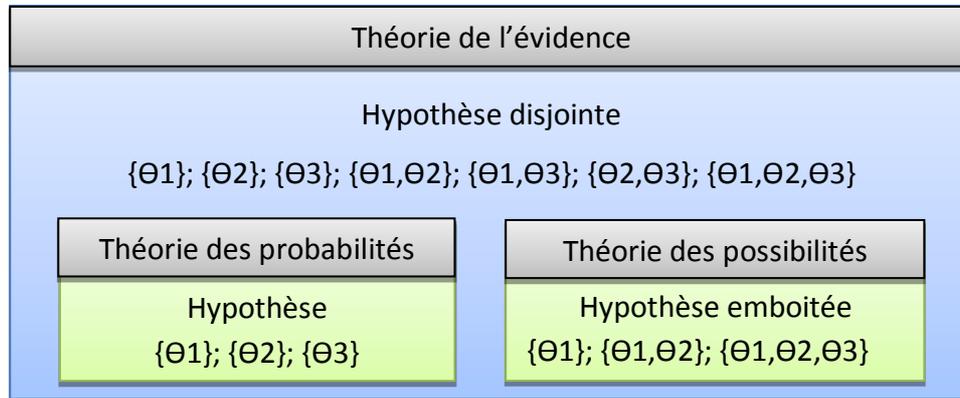


Figure 21 : Synthèse du lien entre la théorie

Dans le cas de notre étude, nous cherchons à estimer précisément le niveau de charge mentale. Nous avons donc besoin de converger uniquement vers un singleton. Sur la Figure 21, on peut voir que seule la théorie des probabilités permet de converger uniquement vers des singletons. La théorie des probabilités peut être mise en œuvre par réseaux bayésiens, lesquels permettent une modélisation graphique des informations. De plus, les réseaux bayésiens permettent l'apprentissage de la structure et/ou des données. Il est également possible de mettre en œuvre un réseau bayésien dynamique permettant de mieux traiter la dynamique des informations, dans le cas d'une fusion en temps réel.

Cependant, l'approche probabiliste et bayésienne ne permet pas de traiter les informations imprécises (cf. Tableau 6), ainsi que les informations continues (pour la plupart des solutions logiciel disponibles sur le marché). Pour pallier ce problème, nous pourrions utiliser le lien entre la théorie des ensembles flous et la théorie des probabilités pour transformer les informations continues de bas niveau, en informations discrètes, précises et incertaines. Ces informations pourront ensuite être fusionnées par réseaux bayésiens. Yang et al. (2010) utilisent cette méthode dans le cadre de l'estimation de la fatigue d'un conducteur de voiture.

La théorie des probabilités, et notamment les réseaux bayésiens, apparaissent donc comme la solution la plus appropriée pour créer un indicateur synthétique de charge mentale par fusion d'informations. Le nouvel indicateur créé servira ensuite à piloter une aide à l'opérateur.

Résumé

Quatre grandes théories, susceptibles de servir de base à la fusion d'informations, ont été abordées dans ce chapitre. Il s'agit de la théorie des probabilités, la théorie des croyances, la théorie des ensembles flous et de la théorie des possibilités. Elles ont été examinées du point de vue de leur capacité à prendre en compte les données imprécises et incertaines. La théorie de l'évidence apparaît comme étant comme la plus généraliste.

Nous avons retenu les réseaux bayésiens (théorie des probabilités) pour réaliser la fusion d'informations proprement dite, car elle permet de converger uniquement vers des singletons, et permet l'apprentissage de la structure et/ou des données ; par ailleurs, il est possible de mettre en œuvre un réseau bayésien dynamique pour intégrer la dynamique des informations, dans le cas d'une fusion en temps réel. Pour traiter les informations continues, nous utiliserons le lien entre la théorie des ensembles flous et la théorie des probabilités qui permet de transformer les informations continues de bas niveau, en informations discrètes, précises et incertaines.

Chapitre IV. La coopération homme machine

L'évolution de la technologie a rendu possible l'automatisation de certaines des tâches qui étaient auparavant attribuées à l'opérateur seul. On conçoit désormais des systèmes homme-machine où la composante technique possède une certaine autonomie. Cette approche est notamment intéressante dans l'étude des situations dynamiques, où l'opérateur ne contrôle pas entièrement l'environnement (Hoc, 2001) et où la pression temporelle peut être forte. Dans ce type de situation, la machine peut alors aider l'opérateur à ne pas perdre ou à récupérer la maîtrise de la situation.

L'objectif de ce chapitre est d'identifier des approches de coopération homme-machine permettant d'apporter une aide à l'opérateur.

La première section (**A**) s'intéresse à la coopération de manière générale. Nous exposerons les différents types d'interférences qui peuvent exister entre des agents en situation de coopération, ainsi que les différentes formes de coopération.

La deuxième section (**B**) s'intéresse à l'automatisation des tâches. Nous verrons que les tâches réalisées par l'opérateur peuvent être automatisées à différents niveaux, et que cette automatisation peut porter sur toutes les étapes du processus de traitement de l'information.

La troisième section (**C**) s'intéresse à l'allocation des fonctions. Nous expliquerons comment les tâches peuvent être réparties entre l'homme et la machine.

A. Coopération

Selon Hoc (2001), deux agents sont en coopération si les deux conditions minimales suivantes sont respectées :

- Les agents poursuivent des buts qui peuvent entrer en interférence ; les interférences se situent au niveau des buts mais peuvent également concerner les ressources, les procédures, etc.
- Chaque agent gère ces interférences pour faciliter sa tâche et/ou la tâche commune (quand elle existe). La machine peut aider l'homme, comme l'homme peut aider la machine.

Cette définition est minimaliste, mais elle permet de mettre en avant deux propriétés (Hoc, 2003) : la gestion d'interférence et la facilitation de l'activité. Le terme d'interférence renvoie aux interactions entre les activités des différents agents. Nous allons maintenant préciser cette notion.

A.1 La notion d'interférence

Hoc (2001) explique que les interférences entre agents peuvent être positives (i.e. facilitation mutuelle de la réalisation d'une tâche), ou négatives (i.e. gêne mutuelle). Cet auteur présente quatre types d'interférences :

Interférence d'interaction :

Ce type d'interférence correspond à des situations où l'activité d'un des agents a une incidence sur l'activité d'un autre agent, ce qui peut provoquer une gêne entre les agents. Hoc (2001) donne l'exemple du pilotage d'avion de combat : si le navigateur décide de changer la navigation pour l'optimiser, il doit changer les conditions de l'activité du pilote et donc son activité en cours. Castelfranchi (1998) identifie deux types d'interaction : l'interaction mutuelle et l'interaction réciproque. L'interaction mutuelle concerne des situations où les agents dépendent les uns des autres pour atteindre un objectif commun, alors que l'interaction réciproque concerne une situation où les agents dépendent les uns des autres pour atteindre leur propre objectif. Ce type d'interférence peut résulter d'une surcharge mentale, qui entraîne un changement dans la procédure (Hoc, 2001).

Interférence de condition préalable :

Ce type d'interférence intervient dans des situations où l'activité d'un agent est une condition préalable pour l'activité d'un autre agent. Dans ce cas, la réalisation d'une tâche ne peut commencer que si une autre tâche est terminée, et les deux tâches sont attribuées à des agents différents. Ce type d'interférence a une incidence directe sur la coordination (Hoc, 2001). Il peut s'agir, par exemple, du respect d'un délai entre la réalisation d'une tâche *a* et la réalisation d'une tâche *b* (Hoc, 2001).

Interférence de contrôle mutuel :

Ce type d'interaction concerne les situations où l'activité d'un des agents consiste à contrôler l'activité d'un autre agent ; ce qui permet notamment de corriger des erreurs. Quand les deux agents ne sont pas d'accord, ils doivent trouver un compromis. Le contrôle mutuel permet de limiter les effets d'autosatisfaction (Smith, McCoy & Layton, 1997; Dijkstra, 1999) et a un effet positif sur la performance (Hoc, 2001).

Interférence redondante

Il est possible qu'une tâche particulière ne puisse pas être préalablement attribuée à un des agents. Quand ce type de tâche survient, l'agent le plus apte à la réaliser (en terme de charge de travail, ressources, etc.) réalise la tâche. Dans le pilotage d'avion de combat, les deux opérateurs réalisent la recherche de cibles avec des moyens différents. Le premier qui identifie la cible procède à l'acquisition (Hoc, 2003).

Ces interférences peuvent être une cause de gêne pour la réalisation de l'activité d'un agent, mais peuvent également permettre d'améliorer la performance d'un des agents ou la performance globale de tous les agents (Hoc, 2001). Deux agents en coopération interfèrent donc de différentes manières pour atteindre leur objectif ou un objectif en commun ; cette coopération peut prendre différentes formes en fonction des caractéristiques de la situation.

A.2 Formes de coopération

Trois formes de coopération sont classiquement définies suivant la situation (Schmidt, Rasmussen, Brehmer, & Leplat, 1991) :

Coopération augmentative : les agents ont un savoir-faire similaire et réalisent une tâche similaire, car la tâche est trop exigeante pour un seul agent. C'est le cas, par

exemple, dans le pilotage d'avion de ligne : le pilote et le copilote ont un savoir-faire similaire et se répartissent les tâches, car un seul pilote ne peut pas réaliser toutes les tâches. Selon Hoc (2001) ce type de coopération est justifié quand la charge de travail augmente, ce qui crée le besoin d'ajouter un agent avec les mêmes compétences. Selon Hoc et Chauvin (2011), on trouve des redondances dans ce type de coopérations. Ici les redondances permettent d'augmenter les capacités de travail. On trouve également des interférences d'interaction et de condition préalable. En effet, dans le cas du pilotage d'avion de ligne, si le pilote décide de faire une remise de gaz, cela va avoir une incidence sur l'activité du copilote (interférence d'interaction) ou encore, pour sortir le train d'atterrissage, le copilote doit attendre que le pilote ait réduit la vitesse (interférence de condition préalable).

- **Coopération intégrative** : les agents ont un savoir-faire différent et complémentaire, et les différents savoir-faire sont nécessaires pour accomplir la tâche. Un anesthésiste et un chirurgien possèdent, ainsi, des savoir-faire différents, qui sont tous deux nécessaires pour réussir une opération. Ce type de coopération peut être source d'interférences d'interaction et de condition préalable. En effet, le chirurgien doit attendre que l'anesthésiste ait endormi le patient avant d'opérer (interférence de condition préalable), si l'anesthésiste décide de réveiller le patient pour des raisons de sécurité, cela change l'activité du chirurgien (interférence d'interaction).
- **Coopération débative** : les agents ont le même savoir-faire et réalisent une tâche similaire, pour ensuite pouvoir comparer leurs résultats. Les agents sont donc mis "en concurrence" dans le but d'obtenir la meilleure performance. Selon Hoc et Chauvin, (2011), on trouve également des redondances dans ce type de coopération. Elles consistent, ici, en un contrôle mutuel.

L'examen de ces trois types de coopération montre que des agents en coopération peuvent s'entraider pour réaliser une tâche. Dans le cas de la coopération entre un homme et une machine, la machine pourrait donc apporter une aide à l'opérateur, en réalisant une partie de son activité, en apportant un savoir-faire ou bien en contrôlant l'activité de l'opérateur.

La coopération entre un humain et une machine peut être définie en différentes structures.

A.3 Structure de coopération

Dans les systèmes mono-opérateurs (un seul agent humain) deux structures de coopérations peuvent être définies (Milot, 1999) ; la structure peut être verticale ou horizontale.

A.3.1 Structure verticale

Dans ce type de structure, le système ne peut pas exécuter de solution, mais uniquement apporter une aide à la décision (Figure 22).

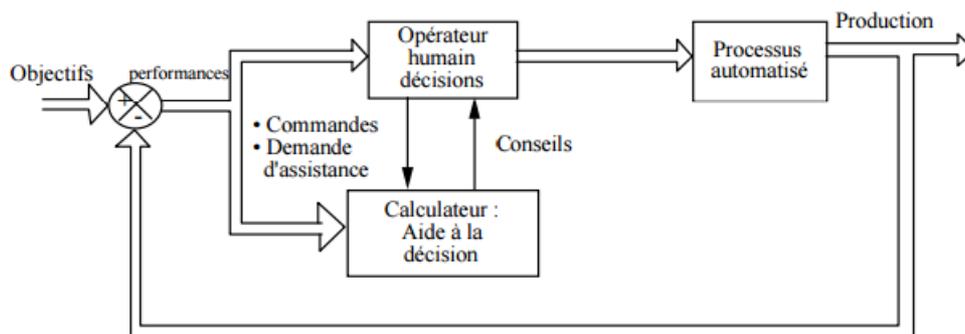


Figure 22 : Structure de coopération verticale (Milot, 1999)

L'aide apportée par le système peut soit guider l'opérateur dans l'élaboration de la décision, soit apporter directement une solution. Face aux solutions proposées par le système d'aide, l'opérateur peut avoir trois types de réactions (Milot, 1999) :

- S'il n'a pas identifié de solution optimale, il peut être tenté d'appliquer la solution proposée par le système d'aide.
- S'il a déjà élaboré une solution qui coïncide avec celle proposée par le système d'aide, il sera alors conforté dans sa propre décision.
- L'opérateur a déjà une solution, mais celle-ci ne coïncide pas avec la solution proposée par le système d'aide. L'opérateur et le système d'aide sont donc en conflit. Pour choisir l'une des solutions, l'opérateur doit réaliser une vérification des solutions. Pour réaliser cette vérification, le système d'aide doit justifier sa décision en fournissant à l'opérateur des explications sur sa démarche. Milot (1999) identifie deux niveaux de justification. Au premier niveau, le système d'aide fournit à l'opérateur le diagnostic qui a servi à l'élaboration de la solution. Si le diagnostic n'est pas suffisant, l'opérateur peut descendre au deuxième niveau, qui consiste à fournir les variables prises en compte pour aboutir au diagnostic. Cette vérification peut être plus

ou moins complexe et plus ou moins longue. Suivant la dynamique du système l'opérateur peut ne pas avoir suffisamment de temps pour réaliser la vérification.

Dans le cas où l'opérateur n'a pas de solution, nous sommes dans une coopération de type augmentative. Alors que dans le cas où l'opérateur a une solution, nous nous trouvons dans une coopération de type débative. En effet, la solution de l'opérateur et celle de la machine sont comparées.

A.3.2 Structure horizontale

Dans ce type de structure, les tâches sont réparties entre l'homme et la machine, et la machine est en mesure d'exécuter une décision (ou "solution") (cf. Figure 23).

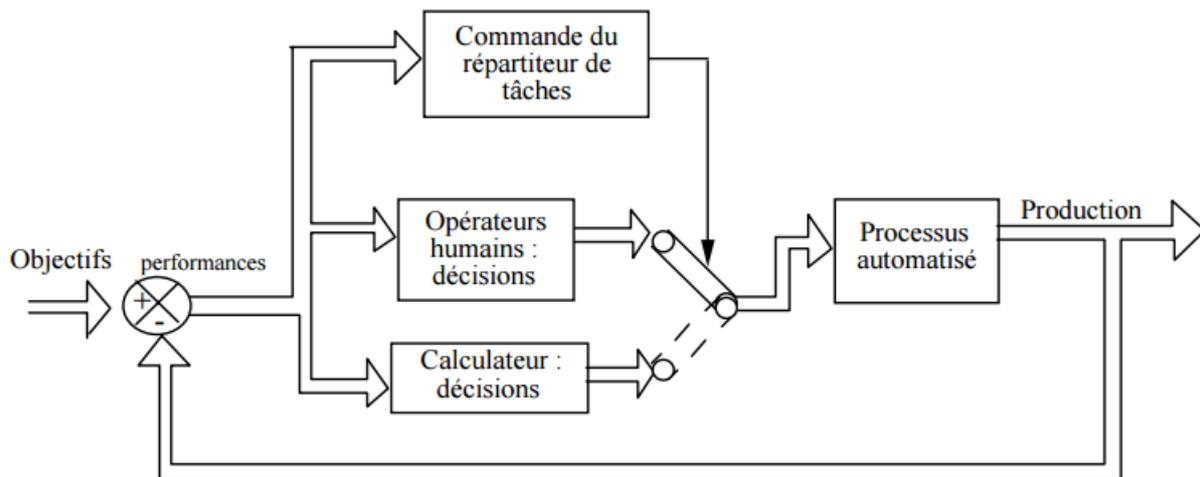


Figure 23 : Structure horizontale de coopération (Milot, 1999)

Pour mettre en place une coopération horizontale, il est nécessaire - dans un premier temps - d'identifier les tâches ou fonctions qui peuvent être réalisées par l'opérateur et par le système d'aide. Selon Royer (1994), il ne faut pas se restreindre aux actions, il faut également s'intéresser aux fonctions de diagnostic, planification, etc. Selon Hoc (1988), il est important de distinguer à un moment donné les tâches qui sont prioritaires et celles qui sont secondaires. Les tâches secondaires doivent être réalisées le plus rapidement possible et en générant un coût minimal pour l'opérateur. Nous reviendrons plus en détail sur cette répartition dans la section C.

Un agent humain peut donc coopérer avec un agent artificiel, qui peut lui apporter une aide sur la prise de décision ou sur l'exécution de la solution sélectionnée. Dans ce cas, certaines

tâches normalement attribuées à l'agent humain sont automatisées (i.e. déléguées à l'agent artificiel). Il convient donc de définir ce qu'est l'automatisation.

B. Automatisation

L'évolution de la technologie permet maintenant d'automatiser des parties de l'activité de l'opérateur. Certains systèmes ont même été entièrement automatisés, l'automatisation peut être réalisée à plusieurs niveaux.

B.1. Niveau d'automatisation

Sheridan et al. (1978) définissent une échelle présentant dix niveaux d'automatisation (cf. tableau 7).

Tableau 7: Niveaux d'automatisation (Sheridan et al., 1978)

Fort	10	Le système décide et exécute les solutions, l'opérateur est ignoré.
	9	Le système exécute automatiquement la solution et le système décide d'en informer l'opérateur ou non.
	8	Le système exécute automatiquement la solution et en informe l'opérateur uniquement si celui-ci en fait la demande.
	7	Le système exécute automatiquement la solution et en informe l'opérateur.
	6	Le système accorde à l'opérateur un temps de réflexion avant d'exécuter automatiquement la solution.
	5	Le système exécute la solution, si l'opérateur approuve.
	4	Le système propose une seule solution.
	3	Le système ne propose pas l'ensemble des solutions, mais quelques unes.
	2	Le système propose un ensemble de solutions complet.
Faible	1	Le système n'offre aucune assistance. L'opérateur doit prendre toutes les décisions et réaliser toutes les actions.

Le niveau le plus bas d'automatisation correspond à un mode entièrement manuel et le mode le plus élevé à un mode entièrement automatique. Dans les huit niveaux intermédiaires, la prise de décision et l'exécution de la décision sont réparties entre l'homme et le système.

Du niveau 2 à 4, la prise de décision est partiellement ou entièrement allouée à la machine. En effet, la machine propose de plusieurs (niveau 2) à une seule solution (niveau 4), mais le

système n'intervient pas sur l'exécution de la solution. Ces trois niveaux peuvent être comparés à une structure de coopération verticale.

À partir du niveau 5, le système peut également exécuter des solutions et ceci sans l'accord de l'opérateur à partir de niveau 6. Les niveaux 5 à 9 peuvent donc être comparés à une structure de coopération horizontale.

Sur l'échelle de Sheridan et al. (1978), l'automatisation porte sur la prise de décision et sur l'exécution d'actions, mais cette automatisation peut être étendue sur toutes les étapes du processus de traitement de l'information.

B.2 Automatisation et processus de traitement de l'information

Parasuraman et al. (2000) proposent d'étendre les dix niveaux d'automatisation de Sheridan et al. (1978) aux quatre étapes du traitement de l'information (cf. Figure 24).

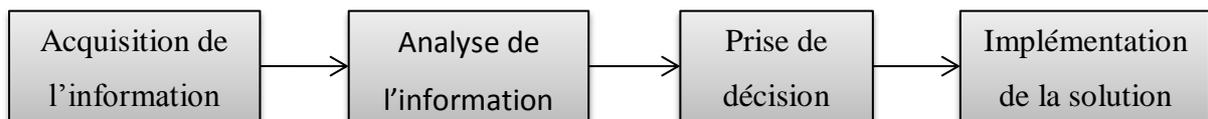


Figure 24 : Traitement de l'information Parasuraman et al. (2000)

À partir de ces quatre étapes de traitement de l'information, Parasuraman et al. (2000) identifient quatre processus - ou "fonctions" - qui peuvent faire l'objet d'une automatisation plus ou moins importante :

- **Acquisition d'information** : Au niveau le plus bas d'automatisation, l'opérateur doit lui-même collecter et organiser les données entrantes. À un plus haut niveau d'automatisation, les données sont collectées et organisées automatiquement suivant des critères. De plus, certaines informations peuvent être mises en évidence pour attirer l'attention de l'opérateur (Inagaki, 2003). Par exemple, dans le cas des contrôleurs aériens, un haut niveau d'automatisation peut consister à présenter une liste des avions à traiter en priorité et à mettre ces avions en évidence sur le radar (Parasuraman et al., 2000).

- **Analyse des informations** : Ici, une partie de l'analyse des informations acquises peut être automatisée dans le but d'aider l'opérateur à se représenter la situation et à anticiper son évolution. À un bas niveau d'automatisation, les données sont présentées dans leurs formes brutes. Au plus haut niveau d'automatisation, le système combine plusieurs données en une seule, pour fournir une représentation dite "élaborée" (Parasuraman et al., 2000).
- **Prise de décision** : la prise de décision (sélection d'une solution parmi plusieurs) peut être automatisée. Les différents niveaux d'automatisation qui peuvent être implémentés sont décrits dans le tableau 7.
- **Exécution de la solution** : L'opérateur peut réaliser toutes les actions de manière manuelle, de manière partiellement manuelle, mais l'exécution des actions peut être également totalement automatisée. Par exemple, dans le pilotage d'avion de ligne, le pilote peut piloter manuellement l'avion, il peut également automatiser certaines tâches comme le maintien d'altitude, de vitesse, etc., et garder les autres commandes en mode manuel, ou encore il peut faire le choix de confier entièrement le pilotage de l'avion aux automatismes.

Un système donné peut donc avoir un niveau d'automatisation différent pour chaque fonction du traitement de l'information (cf. Figure 25).

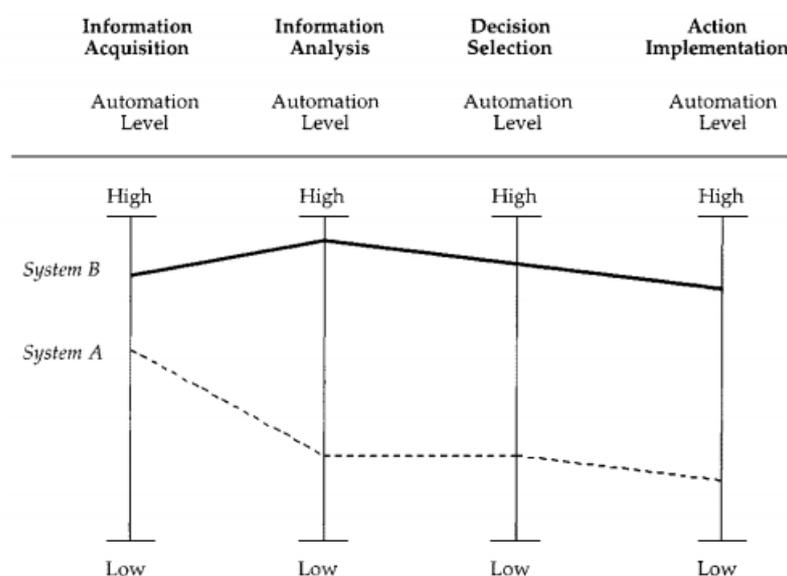


Figure 25 : Niveaux d'automatisation pour chaque fonction du traitement de l'information (Parasuraman et al., 2000)

En parallèle, Endsley et Kaber (1999) ont proposé une nouvelle typologie des niveaux d'automatisation, en prenant en compte la prise d'information, la génération de stratégies, la sélection d'une stratégie et l'implémentation de la stratégie sélectionnée. Dans leur approche, les fonctions peuvent être allouées à l'homme, à la machine ou au deux (cf. Tableau 8).

Tableau 8 : Niveaux d'automatisation (Endsley & Kaber, 1999)

Niveau d'automatisation		Fonction			
		Surveillance	Génération	Sélection	Implémentation
1	Contrôle manuel	Humain (H)	H	H	H
2	Aide à l'action	H/M	H	H	H/M
3	Traitement par lot	H/M	H	H	M
4	Commande partagée	H/M	H/M	H	H/M
5	Aide à la décision	H/M	H/M	H	M
6	Prise de décision mixte	H/M	H/M	H/M	M
7	Système rigide	H/M	M	H	M
8	Prise de décision automatisée	H/M	H/M	M	M
9	Contrôle supervisé	H/M	M	M	M
10	Automatisation complète	Machine (M)	M	M	M

B.3 Evaluation des niveaux d'automatisation

Selon Miller et Parasuraman (2007), les niveaux d'automatisation extrêmes (le plus bas et le plus haut niveau) présentent de nombreux inconvénients. Les bas niveaux d'automatisation ne permettent pas de profiter des bénéfices apportés par l'automatisation qui sont (Parasuraman et al., 2000 ; Reason, 1997 ; Billings, 1997) :

- **une réduction de la charge de travail** : certaines tâches étant réalisées par un agent artificiel, l'opérateur réalise moins de tâches, ce qui réduit sa charge de travail.
- **l'amélioration de la performance** : l'homme et la machine sont complémentaires. Les faiblesses de l'homme peuvent être compensées par la machine, ce qui peut améliorer la performance globale du système.

- **l'amélioration de la sécurité** : l'aide apportée par l'agent artificiel peut permettre d'éviter une perte de maîtrise de la situation.

A contrario, les hauts niveaux d'automatisation peuvent entraîner :

- **Une perte d'expertise et de savoir-faire** : quand certaines tâches sont automatisées, l'opérateur n'est plus en mesure de maintenir ses compétences (Sheridan, 1988).
- **Une diminution de la conscience de la situation** : l'opérateur n'est plus dans la boucle, et sa conscience de la situation peut être trop pauvre pour reprendre le contrôle en cas d'incident (Ephrath & Young, 1981).
- **Perte d'adaptabilité** : selon Reason (1988), les concepteurs de système ont créé des situations dans lesquelles les capacités d'adaptation de l'opérateur sont restreintes et transformées en une dangereuse passivité.

D'une manière plus générale (pour tout niveau d'automatisation), l'automatisation peut entraîner d'autres effets :

- **Le contentement** : des études ont montré que des opérateurs se contentent de la solution proposée par la machine, même s'ils savent que celle-ci n'est pas optimale (Mosier, Skitka, Heers & Burdick, 1998 ; Hoc & Lemoine, 1998). Selon Hoc, Yong et Blosseville (2009), ce phénomène de contentement peut conduire à une négligence dans la prise d'informations, dans la supervision des automatismes ou encore à une diminution des corrections manuelles qui pourraient améliorer la performance.
- **La perte de confiance** : Quand l'opérateur a le sentiment que la machine l'emmène dans une situation qu'il ne pourra pas maîtriser, il peut ne plus lui faire confiance et passer outre (Hoc, 2001). De plus, l'apparition de pannes ou de fausses alertes peut également fortement réduire la confiance de l'opérateur envers la machine.
- **Charge de travail modifiée** : selon Wiener (1987), l'automatisation ne réduit pas forcément la charge de travail, mais la modifie.

Tous ces phénomènes peuvent conduire à mettre l'homme en dehors de la boucle (human-out-of-the-loop). Selon Kaber, Omal, et Endsley (1999), les niveaux d'automatisation intermédiaires sont préférables aux niveaux extrêmes, car ils permettent à l'opérateur d'élaborer une conscience de la situation suffisante et de rester dans la boucle de contrôle.

L'automatisation revient donc à attribuer des fonctions initialement réalisées par l'opérateur à l'agent artificiel. Le choix du niveau d'automatisation et de la répartition des fonctions reste une question difficile : quelle fonction faut-il attribuer à l'homme ou à la machine ? La prochaine partie aborde la question de l'allocation des fonctions.

C. L'allocation des fonctions

Le terme d'allocation a été utilisé la première fois par Fitts en 1951, lors de travaux sur le contrôle aérien. Depuis, l'allocation de fonction a donné lieu à de nombreux travaux. L'allocation des fonctions renvoie à la question de la répartition de l'activité entre les différents agents. Morel, Chauvin, Rossi, et Berrue (2008) soulignent le fait que l'allocation conditionne la conduite même du système une fois mis en service. La principale question posée par l'allocation de fonctions est : À qui attribuer une certaine tâche et quand ? Nous allons tout d'abord nous intéresser à ce qui est alloué à l'homme et à la machine, des tâches ou des fonctions.

C.1 Allocation de fonction ou de tâche

Les notions de tâche et de fonction sont souvent utilisées de manière interchangeable (Inagaki, 2003), cependant ces deux notions ne sont pas synonymes. Hoc et Chauvin (2011) présentent trois grandes différences :

- Une tâche est souvent considérée comme une structure plus macroscopique qu'une fonction.
- Une tâche est concrète, alors qu'une fonction est plus abstraite, et peut contribuer à plusieurs tâches (Fuld, 2000).
- Une tâche est associée à un objectif précis. Alors qu'une fonction est : « un moyen sans aucun but en soi, mais juste lié à un objectif super-ordonné » (Hoc & Debernard, 2002, p.4).

L'allocation de fonction peut être vue comme un cas particulier de l'allocation de tâche (Hoc & Debernard, 2002). Des études menées sur les contrôleurs aériens (Hoc & Lemoine, 1998 ; Vanderhaegen, 1999) ont montré qu'il est plus approprié de distribuer des fonctions plutôt que des tâches entre l'homme et la machine. Nous privilégierons donc le terme d'allocation de fonctions.

C.2 Principe d'allocation de fonctions

Bailey (1989) identifie trois approches pour l'allocation de fonctions : l'allocation par défaut, l'allocation comparative et l'allocation économique. Jordan (1963) identifie un autre type d'allocation qu'il nomme "allocation de complémentarité".

L'allocation par défaut :

Ce type d'allocation consiste à automatiser toutes les fonctions qui peuvent l'être. L'opérateur est donc considéré comme le maillon faible, et seules les tâches non automatisables lui sont attribuées. Cependant, les tâches attribuées à l'homme sont celles qui sont non automatisables et peuvent être celles qui sont les plus complexes à réaliser. Bainbridge (1983) met en avant les limites et les paradoxes de ce type d'approche ; elle parle de l'ironie de l'automatisation.

L'allocation économique :

Ici l'allocation est définie en fonction des coûts de conception. Quand une fonction peut être automatisée, mais que son automatisation coûte plus cher que si elle est réalisée par l'opérateur, alors elle ne sera pas automatisée (Inagaki, 2003).

L'allocation comparative :

Fitts (1951) propose l'une des premières méthodes d'allocations de fonctions. Cette méthode consiste à 1. Identifier les fonctions nécessaires pour réaliser une tâche particulière, 2. Identifier l'agent le plus performant pour réaliser chaque fonction. Dans ce type d'allocation, les capacités de l'homme sont comparées à celle de la machine, pour leur allouer respectivement les tâches pour lesquelles ils sont les plus performants (Salembier & Pavard, 2004). Fitts (1951) propose une liste où figurent les tâches pour lesquelles l'homme est meilleur que la machine et où la machine est meilleure que l'homme. Par exemple, les machines sont plus adaptées que l'homme pour réaliser des calculs complexes, des tâches routinières, pour répondre rapidement (vitesse de calcul), pour raisonner de manière déductive, etc. En revanche, l'homme est meilleur que la machine pour raisonner de manière

inductive, pour s'adapter, pour réaliser un jugement, etc. Cependant, selon Jordan (1963), l'homme et la machine ne sont pas comparables, mais complémentaires, et l'allocation des fonctions devrait être basée sur un principe de complémentarité et non sur un principe de comparaison.

L'allocation complémentaire :

Ce type d'allocation consiste à exploiter au mieux les capacités de chaque agent (humain et machine), dans le but d'obtenir une performance meilleure que celle qui pourrait être obtenue par chacun des agents individuellement. Selon Hollnagel et Woods (1983) dans les systèmes complexes « le tout est plus que la somme des parties ». L'homme et la machine sont donc complémentaires et sont susceptibles de créer un système émergent.

C.3 Allocation statique et allocation dynamique

La répartition des tâches peut être soit statique ou soit dynamique.

C.3.1 Allocation statique

Dans ce type d'allocation, la répartition des fonctions est définie dès la conception du système et ne sera pas modifiée ultérieurement (Parasuraman et al, 2007). Une approche statique vise à définir la meilleure répartition des tâches dans le but d'optimiser la performance. Le niveau d'automatisation pour chaque tâche est donc choisi au moment de la conception et n'évoluera pas lors de l'activité.

Les limites d'une répartition statique des tâches ont souvent été mises en avant (Millot, 1999 ; Older, Waterson, & Clegg., 1997). Parasuraman et al. (2007) identifient plusieurs effets négatifs de l'allocation statique :

- Charge de travail mal répartie ;
- Dégradation de l'expertise ;
- sur-confiance en le système ;
- Réduction de la conscience de la situation.

Dans une activité de supervision de système dynamique, la situation évolue en permanence. En effet, les contraintes imposées à l'opérateur sont variables dans le temps, la performance de l'opérateur peut également varier en fonction de son état, etc. Le système doit donc

pouvoir s'adapter aux évolutions de la situation et à la survenue d'imprévus. Une répartition statique des tâches entre l'homme et la machine peut limiter cette adaptation (Milot, 1999 ; Older et al., 1997). En effet, une allocation statique peut limiter les capacités de l'homme à s'adapter aux contraintes d'une situation en fonction de ses ressources (Grau, Hourlier & Amalberti, 2000), et à réguler son activité pour gérer le compromis cognitif. Selon Scerbo (2007), une allocation de fonction dynamique pourrait résoudre certains problèmes posés par l'allocation statique.

C.3.2 Allocation dynamique

Avec l'allocation dynamique - et contrairement à l'allocation statique - les tâches sont réparties au cours de l'activité. Selon Inagaki (2003), la distinction entre l'allocation de fonction statique et dynamique repose sur l'idée qu'une fonction ne doit pas forcément être attribuée à un agent de manière définitive et qu'il y a beaucoup de situations où la machine et l'opérateur peuvent exécuter une même fonction à tour de rôle de manière satisfaisante. La figure suivante illustre la distinction entre l'allocation de fonction statique et l'allocation de fonction dynamique pour une fonction f.

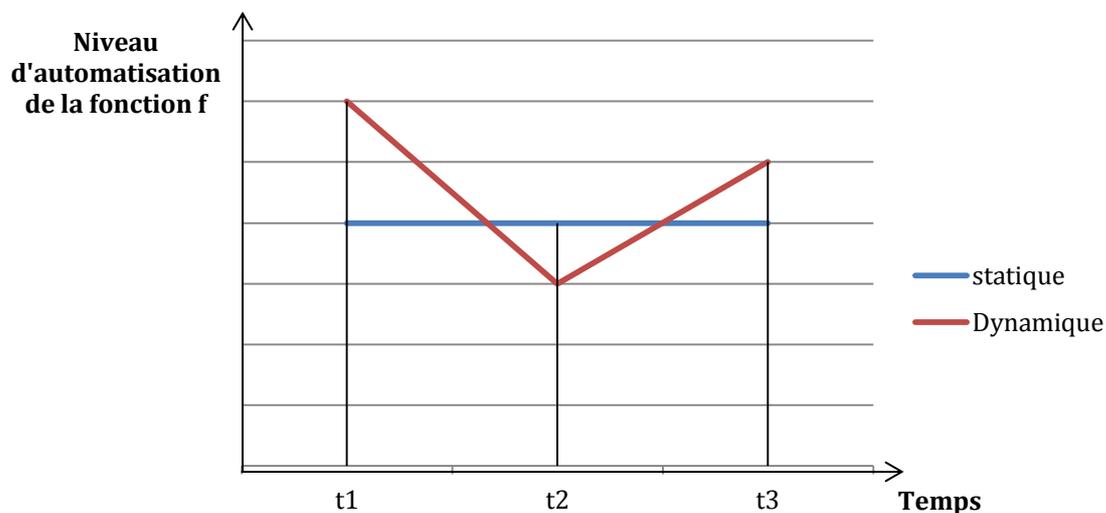


Figure 26 : Distinction entre l'allocation statique et l'allocation dynamique de fonction

L'allocation dynamique des fonctions concerne tout système dans lequel l'opérateur ou la machine peut modifier le niveau d'automatisation en temps réel (Scerbo, 1996). Selon Debernard (1993) quatre conditions doivent être respectées pour mettre en place une allocation de fonction dynamique :

- Le système doit être multitâches.

- Le niveau d'exigence doit varier dans le temps, avec des phases de sous-charge et de surcharge.
- Des tâches réalisées habituellement par l'opérateur doivent pouvoir être automatisées.
- L'opérateur doit impérativement être présent au sein du système.

Si ces quatre conditions ne sont pas respectées, il faut s'orienter vers une allocation statique.

Selon Kaber, Perry, Segall, McClernon et Prinzel (2006), l'objectif de l'allocation de fonction dynamique est de modérer la charge mentale de l'opérateur, et de supporter la conscience de la situation, en facilitant la gestion du compromis entre demande et ressources cognitive. Selon Parasuraman et al. (1992), l'allocation dynamique de fonction permet une meilleure combinaison entre les capacités de l'opérateur et celles de la machine. L'allocation de fonction permet donc d'aider l'opérateur à gérer le compromis cognitif.

Selon Hildebrandt et Harrison (2003), l'allocation dynamique de fonction permet de réguler le niveau de charge mentale de l'opérateur, dans le but d'éviter des sous-charges et des surcharges mentales. Lors de phase de forte contrainte, des fonctions initialement allouées à l'opérateur peuvent être allouées à la machine, dans le but de maintenir un niveau de charge mentale acceptable pour l'opérateur. Quand la contrainte diminue, les fonctions allouées à la machine sont réallouées à l'opérateur.

L'Allocation Dynamique de Fonctions (ADF) doit permettre d'atteindre une meilleure performance de l'ensemble du système (Cook, Corbridge, Morgan, & Turpin, 1999). En cas de dégradation de la performance de l'opérateur, certaines tâches peuvent être allouées à la machine dans le but de maintenir un bon niveau de performance globale.

Selon Hoc et Chauvin (2011), l'alternance de l'allocation de fonction entre l'homme et la machine est recommandée pour réduire le problème de l'homme en dehors de la boucle et peut également améliorer la conscience de la situation.

L'allocation dynamique de fonction a donc pour but de répondre à la question « qui fait quoi et quand ? ». L'allocation dynamique de fonction cherche la meilleure répartition des fonctions à un moment donné, dans le but de trouver un équilibre entre charge mentale, conscience de la situation et performance du système homme/machine.

C3.2.1 L'autorité dans l'allocation dynamique de fonction

Une des principales problématiques de l'allocation dynamique est également d'identifier l'agent (opérateur ou machine) qui sera responsable de la réallocation ? Millot (1999) identifie deux types de réallocation : explicite et implicite. Debernard et Hoc (2001) parlent d'une répartition explicite assistée.

- **Répartition explicite** : l'opérateur gère lui-même la répartition des tâches, en fonction du besoin. Il évalue donc la situation pour piloter ensuite l'allocation manuellement, ce qui peut induire une charge de travail supplémentaire.
- **Répartition implicite** : la répartition est gérée par la machine, elle est donc automatisée. Le système pilote automatiquement la répartition des tâches, en fonction de son évaluation de la situation. Les principales difficultés pour mettre en œuvre ce type de répartition résident dans la définition des critères de répartition et dans l'évaluation de ces critères en temps réel.
- **Répartition explicite assistée**: Ici la répartition est définies par le système, mais l'opérateur peut la modifier, s'il le juge nécessaire. Ce mode de répartition est intermédiaire ; il se situe entre la répartition dite "explicite" et la répartition dite "implicite".

Dans une étude sur les contrôleurs aériens, Debernard et Hoc (2001) comparent le mode explicite avec le mode implicite et le mode sans répartition. Ces auteurs observent que les deux modes ont un effet positif par rapport à la situation de contrôle. Dans le mode explicite, les contrôleurs expérimentés utilisent moins l'outil d'aide que les contrôleurs novices. Avec le mode implicite, les performances obtenues sont meilleures, notamment pour les contrôleurs expérimentés. En revanche, ce mode est moins apprécié que le mode explicite, voire même rejeté par les contrôleurs experts qui préfèrent conserver un contrôle entier de la situation. Ces auteurs ont également comparé le mode explicite et le mode explicite assisté. Ils ont observé un effet positif plus marqué avec le mode explicite assisté mais également l'apparition d'un effet de contentement.

Dans une répartition implicite, il est nécessaire de définir à l'avance (lors de la conception) des critères de répartition.

C.3.2.2 Critère de réallocation de fonction

Selon Scerbo (1996) l'allocation a été initialement pilotée par une estimation de la charge de travail de l'opérateur. Une allocation pilotée à partir de la charge de travail est pertinente, car la répartition de la charge de travail est l'un des buts de l'allocation (Parasuraman et al., 1992). Plus précisément, selon Cook et al. (1999), la réallocation peut être réalisée en fonction de l'état des variables internes (charge mentale, etc.) et externes (exigence, etc.). Kaber et Endsley (2004) identifient quatre critères pour piloter l'allocation de fonctions :

- **Événements critiques** : l'allocation est pilotée par l'apparition d'un événement critique impactant les objectifs du système (Hilburn, Jorna, Byrne & Parasuraman, 1997). Ces événements critiques peuvent être des pannes, des dysfonctionnements, etc. et ils doivent être identifiés lors de la conception ou par retour d'expérience.
- **Performance** : l'allocation de fonction est pilotée par la dégradation de la performance et déclenchée lorsque la performance descend sous un certain seuil (Parasuraman, 1993).
- **Physiologique** : l'allocation est pilotée par le niveau d'activité physiologique de l'opérateur.
- **Modélisation du comportement** : l'allocation de fonction est déclenchée, de façon à ce que l'homme et la machine puissent réaliser une activité suivant un modèle prédéterminé du fonctionnement du système global (Rouse et Rouse, 1983).

Certains auteurs (Parasuraman et al, 1992 ; Wilson & Russell, 2007) proposent de combiner plusieurs critères d'allocation pour pouvoir gérer plusieurs types de situations.

Conclusion

Nous avons, dans ce chapitre, exploré la notion de coopération homme-machine, ce qui nous a amené à définir les notions d' "automatisation" et d' "allocation de fonctions". Plusieurs points peuvent être mis en avant :

- La machine peut apporter une aide à l'opérateur en réalisant une partie de sa tâche, en apportant un savoir-faire ou en contrôlant l'activité de l'opérateur.
- L'interaction entre un humain et une machine permet d'atteindre un objectif commun, mais peut également générer des interférences négatives.
- L'automatisation peut concerner toutes les étapes du traitement de l'information. Elle peut donc apporter une aide à l'opérateur pour les étapes de prise d'information, de construction d'une représentation de la situation et de diagnostic, de prise de décision, de planification, ou d'exécution d'une action. Nous avons vu, dans le chapitre II partie A.2, qu'un être humain possède plusieurs « réservoirs » de ressources, et que la mobilisation de ces ressources n'est pas la même pour toutes les étapes de traitement de l'information. L'automatisation pourra être accentuée pour les étapes pendant lesquelles l'opérateur est en surcharge.
- Les niveaux extrêmes d'automatisation sont à éviter. Il convient de privilégier les niveaux intermédiaires d'automatisation.

Nous pouvons également retenir qu'une allocation statique peut limiter les capacités d'adaptation et de régulation de l'opérateur et donc constituer un frein pour la gestion du compromis cognitif, notamment dans les situations à forte dynamique. Puisque l'activité de supervision de drone est réalisée en situation dynamique, nous nous orienterons vers une allocation dynamique des fonctions.

Nous pouvons également conclure qu'un indicateur de charge mentale créé par fusion d'informations est pertinent pour piloter une allocation de fonctions. En effet, l'allocation des fonctions est souvent pilotée à partir de critères de performance, de critères physiologiques, de marqueurs comportementaux ou d'événements critiques, qui recouvrent les trois dimensions de la charge mentale précédemment identifiées.

Résumé

Deux types d'allocation des fonctions ont été identifiés : l'allocation statique ou dynamique des fonctions. Une allocation statique peut limiter les capacités d'adaptation et de régulation de l'opérateur, nous optons donc pour une allocation dynamique des fonctions.

L'allocation des fonctions repose sur une décomposition d'une tâche en plusieurs fonctions cognitives, lesquelles représentent les quatre étapes de traitement de l'information (prise d'information, représentation des informations, prise de décision, et exécution d'une action).

Chacune de ces différentes étapes peuvent être automatisées à différents niveaux.

Deux structures de coopération peuvent être mises en œuvre : verticale (le système peut uniquement proposer des solutions, mais ne peut pas prendre de décision et les exécuter) et horizontale (le système peut prendre automatiquement des décisions et les exécuter).

Le niveau d'automatisation des quatre fonctions du traitement de l'information, ainsi que la structure mise en œuvre pourront être adaptés pour maintenir la maîtrise de la situation par l'opérateur, en fonction du niveau de charge mentale estimée en temps réel.

Synthèse de la partie théorique et de la problématique

Cette revue de la littérature a conduit à mieux appréhender les approches, méthodes, et les outils qui permettent d'évaluer et maintenir la maîtrise d'une situation dynamique par un opérateur. Cet état de l'art a notamment permis de traiter trois questions fondamentales :

1. Sur quel concept peut-on se baser pour analyser, estimer et maintenir la maîtrise de la situation ?

Plusieurs concepts inter-reliés pourraient être étudiés pour caractériser la maîtrise de la situation de l'opérateur (comme le stress, la fatigue, l'humeur, les émotions, l'engagement, etc). Ces différents concepts permettent d'analyser différents aspects - cognitifs, affectifs ou motivationnels - de ce que Hockey (2003) appelle l'aptitude fonctionnelle de l'opérateur.

Cependant, en approfondissant plus avant la question de la maîtrise de la situation, nous avons choisi de nous concentrer plus particulièrement sur le concept de "charge mentale", qui a nous semblé pertinent pour trois raisons :

- il permet de synthétiser les notions de couple homme/tâche et de compromis cognitif, reposant sur l'équilibre entre exigences « acceptables » de la tâche et investissement « supportable » des ressources cognitives, qui sont au cœur de la maîtrise de la situation.
- La charge mentale peut être vue comme une notion uniquement cognitive, à la différence d'autres concepts comme par exemple le stress, qui intègre également des aspects affectifs et motivationnels (la perception de l'enjeu au regard de la l'expérience de la personne, l'évaluation subjective du soutien externe, etc.). Comme démontré au chapitre II, l'analyse de la charge mentale repose en effet sur la compréhension du processus de traitement de l'information et ses différentes dimensions mis en exergue dans le modèle de Hart et Staveland (1988). Son évaluation peut donc être plus facilement objectivable, à partir de la mesure en temps réel du niveau de contrainte, de l'observation des stratégies mises en œuvre par l'opérateur, et de l'utilisation d'indicateurs relatifs à la performance et à l'activation physiologique.
- Enfin, la charge mentale est un critère très souvent utilisée pour traiter de la coopération homme-homme ou homme-machine ; un état de surcharge mentale se traduisant par la nécessité d'agir sur le partage du travail pour maintenir ou améliorer

la maîtrise de la situation par l'opérateur. C'est par exemple un des six critères mis en avant par Rasmussen et al. (1986) dans la phase SOCA du CWA, relative à l'analyse de la coopération et de l'organisation sociale de sa démarche d'analyse cognitive du travail. De nombreux travaux sur l'allocation dynamique des fonctions utilisent également la charge mentale comme variable de déclenchement, pour redistribuer le travail entre l'homme et la machine (Lagu & Landry, 2011, de Greef et al., 2009, Rauffet et al., 2015).

2. Quel paradigme utiliser pour étudier la charge mentale ?

Si la charge mentale est pertinente pour étudier la maîtrise de la situation, les approches visant à la modéliser et à l'évaluer apparaissent parfois un peu cloisonnées.

Comme le soutient Wickens dans son projet de Keynote à la conférence H-Workload en 2017, de nombreux travaux récents sur l'évaluation de la charge mentale se basent plus particulièrement sur des mesures de performance ou d'activation physiologique, sans tirer parti des travaux plus anciens sur l'analyse de la contrainte ou des régulations. Il faudrait donc, aller vers une approche plus intégrée, qui prend en compte et relie toutes les dimensions de la charge mentale en s'appuyant sur des modèles causaux et prédictifs.

C'est en ce sens que nous avons cherché à proposer un modèle tridimensionnel et dynamique de la charge mentale, en revisitant les modèles de Hart et Staveland (1988) et de Sperandio (1971) :

- Tridimensionnel, car il faut non seulement regarder les « conséquences » de l'activité sur la tâche et sur l'opérateur (avec des mesures de performance et des mesures physiologiques), mais aussi situer la charge mentale en comprenant mieux le contexte et les caractéristiques de la tâche (en mesurant les contraintes ou la charge de travail imposée), et analyser le comportement de l'opérateur (en étudiant les régulations de l'activité par l'opérateur).
- Dynamique, car l'étude du comportement de l'opérateur se base sur l'existence de boucle de régulations, qui viennent rétroagir sur le niveau de charge mentale de l'opérateur. À partir des travaux de Sperandio (1971) et Leplat (2006) nous avons identifié quatre boucles de régulations, qui permettent de mieux analyser le compromis cognitif réalisé par l'opérateur. Les deux premières représentent la recherche de l'atteinte des exigences de la tâche (il s'agit des boucles basées sur la performance, et sur la conformité par rapport aux consignes prescrites), alors que les deux autres modélisent la recherche de l'effort « supportable » (ce sont les boucles

basées sur la priorité et sur le coût cognitif). Pour observer ces régulations, nous avons proposé une grille d'évaluation basée sur des mesures objectives de l'exigence de la tâche, de la performance, et du respect des modes opératoires.

Cette approche tridimensionnelle, combinée à la critique de la robustesse de certaines mesures employées (en termes de sensibilité, de sélectivité ou de caractère diagnostic, cf. Cegarra, 2012) tend par ailleurs à montrer la nécessité d'adopter une approche de fusion d'information pour générer un indicateur synthétique et temps réel de la charge mentale, comme le proposent Bürke et al. (2011) ou encore Schulte et al. (2015). Dans cette perspective, une lecture plus spécifique de la littérature relative à la fusion d'informations a conduit à sélectionner la théorie des probabilités (réseaux bayésien) et la théorie des ensembles floue, pour transformer les informations continues de bas niveau, en informations discrètes, précises et incertaines.

3. Comment adapter la coopération homme-machine pour aider l'opérateur à maintenir sa maîtrise de la situation dynamique ?

Enfin, dans le but de maintenir ou d'améliorer la maîtrise de la situation par l'opérateur, il faut réfléchir à la conception d'assistances pour l'opérateur, qui pourront se déclencher à partir du niveau de charge mentale estimé en temps réel. Ce problème de l'allocation dynamique des fonctions comporte en fait plusieurs questions sous-jacentes auxquelles il convient de répondre :

- D'un côté il faut identifier les étapes du processus de traitement de l'information (perception, représentation de la situation, prise de décision, et exécution d'une action) qui peuvent être automatisées, et déterminer le niveau d'automatisation adéquat, en fonction de la situation rencontrée par l'opérateur (Sheridan et al., 1978, Parasuraman et al., 2000).
- De l'autre côté se pose la question de la transparence et de l'autonomie du système technique, qui doit conserver l'homme dans la boucle tout en s'adaptant à la complexité et à l'urgence de la situation rencontrée. Il faudra ainsi parfois choisir, de façon dynamique, entre une structure de coopération verticale (le système peut uniquement proposer des solutions, mais ne peut pas prendre de décision et les exécuter) et une structure horizontale (le système peut prendre automatiquement des décisions et les exécuter).

Les différents éléments de la littérature, relatifs à ces trois grandes questions théoriques et méthodologiques, vont donc nous permettre de proposer des éléments de réponse à la problématique suivante : **comment créer un indicateur temps réel de la charge mentale, qui permette d'évaluer la maîtrise de la situation de l'opérateur et de déclencher une éventuelle assistance en cas de surcharge ?**

Pour répondre à cette problématique, nous allons appliquer les différents modèles, méthodes, outils rappelés ci-dessus, ainsi que les grilles d'analyse que nous avons proposées dans cette partie théorique (notamment la classification des situations supervisées du chapitre I, la grille de caractérisation des boucles de régulation à partir de variables « objectives » du chapitre II).

La partie empirique suivante consiste donc à illustrer et à valider, sur le cas d'une activité de supervision d'un essaim de drones, une démarche de création d'un indicateur synthétique temps réel de la charge mentale et son utilisation pour une allocation dynamique des fonctions.

Partie empirique

Créer un indicateur temps réel de la charge mentale pour maintenir la maîtrise de la situation d'un opérateur de supervision de drones

Introduction

La partie expérimentale de cette thèse présente une démarche de création d'aide à l'opérateur, pilotée à partir d'une évaluation de la charge mentale en temps réel.

Cette démarche se divise en quatre étapes. La première étape (chapitre V) consiste à réaliser une analyse de l'activité de supervision de drones sur le système SUSIE, dans le but d'identifier les indicateurs alimentant les trois dimensions de notre modèle de la charge mentale. Ces indicateurs ont ensuite été validés et sélectionnés lors de la seconde étape (chapitre VI) de manière expérimentale. La troisième étape (chapitre VII) vise à créer un indicateur synthétique de charge mentale, en fusionnant, par l'utilisation de réseaux Bayésiens et de la logique floue, les indicateurs retenus à l'étape précédente. Enfin, la quatrième étape (chapitre VIII) expose et illustre les principes d'utilisation de cet indicateur synthétique de charge mentale pour configurer et piloter une allocation dynamique des fonctions en temps réel.

Chapitre V. Analyse de l'activité de supervision d'un essaim de drones

Ce chapitre est dédié à la présentation de l'activité de supervision de drones. Nous décrirons dans un premier temps la tâche de supervision de drones, dans le but de donner une idée générale de la situation de travail (section **A**). Cette description permettra ensuite de définir les variables explicatives de la charge mentale, qui nous permettront de modéliser les trois dimensions de la charge mentale (section **B**).

A. Description de la tâche de supervision d'un essaim de drones

A.1. L'activité de pilotage de drone

Les drones inhabités (UAV) se sont rapidement développés dans le milieu militaire. Ils présentent plusieurs avantages par rapport à des aéronefs habités. Ils permettent notamment d'allonger le temps de mission, de réaliser des manœuvres impossibles avec des avions pilotés par un être humain (limite de g acceptable plus élevée, etc.), d'éviter des pertes humaines (Dixon, Wickens & Chang, 2005), d'augmenter les capacités des équipes au sol, d'augmenter la flexibilité tactique, et d'agir comme un « multiplicateur de force » (Barnes, Parasuraman, & Cosenzo, 2006 ; Cummings & Guerlain, 2007). Les drones rendent possibles des missions civiles et militaires qui ne seraient pas envisageables avec des avions pilotés par des êtres humains (Gawron, 1998). Dans le civil, les drones se sont notamment développés pour réaliser des missions de surveillance de trafic routier (Sorin & Lesage, 2003) et de transport de matériel (Kovanis, Skaperdas, & Ekaterinaris, 2011 ; Iwata, Onda, Sano, & Komoriya, 2007).

Cummings, Bruni, Mercier et Mitchell (2007) proposent un modèle de l'activité de pilotage d'un drone (cf. Figure 27). Selon ces auteurs l'activité de pilotage de drone est hiérarchique et se compose de trois boucles permettant d'établir des stratégies. La première boucle concerne le maintien de la stabilité (maintien du cap, de la vitesse, etc.). La seconde boucle concerne la navigation (relier les points de navigation, éviter les « no-fly zone », etc.). Et enfin, la troisième boucle concerne le management de la mission. La hiérarchie « conditionnelle » entre ces trois boucles permet d'expliquer la réussite ou l'échec de l'activité. En effet, si la

boucle 1 (maintien de la stabilité) échoue, les deux autres boucles échouent également. De même, si la navigation échoue, le management de la mission échoue également.

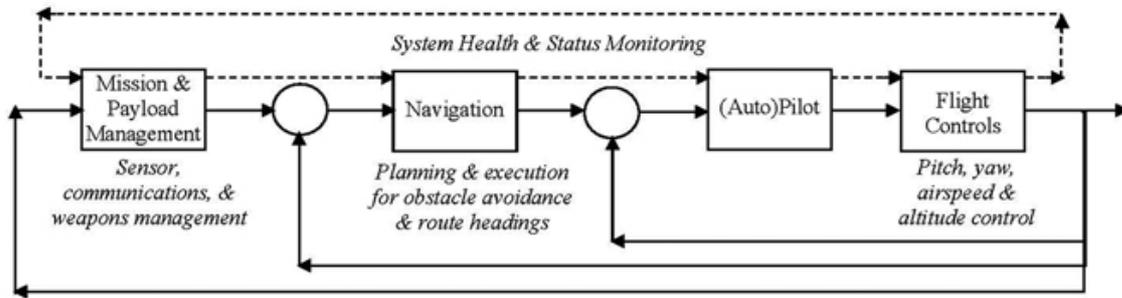


Figure 27 : Boucle de contrôle hiérarchique dans le cas de pilotage d'un drone (Cummings et al., 2007).

Actuellement, le pilotage de drone nécessite un ou plusieurs⁷ opérateurs pour un seul drone. Dans la prochaine génération de système UAV, un opérateur au sol sera amené à superviser plusieurs drones coopérant pour réaliser leur mission (Johnson, 2003 ; Coppin & Legras, 2012). Selon Dixon et al. (2005), la gestion de plusieurs drones peut engendrer de sérieux problèmes de charge de travail. Pomranky et Wojciechowski (2007) montrent, en effet, que la gestion de plus d'un drone entraîne une charge mentale élevée, ce qui peut causer des erreurs. Cummings et al. (2007) proposent une architecture théorique, représentant la tâche de contrôle de plusieurs drones (cf. Figure 28).

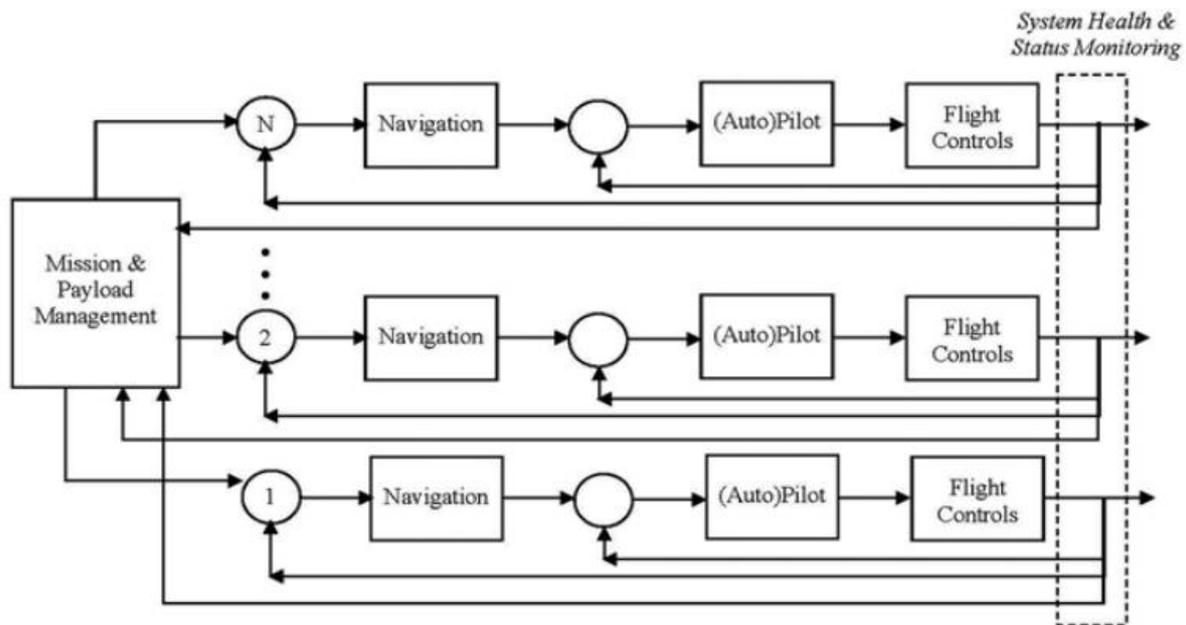


Figure 28 : Boucle de contrôle hiérarchique dans le cas de pilotage multi drones (Cummings et al., 2007).

⁷ Par exemple, le predator et le Shadow nécessitent deux opérateurs (Cummings, et al., 2007).

Dans ce type d'architecture, l'opérateur doit interagir avec le management de la mission de chaque drone et la navigation ainsi que le maintien de la stabilité doivent être automatisés (Cummings & al. (2007). Selon Dixon et al. (2003), il est nécessaire - pour contrôler plusieurs drones - d'abandonner le mode de pilotage actuel (de type télé-opération), pour s'orienter vers un système plus autonome. Ces mêmes auteurs expliquent (Dixon & Wickens, 2003, 2005) que l'automatisation des tâches de navigation et de maintien de stabilité permet de réduire la charge mentale d'un opérateur et rend envisageable le contrôle de plusieurs drones par un opérateur.

De nombreux auteurs ont étudié l'effet de l'automatisation sur le nombre de drones que peut gérer un opérateur (Dixon & al., 2005 ; Ruff & al., 2002 ; 2004 ; Dunlap, 2006 ; Lewis, Polvichai, Sycara & Scerri, 2006 ; Cummings & Guelain 2007). À partir d'une synthèse de ces différentes études, Cummings et al., (2007) montrent qu'un haut niveau d'automatisation (coopération de type horizontale) portant sur la boucle de maintien de la stabilité et sur celle de navigation, associé à une assistance à la décision (coopération de type verticale) portant sur la boucle de management permettrait d'augmenter le nombre de drones qu'un opérateur peut gérer.

Certaines études envisagent même une coopération au sein d'un système de systèmes, entre drones, opérateurs de supervision et aéronefs habités ; c'est le cas du projet ANR TAPAS, qui a été mené par l'équipe IHSEV du laboratoire Lab-STICC (Lassalle et al., 2014 ; Guérin et al., 2014).

Pour rendre des drones plus autonomes, deux approches sont possibles (Legras, Glad, Simonin, & Charpillat, 2008). La première consiste à programmer un parcours en précisant différents points de passage, puis à laisser le drone réaliser la navigation de point en point de manière autonome (Santana, Ramalho, Corruble, & Ratitch, 2004 ; Lauri & Charpill, 2006). L'inconvénient de cette approche est qu'une fois le parcours programmé, l'essaim de drones peut difficilement s'adapter à des changements de configuration. On se trouve donc dans un mode statique et défini a priori, c'est-à-dire non adapté aux situations dynamiques.

Une autre approche, plus dynamique, envisage l'auto-organisation des drones. Elle consiste à faire émerger de nouvelles trajectoires des drones, en fonction de leurs interactions avec l'environnement et avec les autres drones (Wagner, Lindenbaum, & Bruckstein, 1996 ; Chu et al., 2007 ; Coppin & Legras, 2012). L'augmentation de l'autonomie des drones et du système fait apparaître une nouvelle forme d'interaction entre l'homme et la machine. Le pilote d'un

essaim de drones doit réaliser une tâche de supervision d'un système complexe multi-agents et doit faire face à une situation dynamique.

C'est dans le cadre de cette dernière approche que le système SUSIE (Supervision de Systèmes d'Intelligence en Essaim) a été développé par Télécom Brest et l'entreprise Deev Interaction (Coppin & Legras, 2012). Il s'agit d'un simulateur permettant à un opérateur de contrôler un essaim de drones dans le but de surveiller un territoire et de neutraliser d'éventuelles menaces. Le système peut avoir différentes applications : recherche de véhicules suspects, détection d'incendies de forêt, recherche de victimes d'une avalanche, etc. L'application que nous utiliserons a pour but de détecter et de neutraliser des véhicules se déplaçant sur un territoire.

A.2. Description de la tâche du système SUSIE

La description de la tâche a été réalisée en suivant la méthodologie définie par Sperandio (1988), qui consiste à étudier : l'opérateur humain, la machine, les informations transmises et reçues, ainsi que les tâches et les actions possibles.

L'opérateur humain :

Le système ne fait appel qu'à un seul opérateur, mais certaines tâches peuvent être ou sont réalisées par un agent artificiel. Puisque le système est en cours de développement, il n'existe pas d'opérateur expert.

La machine :

Le système est le simulateur SUSIE, un dispositif d'entraînement sur lequel les sujets vont réaliser l'activité de supervision de drones. Ce simulateur permet de générer des événements et les comportements des différents drones mais aussi d'enregistrer les actions des opérateurs (clics souris). D'un point de vue matériel, le système se compose d'un ordinateur, d'un écran et d'une souris.

Les informations :

Toutes les informations transmises à l'opérateur proviennent de la carte évolutive ou du bandeau de message affiché sur l'écran du simulateur (cf. Figure 35). La carte évolutive fournit des informations qui peuvent être soit statiques, soit dynamiques.

Les informations statiques concernent :

1. **les données géographiques** telles que les routes et bâtiments (cf. Figure 29).
2. **les zones suspectes prédéfinies**. Elles ont été définies préalablement et sont représentées en pointillés blancs sur la carte (cf. Figure 29).

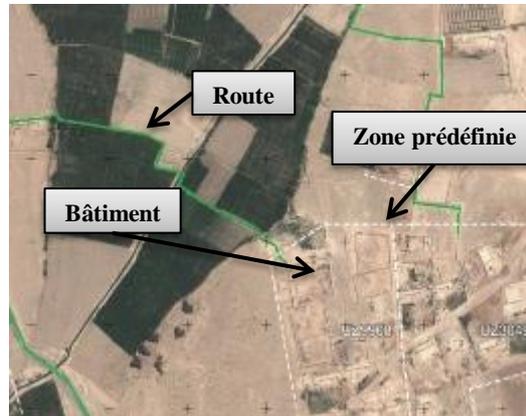


Figure 29: Données géographiques et zone prédéfinie affichées sur la carte du système SUSIE

Les informations dynamiques concernent :

1. **les zones de contrôle** créées par l'opérateur. Pour chaque zone de contrôle, un panneau est créé indiquant le nombre de drones optimal pour contrôler la zone et le nombre de drones présents dans la zone (cf. Figure 30). Quand des drones sont présents dans la zone, le fond du panneau est de couleur bleue ; si aucun drone n'est présent dans la zone, le fond du panneau est de couleur orange.

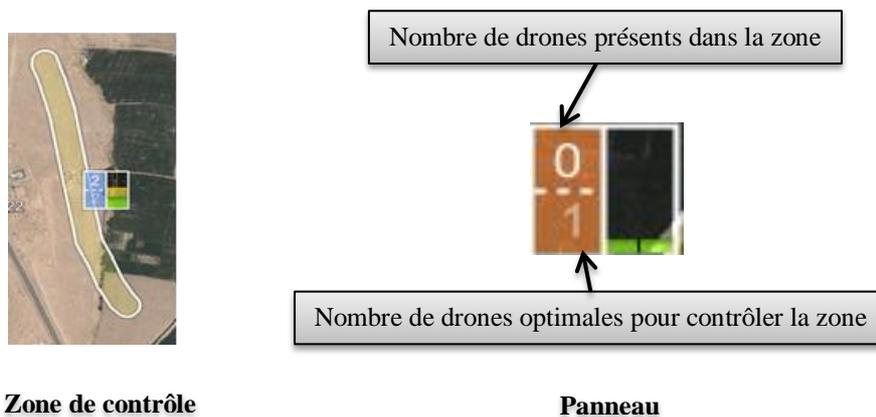


Figure 30 : Zone de contrôle

2. **Les drones** sont symbolisés par un triangle bleu (cf. Figure 31).



Figure 31 : drone

3. **La base** est symbolisée par un cercle bleu en bas à gauche de l'écran (cf. Figure 32). Le nombre au milieu de la base indique le nombre de drones présents dans la base.



Figure 32 : La base

4. **Les véhicules suspects.** Ils sont symbolisés sur la carte de différentes manières en fonction de leur statut (cf. Figure 33) :



Figure 33 : Représentation des véhicules en fonction de leur statut

Les emplacements de ces symboles sont actualisés à chaque fois que le véhicule est survolé par un drone.

Les informations proviennent également du bandeau de message, qui affiche des messages indiquant la présence d'un véhicule prioritaire (coordonnées ou zone prédéfinie et direction) (cf. Figure 34). Un véhicule prioritaire est un véhicule "ennemi", qu'il faut neutraliser en priorité. Ces messages peuvent provenir d'unités sur le terrain, d'un poste de surveillance, etc. Dans la version expérimentale que nous utilisons, les messages sont générés automatiquement par le système.

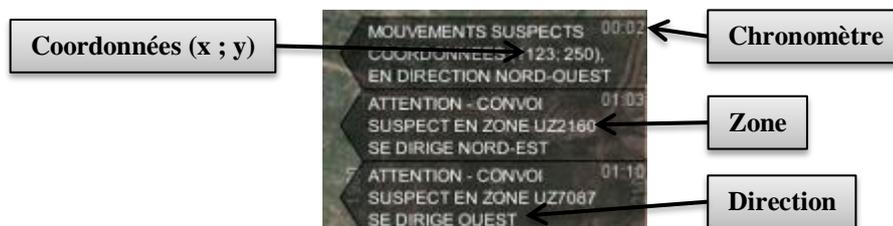


Figure 34 : Message indiquant la présence d'un véhicule prioritaire.

La figure suivante présente une vision globale de ce qui est affiché à l'écran.

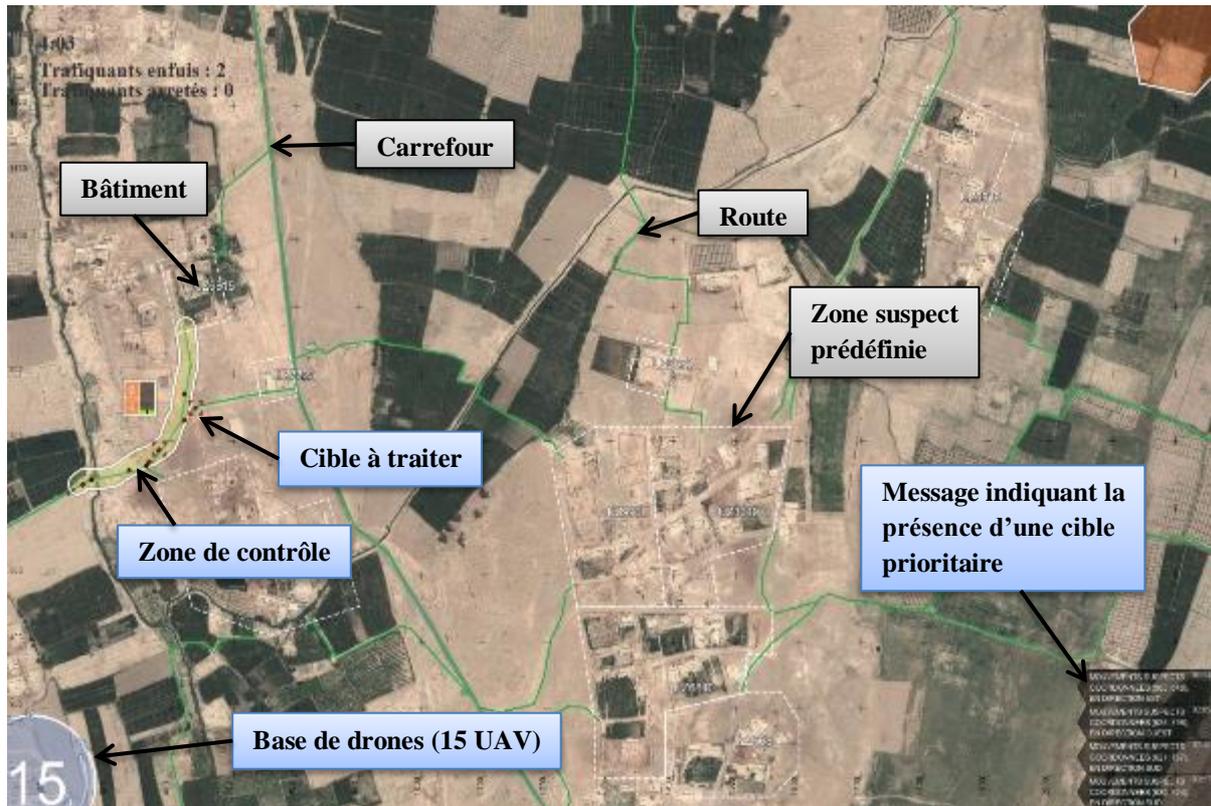


Figure 35 : Carte évolutive du système SUSIE

L'opérateur accède de manière directe à la quasi-totalité des variables du système. Seule l'autonomie restante des drones (temps de vol disponible avant de devoir être ravitaillé) est inaccessible.

Les tâches/actions :

Dans la version expérimentale du simulateur que nous utilisons, le système génère automatiquement l'apparition de nouveaux véhicules sur une période de temps donnée. La fréquence et la durée peuvent être paramétrées, afin de créer différents scénarios. L'objectif qui est donné à l'opérateur est de neutraliser X véhicules en un temps T (les valeurs de T et de X sont choisies dans la partie expérimentale). La tâche principale (prescrite) est donc de neutraliser des menaces terrestres présentes à l'intérieur d'une zone géographique.

Pour décomposer cet objectif principal en sous-tâches, en actions, et en modes opératoires, relatifs à la supervision et au pilotage d'un essaim de drones, nous proposons de suivre la **méthode HTA** (Annett & Duncan, 1967). Cette méthode repose sur :

- une analyse descendante de la tâche (l'objectif principal de la tâche est décomposé en différents niveaux de sous-tâches, jusqu'à un niveau unitaire d'actions individuelles réalisées dans un mode visuel, manuel ou cognitif),
- puis une analyse ascendante (où l'on regroupe ensuite, de façon séquentielle ou parallèle, les actions dans des plans, afin de répondre à des cas d'usage, à des situations types).

Nous traiterons ici l'analyse descendante en décomposant la tâche principale en sous-tâches, jusqu'au niveau des actions. Nous aborderons également l'analyse ascendante (les plans) en présentant les sous-tâches de manière séquentielle. L'analyse ascendante sera approfondie plus loin, notamment lors de l'analyse des boucles de régulation et des transitions de stratégie (section B.2).

Quand un véhicule apparaît, il est invisible sur la carte. Avant d'être neutralisé, il va changer plusieurs fois de statut (cf. Figure 36) :



Figure 36 : Les différentes étapes de traitement d'un véhicule

Pour réaliser la tâche principale, et passer d'une étape à l'autre dans le traitement des véhicules, l'opérateur doit réaliser plusieurs sous-tâches (cf. Figure 37) :

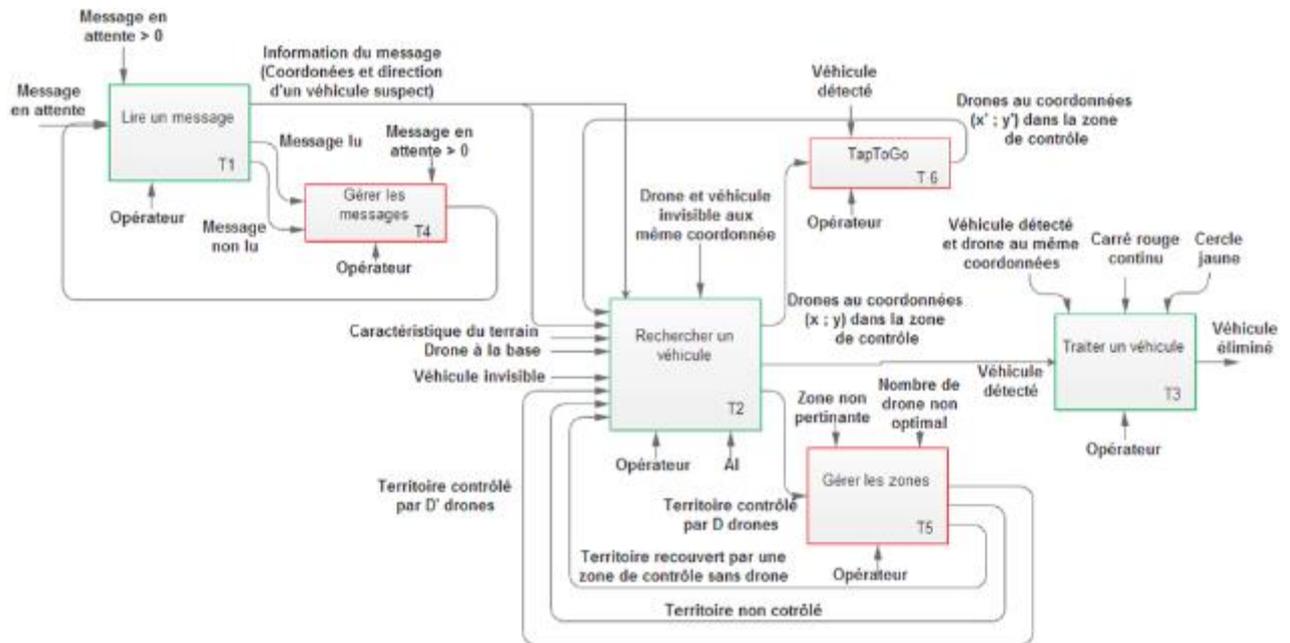


Figure 37 : Une vue d'ensemble de l'activité de supervision de drones (SADT niveau 0)

Nous commencerons par présenter les sous-tâches du processus primaire (en vert sur la Figure 37), puis celles appartenant au processus de supervision (en rouge sur la Figure 37). Dans cette partie, les diagrammes SADT de chaque sous-tâche ne sont pas présentés, mais ils sont disponibles en annexe A.

A.2.1 Processus primaire

Le processus primaire se divise en trois sous tâches séquentielles : lecture d'un message, recherche d'un véhicule, traitement d'un véhicule.

Traitement d'un message (T1) : Cette sous-tâche a pour but d'extraire des informations sur un véhicule suspect (coordonnées et direction), à partir d'un message.

La recherche de véhicules (T2) : Le but de cette sous-tâche est de détecter des mobiles (du statut 1 au statut 2). Cette sous tâche se divise en deux sous tâches séquentielles : créer des zones de contrôle et contrôler les zones de contrôle :

- **Créer une zone de contrôle (T2.1) :** cette sous-tâche a pour but de créer les zones de contrôle où les drones vont patrouiller. Pour réaliser cette tâche, l'opérateur doit réaliser plusieurs actions séquentielles :
 - Localiser sur la carte une zone où la présence d'un véhicule est possible (A.2.1.1). La localisation est réalisée soit à partir des informations délivrées par un message, soit à partir d'une analyse des caractéristiques de la carte.

- Délimiter (tracer la zone sur l'écran tactile) ou activer (sélectionner une zone prédéfinie) une zone de contrôle (A.2.1.2).
- Calculer le nombre de drones optimal pour contrôler la zone (A.2.1.3). Ce calcul est réalisé automatiquement par le système.
- Transférer les drones dans la zone (A.2.1.4). Les drones sont envoyés automatiquement (uniquement s'il y a des drones en attente dans la base).
- **Contrôler la zone (T2.2)** : le but de cette sous-tâche est de contrôler une zone et de détecter des mobiles. Cette sous-tâche est entièrement automatisée, et se divise en deux actions :
 - Patrouiller (A.2.2.1). Les drones patrouillent de manière autonome dans la zone, ils assurent l'anticollision et le contrôle de la totalité de la zone. Les drones ont une autonomie de 3 minutes 30 ; ils rentrent automatiquement à la base quand ils sont à court de carburant. Une fois le ravitaillement terminé, les drones restent en attente à la base.
 - Détection (A.2.2.2). Un drone détecte un véhicule quand il le survole (drone et véhicule aux mêmes coordonnées).

Le traitement des véhicules (T3) : Le traitement d'un mobile a pour but de neutraliser un mobile détecté (du statut 2 au statut 5) et se divise en trois sous tâches séquentielles : le verrouillage, l'identification et l'élimination.

- **Le verrouillage (T3.1)** : Cette sous-tâche a pour but de verrouiller un véhicule détecté (du statut 2 au statut 3). Un drone verrouille un véhicule détecté quand il le survole. Cette tâche ne nécessite pas forcément l'intervention de l'opérateur. En effet, un drone peut verrouiller un véhicule en le survolant sans que l'opérateur intervienne. Cependant, l'opérateur peut réaliser une inspection (T6) pour accélérer le verrouillage.
- **L'identification (T3.2)** : L'objectif de cette sous-tâche est d'identifier si un véhicule est un ennemi (du statut 3 au statut 4). Cette tâche se divise en deux parties :
 - Sélectionner le véhicule (A.3.1). Cette action consiste à cliquer sur un véhicule verrouillé, ce qui permet d'ouvrir la fenêtre d'identification (cf. Figure 38).
 - Identifier le véhicule (A.3.2). Dans la version expérimentale du système que nous utilisons, la tâche d'identification est simulée par une tâche cognitive qui consiste à trier 9 nombres dans l'ordre croissant (cf. Figure 38). En cas de réussite, le véhicule est considéré comme un ennemi et son statut devient « identifié », et en cas d'échec son statut devient « détecté ».

78	47	7
52	10	69
55	31	13

Panneau d'identification

Figure 38 : Panneau d'identification

- **Neutralisation (T3.3)** : La tâche de neutralisation a pour but de résoudre la menace liée au véhicule identifié (du statut 4 au statut 5). L'opérateur trace un corridor qui recouvre la cible (**A.3.3.1**). Ce corridor simule un couloir aérien, emprunté par un hélicoptère pour neutraliser les véhicules (cf. Figure 39). Une fois le corridor tracé, il y a un délai de 15 secondes avant que le véhicule soit neutralisé.



Corridor

Figure 39 : Corridor

A.2.2 Processus secondaire

Gestion des messages (T4) : Cette sous-tâche a pour but de supprimer un message. Elle permet de réguler le nombre de messages en attente. La suppression d'un message se fait en cliquant sur le message (**A4**).

Gestion des zones (T5) : Cette sous-tâche a pour but de gérer une zone et peut être réalisée de deux manières différentes : transfert des drones ou suppression de la zone.

- Transfert des drones (**A.5.1**). Cette action permet de réguler le nombre de drones dans une zone de contrôle. Le transfert des drones consiste à sélectionner la zone de départ et à faire glisser le curseur jusqu'à la zone d'arrivée.
- Supprimer une zone (**A.5.2**). Cette action permet de réguler la surface du territoire contrôlé. La suppression d'une zone peut être réalisée de deux manières :
 - En sélectionnant la zone et en faisant glisser le curseur à l'extérieur de la zone.
 - En sélectionnant la zone et en restant appuyé plus de 1 seconde.

Inspection (T6) : Cette sous-tâche consiste à demander à un drone d'inspecter un point précis à l'intérieur d'une zone de contrôle. Il s'agit d'une reprise manuelle de la tâche de patrouille des drones par l'opérateur.

A.2.3 Synthèse des tâches/actions

Le tableau suivant synthétise les tâches et les sous-tâches réalisées par l'opérateur (Tableau 9 : Tâche réalisée par l'opérateur). L'inspection est une action optionnelle, elle permet notamment d'accélérer le verrouillage, elle n'est donc pas prise en compte.

Tableau 9 : Tâche réalisée par l'opérateur

Tâche principale	Sous-Tâches
Neutraliser des menaces terrestres présentes sur une zone géographique	T1 : Lire un message
	T2 : Rechercher un véhicule (création de zone T2.1)
	T3.1 : Verrouiller un véhicule
	T3.2 : Identifier un véhicule
	T3.3 : Neutraliser un véhicule
	T5 : Gérer des zones

Pour chaque tâche identifiée, deux modes opératoires (**MO**) sont possibles, un mode opératoire complexe et un mode opératoire plus simple. Le mode opératoire complexe demande un effort plus important que le mode opératoire simple, mais permet une meilleure performance. Le mode opératoire le plus simple consiste soit à ne pas réaliser la tâche, soit à adopter une autre façon de faire (pour les tâches 3 et 5, cf. Tableau 10) :

Tableau 10 : Les différentes stratégies

Tâche	MO les plus coûteuses et les plus performantes	MO les moins coûteuses et les moins performantes
T1 : Lire un message	Lire un message	Ne pas lire le message
T2 : Rechercher un véhicule	Réaliser des recherches proactives et réactives	Réaliser uniquement des recherches réactives
T3.1 : Verrouiller un véhicule	Faire une inspection	Ne pas faire d'inspection
T3.2 : Identifier un véhicule	Identifier le véhicule	Ne pas identifier le véhicule
T3.3 : Neutraliser un véhicule	Neutraliser plus d'un véhicule par corridor	Ne neutraliser qu'un seul véhicule par corridor
T5 : Gérer les zones	Gérer une zone sans drone	Ne pas gérer une zone sans drone

Nous allons modéliser maintenant, à partir de cette description de la tâche de supervision et de pilotage d'un essaim de drones, les trois dimensions de la charge mentale.

B. Modélisation de la charge et des boucles de régulation dans le cadre de la supervision de drones

Dans cette partie, nous allons utiliser la description de la tâche présentée ci-dessus et le cadre théorique du chapitre II pour modéliser les trois dimensions de la charge mentale : cause (contrainte), médiateur (régulation) et effet (performance et état de l'opérateur).

B.1. Modélisation de la contrainte

Nous cherchons ici à modéliser la contrainte. Nous allons donc identifier les exigences de la tâche (prescription, nombre d'informations à traiter, contrainte temporelle, etc.).

B.1.1. Niveau de prescription

Objectif :

Deux objectifs sont donnés à l'opérateur :

- **O1** : Neutraliser X véhicules en T minutes. Les valeurs de X et T seront choisies lors de la définition du scénario (voir chapitre VI).
- **O2** : Pour chaque message, tracer une zone relative au message moins de deux minutes après son apparition.

Mode opératoire prescrit :

Pour atteindre les objectifs, nous avons prescrit plusieurs modes opératoires (**MOP**) à l'opérateur. Pour chaque tâche, ce sont les modes opératoires les plus complexes (cf. Tableau 3) qui ont été prescrits. Un non-respect des modes opératoires revient donc à mettre en œuvre les modes opératoires les moins coûteux.

- **MO1** : Toujours lire un message dans les deux minutes qui suivent son apparition.
- **MO2** : Réaliser des recherches proactives et réactives.
- **MO3** : Toujours réaliser une inspection dès qu'un véhicule est détecté.
- **MO4** : Toujours identifier un véhicule dès qu'il vient d'être verrouillé.
- **MO5** : Identifier au maximum 3 véhicules avant de tracer le corridor.
- **MO6** : Ne jamais laisser une zone vide. Supprimer la zone ou transférer des drones.

B.1.2. Contraintes structuro-temporelles :

Le système SUSIE est un système à forte dynamique. Cette dynamique est due au déplacement des véhicules et des drones, à l'apparition de nouveaux messages et de nouveaux véhicules, ainsi qu'aux changements automatiques (suite à l'écoulement d'un délai) de statut d'un véhicule. Cette dynamique impose des contraintes temporelles à l'opérateur :

- Contrainte temporelle due à un changement de statut d'un véhicule :
 - Si un véhicule « détecté » n'a pas été verrouillé dans les 5 secondes après la détection, il devra à nouveau être détecté.
 - À partir du moment où un véhicule est verrouillé, l'opérateur dispose de 10 secondes pour le sélectionner. À la fin de ce délai, le statut du véhicule changera automatiquement de « verrouillé » à « détecté ».
 - À partir du moment où un véhicule est identifié correctement, l'opérateur dispose de 100 secondes pour tracer le corridor. À la fin de ce délai, le statut du véhicule changera automatiquement de « identifié » à « détecté ».
- Contrainte temporelle imposée par l'objectif 1 : L'opérateur dispose de T minutes pour réaliser son objectif (éliminer X véhicules). Les valeurs de T et de X seront établies lors de la définition du scénario.
- Contrainte temporelle imposée par l'objectif 2 : L'opérateur dispose de 2 minutes pour traiter un message avant qu'il ne soit obsolète.

B.1.3. Distances opérateur-système-environnement

Les actions que l'opérateur peut réaliser lui permettent d'effectuer toutes les tâches ; elles ne constituent donc pas un facteur limitant. Néanmoins, l'opérateur ne contrôle pas la totalité du système. En effet, l'opérateur ne peut pas contrôler les déplacements des véhicules et des drones. La majorité des actions sont associées à des délais de réponse et des délais de rétroaction très courts (moins de 1 seconde).

B.1.4. Quantité d'informations à traiter

La quantité d'informations est fonction du nombre de véhicules en cours de traitement (détectés, verrouillés et identifiés), du nombre de messages en attente et du nombre de zones sans drones. La fréquence d'apparition des véhicules et des messages est définie par la

contrainte informationnelle (**CI**). Cette variable est binaire (CI = 0 fréquence faible et CI = 1 fréquence forte)⁸.

B.1.5. Contrainte multitâches

La contrainte multitâches (**CT**) est relative au nombre de tâches différentes que doit réaliser l'opérateur. Puisque nous avons identifié six tâches, CT est compris entre 0 et 6. Le Tableau 11 explique comment la variable CT est calculée.

Tableau 11 : Contrainte multi tâches (CT)

CT			CT		
CT1	Il y a des véhicules à rechercher (c'est toujours le cas)	CT1 = 1	CT4	Il y a au moins 1 véhicule à identifier	CT4 = 1
				Il y a 0 véhicule à identifier	CT4 = 0
CT2	Il y a au moins 1 message à traiter (apparu il y a moins de 2m)	CT2 = 1	CT5	Il y a au moins 1 véhicule à neutraliser	CT5 = 1
	Il y a 0 message à traiter (apparu il y a moins de 2m)	CT2 = 0		Il y a 0 véhicule à neutraliser	CT5 = 0
CT3	Il y a au moins 1 véhicule à inspecter	CT3 = 1	CT6	Il y a au moins 1 zone à traiter (zone vide)	CT6 = 1
	Il y a 0 véhicule à inspecter	CT3 = 0		Il y a 0 zone à traiter (zone vide)	CT6 = 0

B.2. Modélisation de la performance

La performance globale (**P**) est calculée à partir de deux indicateurs **P1** et **P2**, qui sont associés à chaque objectif :

- **P2 (neutralisation d'un véhicule)** : Cet indicateur est associé à l'objectif O1 et représente le fait qu'un véhicule est neutralisé en moins de 1 minute 30 après sa première détection ou non. Cet indicateur est binaire : P1 = 1 si le temps de neutralisation < 1 minute 30, sinon P1 = 0.
- **P1 (message traité)** : Cet indicateur est associé à l'objectif O2 et représente le fait qu'une zone relative à un message a été tracée dans les deux minutes suivant l'apparition du message. Pour ce critère, on ne tient pas compte du fait que le message

⁸ Une fréquence faible correspond à environ 1 véhicule toutes les 40s et à un message toutes les 1 minutes 30, une fréquence forte correspond à environ un véhicule toutes les 16 secondes et un message toutes les minutes.

est lu, on regarde uniquement si une zone est tracée. Cet indicateur est binaire : $P2 = 1$ si une zone relative à un message a été tracée, sinon $P2 = 0$.

Pour calculer la performance globale (**P**) on additionne les valeurs de **P1** et de **P2**, la valeur de **P** est donc comprise entre 0 et 2⁹.

B.3. Modélisation des régulations

Pour modéliser les régulations, nous devons, dans un premier temps, représenter le respect des modes opératoires prescrit. Cette modélisation est réalisée à partir de l'observation des actions de l'opérateur. Il s'agit des actions qui ont été identifiées et modélisées dans la partie précédente portant sur la description de la tâche. Ces actions peuvent être gestuelles (clics souris ou appuis tracés tactiles) ou oculaires (recherche d'informations).

B.3.1. Indicateur de respect des modes opératoires prescrits et du coût investi

À partir des actions de l'opérateur, nous pouvons définir six indicateurs de respect des modes opératoires (**RMOP1 à RMOP6**) associé à chaque mode opératoire prescrit. Ces indicateurs sont binaires, et nous renseignent sur le respect ou le non-respect du mode opératoire prescrit. Le Tableau 12 présente les règles qui ont été élaborées pour attribuer une valeur à chaque RMOP.

Tableau 12 : Mesure de RMOP

RMOP			RMOP		
RMOP1	Le message est lu dans les deux minutes	RMOP1 = 1	RMOP4	Le corridor est tracé avec moins de trois identifications	RMOP4 = 1
	Le message n'est pas lu dans les deux minutes	RMOP1 = 0		Le corridor est tracé avec plus de trois identifications	RMOP4 = 0
RMOP2	Le véhicule détecté est inspecté dans les 5s	RMOP2 = 1	RMOP5	La zone vide est traitée dans les 90s	RMOP5 = 1
	Le véhicule détecté n'est pas inspecté dans les 5s	RMOP2 = 0		La zone vide n'est pas traitée dans les 90s	RMOP5 = 0
RMOP3	Le véhicule verrouillé est identifié dans les 10s	RMOP3 = 1	RMOP6	Recherche proactive + réactive	RMOP6 = 1
	Le véhicule verrouillé n'est pas identifié dans les 10s	RMOP3 = 0		Recherche réactive	RMOP6 = 0

⁹ Considérant que ces deux objectifs sont d'égale importance, nous additionnons les valeurs de P1 et de P2 sans pondérer leurs valeurs pour calculer la performance globale.

À partir de ces six indicateurs, nous pouvons calculer un indicateur de respect des modes opératoires **RMOP**, qui est égal à la somme des six indicateurs de comportement. Puisque les stratégies prescrites sont les plus coûteuses, **RMOP** représente également un indicateur du coût cognitif investi par l'opérateur. Puisqu'il y a six MOP, la variable RMOP est comprise entre 0 et 6.

B.3.2. Régulation de l'activité

Nous allons dans cette partie approfondir l'analyse ascendante de la HTA en analysant les boucles de régulation.

Comme proposé au chapitre II, nous faisons l'hypothèse que l'opérateur adaptera son comportement à partir d'une évaluation de la situation, réalisée en tenant compte de critères d'efficacité, de pertinence et d'efficacité. Cette évaluation est implicite (à moins de faire verbaliser les sujets), seuls les éléments observables de l'activité (contrainte, performance, modifications de comportement) peuvent être mesurés de manière objective, donnant une image exogène des trois critères évoqués.

Nous pouvons donc établir des règles du type si/alors. Si l'efficacité, la pertinence ou l'efficacité est évaluée de manière objective comme étant "mauvaise" et si un changement de stratégie est constaté, alors nous pouvons déduire la nature du diagnostic que l'opérateur a effectué. Prenons l'exemple de la régulation basée sur la performance (**RBP**): si la performance est jugée mauvaise ($P \leq 1$) et si on observe une augmentation du coût investi (augmentation de **RMOP**), alors on peut interpréter ce changement de comportement comme une régulation basée sur la performance. Nous considérons que l'opérateur régule jusqu'au moment où un changement de comportement inverse à celui de la régulation est réalisé. Il s'agira, de la diminution de RMOP pour la boucle RBP. Le tableau suivant liste ces différentes règles :

Tableau 13 : Modélisation des boucles de régulation

Boucle de régulation	Évaluation objective de la perception de la situation			Évaluation objective de la mise en œuvre de la régulation (changement de stratégie)
	CI	P	RMOP	
Régulation basée sur la performance (RBP)		$P \leq 1$		RMOP↑
Régulation basée sur la conformité (RBC)			RMOP ≤ 3	RMOP↑
Régulation basée sur la priorité (RBPR)	CI = 1		RMOP > 3	RMOP↓
Régulation basée sur le coût (RBCO)		$P \geq 1$	RMOP > 3	RMOP↓

C. Conclusion

Le simulateur SUSIE reproduit une situation de supervision d'un essaim de drones et soumet les "opérateurs" à de fortes contraintes temporelles ; on peut noter, de plus, qu'ils ne contrôlent pas entièrement le système (notamment le déplacement des véhicules et des drones). Puisqu'il s'agit d'un système nouveau, il n'existe pas encore de procédures établies et plusieurs modalités d'action peuvent être adoptées par les opérateurs. Cette activité peut toutefois être comparée à celle des contrôleurs aériens, bien que le niveau de prescription diffère, puisqu'il est relativement faible dans le cas de SUSIE (cf. Tableau 14).

Tableau 14 : Comparaison de l'activité des contrôleurs aériens avec la supervision d'un essaim de drones sur SUSIE.

Situation de supervision ou de pilotage	Distance opérateur-système-environnement	Contrainte temporelles du système	Structuro- Niveau de prescription de la tâche de pilotage
Contrôleur aérien	Fort	Fort	Fort
Supervision d'un essaim de drones	Fort	Fort	Faible

Nous pouvons donc positionner l'activité de supervision d'un essaim de drones par rapport à d'autres activités de supervision (cf. Figure 40) :

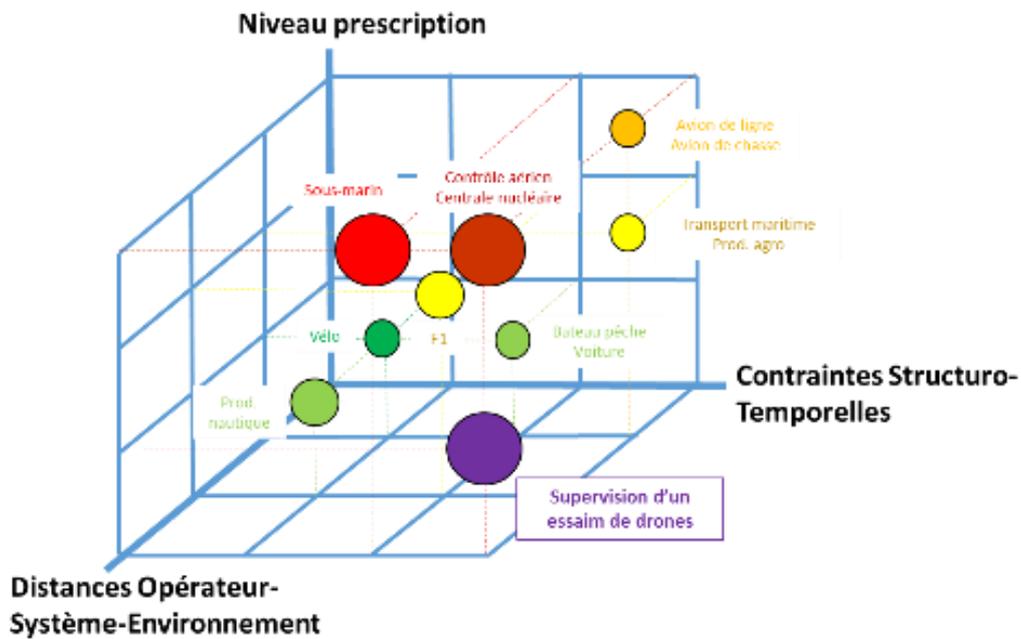


Figure 40 : Le positionnement de l'activité de supervision d'un essaim de drones

Nous pouvons également noter que le système SUSIE permet une évaluation objective de la contrainte (à partir d'une évaluation objective de la contrainte multitâches (CT) et de la fréquence d'apparition des véhicules et des messages (CI)), de la performance, ainsi que l'observation de différentes stratégies de régulation de l'activité.

Dans la prochaine partie, nous partirons de cette analyse pour concevoir une expérimentation utilisant ce système. Cette expérimentation vise à valider les liens entre les trois dimensions de la charge mentale : cause (contrainte), effets (performance, expérience subjective de la charge et conséquences physiologiques) et médiateur (régulations).

Résumé

L'activité de pilotage de drones connaît actuellement une mutation. Cette mutation s'accompagne d'une automatisation des tâches de maintien de stabilité et de navigation, d'une auto-organisation des drones, et de l'augmentation du nombre de drones que l'opérateur doit gérer. L'opérateur doit désormais réaliser une tâche de supervision d'un système complexe multi-agents et doit faire face à une situation dynamique. Le système SUSIE s'inscrit dans ce cadre. Il s'agit, en effet, d'un simulateur permettant à un opérateur de contrôler un essaim de drones dans le but de surveiller un territoire et de neutraliser d'éventuelles menaces.

Une analyse de l'activité du système SUSIE nous a permis de modéliser les trois dimensions de la charge mentale. La contrainte a été modélisée à partir d'un indicateur de contrainte informationnelle et d'un indicateur de contrainte multitâches. La performance a été modélisée à partir de deux indicateurs de performance, l'un relatif au traitement des véhicules et l'autre relatif au traitement des messages. Pour modéliser le comportement, nous avons créé un indicateur de respect des modes opératoires prescrits (six modes opératoires ont été prescrits), et nous avons modélisé les régulations de l'activité en reprenant la grille proposée dans le chapitre II.

CHAPITRE VI. Validation expérimentale du modèle multidimensionnel de la charge mentale

Les chapitres précédents ont conduit à proposer un modèle multidimensionnel de la charge mentale (chapitre II) et à exposer une analyse de l'activité de supervision de drones (chapitre V). À partir de cette analyse, et pour cette activité, nous avons modélisé les trois dimensions de la charge mentale et identifié des indicateurs pour chacune de ces dimensions (chapitre V).

La Figure 41 rappelle cette modélisation :

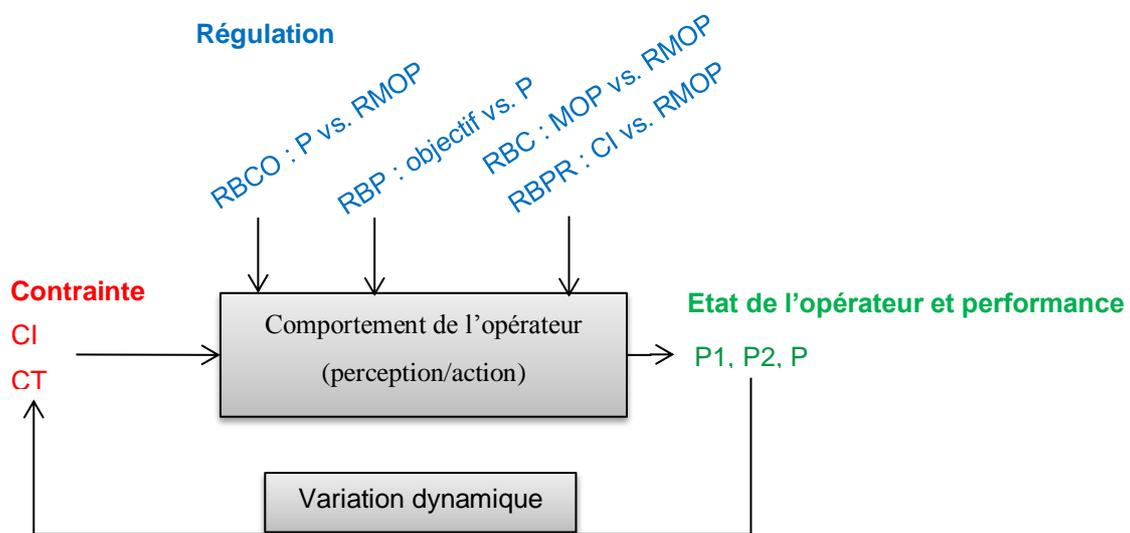


Figure 41 : Modélisation des dimensions de la charge mentale et rappel des indicateurs

Le présent chapitre vise à présenter une première expérience qui poursuit un double objectif. Il s'agit, d'une part, de mieux comprendre les relations entre chaque dimension de la charge mentale (les contraintes, les régulations, la performance et l'état de l'opérateur) et, d'autre part, de valider le modèle multidimensionnel de la charge mentale. Les résultats que nous obtiendrons nous permettront, ensuite, de déterminer des règles pour construire des indicateurs synthétiques « temps réel » de la charge mentale.

A. Méthode

A.1. Participants

Puisqu'il n'existe pas d'opérateur expert pour cette activité de supervision de drones en essaim (c'est un système émergent), nous avons fait appel à 22 étudiants de 1ère année d'IUT, du département HSE. Les étudiants suivant cette formation constituent une population

homogène ayant un bon niveau scientifique, habituée aux environnements de simulation, et intéressée par les problématiques de gestion des risques et de crises. Pour renforcer l'homogénéité au sein de l'échantillon des participants et éviter des biais, nous avons fait appel uniquement à des participants masculins, ayant une bonne pratique des jeux vidéo (contrôlée par un court questionnaire).

A.2. Equipement

Les passations ont été réalisées dans une pièce où la luminosité est maîtrisée, pour éviter des variations du diamètre pupillaire dues aux variations de luminosité. Dans cette pièce un espace a été aménagé pour la réalisation de la tâche. Cet espace est composé (cf. Figure 42) :

- D'un bureau et d'une chaise fixe (pour éviter des mouvements parasites de l'opérateur).
- Du simulateur SUSIE, comprenant un ordinateur et une interface composée d'un écran (Compaq LA2405wg 24" de marque HP) et d'une souris.
- Du dispositif de mesure :
 - Données oculaires : Les données oculaires sont acquises par un eye tracker FaceLAB5 et transférées par FireWire à un ordinateur dédié, puis vers l'ordinateur central, pour être enregistrées par le logiciel Eyework.
 - Données cardiorespiratoires : Les données physiologiques sont acquises par une ceinture bioharness, et sauvegardées sur un boîtier posé sur la ceinture. La ceinture est pilotée par le logiciel Zephyr à partir du PC FaceLab.
 - Données simulateur : Le log (fichier texte) contient les événements du scénario (nouveau message, nouveau véhicule, etc.), ainsi que toutes les actions de l'opérateur enregistrées par les clics de souris.
 - Données subjectives instantanées : Une partie des données subjectives sont enregistrées au moyen d'une échelle ISA.
 - Données subjectives a posteriori : Une partie des données subjectives sont recueillies par un questionnaire post expérience.

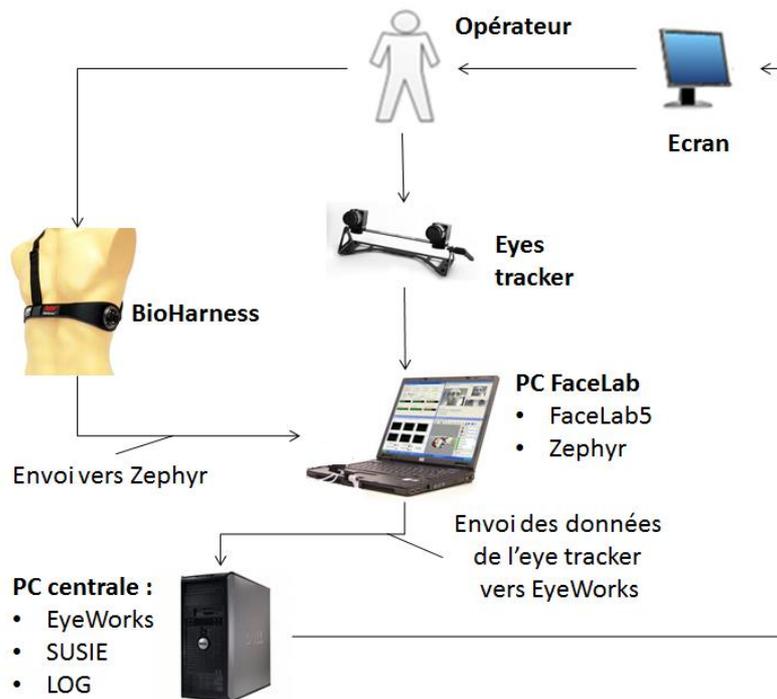


Figure 42 : Le dispositif expérimental

A.3. Scénario

Le scénario choisi dure 20 minutes et se divise en deux phases : une phase A de difficulté faible (10 minutes) et une phase B de difficulté élevée (10 minutes). Pour modifier la difficulté de la tâche, nous avons fait varier la fréquence d'apparition des véhicules et des messages. Par ailleurs, afin d'éliminer l'effet de l'ordre dans lequel les phases sont présentées, nous avons divisé notre échantillon en deux groupes : l'un a tout d'abord été confronté à la phase A puis à la phase B (difficulté croissante), l'autre a passé l'expérience en commençant par la phase B (difficulté décroissante).

A.4. Entraînement et consignes

Une phase d'entraînement de 30 minutes a précédé l'expérience. Cette phase est divisée en deux parties : une partie théorique (10 minutes) et une partie pratique (20 minutes). La phase théorique consiste à présenter le système, donner les objectifs (**O**) et les modes opératoires prescrits (**MOP**) permettant d'atteindre les objectifs. La phase pratique avait pour but de prendre en main le système. Pendant cette seconde phase, les modes opératoires préconisés étaient régulièrement rappelés à l'opérateur.

A.5. Mesures

Différentes mesures ont été réalisées sur les trois dimensions de la charge mentale (contrainte, médiateur et effet).

A.5.1. Contraintes

Mesure de la contrainte :

Deux indicateurs de contrainte ont été enregistrés :

- **La contrainte informationnelle (CI)** : Cette variable représente la fréquence d'apparition des véhicules et des messages. Elle est faible dans la phase A (CI = 0) et forte dans la phase B (CI = 1)¹⁰.
- **La contrainte multitâche (CT)** : Représente le nombre de tâches différentes que doit réaliser l'opérateur.

A.5.2. Etat de l'opérateur et performance

Mesure de performance :

Trois indicateurs de performance ont été enregistrés :

- **P2 (neutralisation d'un véhicule)** : Cet indicateur représente le fait qu'un véhicule est neutralisé en moins de 1 minute 30 après sa première détection ou non. Cet indicateur est binaire : P1 = 1 si le temps de neutralisation < 1 minute 30, sinon P1 = 0.
- **P1 (message traité)** : Cet indicateur représente le fait qu'une zone relative à un message a été tracée dans les deux minutes après l'apparition du message. Pour ce critère, on ne tient pas compte du fait que le message est lu, on regarde uniquement si une zone est tracée. Cet indicateur est binaire : P2 = 1 si une zone relative à un message a été tracée, sinon P2 = 0.
- **P (performance globale)¹¹** : Pour calculer la performance globale (**P**) on additionne les valeurs de **P1** et de **P2**, la valeur de P est donc comprise entre 0 et 2.

¹⁰ Pour rappel, une fréquence faible correspond à environ 1 véhicule toutes les 40s et à un message toutes les 1 minutes 30, une fréquence forte correspond à environ un véhicule toutes les 16 secondes et un message toutes les minutes.

Au début du scénario, nous considérons la performance comme bonne, P1 et P2 sont égaux à 1, et donc $P = 2$. P1 est réactualisée à chaque fois qu'une zone relative à un message est tracée en moins de deux minutes ou à chaque fois qu'une zone n'a pas été tracée en deux minutes. P2 est réactualisée à chaque fois qu'un véhicule est neutralisé en moins de 1 minute 30 ou à chaque fois qu'un véhicule n'a pas été neutralisé en moins de 1 minute 30. Le chronogramme suivant (cf. Figure 43) illustre la réactualisation de ces indicateurs.

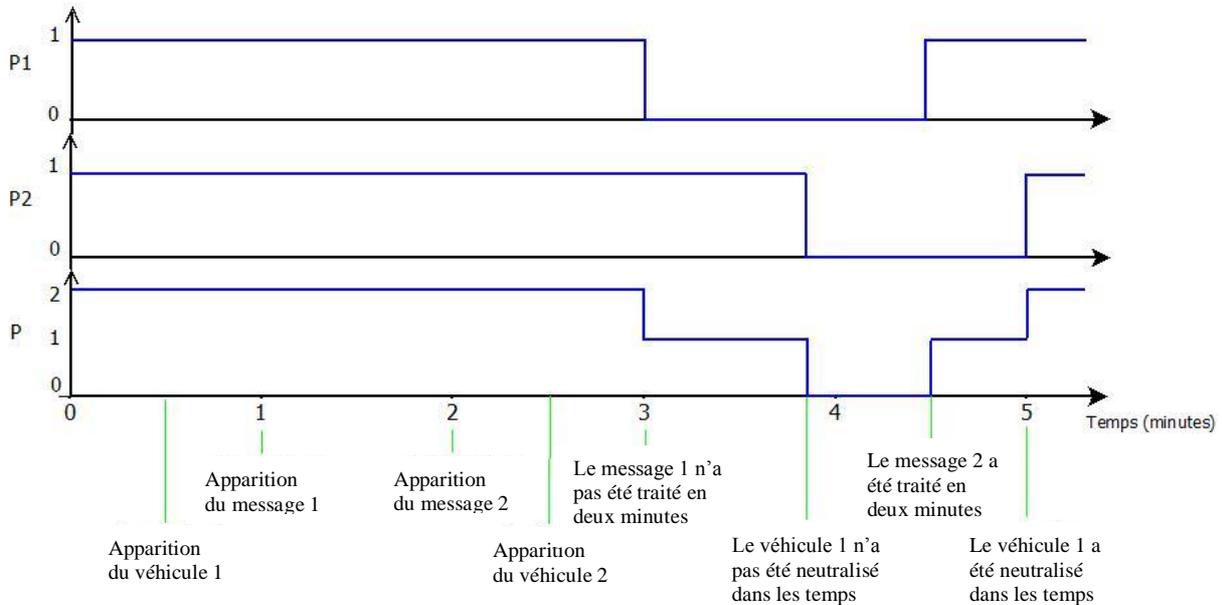


Figure 43 : Chronogramme illustrant les mesures de P1, P2, et P

Mesures physiologiques et oculaires :

Les données oculaires recueillies sont le diamètre pupillaire (**DP**), la fréquence (**BLKf**) et la durée (**BLKd**) des clignements, ainsi que la position du regard.

Les données physiologiques sont la fréquence cardiaque (**FC**), et la fréquence respiratoire (**FR**).

Mesure subjective :

Les données subjectives ont été recueillies en utilisant une échelle ISA (présentée toutes les quatre minutes pendant la passation) et un questionnaire post expérience (cf. annexe E.2).

¹¹P1 est associé à l'objectif 2 et P2 est associé à l'objectif 1. Puisque nous considérons ces deux objectifs comme étant d'importance égale, nous additionnons, pour calculer la performance globale, les valeurs de P1 et de P2 sans pondérer leurs valeurs.

A.5.3. Régulation

Pour appréhender les régulations réalisées par l'opérateur, nous avons tout d'abord cherché à mesurer le respect des modes opératoires prescrits (**RMOP**), pour pouvoir ensuite inférer les régulations.

Respect des modes opératoires :

Nous mesurons ici la variable (RMOP) représentant le nombre de modes opératoires prescrits (cf. chapitre V) respectés. Etant donné que les stratégies prescrites sont les plus performantes et les plus coûteuses, **RMOP** représente également le coût cognitif investi par l'opérateur. Au début du scénario, nous considérons que tous les modes opératoires prescrits (MOP) sont respectés (comme il y a six MOP, RMOP = 6).

Observation des régulations :

Les régulations ont été inférées à partir des mesures de la contrainte (CI), de la performance (P) et du respect des modes opératoires (RMOP). Nous détectons les régulations à partir de règles de type si/alors décrites dans le chapitre V (cf. Tableau 15).

Tableau 15: Régulation

Boucle de régulation	Évaluation objective de la perception de la situation			Évaluation objective de la mise en œuvre de la régulation
	CI	P	RMOP	
Régulation basée sur la performance (RBP)		$P \leq 1$		RMOP ↑
Régulation basée sur la conformité (RBC)			$RMOP \leq 3$	RMOP ↑
Régulation basée sur la priorité (RBPR)	$CI = 1$		$RMOP > 3$	RMOP ↓
Régulation basée sur le coût (RBCO)		$P \geq 1$	$RMOP > 3$	RMOP ↓

Prenons l'exemple de la régulation basée sur la performance (RBP) : Si la performance est évaluée mauvaise ($P \leq 1$) et si nous observons que l'opérateur change de stratégie en mettant en œuvre les stratégies les plus efficaces (augmentation de RMOP), alors on peut interpréter ce changement de comportement comme un début de régulation basée sur la performance. Nous considérons que l'opérateur régule jusqu'au moment où un changement de comportement inverse à celui de la régulation est réalisé ; il s'agit, dans cet exemple, d'une

diminution de RMOP. Le chronogramme suivant illustre la détection de la régulation basée sur la performance.

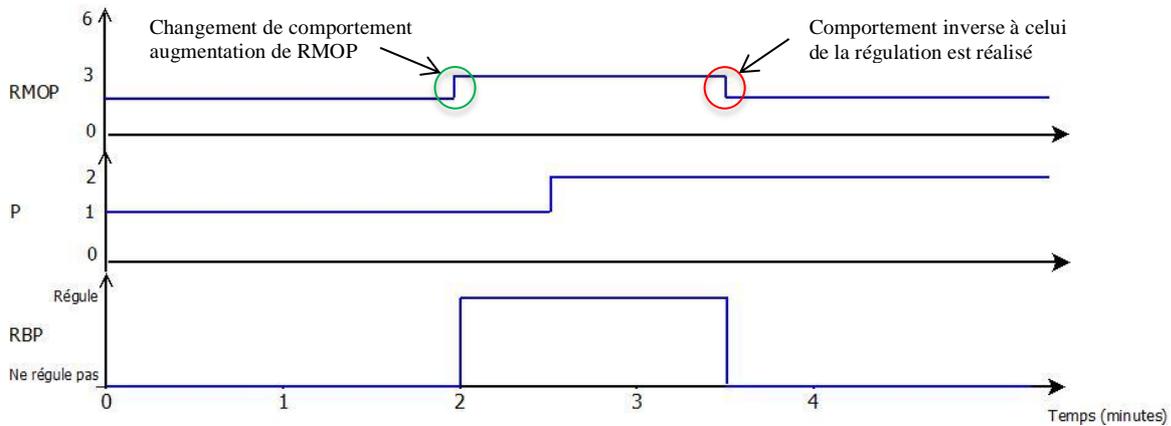


Figure 44 : chronogramme illustrant la détection d'une régulation basée sur la performance

L'identification des moments de début et de fin de régulation nous permettra de découper le scénario en faisant apparaître des séquences au cours desquelles l'opérateur régule son activité et des séquences durant lesquelles il ne la régule pas.

A.5.4. Synthèse des mesures

La figure suivante (Figure 45) synthétise les mesures réalisées dans cette expérience.

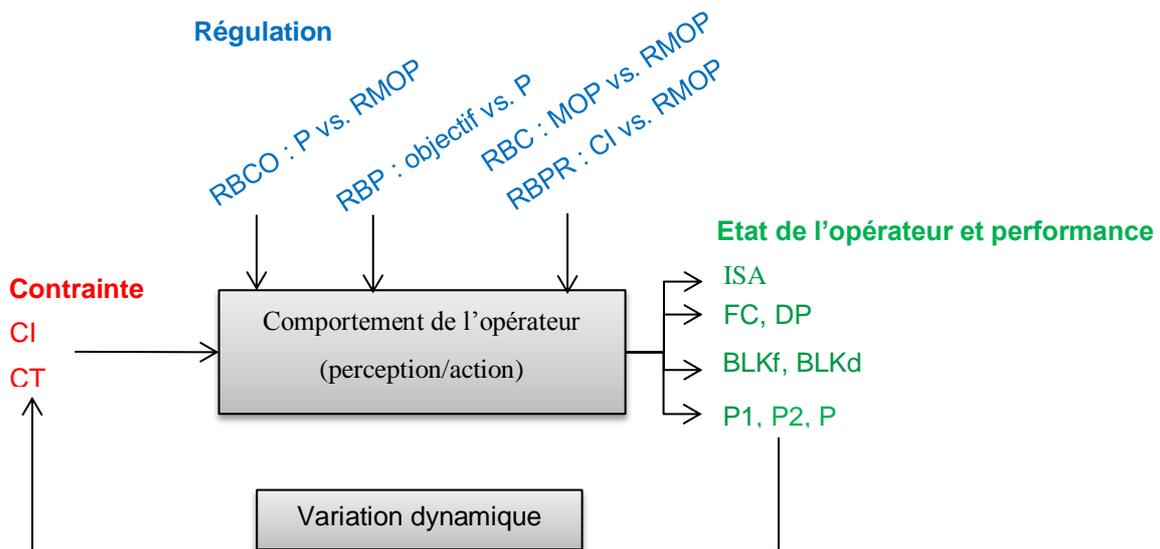


Figure 45 : Synthèse des mesures réalisées dans la 1ère expérience

A.6. Hypothèses

Trois hypothèses générales ont été posées :

Hypothèse 1 : Il existe un effet des contraintes sur les variables liées à l'état de l'opérateur (activité psychophysiological, ressenti subjectif et performance). Nous décomposons cette hypothèse en deux hypothèses opérationnelles :

- **Hypothèse 1.1 :** quand la contrainte informationnelle est forte (CI=1, phase B), nous nous attendons à ce que les valeurs moyennes du diamètre pupillaire (DP), de la fréquence des clignements (BLKf), de la fréquence cardiaque (FC) et de la fréquence respiratoire (FR), ainsi que l'évaluation subjective de la charge (ISA), soient plus élevées. Par ailleurs, les valeurs moyennes de la durée des clignements (BLKd) et celle de la performance (P, P1 et P2) devraient être plus faibles avec une augmentation de la contrainte informationnelle.
- **Hypothèse 1.2 :** Quand la contrainte multitâche CT augmente, nous nous attendons à ce que les valeurs moyennes des indicateurs physiologiques et oculaires DP, BLKf, FC et FR augmentent, et que les valeurs moyennes de BLKd et de P, P1 et P2 diminuent.

Hypothèse 2 : Il existe un effet des régulations sur les indicateurs psychophysiological et la performance. Nous nous attendons à ce que l'implémentation des régulations basées sur la performance et la conformité (RBP et RBC) entraîne une augmentation du diamètre pupillaire et de la performance. Et au contraire, on s'attend à ce que l'implémentation de RBPR et RBCO entraîne une diminution du diamètre pupillaire et de la performance.

Hypothèse 3 : Il existe un effet des contraintes sur les régulations. Nous décomposons cette hypothèse en deux hypothèses opérationnelles :

- **Hypothèse 3.1 :** Nous nous attendons à ce que l'opérateur respecte moins les modes opératoires (MOP) quand la contrainte informationnelle (CI) est forte. Cela signifie que la valeur moyenne du respect des modes opératoires (RMOP) devrait être plus basse dans la phase B que dans la phase A. Nous nous attendons également à ce que, sous forte contrainte (CI = 1), l'opérateur implémente plus souvent des régulations.
- **Hypothèse 3.2 :** Nous nous attendons à ce que l'opérateur respecte moins les modes opératoires MOP quand la contrainte multitâche CT augmente. Ce qui veut dire que la valeur moyenne de RMOP devrait être plus basse sous forte contrainte.

Le schéma suivant synthétise ces hypothèses :

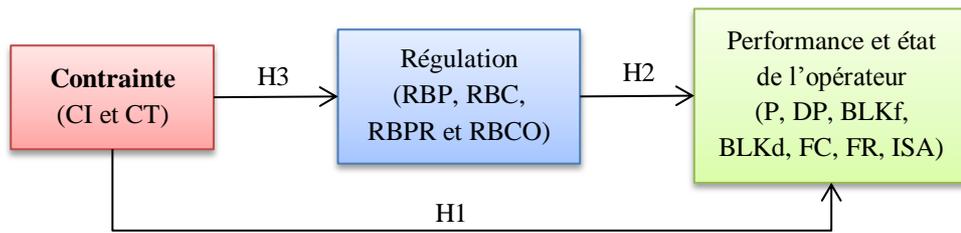


Figure 46 : Les hypothèses de la première expérimentation

B. Résultats

B.1. Préparation des données

Les données relatives aux activités physiologiques et oculaires, à la performance et au comportement de chaque participant ont été enregistrées durant des passations de vingt minutes. Les mesures oculaires de quatre participants ont dû être rejetées en raison d'une mauvaise qualité d'enregistrement. Les mesures subjectives d'un participant ont dû être retirées, suite à une perte de données. Le tableau suivant synthétise les données retenues par type de mesures.

Tableau 16 : Synthèse de données retenues par type de mesures

Type de mesure	Nombre de participants retenus
Contrainte	22
Performance	22
Oculaire	18
Physiologique	22
Subjective	21
Comportement	22

Afin d'analyser ces données et d'étudier les effets de la contrainte sur les régulations, ainsi que l'effet de la contrainte et des régulations sur l'état de l'opérateur et sur la performance, nous avons réalisé plusieurs découpages des données. Ces découpages visent à faciliter la mise à l'épreuve des différentes hypothèses :

- **Vérification des hypothèses 1.1. et 3.1 :** Pour valider ces deux hypothèses, nous avons découpé les passations expérimentales en fonction de la contrainte informationnelle (CI), ce qui correspond aux deux niveaux de difficulté programmés

dans le démonstrateur (phase A moyennement contraignante et phase B très contraignante).

- **Vérification de l'hypothèse 2** : Le troisième découpage permet une analyse plus fine de l'effet des régulations, grâce à un découpage des passations en fonction de l'activation ou non de boucles de régulation. Ce traitement a été réalisé séparément pour chaque type de régulation RBP, RBC, RBPR et RBCO.
- **Vérification des hypothèses 1.2. et 3.2** : La validation de ces hypothèses a été menée à l'aide d'un découpage des données des expérimentations selon la valeur de la contrainte multitâche (CT).

Pour tous les traitements présentés ci-dessous, nous avons systématiquement testé la répartition des données à l'aide des tests de Kolmogorov-Smirnov et de Lilliefors. Ces tests nous ont permis d'opter soit pour des tests paramétriques (test de Student et ANOVA à mesures répétées), soit pour des tests non paramétriques (test de Wilcoxon et ANOVA de Friedman).

B.2. Analyse des effets de la contrainte informationnelle et de la contrainte multitâche sur l'état de l'opérateur et sur la performance

Cette analyse vise à étudier séparément les effets de deux types de contraintes (informationnelle et multitâche) sur la tâche (performance) et l'opérateur (activation physiologique et ressenti subjectif), afin de mettre à l'épreuve les hypothèses 1.1 et 1.2.

Sur l'ensemble de cette analyse, les résultats montrent principalement :

- **Un effet de la contrainte sur l'état de l'opérateur** : Les résultats montrent que le diamètre pupillaire et la fréquence des clignements sont plus forts quand la contrainte informationnelle (CI) est forte que quand elle est faible. De plus, les résultats ont également montré que la fréquence des clignements augmente quand la contrainte multitâche (CT) augmente. Cependant, aucun effet de la contrainte multitâche sur le diamètre pupillaire n'a été observé.
- **Un effet de la contrainte sur la performance** : Les résultats montrent une dégradation de la performance relative aux messages (P1) et de la performance globale (P) quand la contrainte informationnelle CI est forte. Une dégradation de P1, de P2 (performance liée à la neutralisation des véhicules) et de P est observée quand la contrainte multitâche CT augmente.

Ces effets sont détaillés ci-après, dans les sections B2.1 et B2.2.

B.2.1. Effet de la contrainte informationnelle sur l'état de l'opérateur et sur la performance

Effet de la contrainte informationnelle (CI) sur l'activité physiologique et oculaire

Chaque indicateur physiologique (fréquence cardiaque et fréquence respiratoire) et oculaire (diamètre pupillaire, fréquence de clignement et durée des clignements) a été analysé isolément. Une série de tests de *Student* pour données appariées a été réalisée pour chaque indicateur, de façon à pouvoir comparer les valeurs moyennes obtenues lors de la phase A (quand la contrainte informationnelle CI est faible) avec celles obtenues lors de la phase B (quand CI est forte).

Les résultats ne montrent aucun effet significatif, mais uniquement des tendances. Le diamètre pupillaire et la fréquence des clignements sont plus élevés dans la phase B que dans la phase A (cf. Figure 47), respectivement ($t(17) = -1,912, p = 0,0728$) et ($t(17) = -1,541, p = 0,142$). On n'observe aucune différence entre la phase A et la phase B, ni pour la durée de clignement, ni pour la fréquence cardiaque, ni pour la fréquence respiratoire.

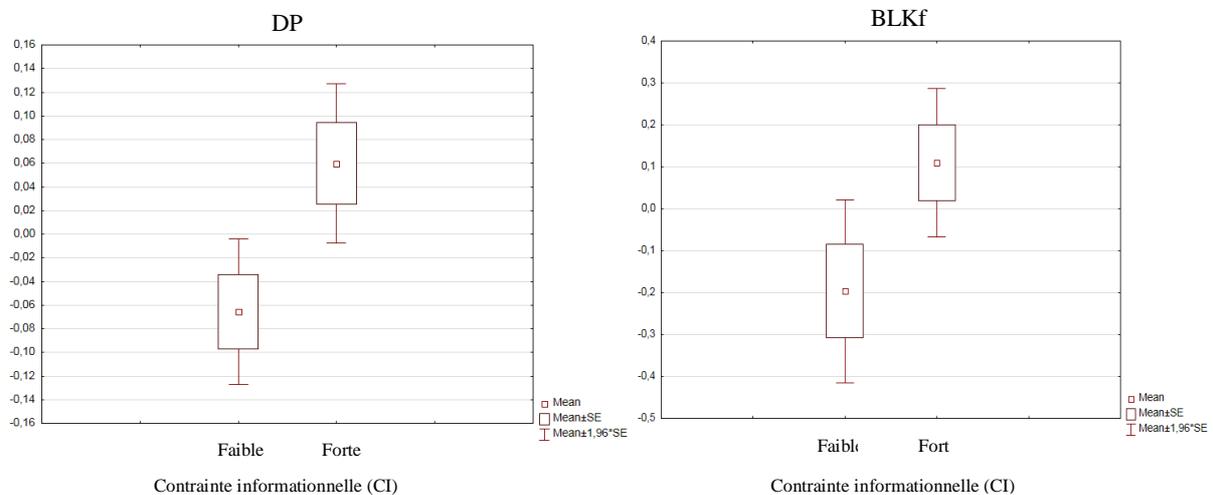


Figure 47 : Effet de la contrainte informationnelle sur le diamètre pupillaire (DP) et sur la fréquence de clignement (BLKf)

Effet de la contrainte informationnelle (CI) sur l'évaluation subjective de la charge mentale

La contrainte informationnelle n'a eu aucun effet significatif sur l'évaluation subjective, seule une tendance a été observée. Les participants ressentiraient une charge mentale plus élevée lorsque la contrainte informationnelle est forte ($Z(21) = -1,78, p = 0,0756$).

Effet de la contrainte informationnelle (CI) sur la performance

Afin d'étudier l'effet de la contrainte informationnelle (CI) sur la performance (P1 pour la performance liée au traitement des messages, P2 pour celle relative à la neutralisation des véhicules, et P pour la performance globale)¹², nous avons réalisé une série de tests de *Student* pour données appariées pour comparer leurs valeurs moyennes pendant la phase A (CI faible) avec celles de la phase B (CI forte).

Les analyses statiques ont révélé une dégradation significative de P1 (relative au traitement des véhicules) et de P (performance globale) lorsque la contrainte informationnelle augmente, respectivement ($t(21) = 4,675, p < 0,001$) et ($t(21) = 2,135, p < 0,05$). Les résultats ne montrent aucune différence significative pour P2 (cf. Figure 48).

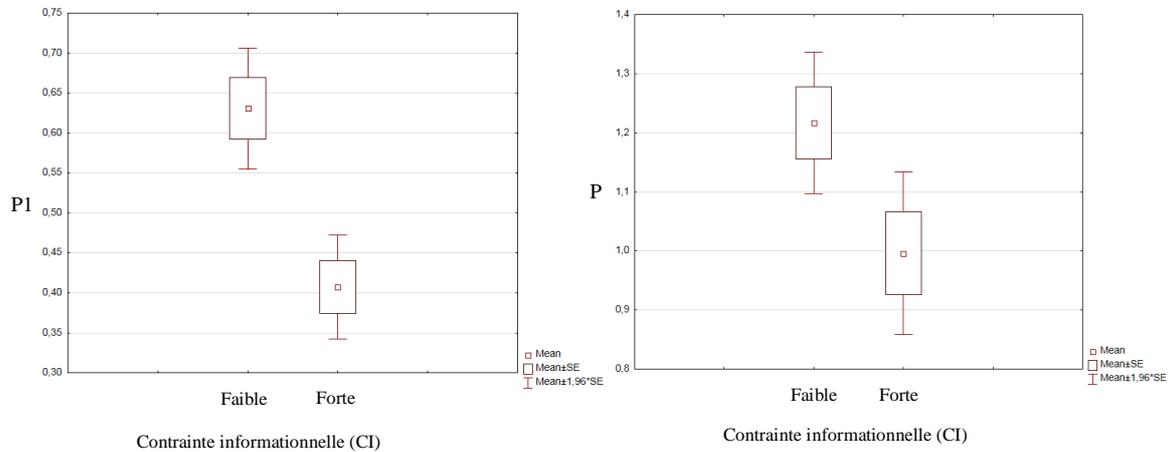


Figure 48: Effets de la contrainte informationnelle sur la performance relative au traitement des messages (P1) et sur la performance globale (P)

B.2.2. Effet de la Contrainte multitâches sur l'état de l'opérateur et sur la performance.

Effet de la contrainte multitâche (CT) sur le diamètre pupillaire (DP)

L'analyse statistique réalisée par le biais d'une ANOVA à mesures répétées sur le diamètre pupillaire DP n'a montré aucune différence significative entre les différentes modalités de la contrainte multitâche CT.

¹² Pour rappel, P1 et P2 sont des variables binaires calculées chaque seconde, et P est la somme de P1 et P2 et est donc un entier compris entre 0 et 2 (cf. partie A.5.2).

Effet de la contrainte multitâche (CT) sur la fréquence de clignement (BLK)

L'analyse statistique réalisée par le biais d'une ANOVA à mesures répétées (cf. Figure 49) a révélé un effet significatif de la contrainte multitâches sur la fréquence des clignements ($F(10, 936) = 2,567, p < 0.01$). On observe notamment que la fréquence des clignements est plus élevée pour les modalités CT = 5 et CT = 6 que pour la modalité CT = 1 (respectivement $t(17) = 3,61, p < 0,01$ et $t(17) = 3,88, p < 0,01$).

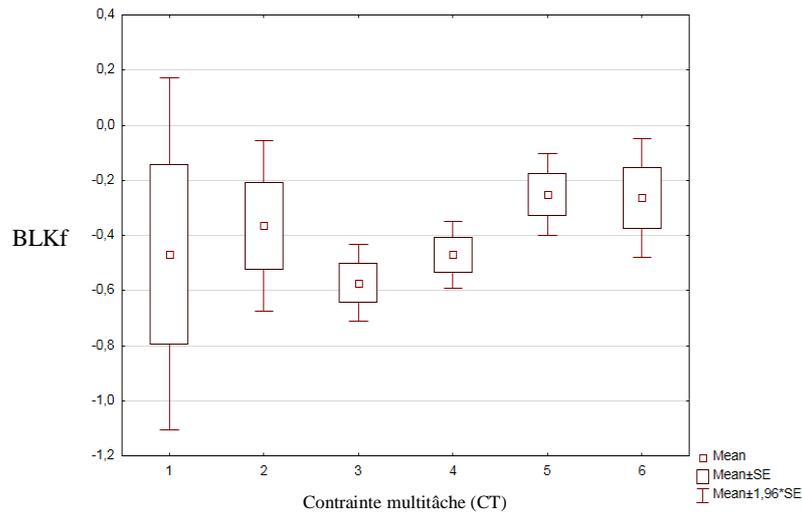


Figure 49 : Effet de la contrainte multitâche (CT) sur la fréquence de clignement (BLKf)

Effet de la contrainte multitâche (CT) sur la performance

Une série d'ANOVA de Friedman a été réalisée dans le but d'étudier l'effet de la contrainte multitâche sur la performance.

Les analyses statistiques ont révélé un effet significatif de la contrainte multitâches sur P, P1 et P2 ; respectivement $X^2(N = 22, df = 5) = 66,080, p < 0,001$, $X^2(N = 22, df = 5) = 75,624, p < 0,001$ et $X^2(N = 22, df = 5) = 52,560, p < 0,001$. Plus précisément, la performance (au travers les trois indicateurs P1, P2 et P) diminue avec l'augmentation de la contrainte multitâche. On observe que la performance est significativement moins bonne pour les modalités CT = 4, CT = 5 et CT = 6 comparé aux modalités CT = 1, CT = 2 et CT = 3 pour P1, P2 et P, sauf pour P2 où l'on n'observe pas de différences significatives entre les modalités CT = 3 et CT = 6. Les figures suivantes présentent les valeurs moyennes de P1, P2 et P pour chaque modalité de CT.

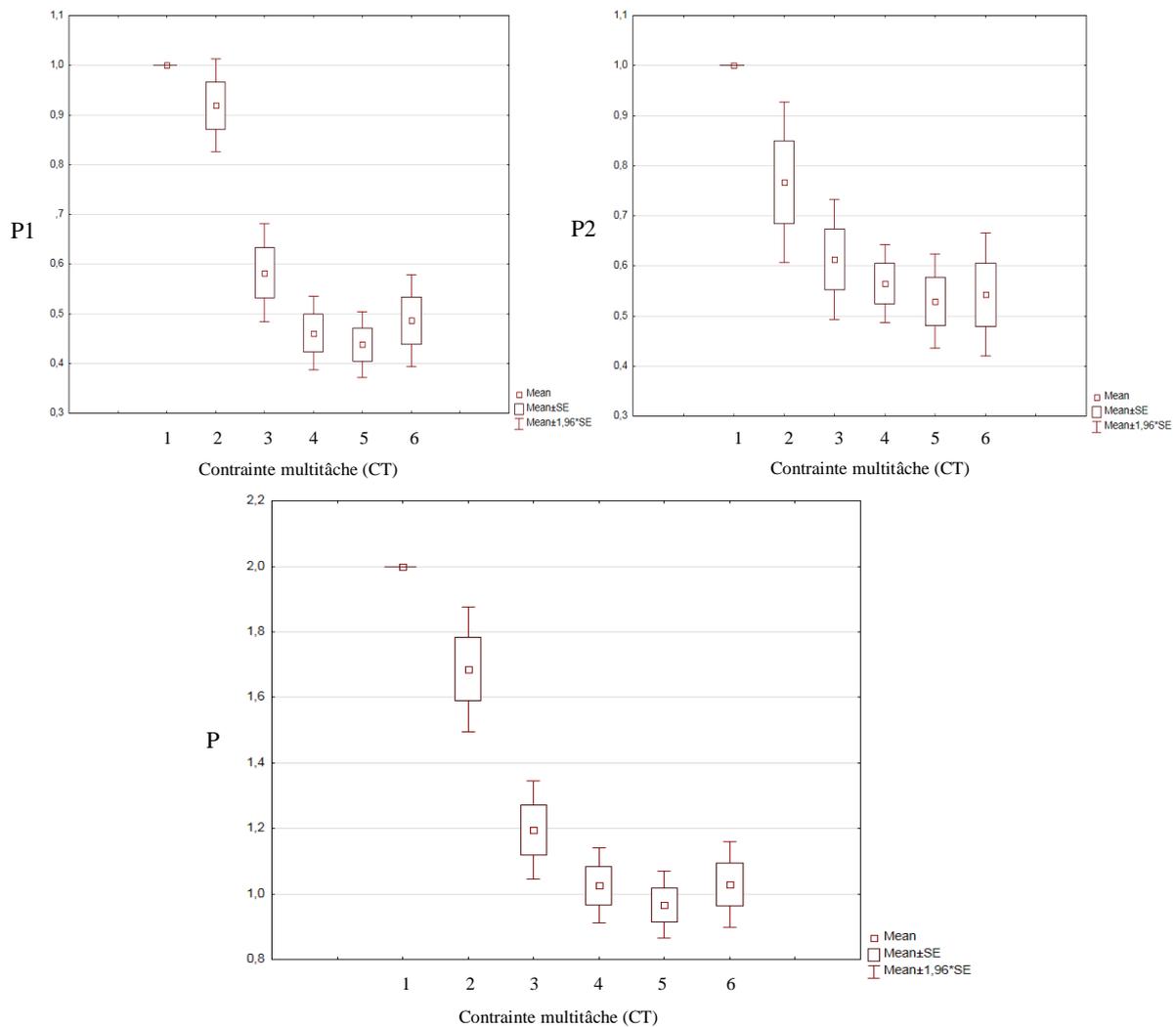


Figure 50 : Effets de la contrainte multitâches sur la performance relative au traitement des messages (P1), sur la performance relative au traitement de véhicules (P2) et sur la performance globale (P)

B.3 Analyse des effets des régulations sur l'état de l'opérateur et sur la performance

Cette analyse vise à étudier les effets des régulations sur le respect des modes opératoires, sur la tâche (performance) et sur l'opérateur (activation physiologique et ressenti subjectif), afin de mettre à l'épreuve l'hypothèse 2. Puisque les régulations apparaissent essentiellement dans la phase B, ce traitement n'a porté que sur cette phase.

Sur l'ensemble de cette analyse, les résultats montrent principalement :

- **Un effet des régulations sur la performance et sur l'état de l'opérateur :** La performance est meilleure quand les régulations basées sur la performance et sur la conformité sont mises en œuvre que quand elles ne le sont pas. A contrario la

performance est moins bonne quand la boucle de régulation basée sur la priorité est mise en œuvre que lorsqu'elle ne l'est pas. Cependant, les régulations n'ont pas d'effet significatif sur le diamètre pupillaire. Seule une tendance a été observée sur la boucle de régulation basée sur la conformité (RBC). Le diamètre pupillaire est plus fort quand RBC est mise en œuvre, que quand elle ne l'est pas.

- **Pérennité des effets des régulations** : Les effets des régulations sont maintenus après la régulation. Aucune différence n'a été observée entre les phases de régulation et les phases de non régulation.

Ces effets sont détaillés dans la partie B.3.1 et dans la partie B.3.2.

B.3.1 Analyse de l'effet des régulations sur la performance et sur l'état de l'opérateur.

La fréquence cardiaque (FC) et la fréquence respiratoire (FR) n'ont pas été étudiées ici, car l'analyse de l'effet de la contrainte informationnelle (CI) sur FC et FR n'a montré aucune variation significative de leurs valeurs.

Les boucles de régulation basées sur la performance, la conformité et la priorité ont été étudiées séparément. Pour analyser l'effet des régulations sur la performance, nous avons réalisé des tests de Wilcoxon sur P de façon à comparer les valeurs moyennes obtenues lors des phases de régulation avec celles obtenues lors des phases de non-régulation. De même, une série de tests de *Student* pour données appariées a été réalisée sur le DP pour comparer les valeurs moyennes obtenues lors des phases de régulation et de non-régulation.

Les analyses statistiques ont montré que l'implémentation de la régulation basée sur la performance (**RBP**) entraîne une augmentation significative de la performance ($Z(21) = -3.23$, $p < 0.01$), mais n'a aucun effet sur le DP. De plus, l'implémentation de la régulation basée sur la conformité (**RBC**) n'est associée à aucun effet significatif, mais uniquement à des tendances. La performance est meilleure et le DP est plus fort dans les phases de régulation que dans les phases de non-régulation, respectivement $Z(21) = -1.74$, $p = 0.089$ et $t(17) = 1,63$, $p = 0,113$. L'implémentation de la régulation basée sur la priorité (**RBPR**) entraîne une diminution significative de la performance ($Z(21) = -4.30$, $p < 0.001$), mais n'a aucun effet sur le DP. Finalement, l'implémentation de la régulation basée sur le coût (**RBCO**) n'a pas d'effet significatif mais est associée à un effet tendanciel qui concerne la performance. La performance est meilleure dans les phases de régulation que dans les phases de non-régulation

($Z(21) = -1.68, p = 0.091$). Les figures suivantes présentent les effets des régulations sur la performance (cf. Figure 51) et sur le diamètre pupillaire (cf. Figure 52).

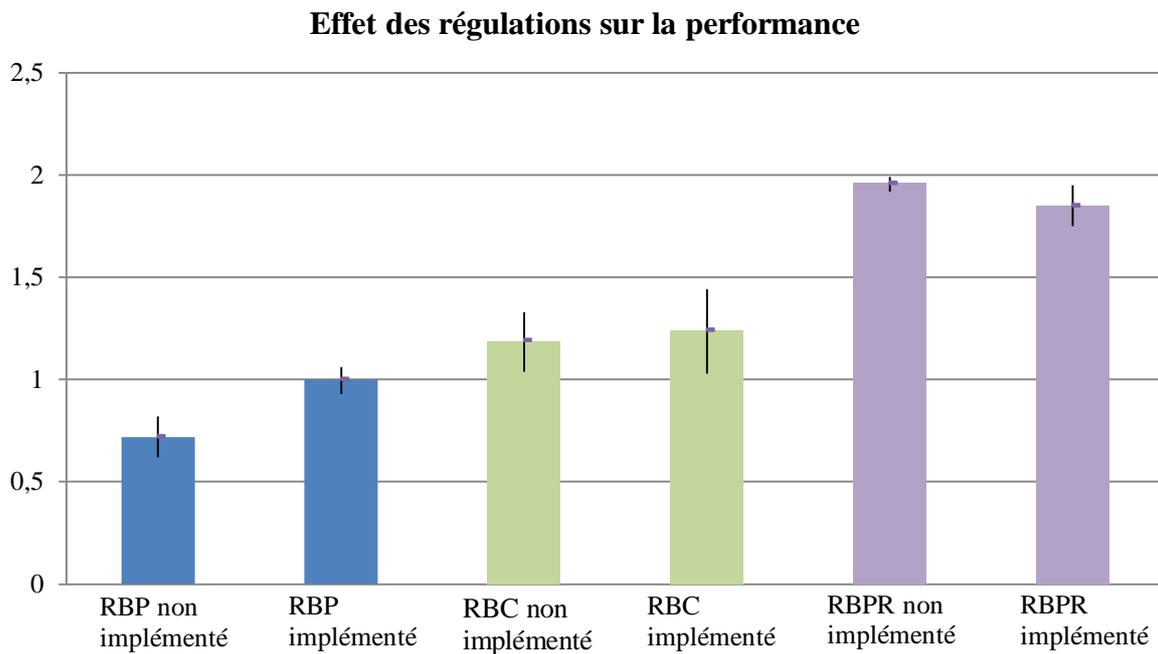


Figure 51 : Effet des régulations sur la performance

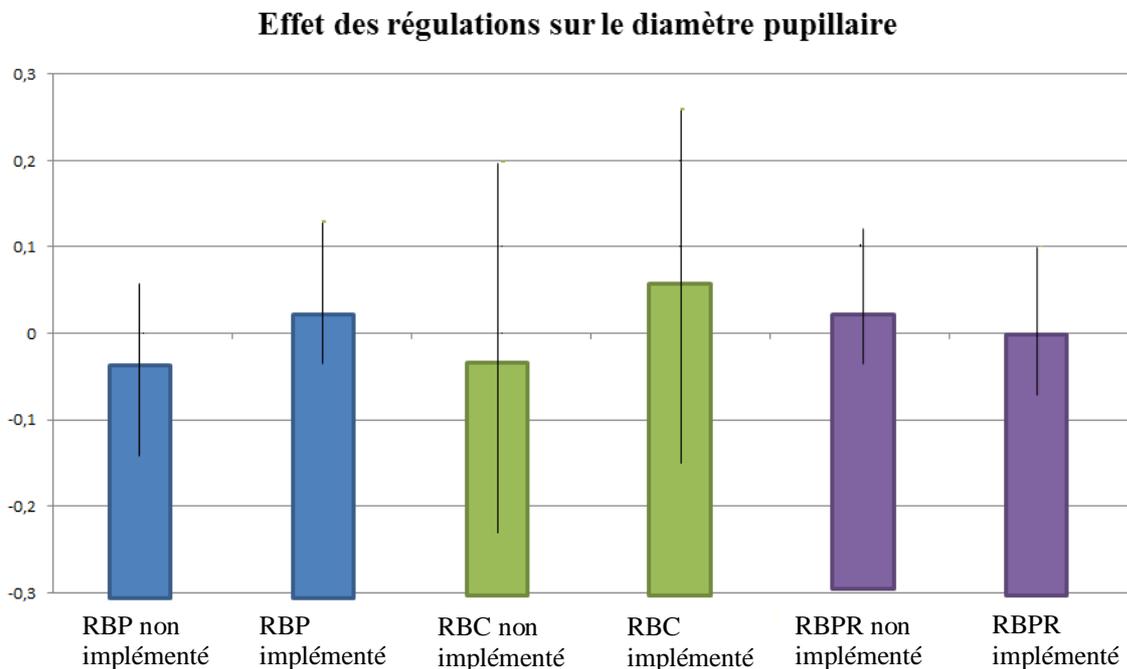


Figure 52 : Effet des régulations sur le diamètre pupillaire

B.3.2 Analyse de la pérennité des effets générés par les régulations

Nous nous demandons, ici, si les effets générés par la mise en œuvre d'une régulation perdurent au-delà. Pour ce qui est de la régulation basée sur la conformité (RBC), nous avons

comparé la performance obtenue lors des phases où RBC est mise en œuvre (en vert sur la Figure 53) avec la performance obtenue lors des phases de non régulation faisant suite à une phase où RBC était mise en œuvre (phase entre la fin d'une régulation basée sur la conformité et le début d'une nouvelle régulation, en rouge sur la Figure 53). Nous avons fait de même pour la régulation basée sur la performance.

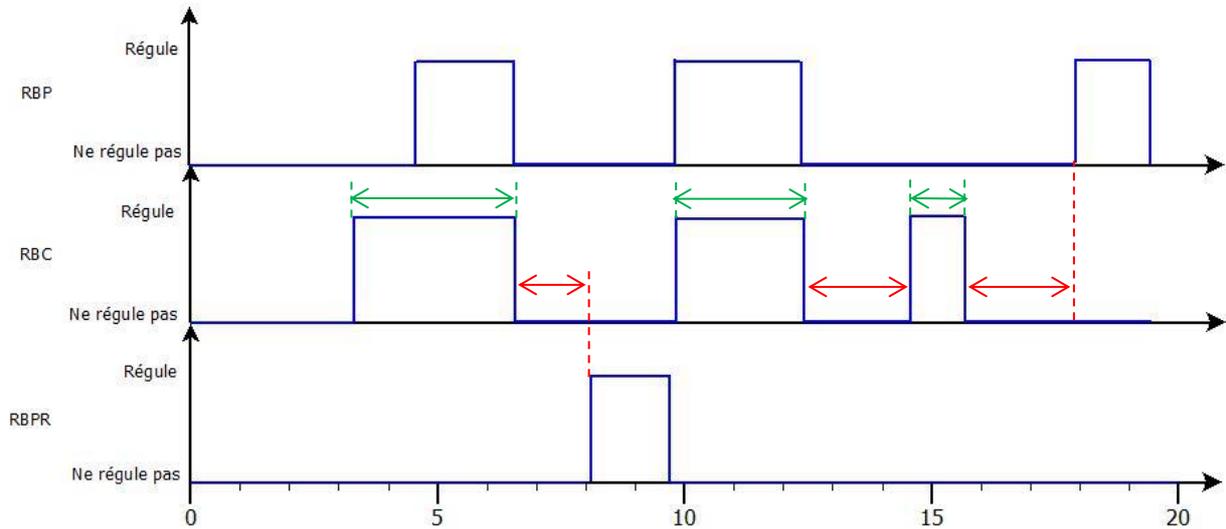


Figure 53 : Analyse de la pérennité des effets des boucles de régulation

Les boucles de régulation basées sur la performance et la conformité ont été analysées séparément. Une série de test de Wilcoxon a été réalisée pour comparer les valeurs moyennes de la performance obtenues pendant les phases de régulations avec celles obtenues lors des phases de non régulation. Les résultats statistiques ne montrent aucune différence pour RBC et RBP, la performance est donc maintenue après la fin de la régulation.

B.4. Analyse des effets de la contrainte informationnelle et de la contrainte multitâche sur les régulations

Cette analyse vise à étudier séparément les effets de deux types de contraintes (informationnelle et multitâche) sur le respect des modes opératoires et sur les régulations, afin de mettre à l'épreuve les hypothèses 3.1 et 3.2.

Sur l'ensemble de cette analyse, les résultats montrent principalement :

- **Un effet de la contrainte sur le respect des modes opératoires** : Les résultats ont montré une dégradation du respect des modes opératoires quand la contrainte informationnelle est forte et quand la contrainte multitâche augmente.

- **Un effet de la contrainte sur le nombre de régulations :** Nous avons observé une augmentation du nombre de régulations basées sur la performance (RBP), sur la conformité (RBC) et sur la priorité (RBPR) quand la contrainte informationnelle (CI) est forte, en comparaison à ce que l'on peut observer lorsqu'elle est faible.

Ces effets sont détaillés dans les parties B.4.1 et B.4.2.

B.4.1. Effet de la contrainte informationnelle sur le respect des modes opératoires et sur les régulations

Cette analyse porte sur deux aspects. Nous avons tout d'abord analysé l'effet de la contrainte informationnelle (CI) sur le respect des modes opératoire (RMOP), puis nous avons examiné l'effet de CI sur le nombre de régulations.

Effet de la contrainte informationnelle (CI) sur l'indicateur du respect des modes opératoires (RMOP)

L'analyse statistique réalisée au moyen d'un test de *Student* pour données appariées (cf. Figure 54) a révélé que les participants respectent significativement moins les modes opératoires prescrits quand la contrainte informationnelle est forte (phase B) que quand elle est faible (phase A) ; ($t(21) = 2,669, p < 0,05$).

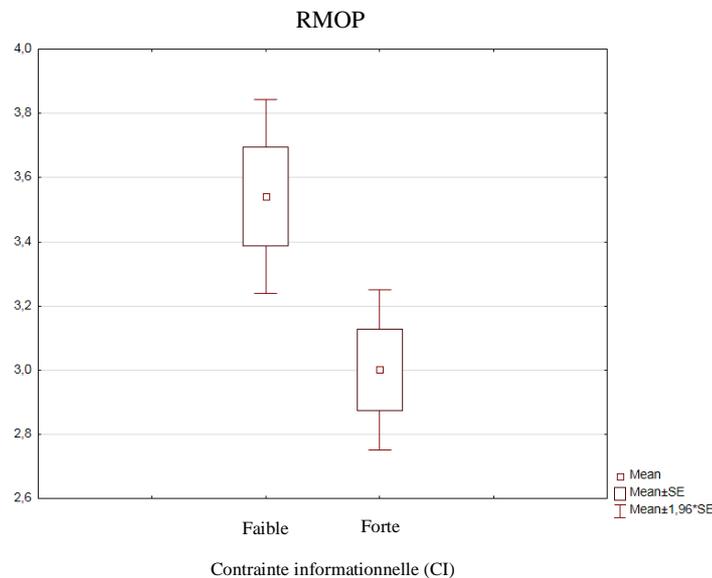


Figure 54: Effets de la contrainte informationnelle (CI) sur le respect des modes opératoires (RMOP)

Effet de la contrainte informationnelle (CI) sur le nombre de régulations

Chaque boucle de régulation a été analysée séparément. Pour chaque boucle de régulation, nous avons réalisé un test de *Student* pour données appariées portant sur le nombre de fois où la régulation est mise en œuvre, de façon à comparer la valeur moyenne obtenue lors de la phase A (CI faible) avec celle obtenue lors de la phase B (CI forte).

Les analyses statistiques ont montré que l'opérateur met en œuvre plus fréquemment les boucles de régulation basées sur la conformité (RBC) et sur la priorité (RBPR) dans la phase B que dans la phase A. Respectivement $t(21) = -2,11047, p < 0,05$, $t(21) = -10,8260, p < 0,001$. Concernant la boucle de régulation basée sur la performance (RBP), seule une tendance a été observée ; l'opérateur met en œuvre la RBP plus souvent dans la phase B ($t(21) = -1,632, p = 0,118$). En moyenne, RBP est mise en œuvre 16 fois dans la phase A contre 24 fois dans la phase B, RBC est mise en œuvre 5 fois dans la phase A contre 9 fois dans la phase B et RBPR est mise en œuvre 0 fois dans la phase A contre 14 dans la phase B (cf. Figure 55). En revanche, les analyses statistiques ne font apparaître aucune différence pour la régulation basée sur le coût entre la phase A et la phase B. La figure suivante présente les effets de la contrainte informationnelle (CI) sur le nombre de régulations.

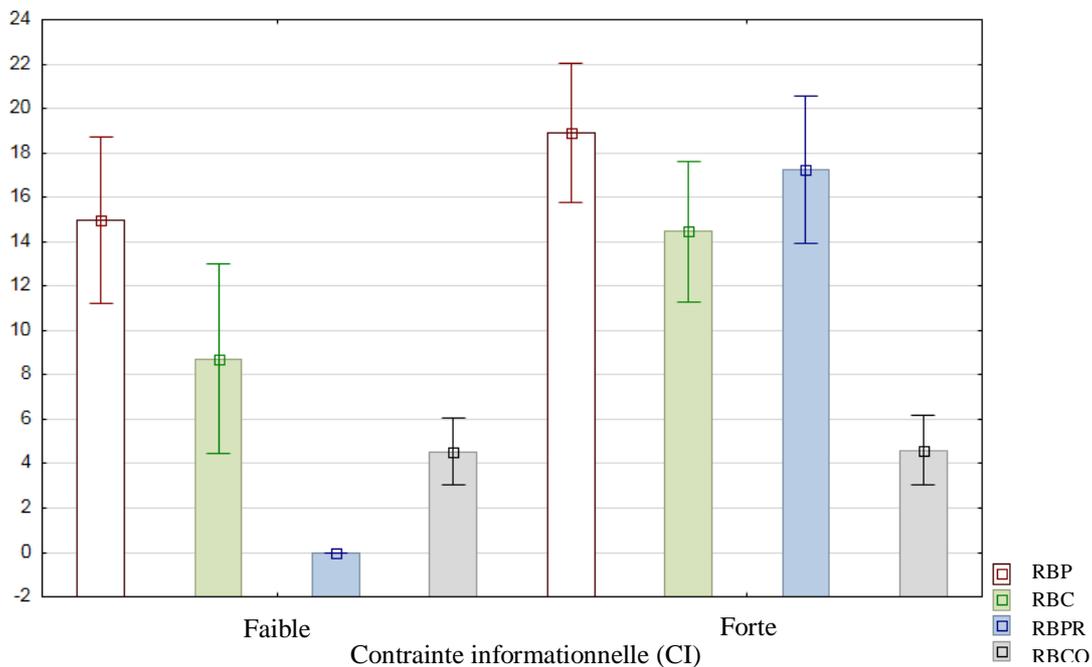


Figure 55 : Nombre de régulations pour la phase A et la phase B et pour chaque boucle de régulation

B.4.2. Effet de la contrainte multitâches (CT) sur le respect des modes opératoires

Effet de la contrainte multitâche (CT) sur le respect des modes opératoires (RMOP)

L'analyse statistique réalisée au moyen d'une ANOVA de Friedman a révélé que les participants respectent significativement moins les modes opératoires prescrits quand la contrainte multitâches augmente ($X^2(N = 22, df = 5) = 100,735, p < 0,001$) (cf. Figure 56).

De plus, on observe une dégradation significative du respect des modes opératoires prescrits entre les modalités de CT considérées deux à deux ($p < 0.001$).

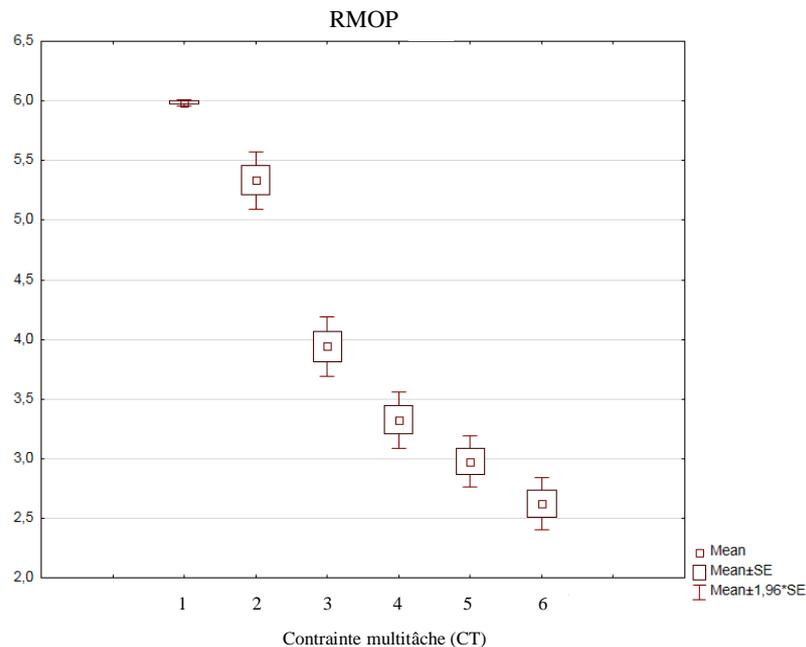


Figure 56 : Effets de la contrainte multitâche sur le respect des modes opératoires

B.5 Discussion

Nous pouvons émettre deux conclusions principales.

- Premièrement, l'analyse relative à l'hypothèse 1 permet d'obtenir un résultat classique, que l'on retrouve dans de nombreux travaux de la littérature, à savoir que les variations à moyen terme de l'état de l'opérateur (DP) et de la performance (P1, P2, P) peuvent être expliquées par une augmentation de la contrainte. Ce résultat a été confirmé pour deux types de contraintes particulières, une contrainte informationnelle et une contrainte multitâche.
- Par ailleurs, les analyses menées dans le cadre des hypothèses 2 et 3 permettent d'affiner la compréhension des variations de la charge mentale. Les résultats obtenus

montrent ainsi que les variations à court terme de l'état de l'opérateur et de la performance peuvent être expliquées par la mise en œuvre des régulations.

Nous détaillons ci-après ces deux conclusions générales, en reprenant les différentes hypothèses émises précédemment.

L'hypothèse **1** concernant les effets des contraintes sur l'activité physiologique et sur la performance est validée.

L'opérateur semble investir un effort plus important quand la contrainte est forte que lorsqu'elle est faible. Cet effort se traduirait par une augmentation du diamètre pupillaire quand la contrainte informationnelle est forte (CI = 1). Ce résultat est cohérent avec la littérature.

Nous avons également observé un effet de CI et de CT sur la fréquence des clignements (BLKf). Plusieurs auteurs relient la fréquence de clignement avec la charge mentale (Wolkoff et al., 2005 ; Tsai et al., 2007), alors que pour d'autres auteurs la fréquence de clignement serait plus un indicateur de charge visuelle que de charge mentale (Veltman & Gaillard, 1996 ; Chen & Epps, 2014). Dans l'étude réalisée ici, l'augmentation de contraintes (CI et CT) peut générer une charge mentale et/ou visuelle (due à une augmentation du nombre de véhicules et de messages affichés à l'écran).

De plus, l'opérateur semble avoir plus de difficulté à réaliser toutes les tâches quand la contrainte augmente ; cette difficulté se traduirait par une baisse significative de la performance mesurée par P1 et P quand la contrainte informationnelle est forte (CI = 1), ainsi que par une dégradation significative de P1, P2 et P lorsque la contrainte multitâche (CT) augmente. Ces résultats sont cohérents avec la littérature. De Waard (1996) montre, en effet, que la performance diminue quand l'exigence devient très forte. Cette dégradation peut être due à une surcharge mentale (Chanquoy et al., 2007 ; De Waard, 1996).

Enfin, aucune variation significative n'a été observée pour l'évaluation subjective (ISA), mais seulement une tendance. L'absence de significativité des résultats peut s'expliquer par un échantillonnage trop faible (quatre évaluations ISA par passation).

L'hypothèse **2** concernant les effets des régulations sur l'activité physiologique et sur la performance est partiellement validée.

Les résultats montrent que la mise en œuvre des boucles de régulation basées sur la performance (RBP) et sur la conformité (RBC) s'accompagnent d'une augmentation de la

performance. On peut expliquer ce résultat par le fait ces deux boucles de régulation consistent à se rapprocher des modes opératoires prescrits, qui sont également les plus performants ; leur mise en œuvre entraînerait donc une augmentation de la performance. Cette augmentation de la performance est maintenue dans les phases de non régulation (phase entre la fin d'une régulation et le début d'une nouvelle régulation), qui suivent les phases où RBP et RBC sont implémentés. Il y a donc une "pérennité" des effets de ces boucles de régulation, après leur mise en œuvre.

A contrario, on observe que la mise en œuvre de la boucle de régulation basée sur la priorité (RBPR) est associée à une diminution de la performance. Ce résultat peut être lié au fait que l'opérateur choisit de ne maintenir une bonne performance que sur certaines tâches (en donnant la priorité à ces tâches) pour éviter une surcharge mentale, ce qui s'accompagne d'une diminution de la performance globale.

Les régulations ne sont associées à aucune variation significative du diamètre pupillaire ; seule une tendance a été observée pour la boucle de régulation basée sur la conformité (RBC). En effet, le diamètre pupillaire est plus élevé quand RBC est implémentée. Etant donné que les modes opératoires prescrits sont les plus difficiles, la mise en œuvre de RBC s'accompagne d'un coût cognitif plus élevé, ce qui peut expliquer que le diamètre pupillaire ait tendance à augmenter quand RBC est mise en œuvre. L'absence de résultat constatée pour la boucle de régulation basée sur la priorité (RBPR) peut s'expliquer par le fait que la contrainte imposée à l'opérateur reste élevée (et l'effort investi important), même quand l'opérateur donne la priorité à certaines tâches (comme le traitement des véhicules) et qu'il suspend la réalisation d'autres tâches (comme la gestion des zones).

Ces constats nous amènent à conclure que les boucles de régulations RBP et RBC sont opposées à la boucle RBPR. En effet, l'implémentation de RBP et RBC entraîne une augmentation de la performance alors que l'implémentation de RBPR entraîne une diminution de la performance.

Finalement, il n'y a pas de résultat pour la boucle de régulation basée sur le coût (RBCO). Cette absence de résultat peut être due au faible nombre d'implémentations de cette boucle (moins de quatre fois en moyenne dans la phase B).

L'hypothèse **3** concernant les effets de la contrainte sur les régulations est validée.

Premièrement, une augmentation significative du nombre de régulations sur RBP, RBC et RBPR a été observée sous forte contrainte informationnelle. Sous faible contrainte informationnelle, il semblerait que l'opérateur soit dans une zone de confort. En effet, les

MOP sont respectés (ils traduisent les stratégies les plus coûteuses) et l'effort investi est moyen, ce qui explique le faible nombre de régulations. Sous forte contrainte informationnelle, il semblerait que l'opérateur ait plus de difficulté à traiter toutes les tâches. Ceci se traduit par une augmentation globale (sur toute la phase B, $CI = 1$) de l'effort investi (traduite par une augmentation du DP) et une diminution globale de la performance et du respect des modes opératoires (RMOP).

Selon Hockey (2003), sous forte contrainte, un opérateur modifie ses stratégies pour maintenir un bon niveau de performance en ce qui concerne la tâche principale ; il opte pour la mise en œuvre des stratégies moins coûteuses. Sperandio (1988) observe ce type de régulation lors d'une étude sur les contrôleurs aériens. En effet, quand la contrainte est soutenue (nombre d'avions important), le contrôleur privilégie la sécurité au détriment des autres critères (confort, consommation de carburant). Nous avons également observé ce type de régulation. Quand la contrainte devient trop importante, l'opérateur - pour maintenir un bon niveau de performance sur la tâche principale et pour éviter une surcharge mentale - régule son activité en implémentant la boucle de régulation basée sur la priorité (RBPR). Par exemple, les participants ne gèrent plus les zones sans drones (tâche secondaire) pour se concentrer sur le traitement des véhicules (tâche principale). L'implémentation de la boucle basée sur la priorité entraîne la diminution globale (sur toute la phase B, $CI = 1$) de la performance et du respect de modes opératoires (RMOP). Quand la contrainte diminue, l'opérateur met en œuvre les régulations basées sur la performance et sur la conformité, ce qui permet de revenir à un niveau de performance globale acceptable. Ce changement de stratégie s'accompagne d'une augmentation temporaire de la performance (P) et du respect des modes opératoires (RMOP). Il semblerait donc que l'opérateur gère un compromis cognitif (au sens d'Amalberti, 1996), en mettant en œuvre des régulations de nature différentes.

D'un autre côté, le faible nombre d'implémentations de la boucle de régulation basée sur le coût (RBCO) peut être expliqué par le fait que l'opérateur n'avait pas suffisamment d'expérience sur le système SUSIE pour rechercher un comportement plus efficient.

D. Conclusion

La première expérience relatée dans ce chapitre conduit à dégager différentes conclusions.

D'un point de vue théorique, cette expérimentation permet de valider le modèle tridimensionnel proposé dans le chapitre II. En effet, elle montre, un effet de la contrainte sur

les régulations, ainsi qu'un effet de la contrainte et des régulations sur l'état de l'opérateur et sur la performance. Elle permet, de plus, de valider la modélisation du comportement de l'opérateur basée sur les régulations qui a été proposée au chapitre II.

Au niveau méthodologique, la grille proposée au chapitre II et visant à observer les régulations en utilisant des mesures objectives, s'avère fiable pour les boucles de régulation basées sur la performance, la conformité et sur la priorité. Cependant, nous n'avons pas observé la boucle de régulation basée sur le coût.

Cette expérimentation met par ailleurs en avant l'intérêt de réaliser une première expérience pour identifier des indicateurs de chaque dimension de la charge mentale. Il en ressort notamment que :

- L'observation du respect des modes opératoires et des régulations basées sur la performance, la conformité et sur la priorité permettent une mesure sensible de la dimension médiateur.
- Le diamètre pupillaire apparaît comme l'indicateur physiologique le plus sensible pour mesurer la charge mentale.
- L'indicateur de performance (P1) permet une mesure sensible de la performance. P2 semble moins sensible.
- Les indicateurs de contrainte CI et CT sont associés à des effets sur les régulations, ainsi que sur l'état de l'opérateur et sur la performance. Ce sont donc de bons indicateurs de la dimension "contrainte".

À partir de ces constats, nous pouvons retenir ou écarter certains indicateurs (cf. Tableau 17).

Tableau 17: Indicateur retenu pour chaque dimension de la charge mentale

Dimension	Indicateur retenu	Indicateur écarté
Contrainte	CI ; CT	
Régulation	RMOP ; RBP ; RBC ; RBPR	RBCO
Etat de l'opérateur et performance	DP ; P1 ; P2	FC, FR, BLKf, BLKd

Résumé

Ce chapitre expérimental poursuit un double objectif. Il s'agit, d'une part, de mieux comprendre les relations entre chaque dimension de la charge mentale (les contraintes, les régulations, la performance et l'état de l'opérateur) et, d'autre part, de valider le modèle multidimensionnel de la charge mentale.

Lors de cette première expérimentation, nous avons observé un effet de la contrainte sur la performance, sur le comportement et sur l'état de l'opérateur. Ces résultats montrent que les variations à moyen terme de l'état de l'opérateur (DP), du comportement et de la performance peuvent être expliquées par une augmentation de la contrainte. Nous avons également observé un effet des régulations sur la performance.

Les résultats obtenus montrent ainsi que les variations à court terme de la performance peuvent être expliquées par la mise en œuvre des régulations. Les résultats obtenus lors de cette expérimentation permettent de valider le modèle tridimensionnel et la modélisation du comportement de l'opérateur basée sur les régulations proposés dans le chapitre II. Cependant, nous n'avons pas observé la boucle de régulation basée sur le coût. Cette expérience nous a également permis de retenir ou écarter les indicateurs identifiés au chapitre V.

Chapitre VII. Création d'un indicateur de charge mentale par fusion d'informations

Les chapitres V et VI nous ont permis d'identifier des indicateurs pour les trois dimensions retenues dans notre modèle de la charge mentale. Dans ce chapitre, nous proposons de fusionner ces indicateurs pour créer un indicateur synthétique de la charge mentale. Le chapitre III a conduit à sélectionner les réseaux bayésiens pour réaliser la fusion d'informations. Ce chapitre vise à présenter et à valider cette démarche.

La section **A** présente la fusion d'informations. Nous présenterons ici la construction du réseau bayésien (identification des variables et de leurs espaces d'état, définition de la structure et définition des tables de probabilité). La section **B** expose ensuite la démarche de validation du modèle de fusion précédemment réalisé.

A. Fusion d'informations pour l'estimation de la charge mentale

L'objectif est de créer une information représentant le niveau de charge mentale, en fusionnant des informations des trois dimensions de la charge mentale ; ceci, en s'appuyant sur les conclusions du chapitre III, c'est-à-dire en utilisant la théorie des ensembles flous et la théorie des probabilités (et son application par les réseaux bayésiens). Pour la construire, nous avons suivi les trois étapes classiques de construction d'un RB (cf. Ch.III.B.1.2) : identification des variables et de leurs espaces d'états, définition de la structure du réseau, puis définition des tables de probabilité. Nous allons maintenant détailler ces trois étapes.

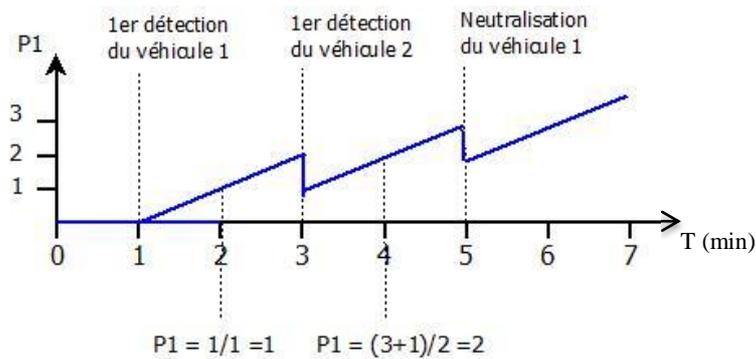
A.1 Identification des variables (informations) et de leur espace d'états, puis définition de la structure de fusion d'informations

Pour construire une information (**CM**) représentant le niveau de charge mentale, nous avons tout d'abord construit quatre informations représentant les trois dimensions de la charge mentale : une information représentant la dimension contraintes (**C**), une information représentant la dimension régulations (**Comp**), et deux informations représentant la dimension état et performance de l'opérateur (**Physio** pour l'état de l'opérateur et **P** pour la performance). Ces quatre informations ont été construites à partir d'informations de bas niveau, décrivant chaque dimension de la charge mentale.

Nous allons maintenant détailler ces informations. Nous allons dans un premier temps identifier les informations brutes (bas niveau). Puis, nous exposerons le traitement qui leur a été appliqué, dans le but de les préparer à la fusion par RB. Nous présenterons ensuite les informations qui ont été créées pour représenter les dimensions de la charge mentale, et enfin l'information synthétique de la charge mentale, qui constitue la décision finale. La structure du RB a été réalisée manuellement, nous la présenterons en même temps que les informations.

A.1.1 Informations de bas niveau

Les informations brutes de bas niveau sont les informations retenues lors de l'expérience 1 (cf. ch. VI). Nous avons apporté des modifications sur l'indicateur de performance P1 (relative au traitement des véhicules). Dans l'expérience 1, P1 était une variable binaire (P1 = 1 si le temps de neutralisation < 1 minute 30, sinon P1 = 0). Notre objectif est d'avoir une mesure "discrétisable" en trois classes {mauvaise, moyenne, bonne} et mesurable en temps réel. Nous avons donc modifié P1, qui est maintenant une variable continue représentant le temps moyen de traitement de tous les véhicules en cours de traitement ($\frac{\sum_{i=0}^{nbr\ de\ véhicules} Temps\ de\ traitement\ (i)}{nbr\ de\ véhicule}$). Cette information peut ensuite être discrétisée par logique floue. La Figure 57 illustre l'information P1.



Le tableau suivant présente les informations brutes de bas niveau par dimension :

Tableau 18 : Informations brutes de bas niveau

Dimension de la charge mentale	Informations brutes	Définition	Espace d'état
Contrainte	CIb	représente la contrainte informationnelle.	{0, 1}
	CTb	représente le nombre de tâches différentes à réaliser à un moment donné.	{0,1,2,3,4,5,6}
Régulation	RMOPb	représente le nombre de MOP respectés par l'opérateur (lesquelles sont également les plus coûteuses cognitivement) à un moment donné.	{0,1,2,3,4,5,6}
	Δ RMOPb	représente les variations de l'information RMOP.	{négative, nul, positive}
Performance et état de l'opérateur	P1b	représente le temps moyen de traitement de tous les véhicules en cours de traitement.	continue
	P2b	indique qu'une zone relative à un message a été tracée dans les deux minutes suivant l'apparition du message ou pas.	{0,1}
	DPb	représente le diamètre pupillaire.	continue

Ces informations ont ensuite subi différents traitements préalables à la fusion par RB.

- **Traitement des informations discrètes** : Les informations discrètes ont été traitées par agrégation.
- **Traitement des informations continues** : Les informations continues ont été discrétisées par la théorie des ensembles flous. Ensuite, nous avons utilisé le lien entre la théorie des ensembles flous et celle des probabilités (cf. chapitre III) pour obtenir une information précise et incertaine.

Le diamètre pupillaire a subi trois traitements :

1. **Moyenne** : la moyenne du DP a été calculée sur la dernière minute.
2. **Comparaison à la baseline** : l'écart entre la moyenne du DP et la moyenne de la baseline a été calculé.
3. **Discrétisation** : l'écart obtenu a ensuite été discrétisé par logique floue.

Le tableau 19 présente les traitements appliqués pour chaque information brute, ainsi que les informations traitées. Ce sont ces informations traitées qui constitueront les données d'entrée du RB.

Tableau 19 : Informations de bas niveau après traitement

Dimension de la charge mentale	Informations brutes	Traitement	Informations traitées	Espace d'état
Contrainte	CIb	Agrégation	CI	{faible, forte}
	CTb	Agrégation	CT	{faible, moyenne, forte}
Régulation	RMOPb	Agrégation	RMOP	{peu respecté, moyennement respecté, bien respecté}
	Δ RMOPb	Aucun traitement	ΔRMOP	{négative, nul, positive}
Performance et état de l'opérateur	P1b	Logique floue	P1	{mauvaise, moyenne, bonne}
	P2b	Agrégation	P2	{mauvaise, bonne}
	DPb	Logique floue	DP	{faible, moyenne, forte, indisponible}

A.1.2 Informations représentant les dimensions de la charge mentale

Quatre informations (C, Comp, Physio et P) ont été construites : elles représentent les trois dimensions de la charge mentale :

C : Cette information représente la contrainte globale imposée à l'opérateur et donc la dimension cause. Elle est discrétisée en trois classes : {faible, moyenne et forte}. Elle a comme parent CT et CI.

P : Cette information représente la performance globale de l'opérateur. Elle est discrétisée en trois classes : {mauvaise, moyenne et bonne}. Elle a comme parent P1 et P2.

Physio : Cette information représente l'activité physiologique de l'opérateur. Elle est discrétisée en trois classes : {faible, moyenne et forte}. Comme il n'y a qu'une seule information physiologique, l'information Physio correspond directement à l'information DP.

Comp : Cette information représente les régulations de l'opérateur. Cette information est discrétisée en trois classes traduisant des compromis cognitifs différents {gestion de la performance/conformité, neutre, gestion du coût}. La classe neutre (absence de régulation) correspond à un comportement où l'opérateur ne cherche pas à réguler son activité. Comp

hérite des trois informations (RBP, RBC et RBPR) qui caractérisent les régulations. Chacune de ces informations est discrète et comporte deux classes {ne régule pas, régule}. Pour construire ces trois informations, nous avons appliqué la grille proposée au chapitre II (cf. Tableau 20).

Tableau 20 : Régulations

Boucles de régulation	Évaluation objective de la perception de la situation			Variation du respect des modes opératoires prescrits (Δ RMOP)
	Contrainte (C)	Performance (P)	Respect des modes opératoires prescrits (RMOP)	
Régulation basée sur la performance (RBP)		Mauvaise/Moyenne		Positive
Régulation basée sur la conformité (RBC)			Peu respecté / Moyennement respecté	Positive
Régulation basée sur la priorité (RBPR)	Moyenne		Bien respecté	Négative
	Forte		Moyennement respecté / Bien respecté	Négative

À partir de cette grille, nous pouvons définir les informations parentes de RBP, RBC et RBPR :

- L'information **RBP** a comme parents les informations P et l'information Δ RMOP.
- L'information **RBC** a comme parents les informations RMOP et Δ RMOP.
- L'information **RBPR** a comme parents les informations C, l'information RMOP et l'information Δ RMOP.

Le tableau suivant synthétise les quatre informations représentant les trois dimensions de la charge mentale, ainsi que les trois informations représentant la mise en œuvre des régulations :

Tableau 21 : Informations représentant les dimensions de la charge mentale

Dimension de la charge mentale	Informations	Définition	Type de données et espace d'état	Informations parentes
Contrainte	C	Représente la contrainte globale imposée à l'opérateur et donc la classe cause.	Qualitative ordinale {faible, moyenne et forte}	CT et CI
Régulation	RBP	Représente la mise en œuvre d'une régulation basée sur la performance.	Qualitative nominale {ne régule pas, régule}	P et Δ RMOP
	RBC	Représente la mise en œuvre d'une régulation basée sur la conformité.	Qualitative nominale {ne régule pas, régule}	RMOP et Δ RMOP
	RBPR	Représente la mise en œuvre d'une régulation basée sur la priorité.	Qualitative nominale {ne régule pas, régule}	C, RMOP et Δ RMOP
	Comp	Représente le comportement de l'opérateur (basé sur le compromis cognitif entre exigences de la tâche et effort mental). Cette information est calculée des régulations RBP, RBC et RBPR expliquées ci-dessus.	Qualitative nominale {gestion de la performance/conformité, neutre, gestion du coût}	RBP, RBC et RBPR
Performance et état de l'opérateur	P	Représente la performance globale de l'opérateur.	Qualitative ordinale {mauvaise, moyenne et bonne}	P1 et P2
	Physio	Représente l'activité physiologique de l'opérateur. Comme il n'y a qu'une seule information, l'information Physio correspond directement à l'information DP.	Qualitative ordinale {faible, moyenne et forte, indisponible}	DP

A.1.3 Information représentant le niveau de la charge mentale

Nous allons ici présenter la construction de l'information CM représentant le niveau de charge mentale. Cette information est discrétisée en cinq classes {forte sous-charge, sous-charge, zone de confort, surcharge, forte surcharge}. Ces cinq classes ont été construites selon les cinq niveaux de l'échelle ISA, ce qui nous permet une mesure fine de la charge mentale. Cette information représente la charge mentale de manière holistique, elle a donc comme parents les quatre informations des trois dimensions de la charge mentale (la contrainte « C », les régulations « Comp », la performance « P » et l'état de l'opérateur « Physio »).

A.3 Définition des tables de probabilité

Les tables de probabilités ont été définies manuellement par expertise. Le tableau suivant présente l'initialisation des probabilités des informations de bas niveau (ne possédant pas de variables parentes) :

Tableau 22 : Table des probabilités marginales

Informations	Probabilité marginale
P1	P[mauvaise] = 0, P[moyenne] = 0, P[bonne] = 1
P2	P[mauvaise] = 0, P[bonne] = 1
RMOP	P[peu respecté] = 0, P[moyennement respecté] = 0, P[bien respecté] = 1
ΔRMOP	P[négative] = 0, P[nul] = 1, P[positive] = 0
CT	P[faible] = 1, P[forte] = 0, P[forte] = 0
CI	P[faible] = 1, P[forte] = 0 ou P[faible] = 0, P[forte] = 1 (suivant le scénario)
DP	P[faible] = 1, P[forte] = 0, P[forte] = 0, P[indisponible] = 0

A.4 Synthèse de la fusion

La figure suivante synthétise le RB :

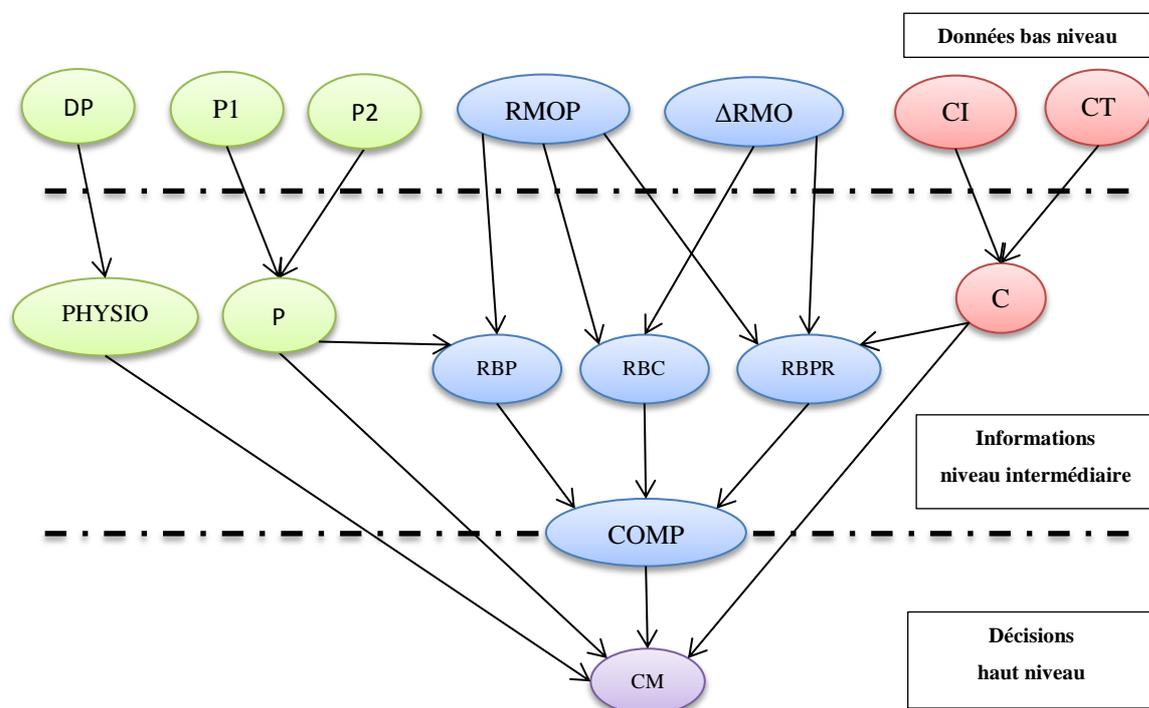


Figure 58 : Réseau bayésien pour estimer le niveau de charge mentale

Nous avons ainsi créé une information CM représentant la charge mentale en fusionnant par RB des informations caractérisant ses trois dimensions. La partie suivante vise à présenter la validation de la fusion proposée.

B. Validation de la fusion d'informations

Nous cherchons ici à valider la fusion d'information. Cela légitimerait l'utilisation de ces informations dans le but de déclencher une activation d'assistance informative ou une allocation des fonctions. Dans cette perspective, deux vérifications ont été réalisées :

- Le premier test consiste à faire rejouer les données obtenues lors de la première expérience, pour vérifier la cohérence interne du modèle de fusion d'informations proposé au niveau des informations intermédiaires (la contrainte **C**, la performance **P**, l'effet sur l'opérateur **Physio** et la mise en œuvre des régulations **Comp**), et la sensibilité de l'indicateur synthétique **CM** à ces quatre informations.
- Le second test consiste à vérifier que l'indicateur synthétique de charge mentale **CM**, et l'indicateur de mise en œuvre des régulations **Comp**, obtenue par fusion d'informations objectives, correspondent à l'évaluation subjective de la charge ressentie par l'opérateur et du comportement qu'il a mis en œuvre. Pour cela, une nouvelle expérimentation a été réalisée.

B.1. Validation de la cohérence et de la sensibilité à partir d'un rejou des données

La fusion d'informations a été réalisée à partir des données brutes de 22 participants, recueillies lors de la première expérience présentée au chapitre VI (tel que les contraintes CI et CT, le diamètre pupillaire DP, les trois types de régulations, etc).

Cette première phase de validation vise donc à vérifier si les relations observées entre ces données brutes (cf. VI.B.5) se retrouvent bien entre les quatre informations de niveau intermédiaire que nous avons générées par fusion (C, P, Physio et Comp).

Par ailleurs, elle permettra également de mesurer la sensibilité de l'indicateur synthétique CM à ces 4 informations intermédiaires.

Pour répondre à ces deux objectifs, deux hypothèses principales ont été testées :

Hypothèse 1 : les relations entre les dimensions de la charge mentale (relatives à la contrainte, aux régulations et aux effets sur la performance et sur l'opérateur) seraient les mêmes au niveau des informations intermédiaires qu'au niveau des données brutes. Nous rappelons ci-dessous ces trois relations, qui serviront d'hypothèses opérationnelles pour la validation de la cohérence interne de notre modèle de fusion :

- **Hypothèse 1.1 :** Nous nous attendons à ce qu'une augmentation de la contrainte (C) entraîne des valeurs moyennes de l'activité physiologique (Physio) plus élevées et des valeurs moyennes de la performance (P) plus basses.
- **Hypothèse 1.2 :** Par ailleurs, l'augmentation de la contrainte (C) se caractérisait par un changement de comportement de l'opérateur (Comp), lequel adopterait moins souvent du comportement « neutre » (absence de régulation) au profit d'un comportement basé sur le compromis cognitif (qui se traduit par la mise en œuvre alternée de régulations basées sur la gestion de la performance/conformité et du coût cognitif).
- **Hypothèse 1.3 :** nous nous attendons à ce que l'activité physiologique (Physio) et la performance (P) soient plus fortes quand les participants ont un comportement basé sur la recherche de la performance ou de la conformité que lorsqu'ils cherchent à réduire le coût cognitif (Comp).

Hypothèse 2 : l'indicateur de charge mentale (CM) sera sensible aux quatre informations intermédiaires (C, Comp, P et Physio) : nous nous attendons ainsi à ce que la charge mentale (CM) augmente avec l'augmentation de la contrainte (C), de l'activité physiologique (Physio), ainsi qu'avec la dégradation de la performance (P). Par ailleurs, nous nous attendons à ce que la charge mentale (CM) soit plus forte quand les participants gèrent le coût que quand il gère la performance/conformité.

B.1.1. Vérification de la cohérence interne du modèle de fusion

Les analyses présentées ci-dessous visent à vérifier l'hypothèse H1.

Comme toutes nos données sont qualitatives, nous optons pour des tests non-paramétriques.

Pour les données qualitatives ordinales, nous avons sélectionné les ANOVA de Friedman.

B.1.1.1. Effet de la contrainte sur l'état de l'opérateur et sur la performance

Nous n'avons constaté aucun effet de la contrainte (C) sur l'activation physiologique (Physio). Par contre, une réduction significative de la performance (P) a été observée, lorsque que la contrainte (C) augmente.

Une ANOVA de Friedman a ainsi révélé un effet des valeurs moyennes obtenues pour chaque modalité de la contrainte (C) sur la performance (P) ($X^2(N = 22, df = 2) = 15,364, p < ,001$) (cf. Figure 59).

Plus particulièrement, une série de tests de Wilcoxon ont révélé une dégradation significative de la performance entre le niveau 1 et 2 ($z(5) = 3,522, p < 0.01$) ainsi qu'entre le niveau 1 et 3 ($z(5) = 2,159, p < 0.05$).

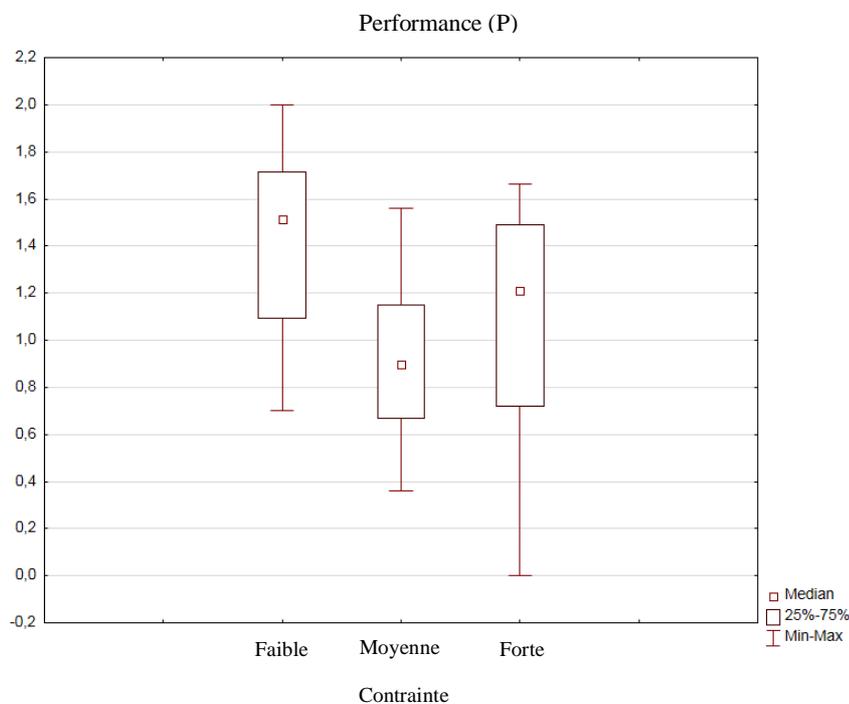


Figure 59 : Effet de la contrainte (C) sur la performance (P)

B.1.1.2. Effet de la contrainte sur les régulations

Nous avons bien observé qu'une augmentation de la contrainte (C) entraîne une diminution du comportement neutre (sans régulation) et une augmentation des comportements basés soit sur la gestion de la performance et de la conformité, soit sur la gestion du coût cognitif (cf. Figure 60).

Une ANOVA de Friedman a ainsi montré un effet significatif de la contrainte sur les régulations (COMP) ($X^2 (N = 22, df = 2) = 7,057, p < 0,05$).

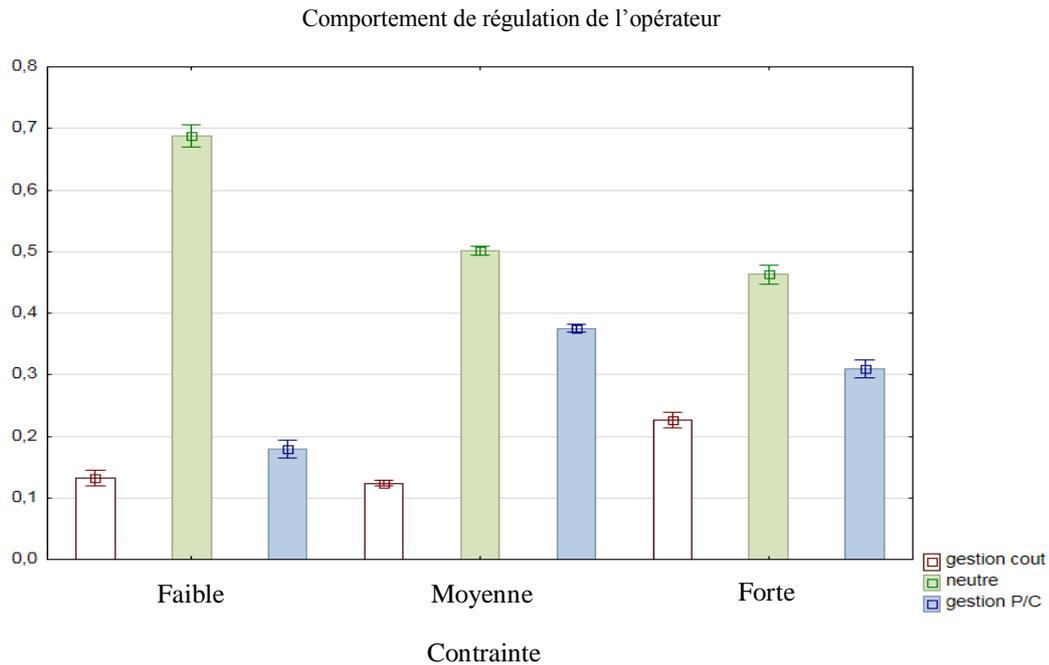


Figure 60 : Effet de la contrainte (C) sur les régulations (Comp)

B.1.1.3. Effets des régulations sur l'activité physiologique et sur la performance

Aucun effet des régulations (Comp) sur l'activité physiologique (Physio) n'a été observé.

Nous avons principalement constaté une réduction de la performance quand l'opérateur adopte un comportement basé sur la gestion du coût cognitif plutôt que sur la recherche de la performance/conformité (cf. Figure 61).

Une ANOVA de Friedman a ainsi montré un effet significatif du comportement (Comp) sur la performance (P) ($X^2 (N = 22, df = 2) = 15,636, p < 0,001$).

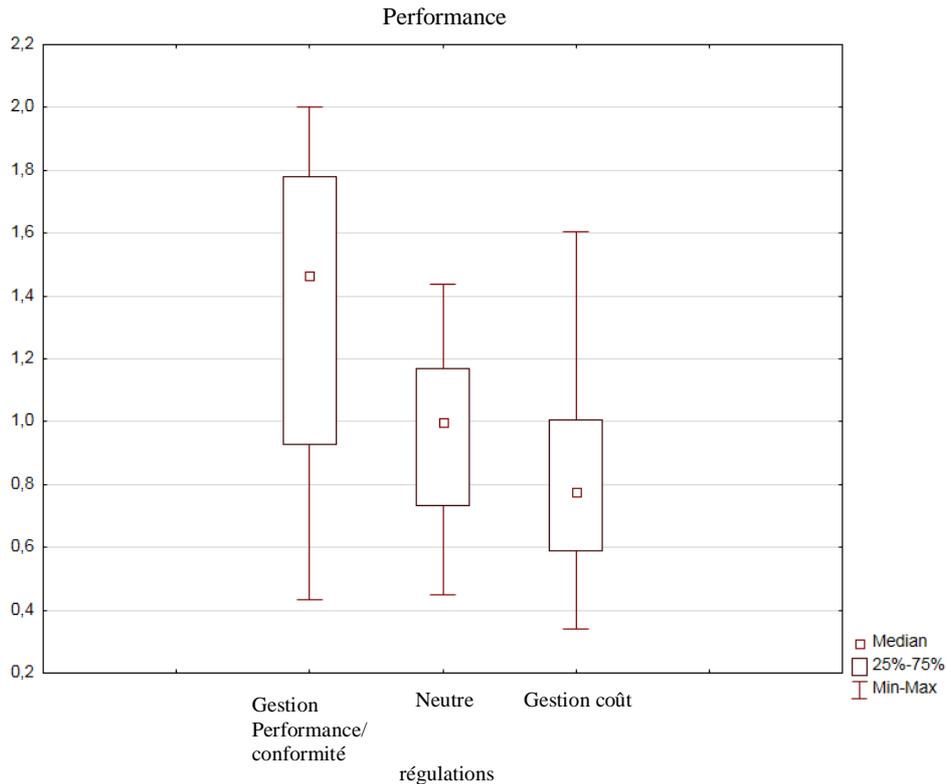


Figure 61 : Effet des régulations (Comp) sur la performance (P)

B.1.2. Vérification de la sensibilité de l'indicateur de charge mentale

Les analyses visent à vérifier l'hypothèse H2, en étudiant l'effet de la contrainte (C), des régulations (Comp), de la performance (P) et de l'activité physiologique (Physio) sur notre indicateur de charge mentale (CM) afin de vérifier l'hypothèse 2.

Effet de la contrainte (C) sur la charge mentale (CM)

L'analyse statistique réalisée au moyen d'une ANOVA de Friedman sur la charge mentale (CM) a révélé un effet significatif de la contrainte sur la charge mentale ($X^2(N = 22, df = 2) = 40,363, p < 0,001$) (cf. Figure 62).

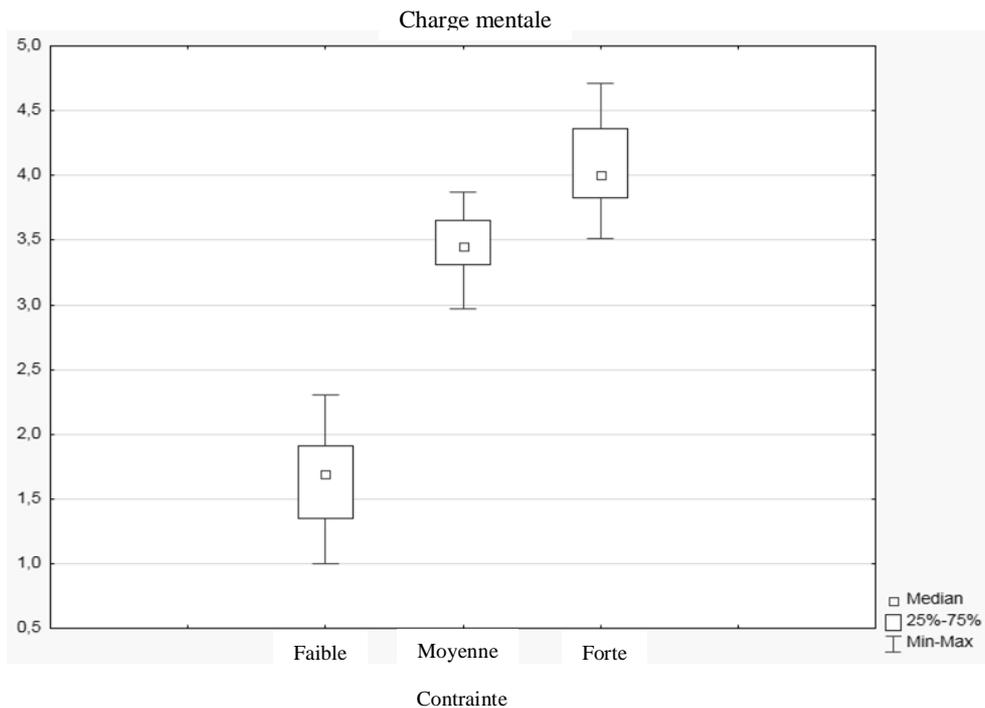


Figure 62 : Effet de la contrainte (C) sur la charge mentale (CM)

Effet des régulations (Comp) sur la charge mentale (CM)

L'analyse statistique réalisée au moyen d'une ANOVA de Friedman sur la charge mentale (CM) a révélé un effet significatif des régulations sur la charge mentale ($X^2(N = 22, df = 2) = 22,454, p < 0,001$) (cf. Figure 63).

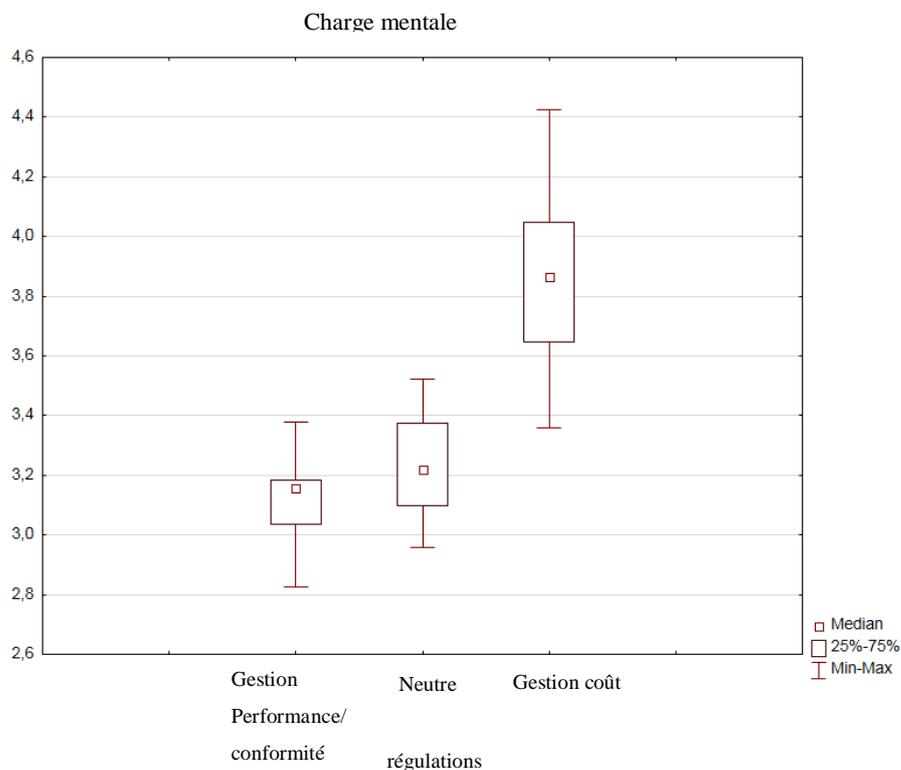


Figure 63 : Effet des régulations (Comp) sur la charge mentale (CM)

Effet de la performance (P) sur la charge mentale (CM)

L'analyse statistique réalisée au moyen d'une ANOVA de Friedman sur la charge mentale (CM) a révélé un effet significatif de la performance sur la charge mentale ($X^2(N = 22, df = 2) = 36,273, p < 0,001$) (cf. Figure 64).

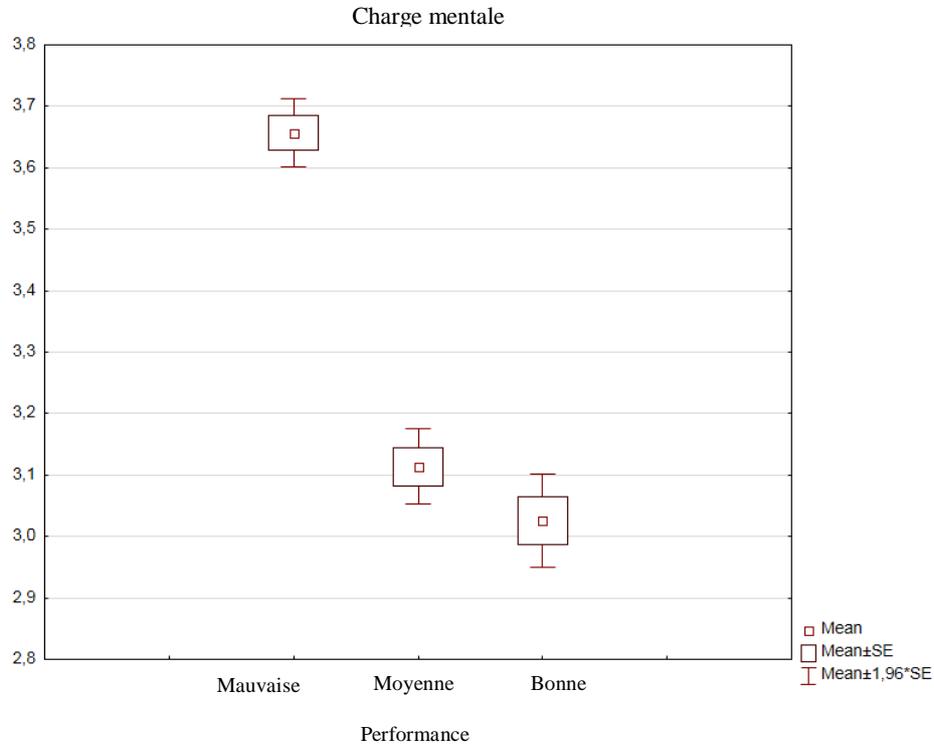


Figure 64 : Effet de la performance (P) sur la charge mentale (CM)

Effet de l'activité physiologique (Physio) sur la charge mentale (CM)

L'analyse statistique réalisée au moyen d'une ANOVA de Friedman sur la charge mentale (CM) a révélé un effet significatif du diamètre pupillaire (DP) sur la charge mentale ($X^2(N = 22, df = 2) = 44,000, p < 0,001$) (cf. Figure 65).

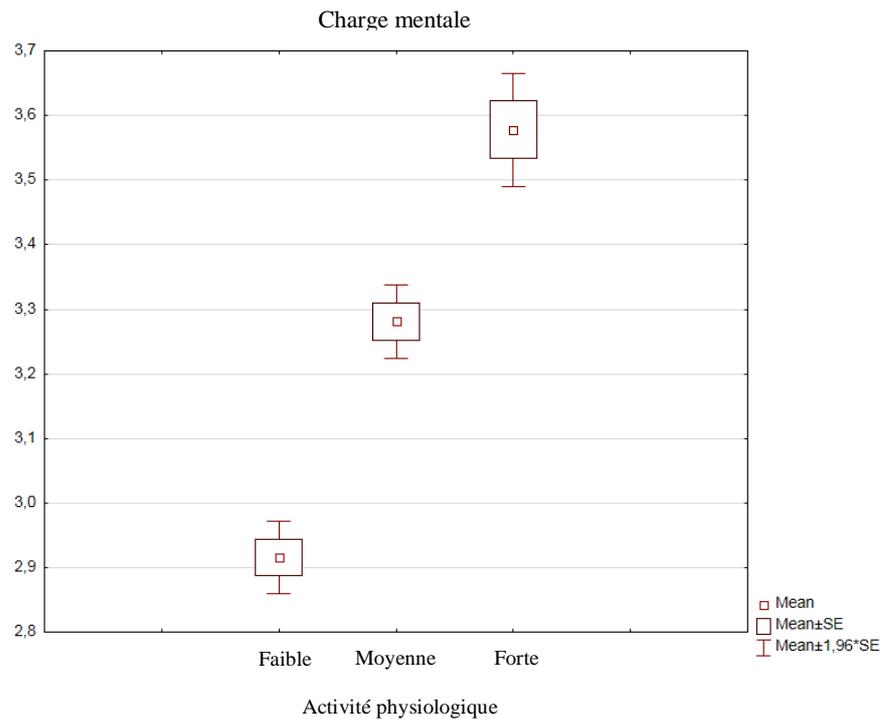


Figure 65 : Effet de l'activité physiologique (Physio) sur la charge mentale (CM)

B.1.3. Éléments de validation de la fusion de données proposée

A partir du rejeu des données recueillies lors de l'expérimentation présentée au chapitre VI, nous avons donc pu valider la robustesse de la fusion de données proposée.

D'une part, notre modèle est cohérent : nous retrouvons bien, comme nous l'attendions dans l'hypothèse H1, une conservation des relations entre les trois dimensions de la charge mentale, en passant des données de bas niveau aux informations de niveau intermédiaire.

Lors d'une augmentation de la contrainte (C), nous observons ainsi une dégradation de l'information performance (P), et un comportement plus « régulateur » (Comp), se traduisant par une diminution du comportement « neutre » et plus de régulations basées sur la performance/conformité ou sur le coût cognitif. Nous constatons également que la performance (P) augmente bien lorsque l'information relative aux régulations (Comp) représente un comportement de recherche de performance/conformité plutôt qu'un comportement de gestion du coût cognitif.

Cette validation n'est cependant que partielle : il n'y a aucun effet de la contrainte (C) ni des régulations (Comp) sur l'activité physiologique (Physio). Ces effets sur l'activité physiologique n'étaient cependant pas démontrées de manière significative lors de l'analyse des données brutes de l'expérimentation présentée au chapitre VI, il semble donc assez

naturel que l'on soit confronté aux mêmes limites lors du passage aux informations de niveau intermédiaire.

D'autre part, l'indicateur de charge mentale (CM), obtenu par la fusion de données des informations de niveau intermédiaire (C, Comp, P et Physio) à l'aide de réseaux Bayésiens, est bien sensible à ces quatre informations, et ce de manière significative, comme prévu dans l'hypothèse H2.

Le réseau Bayésien que nous avons construit permet en effet d'obtenir un indicateur de charge mentale (CM) qui augmente quand la contrainte (C) augmente, quand la performance (P) diminue, quand l'activité physiologique (Physio) augmente et quand l'opérateur a un comportement (Comp) basé sur la gestion du coût cognitif.

B.2. Validation expérimentale du caractère diagnostic

Nous proposons maintenant de tester le modèle de fusion d'informations de manière expérimentale. L'objectif est de valider les informations **Comp** et **CM**, en comparant une évaluation objective (par fusion d'informations) à une évaluation subjective (en utilisant de questionnaires). Nous commencerons par présenter la mise en place de l'expérience, puis nous présenterons ensuite les résultats.

B.2.1. Méthode

B.2.1.1. Participants

Puisqu'il n'existe pas d'opérateurs supervisant un essaim de drones (le système est en effet émergent, voir chapitre V), nous avons cherché à approcher une population réaliste d'experts. Nous avons pour cela fait appel à 6 étudiants d'école d'ingénieur, ayant entre 18 et 24 ans. Pour respecter une certaine homogénéité et éviter des biais, nous avons fait appel uniquement à des participants masculins, qui ont ou ont eu une bonne pratique des jeux vidéo de stratégie en temps réel (contrôlée par un court questionnaire).

B.2.1.2. Equipement

Les passations ont été réalisées dans une pièce où la luminosité est maîtrisée, pour éviter des variations du diamètre pupillaire dues aux variations de luminosité. Dans cette pièce, un espace a été aménagé pour la réalisation de la tâche. Cet espace est composé (cf. Figure 66 :)

:

- D'un bureau et d'une chaise fixe (pour éviter des mouvements parasites de l'opérateur).
- Du simulateur SUSIE, comprenant un ordinateur et d'une interface composée d'un écran (Compaq LA2405wg 24" de marque HP) et d'une souris.
- Du dispositif de mesure :
 - Eye-tracker FaceLAB5 et Eyework : Les données oculaires sont acquises par un eyes tracker FaceLAB5 et transférées par FireWire à un ordinateur dédié, puis transférées vers l'ordinateur central, pour être enregistrées par le logiciel Eyework.
 - D'un log (fichier texte) : Le log contient les évènements du scénario (nouveau message, nouveau véhicule, etc.), ainsi que toutes les actions de l'opérateur enregistrées par les clics de souris.
 - D'un questionnaire : Les données subjectives ont été enregistrées par un questionnaire.

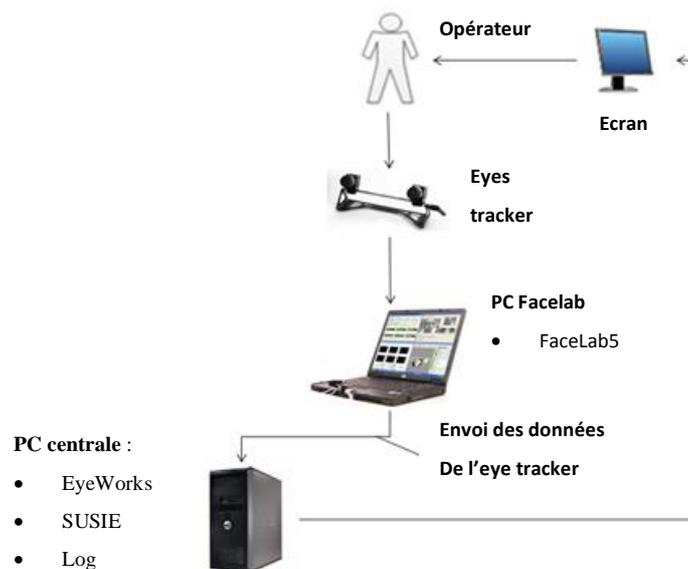


Figure 66 : Dispositif expérimental

B.2.1.3. Scénario

Le scénario est le même que celui qui a été utilisé lors de la première expérience. Afin d'éliminer l'effet de l'ordre dans lequel les phases sont présentées, les participants ont été répartis en deux groupes : l'un a réalisé d'abord la phase A puis la phase B (difficulté croissante), l'autre a fait le contraire (difficulté décroissante).

B.2.1.4. Consignes

L'entraînement, les consignes et les objectifs sont exactement les mêmes que ceux définis pour la première expérience. Pour rappel : une phase d'entraînement de 30 minutes a précédé l'expérience. Cette phase est divisée en deux parties : une partie théorique (10 minutes) et une partie pratique (20 minutes). La phase théorique consiste à présenter le système, donner les objectifs (**O**) (cf.

Tableau 23) et les modes opératoires prescrits (**MOP**) permettant d'atteindre les objectifs. Les modes opératoires les plus complexes étaient prescrits aux participants. La phase pratique a pour but de prendre en main le système. Pendant cette seconde phase, les modes opératoires préconisés étaient régulièrement rappelés à l'opérateur.

Tableau 23: Objectifs

Objectives	Description
O1	Neutraliser 25 mobiles en 20 minutes.
O2	Pour chaque message, tracer une zone relative au message moins de deux minutes après l'apparition du message.

B.1.5. Mesures

B.2.1.5. Mesures

Dans cette expérience nous avons réalisé des mesures subjectives et objectives :

Mesures subjectives : Les mesures subjectives ont été recueillies à partir d'un questionnaire constitué de deux questions (Figure 67) ; une question pour l'évaluation du comportement et une pour l'évaluation de la charge mentale :

- **Évaluation du comportement** : Pour obtenir une mesure subjective du comportement, nous posons la question suivante: « quel est le critère qui guide actuellement votre comportement ? ». Trois réponses étaient proposées (correspondant respectivement aux 3 classes, performance/conformité, neutre, coût cognitif) :
 - Je cherche à prioriser les tâches, pour ne pas être débordé.
 - J'arrive à être performant sans effort.
 - Je cherche à être plus performant ou à mieux respecter les consignes.
- **Évaluation de la charge mentale** : Pour obtenir une mesure subjective de la charge mentale, nous utilisons l'échelle d'**ISA**. Nous demandons donc à l'opérateur : « Sur une échelle de 1 à 5 comment évaluez-vous votre charge mentale », en précisant avant la passation le sens précis de chaque niveau.

Le questionnaire a été présenté aux participants toutes les 1 minute 30 ; il apparaissait directement sur l'écran (cf. Figure 67).

Sur une échelle de 1 à 5 comment évaluez-vous votre charge mentale?

Quel est le critère qui guide actuellement votre comportement ?

5	Je cherche à prioriser les tâches, pour ne pas être débordé
4	
3	J'arrive à être performant sans effort
2	Je cherche à être plus performance ou à mieux respecter les consignes
1	

Valider

Figure 67 : Questionnaire

Évaluation et mesures objectives : Deux indicateurs sont testés dans cette étude : l'indicateur global de charge mentale CM, et l'indicateur Comp portant sur la mise en œuvre des régulations. Ces indicateurs fusionnés s'appuient sur l'enregistrement de mesures objectives représentant les informations brutes de bas niveau présentées dans la partie A : (CTb, CIb, P1b, P2b, et RMOPb). Ces mesures ont été recueillies à partir du log. La fusion d'informations a été réalisée a posteriori.

B.2.1.6. Protocole

Le protocole est similaire à celui qui a été utilisé lors de la première expérience. La seule différence réside dans le fait que l'explication du questionnaire a été présentée dans la phase 3 : « **Présentation et prise en main du système** ».

B.2.1.7. Hypothèse

Afin de vérifier le caractère diagnostique des indicateurs de charge mentale (CM) et de comportement (Comp) obtenus par fusion d'information, nous vérifions les deux hypothèses suivantes :

- **H1** : Nous nous attendons à observer une corrélation entre l'évaluation subjective (donnée sur une échelle ISA) et l'évaluation objective de la charge mentale (donnée par l'indicateur fusionné CM).
- **H2** : Nous nous attendons à observer une corrélation entre l'évaluation subjective du comportement des participants et l'évaluation objective de la mise en œuvre des régulations donnée par l'indicateur Comp.

B.2.2. Vérification du caractère diagnostique des indicateurs de comportement et de charge mentale

B.2.2.1. Dépendance des mesures subjective et objective de la charge mentale

L'indicateur de charge mentale CM et l'évaluation subjective mesurée à l'aide de l'échelle ISA sont des variables qualitatives ordinales. En s'appuyant sur le cours de Gadat (2012), un test Spearman a été utilisé pour étudier la corrélation entre ces deux variables ordinales. Celui-ci montre que les deux mesures sont positivement corrélées ($r = 534$, $p < 0.001$) (cf. Figure 68).

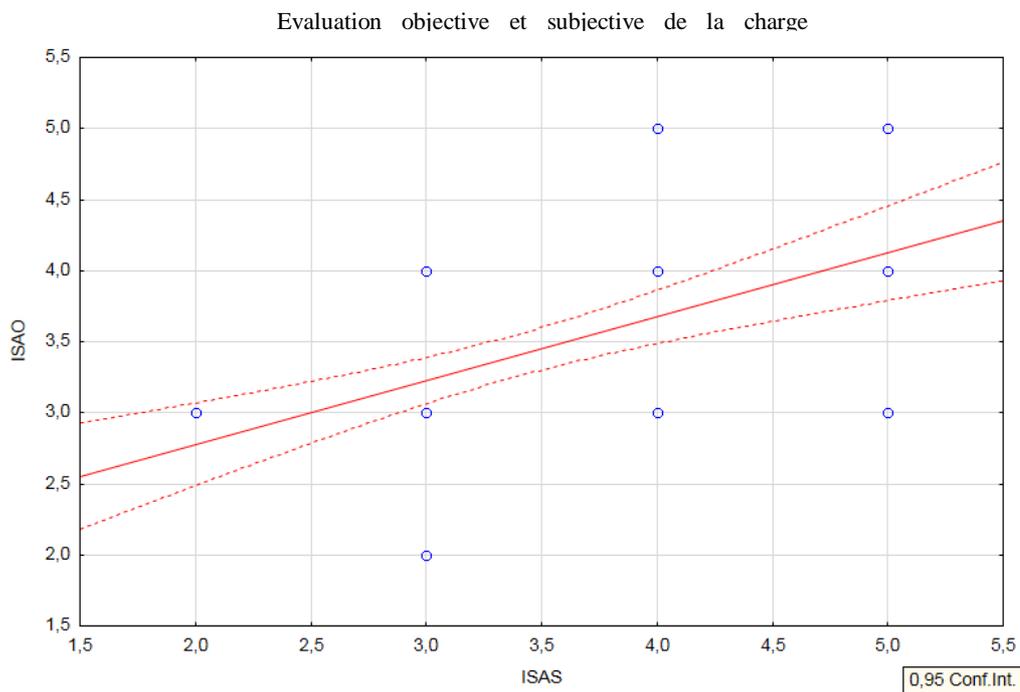


Figure 68 : Corrélation entre l'indicateur de charge mentale et l'évaluation subjective.

B.2.2.2. Dépendance des évaluations subjective et objective du comportement

L'indicateur de régulation (Comp), ainsi que l'évaluation subjective des régulations réalisée par un questionnaire, sont des variables nominales. En s'appuyant sur le cours de Gadat

(2012), un test du Chi² a été réalisé pour étudier la dépendance entre les deux variables. Les résultats ne montrent aucune dépendance significative entre les deux évaluations ($X^2=6,389$, $df=4$, $p = 0,172$).

B.2.3. Éléments de validation de la fusion d'informations proposée

La passation de cette nouvelle expérimentation tend à montrer le caractère diagnostique des indicateurs obtenus par fusion d'informations. Cela doit cependant être nuancé par l'emploi d'un échantillon faible, dû à un manque d'étudiants volontaires sur la période considérée.

Nous observons ainsi une dépendance statistique significative entre l'évaluation subjective donnée par l'échelle ISA et l'indicateur de charge mentale CM, comme attendu dans l'hypothèse H1.

La dépendance entre l'évaluation subjective du comportement et l'indicateur Comp n'est par contre pas confirmée. Cela peut s'expliquer par un nombre de participants trop faible.

B.3. Discussion

Pour obtenir un indicateur complet et robuste de la charge mentale, nous avons choisi de fusionner des informations relatives à la contrainte de la tâche, aux régulations mise en œuvre par l'opérateur, à l'effet de la charge sur la performance et l'état de l'opérateur (activation physiologique). Ce modèle de fusion d'informations a été validé par le biais de deux analyses, montrant la cohérence du modèle (par rapport à ce qui avait été observé sur les données non fusionnées de la première expérience), ainsi que la sensibilité et le caractère diagnostique de l'indicateur synthétique de charge mentale (CM).

Ce choix du modèle tridimensionnel de la charge mentale et des informations à fusionner converge avec des travaux récents de la littérature, qui cherchent à dépasser une approche en temps réel uniquement basée sur l'analyse des effets de la charge sur la performance et l'effort physiologique (comme par exemple la proposition de Rachedi en 2015 sur le domaine de la conduite ferroviaire). Ainsi, on peut citer le travail des chercheurs de l'AFRL 711th Human Wing (branche Facteurs Humains de l'US Air Force), portant sur le système PACER (Performance Augmentation Computing Engine in Real time) (Durkee et al., 2015), qui propose, pour piloter une allocation des fonctions visant à améliorer la performance opérationnelle, de contextualiser des mesures physiologiques par une évaluation de la contrainte. Imbert et al. (2012) propose également de contextualiser les données physiologique et oculaire par une évaluation de la contrainte. Outre l'introduction de la

dimension contrainte dans ces modèles d'évaluation en temps réel de la charge mentale, on peut également citer les récents développements de Schulte et al. (2015), qui posent les principes d'une méthode de mesure en temps réel de la charge mentale très similaire à notre approche, en combinant une mesure objective de la contrainte et de la performance, une mesure de la demande en ressource de l'activité en cours, et une mesure des régulations de l'opérateur. Celle-ci se distingue cependant par le choix de méthodes de fusion différentes de celles que nous avons employées.

Par ailleurs, dans la plupart des études, la fusion d'informations aboutit à un indicateur ne possédant bien souvent que deux classes (Cannon, Krokmal, Chen, & Murphey, 2012 ; Noel, 2005), même si les travaux menés par l'US Air Force proposent d'aller vers une classification plus fine, s'appuyant sur des indicateurs continus. Pour obtenir un indicateur moins binaire et sensible à chaque dimension de la charge mentale, nous avons choisi de créer une information divisée en cinq classes, en se basant sur l'échelle ISA, très utilisée dans la littérature et le domaine de l'aéronautique (Martin, 2013).

Enfin, pour fusionner ces indicateurs nous avons sélectionné la théorie des probabilités (réseau bayésien) et la théorie des ensembles flous (cf. chapitre IV). Les réseaux Bayésiens s'avère être un choix pertinent dans notre cas. En effet, ils rendent possible une mesure gérant l'hétérogénéité et l'incertitude des informations de bas niveaux. Ji, Lan et Looney (2006) et Yang et al. (2010) ont recours aux réseaux bayésiens pour estimer en temps réel la fatigue de l'opérateur. De même, Rachedi (2015) met en œuvre un RB pour caractériser l'état de l'opérateur dans le domaine de la conduite ferroviaire. Par ailleurs, notre choix d'employer de la logique floue converge avec les propositions de Yang et al. (2010) et s'explique par le besoin de discrétisation des informations continues de bas niveau en vue d'alimenter des réseaux Bayésiens par des informations précises et incertaines.

C. Conclusion

En partant du constat qu'il est nécessaire de fusionner différentes informations caractérisant les trois dimensions de la charge mentale pour obtenir une mesure complète et robuste, nous avons réalisé une fusion d'informations à partir des indicateurs retenus au chapitre VI. Pour réaliser la fusion, nous avons tout d'abord traité les informations de bas niveaux, dans le but de les préparer à la fusion par réseaux bayésiens. Les informations discrètes ont été traitées par

agrégation. Les informations continues ont été discrétisées à l'aide de la théorie des ensembles flous, puis nous avons utilisé le lien entre la théorie des ensembles flous et celle des probabilités (cf. chapitre III) pour obtenir une information précise et incertaine. La seconde étape a consisté à fusionner ces informations. Le choix du réseau bayésien s'avère pertinent. Les réseaux bayésiens permettent de converger vers un singleton et permettent une modélisation graphique, mais les réseaux bayésiens ne permettent pas de prendre en compte la dynamique des informations (cf. chapitre III).

Du point de vue méthodologique, nous avons proposé une méthode de validation de la fusion, divisée en deux étapes. La première étape consiste à analyser à nouveau les données obtenues lors d'une première expérience. Cette étape permet notamment de vérifier qu'il n'y a pas d'aberrations dans les tables de probabilités. La seconde étape consiste à réaliser une expérience dans le but de comparer une évaluation objective à une évaluation subjective. Cette étape permet notamment de vérifier le fait que les mesures objectives sont proches de ce que ressent l'opérateur.

L'indicateur ainsi créé permet d'obtenir une représentation de la charge mentale sensible (au sens de Cegarra & Chevalier, 2008) à chaque dimension. Cette information nous servira ensuite pour piloter une aide à l'opérateur. Contrairement à la majorité des approches qui se focalise sur des mesures de performance et physiologiques, nous avons en plus pris en compte la contrainte et les régulations, ce qui permet d'obtenir une représentation complète de la charge mentale, et également de mieux comprendre les variations de performance et de l'activité physiologique.

Résumé

En partant du constat qu'il est nécessaire de fusionner différentes informations traduisant les trois dimensions de la charge mentale pour obtenir une mesure complète et robuste, nous avons réalisé une fusion d'informations provenant des indicateurs retenus au chapitre VI. Pour réaliser la fusion, nous avons tout d'abord traité les informations de bas niveau avec la logique floue, puis nous les avons fusionnées par réseaux bayésiens. Pour construire ce réseau bayésien, nous avons tout d'abord créé quatre indicateurs représentant les dimensions de la charge mentale, un pour la contrainte, un pour le comportement, un pour la performance et un pour l'activité physiologique. Ces quatre indicateurs ont ensuite été fusionnés pour créer un indicateur synthétique de charge mentale. Cet indicateur a été créé à partir de l'échelle ISA, ce qui nous permet d'obtenir une mesure fine.

Cet indicateur a été validé en deux étapes. La première étape consiste à analyser les données obtenues lors de la première expérience. Cette étape permet notamment de vérifier qu'il n'y a pas d'aberrations dans les tables de probabilités. La seconde étape consiste à réaliser une expérience dans le but de comparer une évaluation objective à une évaluation subjective. Cette étape permet notamment de vérifier le fait que les mesures objectives sont proches de ce que ressent l'opérateur.

Cette approche de fusion d'informations pour la charge mentale converge avec le courant actuel, notamment avec les travaux de l'US Air Force, qui contextualisent les données physiologiques et de performance par une mesure de la contrainte, ainsi qu'avec les travaux de Schulte, et al. (2015), qui prennent en compte des régulations pour estimer en temps réel la charge mentale.

Chapitre VIII. Création et validation de l'aide à l'opérateur

Ce chapitre expérimental vise à valider le fait que l'indicateur de charge mentale créé permet de piloter une aide à l'opérateur. La première section **A** définit l'aide à l'opérateur qui peut être mise en place dans le cadre de l'activité menée sur le démonstrateur SUSIE. La seconde section **B** présente ensuite une expérimentation, dont l'objectif est de valider cette proposition d'aide à l'opérateur, déclenchée à partir d'une évaluation objective en temps réel de la charge mentale, obtenue par la fusion d'informations.

A. Aide à l'opérateur

L'objectif est d'apporter une aide à l'opérateur quand une surcharge mentale est détectée. Nous avons créé et présenté (cf. Chapitre VII) un indicateur de charge mentale divisé en cinq niveaux : les niveaux 1 et 2 représentent une sous charge, le niveau 3 une zone de confort et les niveaux 4 et 5 une surcharge. C'est donc quand un niveau de surcharge (4 ou 5) est détecté qu'il est pertinent de déclencher une aide.

Pour la définir, nous avons dans un premier temps identifié les tâches sur lesquelles elle devrait porter, puis nous avons identifié des automatisations possibles. Enfin, nous avons sélectionné un type de coopération (cf. chapitre IV) et les automatisations à mettre en œuvre pour chaque niveau de surcharge mentale.

A.1 Identification des tâches candidates pour l'automatisation

Plusieurs tâches ont été identifiées et décrites dans le chapitre V ; elles sont rappelées dans le Tableau 24 Nous proposons, ici, une analyse complémentaire portant sur les données recueillies dans la première expérience et visant à identifier les tâches les plus longues.

Tableau 24 : Tâches réalisées par l'opérateur

Tâches
Lire un message
Rechercher un véhicule
Traiter des véhicules <ul style="list-style-type: none">• Verrouiller un véhicule• Identifier un véhicule• Neutraliser un véhicule
Gérer des zones

Pour analyser le temps passé pour chaque type de tâche, nous utilisons une évaluation subjective obtenue à partir d'un questionnaire post-test, ainsi qu'une évaluation objective obtenue à partir des données du log.

A.1.1 Analyse du temps passé par type de tâche

Nous allons ici analyser le temps passé par type de tâche sur l'ensemble du scénario, ainsi que pour la phase A (modérément contraignante) et la phase B (fortement contraignante).

A.1.1.1 Temps passé par type de tâche sur l'ensemble du scénario

Analyse des questionnaires relatifs au ressenti subjectif des participants sur le déroulement de la mission

Une ANOVA de Friedman a été réalisée sur les réponses apportées au questionnaire auquel ont été soumis les participants après la passation du scénario. Les résultats ont révélé des différences significatives ($X^2(N = 22, df = 3) = 26,430, p < 0,001$) (cf. Figure 69).

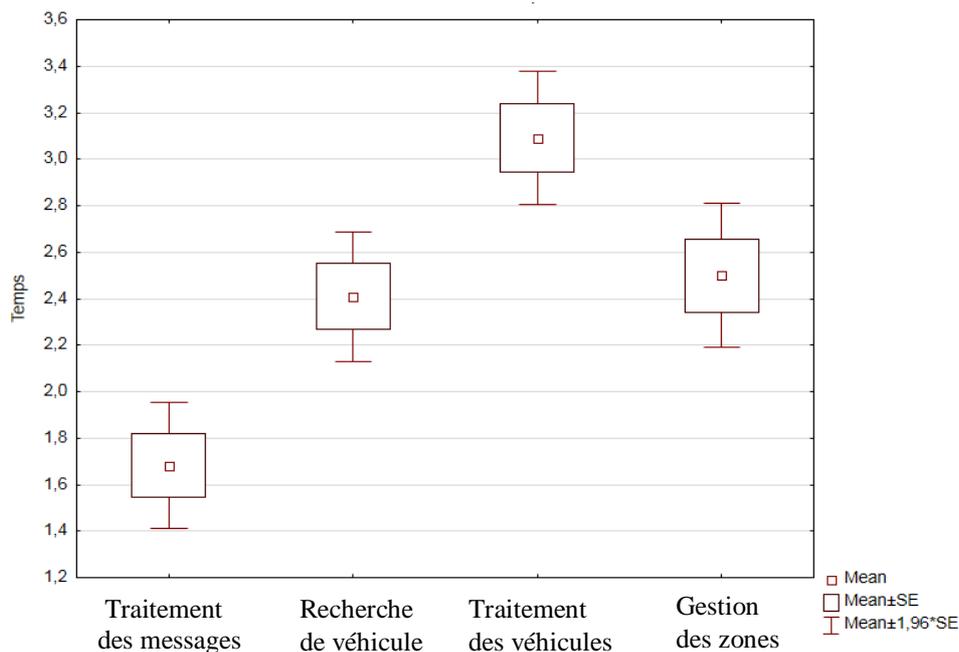


Figure 69 : Evaluation subjective du temps passé par type de tâche sur l'ensemble du scénario

Analyse des données objectives sur le déroulement de la mission

Une ANOVA de Friedman a été réalisée dans le but d'étudier le temps effectivement passé par type de tâche. Les résultats ont révélé des différences significatives ($X^2(N = 22, df = 3) = 63,818, p < 0,001$). Plus précisément, les résultats montrent que, sur l'ensemble du scénario, les participants consacrent en moyenne 783s à la tâche de traitement des véhicules

(verrouillage, identification et neutralisation), 238s à la tâche de gestion, 156s à la tâche de recherche de véhicules et 23s à la tâche de lecture des messages (cf. Figure 70).

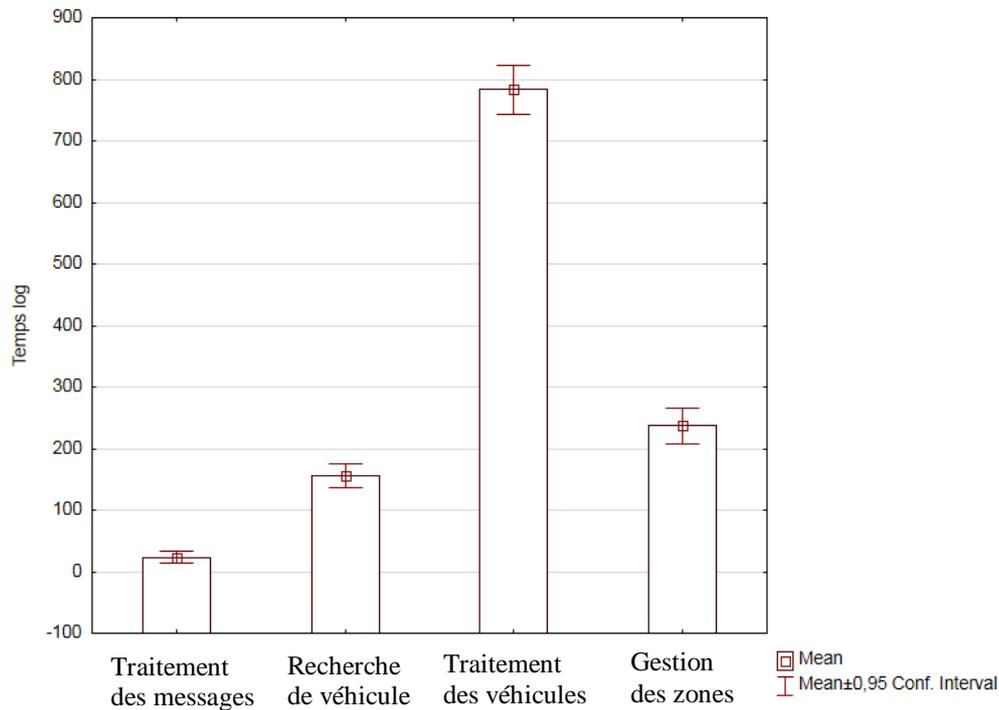


Figure 70 : Evaluation objective du temps passé par type de tâche sur l'ensemble du scénario

A.1.1.2. Temps passé par type de tâche en fonction de la phase

Une série de tests de Wilcoxon a été réalisée sur le temps consacré à chaque tâche, de façon à pouvoir comparer les valeurs obtenues lors de la phase A avec celles obtenues lors de la phase B.

Les résultats statistiques ont révélé que le temps consacré à la tâche de traitement des véhicules est significativement plus élevé dans la phase B ($Z(21) = -2,971$, $p < 0,01$), et que le temps consacré à la tâche de gestion des zones est significativement plus faible dans la phase B que dans la phase A ($Z(21) = 2,776$, $p < 0,01$). Pour les tâches de traitement des messages et de recherche de véhicules aucune différence n'a été observée entre la phase A et la phase B (cf. Figure 71).

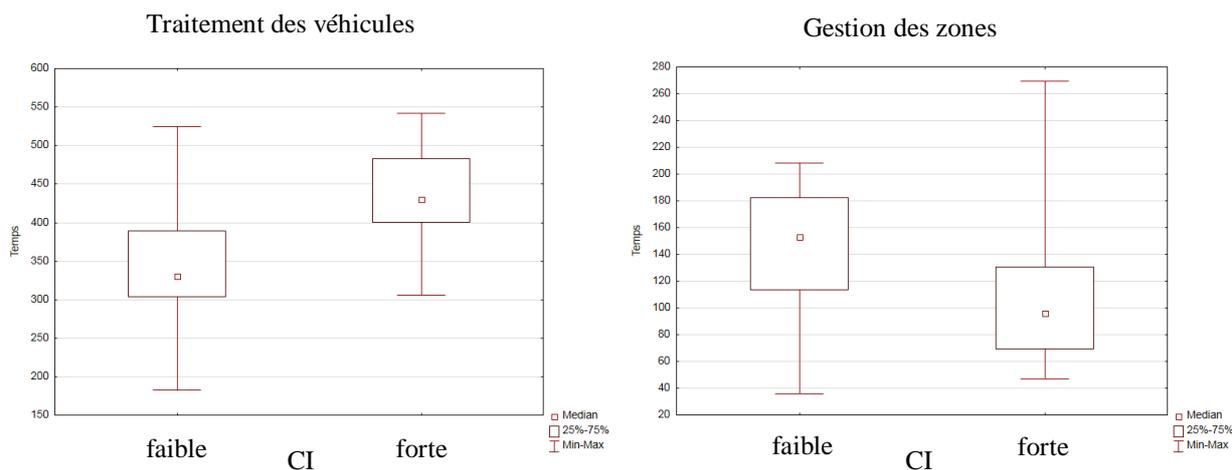


Figure 71 : Effet de la phase (A - CI faible - / B - CI Forte) sur le temps de réalisation des tâches de traitement des véhicules et de gestion des zones (tests U de Mann-Whitney)

A.1.2 Synthèse

Les analyses réalisées à partir des observations subjectives et objectives montrent que les participants consacrent la plus grande partie de leur temps aux traitements des véhicules, et que la tâche de traitement des messages est la tâche à laquelle ils consacrent le moins de temps. Les participants semblent donc donner priorité à la tâche de traitement des véhicules.

L'analyse comparative entre phases A et B fait par ailleurs ressortir d'autres points.

Les participants se focalisent relativement plus sur la tâche de traitement de véhicules dans la phase B que dans la phase A. En effet, nous avons observé une augmentation significative du temps consacré à cette tâche dans la phase B (en moyenne 350s passées sur cette tâche dans la phase A contre 437s dans la phase B).

En revanche, ils consacrent relativement moins de temps aux tâches de lecture de message, de gestion des zones et de recherche de véhicules dans la phase B que dans la phase A (143s dans la phase A contre 106s dans la phase B pour la tâche de gestion de zones et 50s dans la phase A contre 42s dans la phase B pour la tâche de recherche de véhicule). Le temps moyen consacré à la tâche de lecture de messages reste le même dans la phase A comparé à la phase B, alors que le nombre de messages est plus important, ce qui signifie que certains messages ne sont pas traités.

Les tâches de traitement des messages, de recherche de véhicules et de gestion des zones deviennent donc secondaires, ce qui peut entraîner une diminution globale de la performance. Cette conséquence a été observée, dans la première expérience, au travers de l'implémentation de la boucle basée sur la priorité.

A.2 Identification des automatisations possibles

Nous allons maintenant identifier des solutions d'automatisation que nous pouvons proposer pour les tâches étudiées.

Au regard des observations précédentes, il semblerait pertinent d'automatiser les trois tâches que l'opérateur traite de manière secondaire (recherche de véhicule, traitement de messages et gestion des zones) dans le but de garder un bon niveau de performance dans les phases de surcharge et de lutter contre l'effet de hiérarchisation des tâches (régulation sur la boucle basée sur la priorité).

Par ailleurs, pour contrer l'augmentation du focus sur la tâche de traitement de véhicules, on peut automatiser certaines étapes de cette tâche. La tâche d'identification ne peut pas être automatisée sur le système SUSIE et la tâche de neutralisation ne peut pas être déléguée à l'agent artificiel, car l'ordre d'attaquer doit impérativement être donné par un humain. Aucune automatisation n'est donc envisageable en ce qui concerne ces deux tâches. Pour verrouiller un véhicule, l'opérateur doit réaliser une inspection¹³, cette inspection peut - quant à elle - être automatisée.

Selon Hoc (2001) l'augmentation de la charge de travail d'un agent engendre le besoin d'ajouter un autre agent disposant des mêmes compétences. Dans un tel cas, la mise en place d'une coopération augmentative - au sens de Schmidt et al. (1991) - est justifiée (cf. chapitre IV). Dans ce type de coopération, les deux agents réalisent les mêmes fonctions, nous allons donc chercher à automatiser des fonctions initialement réalisées par l'opérateur. Considérant les quatre grandes étapes de traitement de l'information, Parasuraman et al. (2000) identifient quatre processus - ou "fonctions" - qui peuvent faire l'objet d'une automatisation plus ou moins importante (cf. chapitre IV). Nous allons donc chercher à définir des solutions d'automatisation portant sur ces "fonctions" pour chacune des tâches identifiées.

Prise d'information : Selon Inagaki (2003) une forte automatisation sur la prise d'information consiste à mettre en évidence des informations pour attirer l'attention de l'opérateur. Deux automatisations de ce type sont possibles : l'une porte sur le traitement des messages et l'autre sur la gestion des zones. Ces automatisations consistent à mettre en

¹³ Pour verrouiller un véhicule, un drone doit survoler le véhicule dans les 5 secondes qui suivent sa détection. L'inspection permet d'envoyer un drone survoler le véhicule.

évidence les messages non traités apparus il y a moins de deux minutes (pour la tâche de traitement des messages) ainsi que les zones sans drones (pour la tâche de gestion de zones) en les faisant clignoter dans le but d'attirer l'attention de l'opérateur et de l'inciter à les traiter. Il s'agit ici de contrôle mutuel (Hoc, 2001), dans le sens où le système vérifierait que l'opérateur respecte la prescription concernant le traitement des messages (MOP1 : Toujours lire un message dans les deux minutes qui suivent son apparition), ainsi que la prescription concernant le traitement des messages (MOP6 : Ne jamais laisser une zone vide. Supprimer la zone ou transférer des drones).

Analyse de l'information : selon Parasuraman et al. (2000), un bas niveau d'automatisation consiste à présenter les données sous leur forme brute. Au plus haut niveau d'automatisation, le système combine plusieurs données en une seule, pour fournir une représentation dite "élaborée". Nous pouvons mettre en place une automatisation de ce type pour la tâche de recherche de véhicule. Cette automatisation consiste à analyser et représenter de manière plus élaborée les informations délivrées par un message qui n'a pas été traité. Ce traitement pourrait consister à mettre une croix rouge sur la carte, aux coordonnées du message. Il s'agit donc ici d'une forte automatisation sur l'analyse des informations.

Prise de décision : il est possible d'automatiser cette fonction pour la tâche de gestion des zones. Pour gérer une zone sans drone, l'opérateur doit d'abord juger de l'utilité de la zone, puis transférer des drones dans la zone si elle est utile, ou la supprimer si elle ne l'est pas. L'automatisation consisterait à considérer automatiquement les zones sans drones comme étant utiles et à y envoyer des drones.

Implémentation de la solution : Deux automatisations portant sur l'implémentation de la solution peuvent être mises en œuvre : l'une porte sur le verrouillage et l'autre sur la tâche des gestions des zones. Pour verrouiller un véhicule, l'opérateur doit réaliser une inspection. L'exécution de cette action d'inspection peut être automatisée. L'automatisation portant sur la tâche de gestion des zones, consisterait à implémenter automatiquement la décision d'envoyer des drones dans la zone (i.e. transférer des drones dans les zones sans drones).

Concernant la tâche de gestion des zones, décision et implémentation sont réalisées de manière automatique sans demander l'avis de l'opérateur, ce qui correspond à un niveau 10

d'automatisation (sur l'échelle de Sheridan et al., 1978). Le schéma suivant synthétise les automatisations possibles pour chaque tâche :

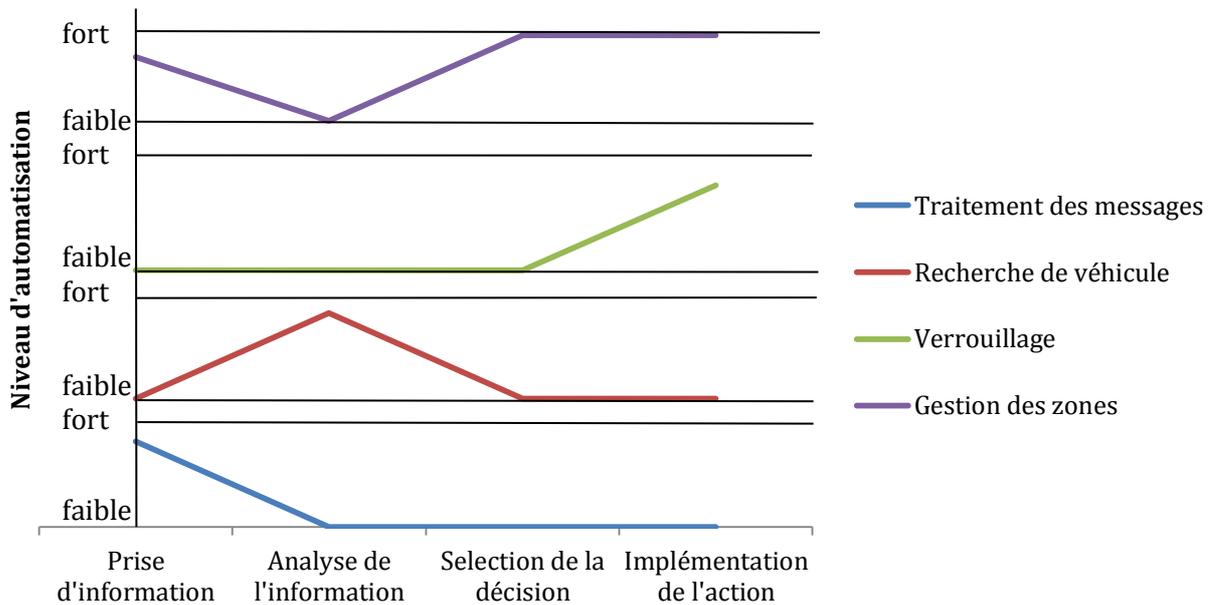


Figure 72 : Automatisation possible pour chaque tâche et sur chaque étape du traitement de l'information.

A.3 Sélection des automatisations par niveau de charge mentale

Au chapitre IV nous avons identifié deux structures de coopération (verticale et horizontale). Dans une structure verticale, le système ne peut pas mettre en œuvre des solutions, mais uniquement apporter une aide à la décision. Dans une structure horizontale, le système est en mesure d'exécuter une décision. En fonction du niveau de charge mentale détectée (niveau 4 : surcharge modérée ou niveau 5 : forte surcharge), la structure mise en œuvre, et le niveau d'automatisation des quatre fonctions du traitement de l'information ne seront pas les mêmes ; nous envisageons donc une allocation de fonctions dynamique.

Niveau 4 de charge mentale

Puisque l'opérateur se focalise sur le traitement des véhicules quand la charge augmente, nous apporterons une aide dans le but d'améliorer sa représentation de la situation. A ce niveau de charge mentale, nous mettons en œuvre des solutions d'automatisation portant uniquement sur la prise d'information. Nous sommes donc dans une coopération de type verticale et l'aide est uniquement informative. Le tableau suivant présente l'automatisation mise en œuvre à ce niveau de charge mentale.

Tableau 25 : Automatisations mises en œuvre au niveau 4 de charge mentale

Tâches	Description de l'automatisation	Étape du traitement de l'information
Lecture d'un message	clignotement des messages non traités apparus il y a moins de deux minutes	prise d'informations
Gestion des zones	clignotement des zones vides	prise d'informations

Niveau 5 de charge mentale

A ce niveau de charge mentale, l'opérateur est dépassé et beaucoup de tâches ne sont plus réalisées. Il est donc pertinent de mettre en place une coopération de type horizontale, où les « fonctions » de prise de décision et d'exécution de la solution sont réparties entre l'homme et la machine. La machine peut donc prendre et exécuter des décisions. En plus des automatisations apportées au niveau 4, nous ajoutons des automatisations portant sur l'analyse des informations, la prise de décision et l'implémentation de la solution. L'automatisation porte donc sur quatre étapes de traitement de l'information. Le tableau suivant présente les automatisations mises en œuvre à ce niveau de charge mentale.

Tableau 26 : Automatisations mises en œuvre au niveau 5 de charge mentale

Tâches	Description de l'automatisation	Étape du traitement de l'information
Lecture d'un message	clignotement des messages non traités apparus il y a moins de deux minutes	prise d'informations
Recherche de véhicules	Analyse automatique des informations apportées par un message non traité et représentation des données du message de manière plus élaborée sur la carte, par une croix aux coordonnées d'un message.	Analyse des informations
Verrouillage	Inspection automatique	Implémentation de la solution
Gestion des zones	Les zones vides clignotent et sont automatiquement jugées comme étant utiles ; des drones sont automatiquement transférés dans les zones vides.	prise d'informations ; prise de décision ; implémentation de la solution

En fonction du niveau de charge mentale détecté, certaines fonctions sont automatisées, et ceci sans demander l'avis de l'opérateur, nous procédons donc à une répartition implicite des fonctions.

L'aide mise en place a pour but de mieux exploiter les capacités des deux agents. Quand l'opérateur humain est dépassé, une aide lui est apportée pour qu'il soit en mesure de maintenir un bon niveau de performance, nous sommes donc dans un type d'allocation complémentaire, au sens de Jordan (1963).

Niveau 1, 2 et 3 de charge mentale

A ces niveaux aucune aide n'est apportée à l'opérateur.

La Figure 73 synthétise les niveaux d'automatisation pour chaque niveau de surcharge (4 et 5) et pour chaque étape du traitement de l'information.

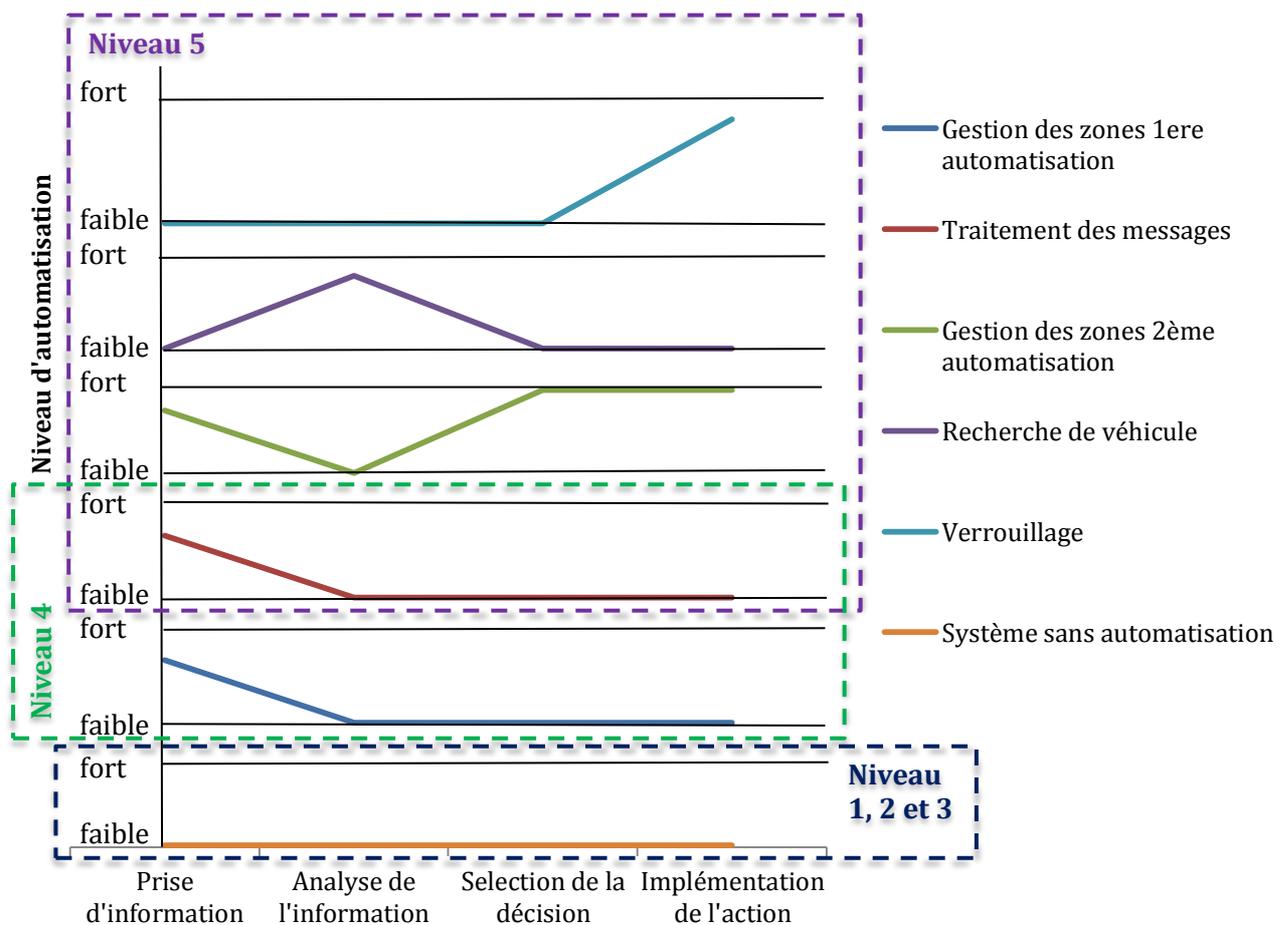


Figure 73 : Niveau d'automatisation sélectionné pour chaque étape du traitement de l'information

Nous avons ici défini une aide à l'opérateur, en modifiant le niveau d'automatisation et la structure de coopération (horizontale ou verticale) en fonction du niveau de charge mentale détectée. La prochaine partie vise à valider de manière expérimentale l'aide proposée.

B. Validation de l'aide à l'opérateur

Nous allons présenter une expérience qui a pour objectif de démontrer que la mesure de la charge mentale permet de piloter une aide à l'opérateur. Les résultats obtenus dans cette expérience (avec aide à l'opérateur) seront comparés aux résultats de la première expérience (sans aide à l'opérateur).

Le diamètre pupillaire n'a pas été pris en compte dans la fusion d'informations en temps réel pour des raisons pratiques. En effet, lors de pré-tests, nous ne sommes pas parvenus à une classification temps réel ({faible, moyen, fort}) stable et répétable pour l'ensemble des participants.

Afin d'éviter une différence interindividuelle importante sur l'indicateur de charge mentale qui aurait amené à un déclenchement des automatisations très variable d'un participant à l'autre, l'allocation dynamique des fonctions a donc été pilotée par un indicateur « dégradé » basé uniquement sur la contrainte, les régulations et la performance et où le diamètre pupillaire est considéré comme indisponible (nous nous retrouvons donc dans le cas classique où la fusion d'informations génère un indicateur malgré l'absence de certaines données).

B.1. Méthode

B.1.1 Participants

Pour respecter une certaine homogénéité avec la première expérience, nous avons fait à nouveau appel à 24 étudiants de 1ère année d'IUT, du département HSE. Nous avons fait appel uniquement à des participants masculins, ayant une bonne pratique de jeux vidéo (contrôlée par un court questionnaire).

B.1.2 Equipement

Les passations ont été réalisées dans une pièce où la luminosité est maîtrisée. Dans cette pièce, un espace a été aménagé pour la réalisation de la tâche. Cet espace est composé (cf. Figure 74) :

- D'un bureau et d'une chaise fixe (pour éviter des mouvements parasites des participants).

- Du simulateur SUSIE : Le simulateur est composé d'un écran (nous utiliserons un écran Compaq LA2405wg 24" de marque HP), d'une souris et d'un ordinateur.
- Du dispositif de mesure :
 - Données oculaires : les données oculaires sont acquises par un eye tracker FaceLAB5 et transférées par FireWire à un ordinateur dédié, puis vers l'ordinateur central pour être traitées en temps réel par le système SUSIE.
 - Données simulateur : Le log (fichier texte) contient les évènements du scénario (nouveau message, nouveau véhicule, etc.), ainsi que toutes les actions des participants enregistrées par les clics de souris.

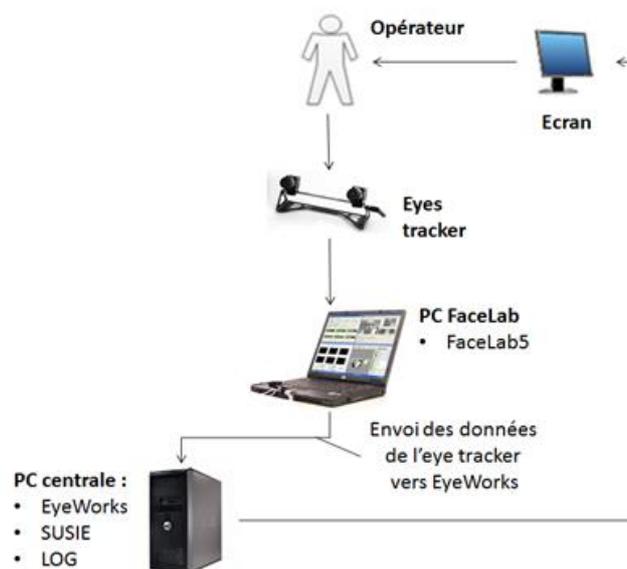


Figure 74 : le dispositif expérimental

B.1.3 Scénario

Le scénario est le même que celui qui a été utilisé lors de la première expérience. Afin d'éliminer l'effet de l'ordre dans lequel les phases sont présentées, les participants ont été répartis en deux groupes : l'un a réalisé d'abord la phase A puis la phase B (difficulté croissante), l'autre a fait le contraire (difficulté décroissante).

B.1.4 Entraînement et consigne

L'entraînement, les consignes et les objectifs sont exactement les mêmes que ceux définis pour la première expérience. Pour rappel : Une phase d'entraînement de 30 minutes a été réalisée. Cette phase est divisée en deux parties : une partie théorique de 10 minutes et une partie pratique de 20 minutes. La phase théorique consiste à présenter le système, donner les

objectifs (**O**) (cf. Tableau 27) et les modes opératoires prescrits (**MOP**) permettant d'atteindre les objectifs. Les modes opératoires les plus complexes étaient prescrits aux participants. La phase pratique a pour but de prendre en main le système. Pendant cette seconde phase, les modes opératoires prescrits étaient régulièrement rappelés aux participants.

Tableau 27 : Objectifs

Objectifs	Description
O1	Neutraliser 25 mobiles en 20 minutes.
O2	Pour chaque message, tracer une zone relative au message moins de deux minutes après l'apparition du message.

B.1.5 Mesures

Nous avons réalisé ici une évaluation de la charge mentale par fusion d'informations (cf. chapitre VII) en temps réel. Pour réaliser cette mesure, nous avons tout d'abord mesuré les informations brutes de bas niveau (cf. chapitre VII) : (CTb, CIb, P1b, P2b, RMOPb et DPb). Ces mesures ont été recueillies à partir du log, sauf l'activité oculaire (DPb) qui a été recueillie par un eyetracker Facelab5.

B.1.6 Hypothèses

Deux hypothèses principales ont été formulées :

Hypothèse 1 : L'aide apportée à l'opérateur aura une incidence sur la performance et sur les régulations de l'opérateur.

- **Hypothèse 1.1 :** Nous nous attendons à ce que la performance soit meilleure dans cette expérience que dans la première expérience.
- **Hypothèse 1.2 :** Nous nous attendons à ce que les modes opératoires soient mieux respectés dans cette expérience que dans la première expérience.
- **Hypothèse 1.3 :** Nous nous attendons à ce que l'opérateur régule plus en fonction des boucles performance/conformité et moins en fonction du coût cognitif dans cette expérience que dans la première expérience.

Hypothèse 2 : L'aide à l'opérateur aura une incidence sur le temps accordé à chaque type de tâches.

Hypothèse 3 : L'aide à l'opérateur aura une incidence sur la charge mentale. Cela peut se diviser en deux points :

- **Hypothèse 3.1 :** Nous nous attendons à ce que le niveau moyen de charge mentale soit plus faible dans l'expérience 2 que dans l'expérience 1.
- **Hypothèse 3.2 :** Nous nous attendons à ce que l'opérateur soit moins souvent en surcharge mentale dans cette expérience que dans l'expérience 1.

- **Hypothèse 3.3 :** Nous nous attendons à ce que les phases de surcharge soient plus courtes dans cette expérience que dans l'expérience 1.

B.2 Résultats

Afin d'analyser les données et d'étudier les effets de l'aide sur l'activité de supervision, nous avons réalisé plusieurs traitements :

- **Mise à l'épreuve de l'hypothèse 1 :** nous avons comparé les données obtenues dans l'expérience 1 avec celles obtenues dans l'expérience 2 sur l'ensemble sur scénario.
- **Mise à l'épreuve de l'hypothèse 2 :** nous avons comparé les données de l'expérience 1 avec celles de l'expérience 2, en découpant les passations en fonction du type de tâche réalisée.
- **Mise à l'épreuve de l'hypothèse 3 :** Pour valider cette hypothèse, nous avons comparé les données de l'expérience 1 avec celles de l'expérience 2, en découpant le scénario en fonction du niveau de charge mentale mesuré, puis en comparant pour un même niveau les données de l'expérience 1 et de l'expérience 2.

Pour tous les traitements présentés ci-dessous, nous avons systématiquement testé la répartition des données à l'aide des tests de Kolmogorov-Smirnov et de Lilliefors. Ces tests nous ont permis d'opter soit pour des tests paramétriques (test de *Student* pour données appariées), soit pour des tests non paramétriques (test de Wilcoxon).

B.2.1 Effet de l'aide sur la performance et sur les régulations

Cette analyse vise à étudier les effets de l'aide sur la performance et sur le comportement de l'opérateur ; elle est relative à l'hypothèse 1.

Sur l'ensemble de cette analyse, les résultats montrent principalement :

- **Un effet de l'aide sur la performance :** l'aide est associée à une augmentation de la performance globale et du pourcentage de véhicules détectés.
- **Un effet de l'aide sur le comportement :** les participants respectent mieux les modes opératoires prescrits avec l'aide. Par ailleurs, les participants ont un comportement basé plus sur la gestion de la performance/conformité et moins sur la gestion du coût avec l'aide.

Ces effets sont détaillés ci-après, dans les sections B2.1.1, B2.1.2 et B2.1.3.

B.2.1.1 Effets de l'aide sur la performance

Nous avons analysé l'effet de l'aide sur les variables P, P1 et P2, ainsi que sur le nombre de neutralisations et le pourcentage de véhicules qui ont été détectés.

Effet de l'aide sur la performance (P) :

Une série de tests de Wilcoxon a été réalisée sur P, P1 et P2 de façon à pouvoir comparer les valeurs moyennes obtenues avec l'aide avec celles obtenues sans l'aide.

Les résultats statistiques ont révélé une augmentation significative de P et de P2 (relative au traitement des messages) avec l'aide (respectivement $Z(45) = 2,061, p < 0,05$ et $Z(45) = 2,094, p < 0,05$). Aucune différence n'a été observée pour P1 (cf. Figure 75).

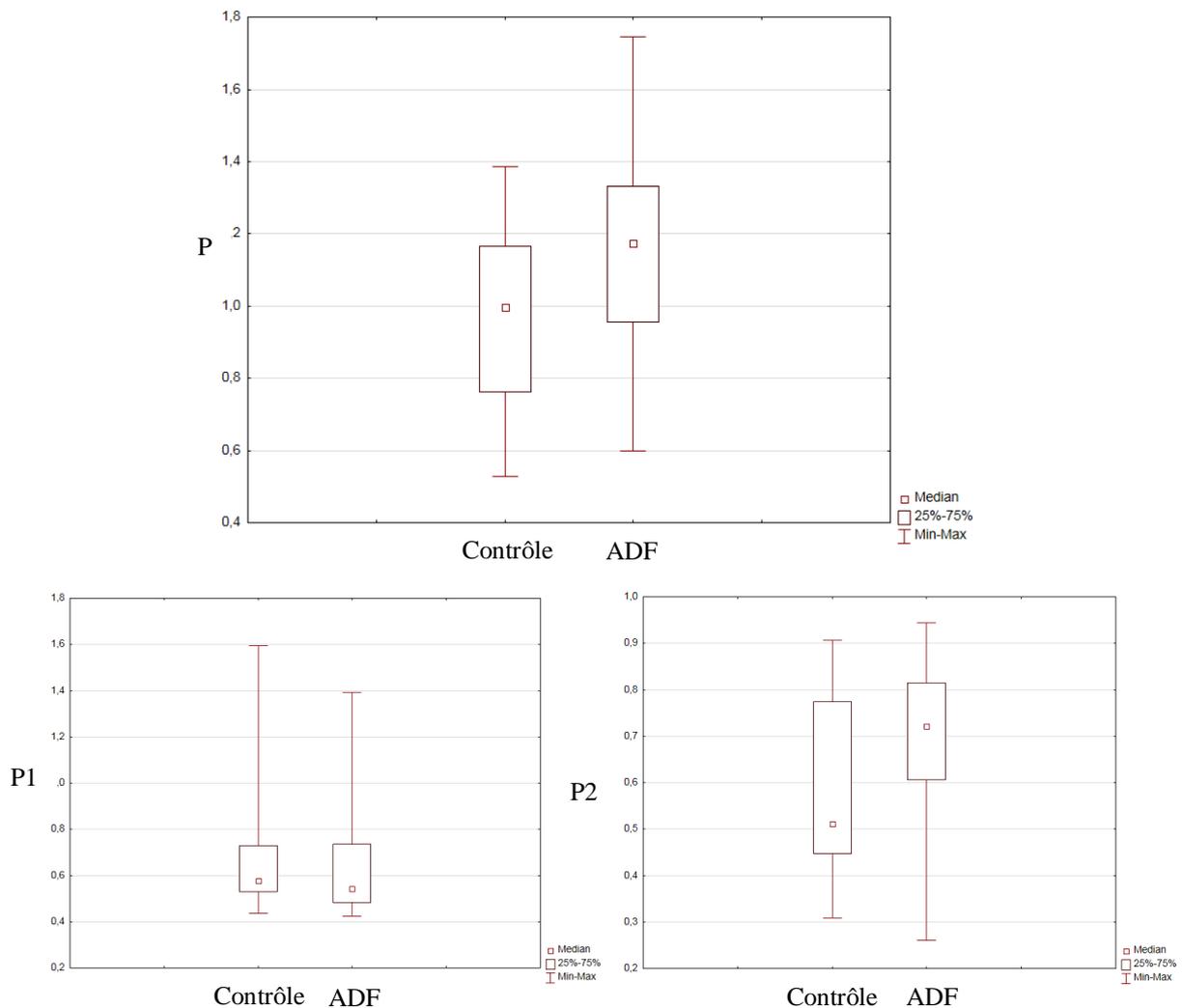


Figure 75 : Effet de l'aide sur la performance relative au traitement des messages (P1), sur la performance relative au traitement de véhicules (P2) et sur la performance globale (P)

Effet de l'aide sur le nombre de neutralisations :

Nous avons ici comparé la valeur moyenne du nombre de neutralisations obtenues avec l'aide avec celles obtenues sans l'aide.

L'analyse statistique réalisée au moyen d'un test de *Student* pour données appariées n'a montré aucun effet.

Effet de l'aide sur le pourcentage de véhicules qui ont été détectés

Un test de Wilcoxon a été réalisé sur le pourcentage de véhicules qui ont été détectés, de façon à pouvoir comparer la valeur moyenne recueillie dans l'expérience 1 avec celle recueillie dans l'expérience 2 (cf. Figure 76).

Les résultats statistiques ont révélé que le pourcentage de véhicules qui ont été détectés est significativement plus élevé avec l'aide ($Z(45) = 3,133, p < 0,01$).

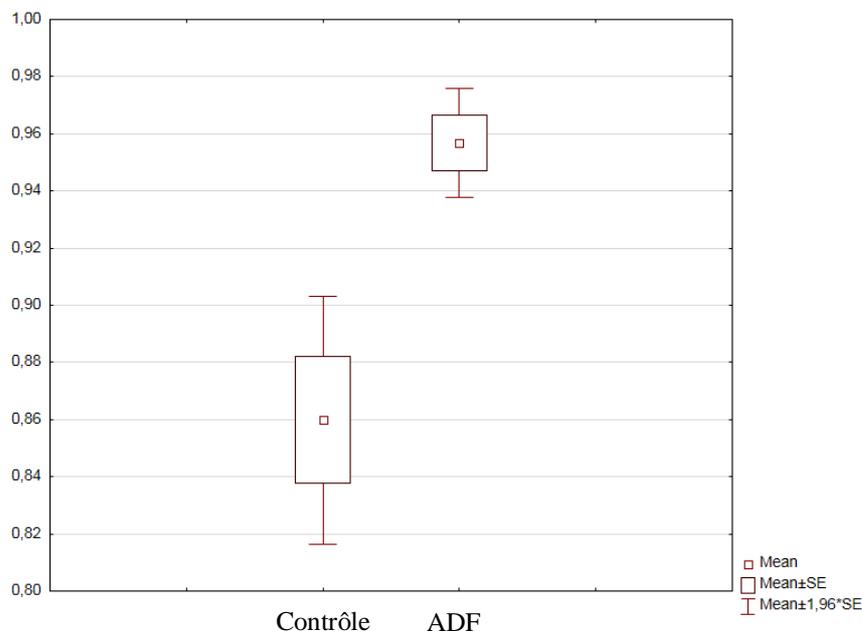


Figure 76 : Effet de l'aide sur le nombre de véhicules qui ont été détectés

B.2.1.2 Effets de l'aide sur le respect des modes opératoires

Cette analyse a pour but d'analyser l'effet de l'aide sur le respect des modes opératoires (RMOP).

L'analyse statistique a été réalisée au moyen d'un test de Wilcoxon sur RMOP. Elle vise à comparer la valeur moyenne des valeurs obtenues avec l'aide avec celles obtenues sans l'aide. Elle a montré que les modes opératoires sont significativement mieux respectés dans l'expérience 2 que dans l'expérience 1 ($Z(45) = 2,126, p < 0,05$) (cf. Figure 77).

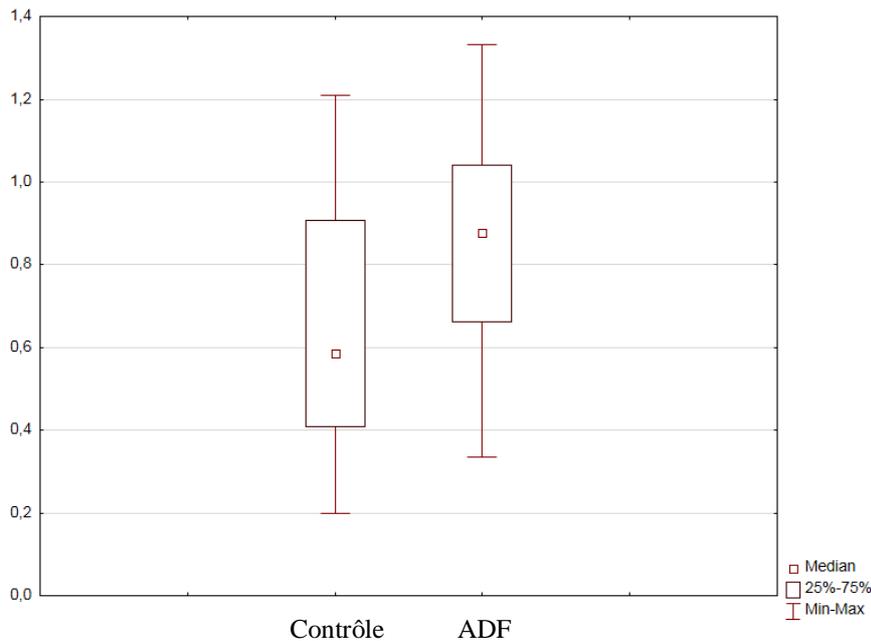


Figure 77 : Effet de l'aide sur le respect de modes opératoires (RMOP)

B.2.1.3 Effets de l'aide sur les régulations

Cette analyse a pour but d'étudier l'effet de l'aide sur les régulations (COMP).

Un test de Wilcoxon réalisé sur la valeur de Comp (variable représentant le comportement des participants et basée sur les mises en œuvre des régulations) montre que le comportement des participants est plus basé sur la gestion de la performance/conformité (RBP et RBC) et moins sur la gestion de la priorité (RBPR) dans l'expérience 2 (avec l'aide) que dans l'expérience 1 et cette différence est significative ($Z(45) = 4,107, p < 0,001$).

B.2.2 Effet de l'aide sur le temps passé par type de tâche.

Chaque tâche a été étudiée séparément. Une série de tests de Wilcoxon a été réalisée sur le temps passé par type de tâche, de façon à pouvoir comparer les valeurs obtenues avec l'aide avec celles obtenues sans l'aide.

Les résultats statistiques ont révélé que les participants consacrent significativement moins de temps aux tâches de traitement des messages et de recherche de véhicule avec l'aide, respectivement : $Z(45) = -2,287, p < 0,05$ et $Z(45) = -2,209, p < 0,05$ (cf. Figure 78).

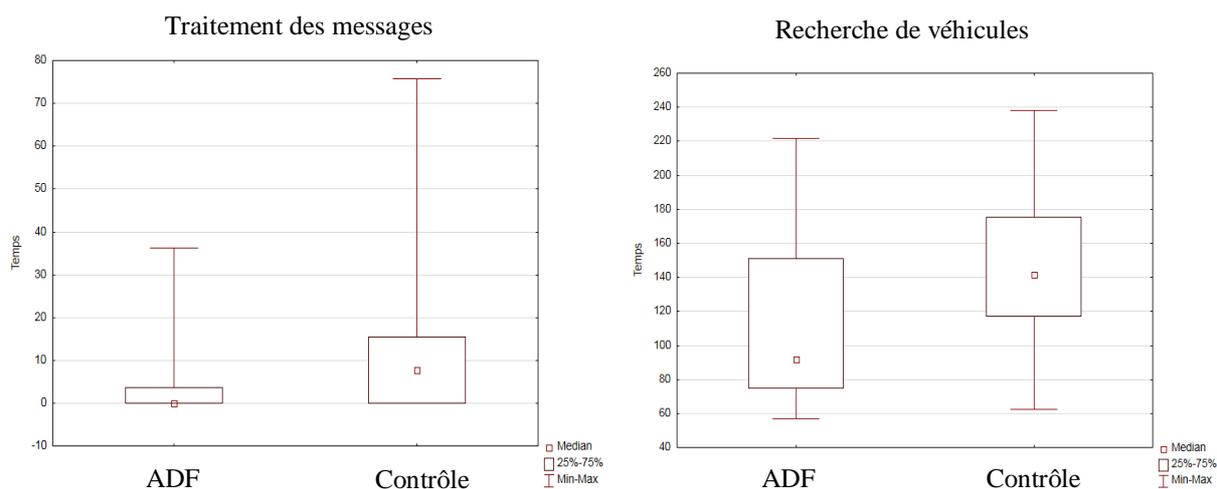


Figure 78 : Effet de l'aide sur le temps consacré aux tâches de traitement des messages et de recherche de véhicule

Aucune différence significative n'a été observée pour les autres tâches, mais une tendance a été observée pour la tâche de traitement des véhicules. Les participants consacrent plus de temps aux tâches de traitement des véhicules avec l'aide ($Z(45) = 1,22, p = 0,22$).

B.2.3 Effet de l'aide sur la charge mentale

Cette analyse vise à étudier les effets de l'aide sur la charge mentale, afin de vérifier l'hypothèse 3. Sur l'ensemble de cette analyse, les résultats montrent principalement :

- **Un effet de l'aide sur la charge mentale** : le niveau de charge mentale est plus élevé avec l'aide que sans l'aide, et les participants passent plus de temps en surcharge (niveau 4+5) avec l'aide.
- **Un effet de l'aide sur la durée moyenne des phases de chaque niveau de charge mentale** : les durées moyenne des phases de niveau 4 suivies d'une phase de niveau 5 et durées moyenne des phases de niveau 4 suivies d'une phase de niveau 3 sont plus courtes avec l'aide.

Ces effets sont détaillés ci-après, dans les sections B2.3.1, B2.3.2 et B2.3.3.

B.2.3.1 Effet de l'aide sur le niveau moyen de charge mentale :

Nous avons ici comparé la valeur moyenne de la charge mentale (CM) obtenue avec l'aide avec celle obtenue sans l'aide. L'analyse statistique réalisée au moyen d'un test de Wilcoxon, a révélé que le niveau moyen de charge mentale est significativement plus élevé avec l'aide ($Z(45) = 2,548, p < 0,05$) (cf. Figure 79).

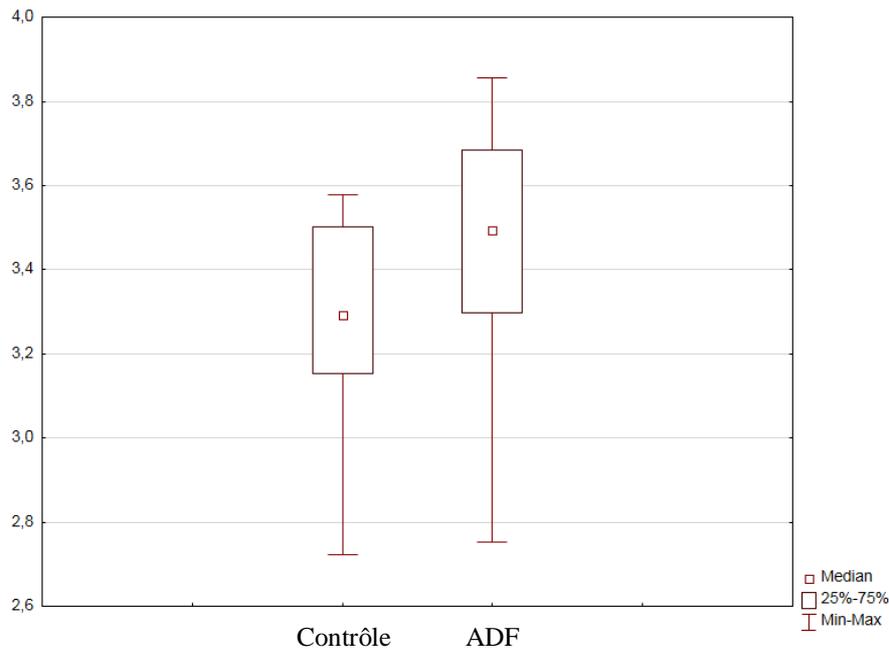


Figure 79 : Effet de l'aide sur la charge mentale (CM)

B.2.3.2 Effet de l'aide sur le temps passé par niveau de charge

Le temps passé par niveau correspond à la somme des durées des phases d'un niveau de charge donné. Nous avons tout d'abord calculé pour chaque participant le temps passé en surcharge, donc au niveau 4+5, nous avons également regardé les niveaux 4 et 5 indépendamment, puis le temps passé en sous charge, donc au niveau 1+2 et le temps au niveau de confort (niveau 3). Nous avons ensuite comparé les valeurs moyennes recueillies dans le cadre de l'expérience avec aide avec celles obtenues dans l'expérience sans aide.

Temps passé en surcharge

Des tests de *Student* pour données appariées ont été réalisés sur le temps moyen passé en surcharge (niveau 4+5), ainsi que sur le temps moyen passé au niveau 4 et au niveau 5 pour comparer les valeurs obtenues avec l'aide avec celles obtenues sans l'aide (cf. Figure 80). Les résultats statistiques ont révélé que les participants passent significativement moins de temps au niveau 4 avec l'aide ($t(45) = 2,22, p < 0,05$).

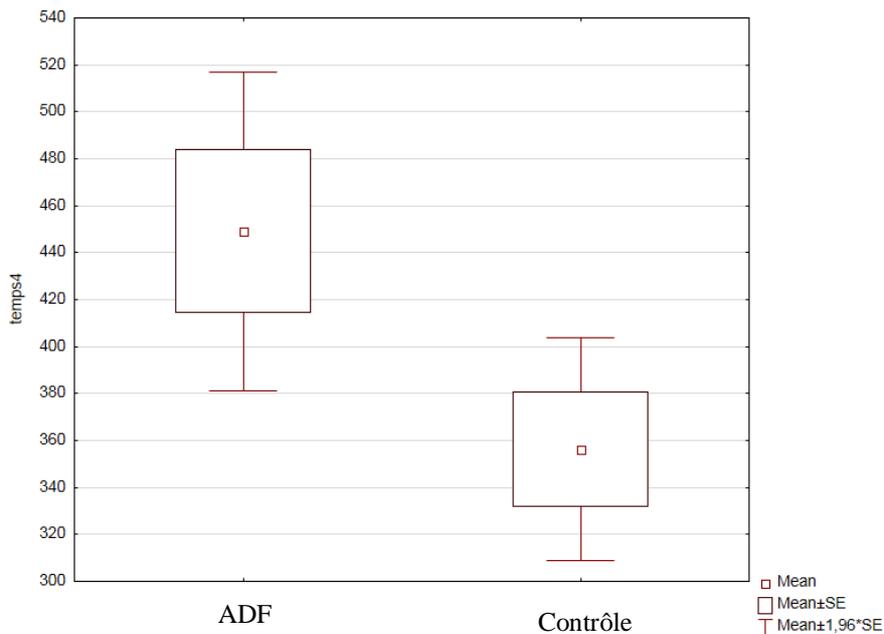


Figure 80: Effet de l'aide sur le temps passé au niveau 4

Aucun effet significatif n'a été observé sur le temps passé au niveau 4+5 et au niveau 5, mais uniquement une tendance pour le temps passé au niveau 5. Les participants passent plus de temps au niveau 5 avec l'aide, $t(45) = -1.71, p = 0,094$.

Temps passé en sous-charge et en zone de confort

Des tests de *Student* pour données appariées ont été réalisés sur le temps passé en sous-charge (niveau 1+2) et en zone de confort (niveau 3) de façon à pouvoir comparer les valeurs moyennes obtenues avec l'aide avec celles obtenues sans l'aide. Aucun effet n'a été observé.

B.2.3.3 Effet de l'aide sur la durée moyenne de chaque niveau.

La durée moyenne de chaque niveau correspond à la somme des durées des phases d'un niveau donné divisé par le nombre de phases d'un niveau donné. Nous avons ici découpé le scénario en fonction du niveau de charge mentale mesuré. Nous avons ensuite calculé la durée moyenne des phases pour chaque niveau de charge mentale, puis nous avons comparé les valeurs obtenues avec l'aide et sans aide. Dans le but de savoir si l'aide permet un retour plus rapide à un niveau de charge mentale acceptable, nous avons comparé la durée moyenne des phases de niveau 4 qui sont suivies d'une phase de niveau 3. De même, dans le but de savoir si l'aide accélère la montée de la charge mentale au niveau 5, nous avons comparé la durée moyenne des phases de niveau 4 qui sont suivies d'une phase de niveau 5.

Niveau 1, 2, 3, 4 et 5

Nous avons comparé les durées moyennes des phases du niveau 1, 2, 3, 4 et 5 avec l'aide avec celles observées sans l'aide. L'analyse statistique réalisée au moyen de tests de Wilcoxon montre que la durée moyenne des phases de niveau 3 est significativement plus courte avec l'aide que sans l'aide ($Z(45) = 2,89, p < 0,01$) (cf. Figure 81).

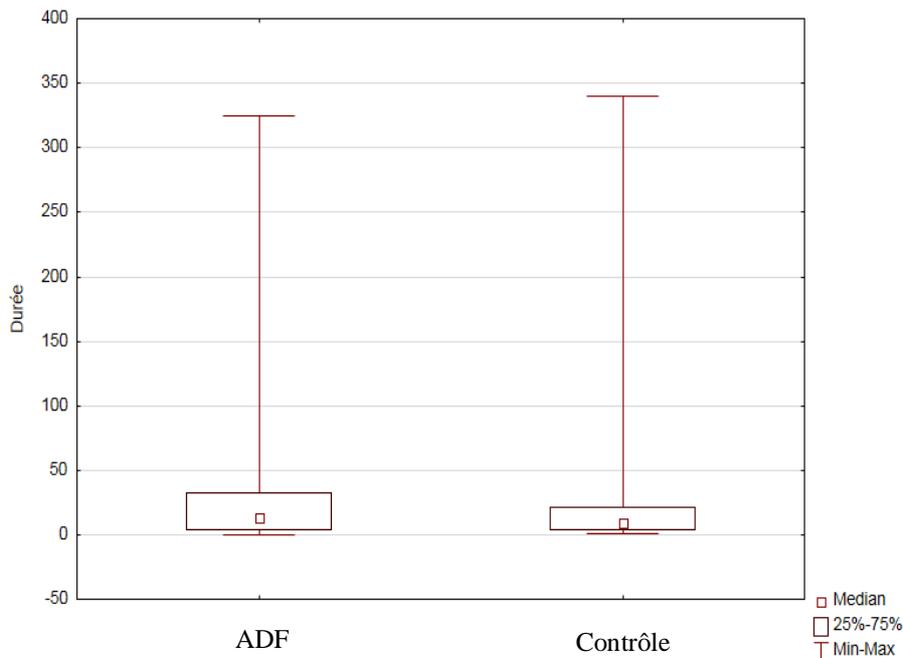


Figure 81 : Effet de l'aide sur la durée moyenne de la phase au niveau 3

Aucun effet significatif de l'aide sur la durée moyenne des phases du niveau 1, 2, 4 et 5 n'a été observé, mais uniquement des tendances pour les phases de niveau 2, 4 et 5. En moyenne, les phases de niveau 4 sont plus courtes avec l'aide ($Z(45) = 1,63, p = 0,102$). Les durées moyennes des phases de niveau 2 et 5 sont plus longues avec l'aide, respectivement $Z(45) = 1,69, p = 0,092$ et $Z(45) = -1,80, p = 0,072$.

Phase de niveau 4 suivie d'une phase de niveau 5 et phase de niveau 4 suivie d'une phase de 3

Une série de tests de Wilcoxon a été réalisée sur la durée moyenne des phases du niveau 4 suivies d'une phase de niveau 3 et des phases de niveau 4 suivies d'une phase de niveau 5. Aucun effet significatif n'a été observé. Seule une tendance a été observée pour les phases de niveau 4 suivies d'une phase de niveau 5. Elles sont en moyenne plus courtes avec l'aide ($Z(45) = -1,65, p = 0,098$).

B.3 Discussion

Nous pouvons émettre deux conclusions principales.

- Premièrement, l'analyse relative à l'hypothèse 1 permet d'obtenir un résultat classique, que l'on retrouve dans de nombreux travaux de la littérature, à savoir que l'allocation dynamique de fonction aide l'opérateur à mieux réguler son activité, ce qui permet d'améliorer la performance globale et facilite le respect des modes opératoires.
- Par ailleurs, les analyses relatives aux hypothèses 2 et 3 montrent que l'aide à l'opérateur modifie la charge de travail (contrainte) et augmente le niveau moyen de charge mentale.

Nous détaillons ci-après ces deux conclusions générales, hypothèse par hypothèse.

L'hypothèse 1 concernant l'effet de l'aide sur la performance et le comportement de l'opérateur a été validée.

L'aide déployée semble aider les participants à mieux réguler leur activité, en les incitant à implémenter les régulations basées sur la performance et sur la conformité. En effet, nous avons observé que les participants ont un comportement qui repose plus sur la gestion de la performance (RBP et RBC) que sur la gestion du coût (RBPR) dans l'expérience 2.

L'automatisation portant sur la prise d'information (pour les tâches de traitement des messages et de gestion de zones) incite les participants à réaliser des tâches qui n'avaient pas été réalisées dans l'expérience 1. La mise en œuvre d'une coopération horizontale et de type augmentative (au niveau 5 de charge mentale) permet de lutter contre la priorisation, en allouant les tâches qui deviennent secondaires à la machine, ce qui explique l'augmentation du respect des modes opératoires et de la performance dans l'expérience 2.

L'aide apportée facilite donc la gestion du compromis cognitif (compromis entre performance/conformité et coût cognitif) et améliore la performance. Ces résultats sont en cohérence avec la littérature. En effet, selon Parasuramam et al. (1992), l'allocation dynamique de fonction permet une meilleure combinaison entre les capacités de l'opérateur et celles de la machine et, selon Kaber et al. (2006), l'aide permet de faciliter le compromis entre demande et ressources.

Selon Cook et al. (1999), l'allocation dynamique de fonctions permet une meilleure performance de l'ensemble du système. Nous avons pu l'observer dans cette expérience. En effet, nous avons observé que la performance globale (P) est meilleure dans l'expérimentation 2. Plus précisément, il semble que l'automatisation mise en œuvre au niveau 5 - qui consiste à

présenter les informations d'un message de manière élaborée - augmente le nombre de messages traités (augmentation de P2). De plus, il semble que l'automatisation de la gestion des zones (portant sur la prise d'information) appliquée au niveau 4, ainsi que l'automatisation portant sur la prise de décision et sur l'implémentation de la solution au niveau 5 de charge mentale, améliorent la gestion des zones, ce qui explique l'augmentation du pourcentage de véhicules détectés.

L'hypothèse **2** concernant l'incidence de l'aide sur le temps passé par type de tâche a été validée.

Selon Wiener (1987), l'automatisation ne réduit pas forcément la charge de travail, mais la modifie. Il semble que l'automatisation mise en œuvre diminue la charge de travail relative aux tâches de traitement des messages et de recherche de véhicule, mais augmente la charge de travail liée à la tâche de traitement des véhicules.

En effet, l'automatisation de l'analyse des informations relative à la tâche de recherche de véhicule permet aux participants de traiter un message sans le lire. L'automatisation consiste à placer une croix rouge sur la carte aux coordonnées du message, les participants peuvent donc traiter le message en traçant une zone à l'emplacement de la croix, sans lire le message. Les participants ont donc moins souvent lu les messages, et ont réalisé moins de recherche de véhicules à partir des informations des messages, ce qui explique la diminution du temps consacré à ces deux tâches.

De plus, les résultats en lien avec l'hypothèse 1 ont montré que le pourcentage de véhicules détectés est plus élevé dans l'expérience 2. Les participants consacrent donc plus de temps à la tâche de traitement des véhicules, pour traiter les véhicules qui n'avaient pas été détectés dans l'expérience 1.

L'hypothèse **3** concernant l'incidence de l'aide sur la charge mentale n'a pas été validée.

L'aide ne permet pas de diminuer la charge mentale, au contraire elle a pour effet de l'augmenter.

Premièrement, il semble que la mise en place d'une coopération verticale au niveau 4 de charge mentale augmente la charge mentale. En effet, l'automatisation portant sur la prise d'informations appliquée aux tâches de gestion de zones et de traitement des messages incite les participants à traiter des tâches qu'ils n'auraient pas traitées sans cela, ce qui a pour conséquence d'augmenter la charge. Ceci explique la diminution de la durée des phases de niveau 4 suivies d'une phase de niveau 5 ; le niveau 5 étant plus rapidement atteint.

Par ailleurs, il semble que l'aide augmente le temps passé en forte surcharge (niveau 5). En effet, nous avons observé que les phases de niveau 5 sont plus longues dans l'expérience 2. L'aide permet d'augmenter le nombre de véhicules détectés, ce qui oblige ensuite les participants à les neutraliser ; cette dernière tâche prenant du temps, la contrainte reste élevée plus longtemps que dans l'expérience 1.

C. Conclusion

La deuxième expérience présentée dans ce chapitre conduit à dégager différentes conclusions.

D'un point de vue théorique, cette expérimentation montre qu'un indicateur de charge mentale créé par fusion d'informations permet de piloter une réallocation de fonctions. Nous avons observé que l'aide pilotée à partir de l'indicateur de charge mentale aide les participants à mieux réguler leur activité et améliore, in fine, la performance et le respect des modes opératoires prescrits.

Au niveau méthodologique, nous avons montré l'intérêt de fusionner plusieurs indicateurs des trois dimensions de la charge mentale. Cette technique permet d'avoir une mesure complète de la charge mentale. De plus, cette expérimentation montre l'utilité de créer un indicateur discriminé suivant les cinq niveaux de l'échelle ISA ; il constitue un indicateur fin de la charge mentale. Disposer d'une mesure fine de la charge mentale permet d'apporter plusieurs niveaux d'aide en fonction du niveau détecté. Nous avons ainsi mis en œuvre deux structures de coopération différentes, en fonction de ce niveau.

Cependant, la fusion d'informations réalisée par réseaux bayésiens ne permet pas de prendre en compte la dynamique de la situation. L'utilisation de réseaux bayésiens dynamiques permettrait de mieux capter la dynamique de la situation et d'anticiper une surcharge mentale. Le recours à cette méthode permettrait d'améliorer l'aide, en assistant l'opérateur dès qu'une surcharge est anticipée.

Enfin, d'un point de vue pratique, nous pouvons remarquer que le système SUSIE permet l'implémentation de solutions d'automatisation portant sur toutes les étapes du traitement de l'information. Nous avons donc pu mettre en œuvre différents types de coopération (verticale et horizontale), ce qui permet d'apporter une aide adaptée en fonction du niveau de charge mentale détecté. L'activité de supervision de drones sur le système SUSIE apparaît donc comme un cadre intéressant pour mener des études sur l'allocation dynamique de fonctions.

Résumé

Définition d'une aide pilotée par l'indicateur de charge mentale.

Dans ce chapitre nous avons proposé une allocation dynamique de fonction pilotée à partir de l'indicateur synthétique de charge mentale proposé au chapitre VII. Cet indicateur de charge mentale se divise en cinq niveaux correspondant aux niveaux de l'échelle ISA.

Les niveaux 4 et 5 traduisent une surcharge mentale, c'est donc à ces niveaux que nous avons apporté une aide. Il s'agit, au niveau 4, d'une coopération verticale ; l'automatisation ne porte alors que sur la prise d'information. Au niveau 5, la coopération est horizontale et les solutions d'automatisation portent sur les quatre étapes du processus de traitement de l'information.

Évaluation de la proposition d'aide.

Les résultats ont montré que l'allocation dynamique de fonction aide l'opérateur à mieux réguler son activité, ce qui permet d'améliorer la performance globale et facilite le respect des modes opératoires. Mais l'aide à l'opérateur modifie également la charge de travail. Elle semble diminuer la charge de travail imposée par la tâche de traitement des messages et par la tâche de recherche de véhicule alors qu'elle entraîne une augmentation de la charge de travail imposée par la tâche de traitement des messages. Enfin, l'aide ne permet pas de diminuer le niveau moyen de charge mentale, mais l'augmente au contraire.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce manuscrit aborde la problématique suivante : comment estimer la maîtrise de la situation par l'opérateur en temps réel, de façon à déclencher - si nécessaire - une assistance "cognitive" qui l'aide à maintenir ou à reprendre le contrôle ?

Une revue de la littérature nous a permis de sélectionner la charge mentale comme déterminant principal de la maîtrise des situations dynamiques. Pour maintenir la maîtrise de la situation, l'opérateur adapte son comportement au moyen de mécanismes qui recouvrent différentes stratégies caractérisées par des coûts cognitifs plus ou moins importants (Hoc et al., 2004). L'opérateur gère donc un rapport entre les contraintes de la situation et ses capacités cognitives ; il s'agit du compromis cognitif défini par Amalberti (1996). En situation de surcharge mentale, l'opérateur peut ne plus être en mesure de gérer ce compromis cognitif et risque de perdre la maîtrise de la situation. La charge mentale a donc un effet direct sur la maîtrise de la situation.

L'objectif du travail réalisé dans le cadre de cette thèse a donc été de créer un indicateur synthétique de charge mentale, mesurable « on-line », qui servira ensuite à piloter une réallocation des fonctions en temps réel ; ceci, pour permettre à l'opérateur de mieux réguler sa charge mentale, et de garder ou récupérer la maîtrise de la situation. Ces travaux sont appliqués à l'activité de supervision d'un essaim de drones étudiée sur une plateforme de simulation (la plateforme SUSIE).

Dans un premier temps, nous avons réalisé une analyse du domaine de travail et des tâches de l'opérateur, afin de définir et d'identifier des indicateurs de charge mentale qui soient propres à l'activité de supervision d'un essaim de drones. Ces indicateurs ont été validés ou rejetés, en fonction de leur sensibilité à la charge mentale, lors d'une première expérimentation. Les résultats de cette expérimentation ont montré que le diamètre pupillaire est l'indicateur physiologique le plus sensible aux variations de la charge mentale, et que l'observation des régulations permet une mesure sensible de la charge mentale. Les indicateurs sélectionnés ont ensuite été fusionnés par réseaux bayésiens et logique floue pour générer un indicateur synthétique de la charge mentale. Cet indicateur de charge mentale a été créé en se basant sur l'échelle ISA (cinq niveaux), dans le but d'obtenir une estimation fine et sensible pour chaque

dimension de la charge mentale. Nous avons ensuite conçu une allocation dynamique des fonctions déclenchée à partir de l'indicateur synthétique de charge mentale. Suivant le niveau de charge mentale détectée, nous avons mis en œuvre des automatisations de différentes natures portant sur les quatre fonctions du processus de traitement de l'information, ainsi que deux structures de coopération. Au niveau 4 (surcharge modérée), nous avons mis en œuvre une coopération de type vertical, où l'aide n'est qu'informatrice, dans le but d'améliorer la représentation de la situation de l'opérateur. Au niveau 5 (forte surcharge), l'opérateur est dépassé et beaucoup de tâches ne sont plus réalisées, nous avons donc choisi de mettre en œuvre une coopération de type horizontal, où le système peut prendre et exécuter des décisions. Nous avons validé l'aide en réalisant une deuxième expérimentation (avec l'aide) et en comparant les résultats avec ceux obtenus lors de la première expérimentation (sans aide). Nous avons observé que l'aide facilite la régulation de l'activité de l'opérateur, ce qui permet d'améliorer la performance et le respect des modes opératoires. De plus, l'aide modifie la charge de travail (contrainte), mais ne permet pas de diminuer la charge mentale proprement dite. Cette aide a pour but d'assister l'opérateur quand une surcharge mentale est détectée ; elle intervient donc en cas de surcharge mentale mais ne permet pas de l'éviter.

Contributions théoriques

La plupart des approches cherchant à estimer la charge mentale se focalisent sur des observables liés aux conséquences de cette charge sur l'opérateur et la tâche ; elles utilisent des mesures physiologiques et/ou des mesures de la performance. Pour Cegarra et Chevalier (2008) aucune mesure de la charge mentale ne peut prétendre mesurer parfaitement la charge mentale. Ces auteurs considèrent donc qu'il est nécessaire de combiner différentes mesures pour améliorer la qualité (sensibilité, sélectivité, diagnostic) de l'indicateur de charge mentale. Schulte et al. (2015) proposent une triple approche de la charge mentale. Cette approche se base sur une évaluation objective de la contrainte (travail imposé à l'opérateur) et sur la performance de l'opérateur, sur l'activité réalisée par l'opérateur et la demande en ressource qui lui est associée, et enfin sur les régulations de l'activité. C'est dans ce cadre que s'inscrit cette thèse. Nous proposons de compléter l'estimation de la charge mentale (basée sur l'activité physiologique et sur la performance) par une contextualisation de la charge (en observant les contraintes de la tâche) et par une observation du comportement des opérateurs (en observant les régulations mises en œuvre par l'opérateur). En combinant le modèle de Hart et Staveland (1988) et celui de Sperandio (1971), nous avons proposé un modèle tridimensionnel de la charge mentale. Ce modèle suggère d'étudier la charge mentale en

réalisant trois analyses : une analyse des causes (contraintes), une analyse des médiateurs (régulation de l'activité de l'opérateur) et une analyse des conséquences de la charge mentale (état de l'opérateur et performance). La prise en compte de ces trois dimensions permet d'avoir une représentation complète de la charge mentale.

Nous avons également proposé une modélisation du comportement de l'opérateur basé sur les régulations de l'activité mises en œuvre. A partir des boucles de régulations identifiées par Sperandio (1971) et par Leplat (2006), nous avons identifié trois critères de régulations : efficacité, pertinence et efficience, ainsi que quatre boucles de régulations : la régulation basée sur la performance (efficacité), sur la conformité par rapport aux consignes prescrites (pertinence), sur la priorité (pertinence) et sur le coût cognitif (efficience). Pour observer ces régulations, nous avons proposé une grille d'évaluation basée sur des mesures objectives de l'exigence de la tâche, de la performance, et du respect des modes opératoires.

Partant de l'hypothèse que l'opérateur régule son activité à partir de son évaluation de la situation, l'observation des boucles de régulations devrait nous permettre d'approcher cette évaluation.

Ces deux modélisations ont été validées lors de la première expérience. En effet, nous avons observé un effet de la contrainte sur le comportement (sur le respect des modes opératoires et sur les régulations), sur l'état de l'opérateur et sur la performance, ainsi qu'un effet des régulations sur l'état de l'opérateur et sur la performance.

Contributions méthodologiques

D'un point de vue méthodologique, nous avons proposé une démarche de création d'aides à l'opérateur basée sur une estimation de la charge mentale. Cette démarche se divise en quatre étapes, que nous retrouvons d'une certaine manière dans la structure du manuscrit, aussi bien dans la partie théorique que dans la partie empirique.

1. **Analyse du domaine de travail – identification des descripteurs** : la première étape consiste à réaliser une analyse du domaine de travail et des tâches de l'opérateur, afin de définir et d'identifier les observables pour les trois dimensions de la charge mentale. Cette analyse s'appuie sur la méthodologie définie par Sperandio (1988).
2. **Validation des observables pertinents pour la charge mentale** : la seconde étape vise à réaliser une analyse de l'activité de l'opérateur, en menant une expérimentation pour observer les relations existant entre chaque dimension et pour valider ou exclure

les indicateurs identifiés dans l'étape 1, en fonction de leur sensibilité à la charge mentale.

3. **Génération d'indicateurs de charge mentale par fusion d'informations :** la troisième étape a pour objectif de créer, sur plusieurs niveaux, différents indicateurs de charge mentale par fusion d'informations. Cela conduit ainsi à l'obtention d'une évaluation des différentes dimensions (contrainte, régulation et performance/état physiologique) de la charge mentale, mais aussi à la génération d'un indicateur synthétique unique, qui permet d'approcher la maîtrise de la situation de l'opérateur. Cette fusion d'informations peut être réalisée en utilisant la théorie des probabilités et, plus précisément, les réseaux bayésiens. Cette solution permet de converger vers un singleton et rend possible une modélisation graphique. Lors de cette étape, nous avons également proposé une méthode de validation de ces indicateurs, reposant sur une comparaison entre les informations générées à partir de mesures objectives et une évaluation subjective de la charge ressentie par les opérateurs. Cette validation se divise en deux étapes : une nouvelle analyse des données de la première expérience d'une part et une comparaison entre données objectives et subjectives d'autre part. La première étape permet notamment de vérifier qu'il n'y a pas d'aberrations dans les tables de probabilités. La seconde étape permet de vérifier le fait que les mesures objectives sont proches de ce que ressent l'opérateur.
4. **Conception d'une allocation dynamique des fonctions à partir des indicateurs de charge mentale :** finalement, la quatrième étape permet de concevoir et de valider une allocation dynamique des fonctions visant à aider l'opérateur à maintenir ou à améliorer sa maîtrise de la situation. Cette aide est déclenchée à partir de l'indicateur synthétique de charge mentale précédemment créé.

Nous avons appliqué cette démarche à une activité particulière, celle de supervision d'un essaim de drones. Il convient cependant de souligner le fait que cette démarche peut être appliquée à toute activité de supervision de système dynamique.

Contributions pratiques

L'activité de supervision d'un essaim de drones (sur le simulateur SUSIE) constitue un cas pratique pertinent pour traiter la problématique. En effet, l'activité de supervision d'un essaim de drones est une activité à fortes contraintes temporelles, où l'opérateur ne contrôle pas

entièrement le système. Le risque de perdre le contrôle de la situation est donc bien présent. De plus, le système SUSIE présente différents avantages :

- Il permet de faire varier le niveau de contrainte (en faisant varier la fréquence d'apparition de nouveaux véhicules et de nouveaux messages), ce qui nous a permis de créer un scénario avec une phase de contrainte faible et une phase de contrainte forte, et donc de faire varier le niveau de charge mentale de l'opérateur.
- Il permet également une évaluation objective de la contrainte, de la performance, ainsi que l'observation de différentes stratégies de régulation de l'activité.
- Et enfin, le système SUSIE permet des automatisations sur toutes les étapes du traitement de l'information. Nous avons donc pu mettre en œuvre différents types de coopération (verticale et horizontale), ce qui permet d'apporter une aide en fonction du niveau de charge mentale détecté.

L'activité de supervision de drone sur le système SUSIE constitue donc un cadre intéressant pour mener des études sur la charge mentale.

Néanmoins, ces contributions doivent être remises dans le contexte de notre étude, et il convient de souligner les limites inhérentes à ce contexte. L'énoncé de ces limites conduit à définir des perspectives dans lesquelles pourraient s'inscrire des travaux de recherche complémentaires.

Limites et perspectives méthodologiques

Le premier axe, méthodologique, concerne la fusion d'informations. Trois points principaux sont ici à souligner.

Premièrement, la fusion d'informations a été réalisée par réseaux bayésiens, or cette méthode ne permet pas de prendre en compte la dynamique de la situation. Une perspective d'évolution serait de mettre en œuvre un réseau bayésien dynamique qui permettrait de mieux considérer cet aspect. Ce type de réseau permettrait d'anticiper une surcharge mentale et donc d'agir par allocation dynamique et anticipée de fonctions, de façon à apporter une assistance précoce à l'opérateur.

Par ailleurs, les tables de probabilités ont été élaborées empiriquement, à partir de notre expertise. Une autre piste d'amélioration consisterait à utiliser l'apprentissage pour créer ces

tables. Ce point d'amélioration fait actuellement objet de travaux menés par le Lab-STICC en partenariat avec Dassault aviation. Ce projet, auquel je contribue, fait suite aux travaux présentés dans ce manuscrit. Le principal objectif est proche de celui de cette thèse, qui est de détecter des états de l'opérateur qui pourraient amener à une perte de maîtrise de la situation. Dans ce projet, de l'apprentissage supervisé est réalisé sur les données physiologiques (fréquence cardiaque et diamètre pupillaire), au moyen d'algorithmes d'apprentissage comme le Knn (k-nearest neighbors), le SVM (Support Vector Machine) et le random forest. L'apprentissage supervisé est réalisé à partir d'une évaluation objective de la contrainte. De plus, l'état de l'opérateur n'est pas détecté uniquement à partir d'une mesure de charge mentale, mais également à partir de mesures de sous-vigilance, de fatigue, et de perte d'anticipation. Ce projet est réalisé sur une nouvelle version de SUSIE.

Pour ce projet, une nouvelle expérimentation sera mise en place dans laquelle nous réaliserons une mesure subjective de la charge mentale, similaire à celle présentée au chapitre VII. Les données recueillies nous permettront de répéter la seconde validation de l'indicateur de charge mentale créé au chapitre VII. Nous avons comparé la mesure de l'indicateur de charge mentale avec une mesure subjective pour six participants. La prochaine expérimentation sera menée auprès d'une vingtaine de personnes.

Limites et perspectives pratiques

Le second axe concerne le domaine d'application.

Le système SUSIE porte sur une activité émergente, et constitue un micromonde virtuel dont la validité écologique pourrait être questionnée. Il n'y a pas d'opérateur expert, ce qui limite notamment l'étude des régulations. En effet, un opérateur expert ne régule pas son activité de la même manière qu'un opérateur novice. C'est sûrement pour cela que nous n'avons pas ou peu observé la mise en œuvre de la boucle de régulation basée sur le coût. Par ailleurs, par souci de simplification des scénarios proposés aux participants, nous n'avons défini que deux stratégies alternatives à mettre en œuvre pour chaque tâche.

Il serait donc intéressant d'appliquer la démarche de conception d'aide préconisée dans un domaine où il existe des opérateurs experts, et sur une activité et dans un environnement plus « naturels », où il y aurait par exemple plus de deux stratégies alternatives pour réaliser une même tâche, comme le contrôle aérien, ou la conduite de voiture. Appliquer la méthode proposée sur un tel système permettrait notamment d'affiner la modélisation théorique des boucles de régulations.

Bibliographie

- Amalberti, R. (1996). *La conduite de systèmes à risques: le travail à l'hôpital*. Paris : PUF.
- Amalberti, R. (2007). Ultrasécurité. Une épée de Damoclès pour les hautes technologies. *Sciences à risques. Les dossiers de la recherche*, 26, 74-81.
- Anderson, J. R., Lebiere, C., Lovett, M., & Reder, L. (1998). ACT-R: A higher-level account of processing capacity. *Behavioral and Brain Sciences*, 21(06), 831-832.
- Andreassi, J. L. (2013). *Psychophysiology: Human behavior & physiological response*. New York: Erlbaum.
- Annett, J. & Duncan, K. D. (1967). Task analysis and training design. *Occupational Psychology*, 12, 211–221.
- Arad, B. A. (1964). *Notes on the measurement of control load and sector design in the enroute environment*. Washington, DC: Federal Aviation Administration.
- Baddeley, A. D., & Hitch, G. (1974). Working memory. *Psychology of learning and motivation*, 8, 47-89.
- Badham, R., Clegg, C., & Wall, T. (2000). Socio-technical theory. *Handbook of Ergonomics*. New York: John Wiley.
- Bailey, R. W. (1989). *Human performance engineering: Using human factors/ergonomics to achieve computer system usability*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Bainbridge, L. (1981). Le contrôleur de processus. *Bulletin de Psychologie*, 34, 813- 832.
- Bainbridge, L. (1983). Ironies of automation. *Automatica*, 19(6), 775-779.
- Barnes, M., Parasuraman, R., & Cosenzo, K. (2006). Adaptive automation for military robotic systems. *NATO Technical Report RTO-TR-HFM-078: Uninhabited military vehicles. Human factors issues in augmenting the force* 420–440.
- Barrouillet, P. (1996). Ressources, capacités cognitives et mémoire de travail: postulats, métaphores et modèles: La charge mentale. *Psychologie française*, 41(4), 319-338.
- Barry, R. J., Clarke, A. R., McCarthy, R., Selikowitz, M., & Rushby, J. A. (2005). Arousal and activation in a continuous performance task. *Journal of psychophysiology*, 19(2), 91-99.
- Baxter, G., & Sommerville, I. (2011). Socio-technical systems: From design methods to systems engineering. *Interacting with computers*, 23(1), 4-17.
- Beatty, J. (1982). Task-Evoked Pupillary Responses, Processing Load, and the Structure of Processing Resources. *Psychological Bulletin* 91(2), 276–92.

- Beatty, J., & Lucero-Wagoner, B. (2000). The pupillary system. *Handbook of psychophysiology*, 2, 142-162.
- Billings, C. E. (1997). *Aviation automation: The search for a human-centered approach*. Hillsdale, N.J.: Lawrence Erlbaum Associates.
- Bloch, I., & Maître, H. (1994). Fusion de données en traitement d'images : modèles d'information et décisions. *Traitement du Signal*, 11(6), 435-446.
- Bloch, I. (2003). Fusion d'informations en traitement du signal et des images. *Hermes Science Publication*, Paris, France .
- Boag, C., Neal, A., Loft, S., & Halford, G. S. (2006). An analysis of relational complexity in an air traffic control conflict detection task. *Ergonomics*, 49(14), 1508-1526.
- Boonnithi, S., & Phongsuphap, S. (2011). Comparison of heart rate variability measures for mental stress detection. In *Computing in Cardiology* (pp. 85-88). Hangzhou, China.
- Boucsein, W. (1992). *Electrodermal Activity*. New York, NY: Plenum Press.
- Boudes, N. (1997). *L'anticipation dans le contrôle des environnements dynamiques: le cas du contrôle du trafic aérien* (Unpublished doctoral dissertation). Université de Toulouse 2, Toulouse, France.
- Bouguelid, M. S. (2007). *Contribution à l'application de la reconnaissance des formes et la théorie des possibilités au diagnostic adaptatif et prédictif des systèmes dynamiques*. (Unpublished doctoral dissertation), Université de Reims Champagne-Ardenne, Reims France.
- Burns, J. M. (1978). *Leadership*. New York: Harper and Row Publishers.
- Byers, J. C., Bittner, A. C., & Hill, S. G. (1989). Traditional and raw task load index (TLX) correlations: Are paired comparisons necessary. *Advances in industrial ergonomics and safety I*, 481-485.
- Cannon, J., Krokhmal, P. A., Chen, Y., & Murphey, R. (2012). Detection of temporal changes in psychophysiological data using statistical process control methods. *Computer methods and programs in biomedicine*, 107(3), 367-381.
- Carpenter, Roger HS. 1988. *Movements of the Eyes 2nd Rev*. London : Pion Limited.
- Castelfranchi, C. (1998). Modelling social action for AI agents. *Artificial Intelligence*, 103(1), 157-182.
- Ceder, A. (1977). Drivers' eye movements as related to attention in simulated traffic flow conditions. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 19(6), 571-581.

- Cegarra, J., & Chevalier, A. (2008). The use of Tholos software for combining measures of mental workload: Toward theoretical and methodological improvements. *Behavior Research Methods*, 40(4), 988-1000.
- Cegarra, J., (2012). *De la gestion de la complexité à son assistance : contribution en psychologie ergonomique* (Unpublished habilitation à diriger des recherches). Université de Toulouse II - Le Mirail, Toulouse, France.
- Chanquoy, L., Tricot, A., & Sweller, J. (2007). *La charge cognitive: Théorie et applications*. Paris: Armand Colin.
- Chatterji, G., & Sridhar, B. (2001). Measures for air traffic controller workload prediction. *1st AIAA, Aircraft, Technology Integration, and Operations Forum* 52_42.
- Chen, S., & Epps, J. (2014). Using task-induced pupil diameter and blink rate to infer cognitive load. *Human-Computer Interaction*, 29(4), 390-413.
- Chi, C. F., & Lin, F. T. (1997). A new method for describing search patterns and quantifying visual load using eye movement data. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 19(3), 249-257.
- Chorley, R. J. (1962). *Geomorphology and general systems theory*. Washington, DC: US Government Printing Office.
- Chu, H. N., Glad, A., Simonin, O., Sempe, F., Drogoul, A., & Charpillet, F. (2007). Swarm approaches for the patrolling problem, information propagation vs. pheromone evaporation. In *19th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI 2007)* (pp. 442-449).
- Clarion, A. (2009). *Recherche d'indicateurs électrodermiques pour l'analyse de la charge mentale en conduite automobile* (Unpublished doctoral dissertation), Université Claude Bernard-Lyon I, Lyon, France.
- Collet, C., Deschaumes-Molinaro, C., Delhomme, G., Dittmar, A., & Vernet-Maury, E. (1994). Autonomic responses correlate to motor anticipation. *Behavioural brain research*, 63(1), 71-79.
- Cook, C., Corbridge, C., Morgan, C., & Turpin, E. (1999). Investigating methods of dynamic function allocation for naval command and control. *Human Interfaces in Control Rooms, Cockpits and Command Centres*, 388-393.
- Coppin, G., & Legras, F. (2012). Controlling Swarms of Unmanned Vehicles through User-Centered Commands. *AAAI Fall Symposium: Human Control of Bioinspired Swarms*, 21-25.

- Crawford, P. M., Engelsman, M., Brown, S. W., Rentmeester, T. W., Pedersen, B., Clarke, C. E., & Trenite, D. K. N. (1993). Tiagabine: phase II study of efficacy and safety in adjunctive treatment of partial seizures. *Epilepsia*, *34*, 182.
- Critchley, H. D. (2002). Book review: electrodermal responses: what happens in the brain. *The Neuroscientist*, *8*(2), 132-142.
- Cummings, M. L., Bruni, S., Mercier, S., & Mitchell, P. J. (2007). Automation architecture for single operator, multiple UAV command and control. *The International C2 Journal*, *1*, 1-24.
- Cummings, M. L., & Guerlain, S. (2007). Developing operator capacity estimates for supervisory control of autonomous vehicles. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *49*(1), 1-15.
- Cummings, M. L., Nehme, C. E., Crandall, J., & Mitchell, P. (2007). Predicting operator capacity for supervisory control of multiple UAVs. In *Innovations in Intelligent Machines-1* (pp. 11-37). Berlin: Springer.
- Dawson, M. E., Schell, A. M., & Fillion, D. L. (2007). The electrodermal system. *Handbook of psychophysiology*, *2*, 200-223.
- Dearden, A., Harrison, M., & Wright, P. (2000). Allocation of function: scenarios, context and the economics of effort. *International Journal of Human-Computer Studies*, *52*(2), 289-318.
- Debernard, S. (1993). *Contribution à la répartition dynamique de tâches entre opérateur et système automatisé: application au contrôle du trafic aérien* (Unpublished doctoral dissertation) Université de valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, Valenciennes, France.
- Debernard, S., & Hoc, J. M. (2001). Designing Dynamic Human-Machine Task Allocation in Air Traffic Control: Lessons Drawn From a Multidisciplinary Collaboration. *Usability evaluation and Interface design: Cognitive Engineering, Intelligent Agents and Virtual Reality*, *1*, 1440-1444.
- Dehais, F., Causse, M., & Pastor, J. (2008, March). Embedded eye tracker in a real aircraft: new perspectives on pilot/aircraft interaction monitoring. *Proceedings from The 3rd International Conference on Research in Air Transportation*. Fairfax, USA: Federal Aviation Administration.
- Delignières, D., & Deschamps, T. (2000). L'effort mental. In: D. Delinières (Ed.), *L'effort* (pp. 25-40). Paris: Edition Revue EPS.

- De Greef, T., Lafeber, H., van Oostendorp, H., & Lindenberg, J. (2009, July). Eye movement as indicators of mental workload to trigger adaptive automation. In: *International Conference on Foundations of Augmented Cognition* (pp. 219-228). Berlin Heidelberg: Springer.
- De Waard, D. (1996). *The measurement of drivers' mental workload* (Unpublished doctoral dissertation). University of Groningen, Groningen, Netherlands.
- Dijkstra, J. J. (1999). User agreement with incorrect expert system advice. *Behaviour & Information Technology*, 18(6), 399-411.
- Di Stasi, L. L., Marchitto, M., Antolí, A., Baccino, T., & Cañas, J. J. (2010). Approximation of on-line mental workload index in ATC simulated multitasks. *Journal of Air Transport Management*, 16(6), 330-333.
- Dixon, S. R., Wickens, C. D. (2003). Control of Multiple-UAVs: A Workload Analysis. *Proceedings of the 12th International Symposium on Aviation Psychology*, 1-5.
- Dixon, S. R., Wickens, C. D., & Chang, D. (2005). Mission control of multiple unmanned aerial vehicles: A workload analysis. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 47(3), 479-487.
- Dubois, D., & Prade, H. (1985). A review of fuzzy set aggregation connectives. *Information sciences*, 36, 85-121.
- Dubois, D. and Prade, H. (1993). Fuzzy Sets and Probability: Misunderstandings, Bridges and Gaps. *Proceedings of the Second IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, 1059-1068.
- Dunlap, R. D. (2006). The evolution of a distributed command and control architecture for semi-autonomous air vehicle operations. *Moving Autonomy Forward Conference*, 107-123.
- Durkee, K. T., Pappada, S. M., Ortiz, A. E., Feeney, J. J., & Galster, S. M. (2015). System decision framework for augmenting human performance using real-time workload classifiers. *IEEE International Multi-Disciplinary Conference on Cognitive Methods in Situation Awareness and Decision*, 8-13.
- Hon, E. H., & Lee, S. T. (1963). Electronic evaluation of the fetal heart rate. VIII. patterns preceding fetal death, further observations. *American journal of obstetrics and gynecology*, 87, 814-826.
- Emery, F. E., & Trist E. L., (1960). *Socio-Technical Systems. Management Sciences, Models and Techniques*. Churchman CW et Al. London: Pergamon.

- Endsley, M. R. (1988, May). Situation awareness global assessment technique (SAGAT). *Aerospace and Electronics Conference*, 789-795.
- Endsley, M. R., Selcon, S. J., Hardiman, T. D., & Croft, D. G. (1998, October). A comparative analysis of SAGAT and SART for evaluations of situation awareness. *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting*, 42, (82-86).
- Endsley, M. R., & Kaber, D. B. (1999). Level of Automation Effects on Performance Situation Awareness and Workload in a Dynamic Environment. *Ergonomics*, 42(3), 462-492.
- Endsley, M. R. (1999). Level of automation effects on performance, situation awareness and workload in a dynamic control task. *Ergonomics*, 42(3), 462-492.
- Engström, J., Johansson, E., & Östlund, J. (2005). Effects of visual and cognitive load in real and simulated motorway driving. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 8(2), 97-120.
- Ephrath, A. R., & Young, L. R. (1981). Monitoring vs. man-in-the-loop detection of aircraft control failures. . In: J. Rasmussen and W. B. Rouse (Eds.), *Human detection and diagnosis of system failures* (pp. 143-154). New York: Plenum
- Falzon, P. (2013). Pour Une Ergonomie Constructive. *Ergonomie Constructive*, 1–15.
- Fine, S. A., & Wiley, W. W. (1971). An introduction to functional job analysis: a scaling of selected tasks from the social welfare field. In: e. A. Fleishman & R. A. Bass (Eds.), *Studies in personnel and industrial psychology*, Homewood, IL: Irwin.
- Fitts, P. M. (1951). *Human engineering for an effective air-navigation and traffic-control system*. Washington, DC: National Research Council
- Flament, C. (1965). *Théorie des graphes et structures sociales*. Paris: Mouton-Gauthier-Villars.
- Fuld, R. B. (2000). The fiction of function allocation, revisited. *International Journal of Human-Computer Studies*, 52(2), 217-233.
- Gadat, S. (2012). *Seance 3: Liaisons entre variables Analyse des individus*. Laboratoire de Statistique et Probabilités.
- Galley, N. (1989). Saccadic eye movement velocity as an indicator of (de) activation. A review and some speculations. *Journal of Psychophysiology*, 3(3), 229-244.
- Galley, N. (1993). The evaluation of the electrooculogram as a psychophysiological measuring instrument in the driver study of driver behaviour. *Ergonomics*, 36(9), 1063-1070.

- Gawron, V. J. (1998). Human factors issues in the development, evaluation, and operation of uninhabited aerial vehicles. In: *Proceedings of the Association for Unmanned Vehicle Systems International* (pp. 431-438). Arlington, VA: AUVSI.
- Georgé, J. P., Gleizes, M. P., & Glize, P. (2003). Conception de systèmes adaptatifs à fonctionnalité émergente: la théorie Amas. *Revue d'intelligence artificielle*, 17(4), 591-626.
- Gil, S. (2009). Comment étudier les émotions en laboratoire. *Revue électronique de psychologie sociale*, 4, 15-24
- Gladwell, M. (2008). *Outliers: The Story of Success*. New York: Little Brown.
- Goldberg, J. H., & Kotval, X. P. (1999). Computer interface evaluation using eye movements: methods and constructs. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 24(6), 631-645.
- Grau, J. Y., Hourlier, S. & Amalberti, P. R (2000). Quelle Assistance pour la Gestion des Missions Tactiques? A Propos du Projet Copilote Electronique. *Symposium of RTO HFh4 on « Usability of Information in Battle Management Operation »*, Oslo, Norway.
- Greef, T., Lafeber, H., van Oostendorp, H., & Lindenberg, J. (2009, July). Eye movement as indicators of mental workload to trigger adaptive automation. *International Conference on Foundations of Augmented Cognition*, 219-228.
- Guerin, C., Leroy, B., Chauvin, C., & Coppin, G. (2014). Task analysis from the expert point of view: a prerequisite condition to analyse physiological activity of fighter pilot aircraft. *Poster presented at HFES Europe*.
- Guillevic, C., & Chiva, M. (1999). *Psychologie du travail*. Paris: Nathan.
- Hall, D. L., & Llinas, J. (1997). An introduction to multisensor data fusion. *Proceedings of the IEEE*, 85(1), 6-23.
- Hancock, P. A. & Williams, G. (1993). Effect of task load and task load increment on performance and workload. In: R. S. Jensen (Ed.), *Seventh International Symposium on Aviation Psychology* (pp. 328-334). Columbus: Ohio.
- Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. In: Hancock P. A. and Meshkati N. (Eds), *Advances in Psychology* (pp. 139-83). North-Holland : Human Mental Workload.
- Hassas, S. (2003). *Systèmes complexes à base de multi-agents situés* (Unpublished Habilitation à Diriger les Recherches). Université de Lyon 1, Lyon, France.

- Hastrup, J. L. (1979). Effects of electrodermal lability and introversion on vigilance decrement. *Psychophysiology*, *16*(3), 302-310.
- Henrion, M. (1988). Propagation of uncertainty by probabilistic logic sampling in Bayes' networks. *Uncertainty in Artificial Intelligence*, *2*, 149-164.
- Hilburn, B., Jorna, P. G., Byrne, E. A., & Parasuraman, R (1997). The effect of adaptive air traffic control (ATC) decision aiding on controller mental workload. In: M. Mouloua and J. Koonce (Eds), *Human-automation interaction: Research and practice* (pp 84–91). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Hilburn, B., (2004). "Cognitive Complexity in Air Traffic Control: A Literature Review." Eurocontrol Experimental Research Centre. EEC Note No. 04/04.
- Hildebrandt, M., & Harrison, M. (2003). Putting time (back) into Dynamic Function Allocation. *Proceedings of HFES*, 488-492.
- Hoc, J. M. (1996). *Supervision et contrôle de processus: la cognition en situation dynamique*. Grenoble: PUG.
- Hoc, J. M., & Lemoine, M. P. (1998). Cognitive evaluation of human-human and human-machine cooperation modes in air traffic control. *The International Journal of Aviation Psychology*, *8*(1), 1-32.
- Hoc, J. M. (1988). *Cognitive psychology of planning*. London: Academic Press.
- Hoc, J. M. (2001). Towards a cognitive approach to human-machine cooperation in dynamic situations. *International journal of human-computer studies*, *54*(4), 509-540.
- Hoc, J. M., & Debernard, S. (2002). Respective demands of task and function allocation on human-machine co-operation design: a psychological approach. *Connection science*, *14*(4), 283-295.
- Hoc, J. M. (2003). Coopération humaine et systèmes coopératifs. *Ingénierie cognitive. IHM et cognition*, 139-187.
- Hoc, J. M., Amalberti, R., Cellier, J. M., & Grosjean, V. (2004). Adaptation et gestion des risques en situation dynamique. In J. M. Hoc & F. Darses (Eds.), *Psychologie ergonomique : tendances actuelles* (pp. 15-48). Paris, France: Presses Universitaires de France.
- 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.
- Hoc, J.M., & Chauvin, C. (2011). *Cooperative implications of the allocation of functions to humans and machines*. IRCCyN, Nantes, France.

- Hockey, G. R. J. (2003). Operator functional state as a framework for the assessment of performance degradation. *Nato science series sub serie I life and behavioral sciences*, 355, 8-23.
- Hollnagel, E., & Woods, D. D. (1983). Cognitive systems engineering: New wine in new bottles. *International Journal of Man-Machine Studies*, 18(6), 583-600.
- Holmqvist, K., Nyström, M., Andersson, R., Dewhurst, R., Jarodzka, H., & Van de Weijer, J. (2011). *Eye tracking: A comprehensive guide to methods and measures*. Oxford: University Press.
- Inagaki, T. (2003). Automation and the cost of authority. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 31(3), 169-174.
- Imbert, J. P., Hurter, C., Peysakhovich, V., Blättler, C., Dehais, F., & Camachon, C. (2015). Design Requirements to Integrate Eye Trackers in Simulation Environments: Aeronautical Use Case. In: *Intelligent Decision Technologies* (pp. 231-241). Springer International Publishing.
- Iqbal, S. T., Zheng, X. S., & Bailey, B. P. (2004, April). Task-evoked pupillary response to mental workload in human-computer interaction. *Proceedings of the ACM conference on human factors in computing systems*, 1477-1480.
- Iwata, K., Onda, M., Sano, M., & Komoriya, K. (2007). UAV for Small Cargo Transportation. *AIAA Infotech Aerospace 2007 Conference and Exhibit*, 1-6.
- Ji, Q., Lan, P., & Looney, C. (2006). A probabilistic framework for modeling and real-time monitoring human fatigue. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics-Part A: Systems and humans*, 36(5), 862-875.
- Jobard, R., (2014). *Les drones: La nouvelle révolution*. Eyrolles. Eyrolles.
- Johnson, C. (2003). Inverting the control ratio: Human control of large, autonomous teams. *International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems: Workshop on Humans and Multi-Agent Systems*.
- Jordan, N. (1963). Allocation of functions between man and machines in automated systems. *Journal of applied psychology*, 47(3), 161.
- Kaber, D. B., Omal, E., & Endsley, M. (1999). Level of automation effects on telerobot performance and human operator situation awareness and subjective workload. *Automation technology and human performance: Current research and trends*, 165-170.

- Kaber, D. B., & Endsley, M. R. (2004). The effects of level of automation and adaptive automation on human performance, situation awareness and workload in a dynamic control task. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 5(2), 113-153.
- Kaber, D. B., Perry, C. M., Segall, N., McClernon, C. K., & Prinzel, L. J. (2006). Situation awareness implications of adaptive automation for information processing in an air traffic control-related task. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 36(5), 447-462.
- Kahneman, D., (1973). *Attention and Effort*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Klein, G., Calderwood J., and Zsombok, C. (1993). *Decision Making in Action : Models and Methods*. Norwood, NJ: Ablex.
- Knowles, W. B. (1963). Operator loading tasks. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 5(2), 155-161.
- Kopardekar, P., & Magyarits, S. (2003, June). Measurement and prediction of dynamic density. *Proceedings of the 5th USA/Europe Air Traffic Management R & D Seminar*, 139.
- Kovanis, A. P., Skaperdas, V., & Ekaterinaris, J. A. (2011). Design and analysis of a light cargo UAV prototype. *Journal of Aerospace Engineering*, 25(2), 228-237.
- Kramer, A. F. (1991). Physiological metrics of mental workload: A review of recent progress. *Multiple-task performance*, 279-328.
- Lexicon, D. F. (1992). *Data fusion subpanel of the joint directors of laboratories technical panel for 3*. San Diego, CA: FE White, Code, 4202.
- Lagu, A. V., & Landry, S. J. (2011). Roadmap for the next generation of dynamic function allocation theories and strategies. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 21(1), 14-28.
- Lassalle, J., (2013). *Etude de l'influence de la qualité audiovisuelle sur la qualité d'expérience du spectateur : Combinaison d'indicateurs subjectifs, physiologiques et oculaires* (Unpublished doctoral dissertation). Télécom Bretagne, Brest, France.
- Lassalle, J., Rauffet, P., Leroy, B., Guillet, L., Chauvin, C., & Coppin, G. (2014). Innovative multi-sensors device deployment for fighter pilots activity study in a highly realistic Rafale simulator. In: D. de Waard, J. Sauer, S. Röttger, A. Kluge, D. Manzey, C. Weikert, A. Toffetti, R. Wiczorek, K. Brookhuis, and H. Hoonhout (Eds.). *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Europe Chapter 2014 Annual Conference*, Lisbon, Portugal.

- Lauri, F., & Charpillat, F. (2006). Ant colony optimization applied to the multi-agent patrolling problem. *IEEE Swarm Intelligence Symposium*.
- Lauritzen, S. L., & Spiegelhalter, D. J. (1988). Local computations with probabilities on graphical structures and their application to expert systems. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 157-224.
- Lavie, N., Hirst, A., De Fockert, J. W., & Viding, E. (2004). Load theory of selective attention and cognitive control. *Journal of Experimental Psychology: General*, 133(3), 339.
- Legras, F., Glad, A., Simonin, O., & Charpillat, F. (2008). Partage d'autorité dans un essaim de drones auto-organisé. *16es Journées Francophones des Systèmes Multi-Agents-JFSMA'08*.
- Le Moigne, J.L., & Orillard, M. (1990). Systemique et Complexité. *Revue Internationale de Systemique*, 4, 189.
- Leplat, J. (1977). Les facteurs déterminant la charge de travail. *Le Travail humain*, 40, 195-202.
- Leplat, J., & Hoc J. M. (1983). Tâche et activité dans l'analyse psychologique des situations. In: *Cahiers de Psychologie Cognitive*, 3(1), 49-63.
- Leplat, J. (1985). *Erreur humaine, fiabilité humaine dans le travail*. Paris: Armand Colin.
- Leplat, J. (1989). Les Habiletés Cognitives Dans Le Travail. In: P. Perruchet (Eds.), *Les automatismes cognitifs*. Bruxelles : Editions Mardaga.
- Leplat, J. (2006). La notion de régulation dans l'analyse de l'activité, *PISTES*, 8(1). Récupéré le 1er septembre 2013 du site : <http://www.pistes.uqam.ca/v8n1/pdf/v8n1a7.pdf>.
- Lewis, M., Polvichai, J., Sycara, K., & Scerri, P. (2006). 17. Scaling-up Human Control for Large UAV Teams. In: N. Cooke, H. Pringle, H. Pedersen, and O. Connor (Eds), *Human factors of remotely operated vehicles* (pp 237-250). New York: Elsevier.
- Malik, M., Bigger J. T., Camm A. J., Kleiger R. E., Malliani A., Moss A. J., & Schwartz P. J. (1996). Heart Rate Variability. *European Heart Journal*, 17(3), 354-81.
- Martin, A. (2005). La fusion d'informations. *Polycopié de cours ENSIETA, Réf : 1484*, 117.
- Martin, C. (2013). *La gestion de la charge mentale des contrôleurs aériens en-route: apports de l'eye-tracking dans le cadre du projet européen SESAR* (Unpublished Doctoral dissertation). Université Toulouse le Mirail-Toulouse II, Toulouse, France.
- Masson, M. H. (2005). *Apports de la théorie des possibilités et des fonctions de croyance à l'analyse de données imprécises* (Unpublished Doctoral dissertation). Université de Technologie de Compiègne, Compiègne, France.

- May, J. G., Kennedy, R. S., Williams, M. C., Dunlap, W. P., & Brannan, J. R. (1990). Eye movement indices of mental workload. *Acta psychologica*, 75(1), 75-89.
- McGregor, D. K., & Stern, J. A. (1996). Time on task and blink effects on saccade duration. *Ergonomics*, 39(4), 649-660.
- Mechraoui, A., Thiriet, J. M., & Gentil, S. (2010). Aide à la décision et diagnostic par réseaux bayésiens d'un robot mobile commandé en réseau. *Sixième Conférence Internationale Francophone d'Automatique*.
- Meister, D., (1976). *Behavioral Foundations of System Development*. England: John Wiley & Sons.
- Mélèze, J. (1972). *L'analyse Modulaire Des Systèmes*. Paris: Les éditions d'organisation.
- Meshkati, N. (1988). Toward Development of a Cohesive Model of Workload. In: P. Hancock & N. Meshkati (Eds), *Advances in Psychology*, (pp. 305–14). North-Holland: Human Mental Workload.
- Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychological review*, 63(2), 81.
- Miller, C. A., & Parasuraman, R. (2007). Designing for flexible interaction between humans and automation: Delegation interfaces for supervisory control. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 49(1), 57-75.
- Millot, P. (1999). Systèmes homme-machine et automatique. *Journées Doctorales d'Automatique*, 1-24.
- Moray, N. (1979). *Mental Workload: Its Theory and Measurement*. New York: Plenum Publishing Corporation.
- 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: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 50(1), 1-16.
- Morel, G., Chauvin, C., Rossi, A., & Berruet, P. (2008). Concevoir des Systèmes Sociotechniques Complexes Résilients et Reconfigurables pour Garantir un Niveau de Sécurité Optimal. *ERGO IA 2008*.
- 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.
- Mosier, K. L., Skitka, L. J., Heers, S., & Burdick, M. (1998). Automation bias: Decision making and performance in high-tech cockpits. *The International journal of aviation psychology*, 8(1), 47-63.

- Mulder, G. (1986). The concept and measurement of mental effort. In G.R.J. Hockey, A.W.K. Gaillard & M.G. H Coles (Eds.), *Enrrgerics and Human Infbrmation Processing*. Dordrecht: Martinus Nijhoff.
- Müller, J. P. (2002). *Des systèmes autonomes aux systèmes multi-agents: Interaction, émergence et systèmes complexes* (Unpublished Doctoral dissertation), Université Libre de Bruxelles, Bruxelles, Belgique.
- Naïm, P., Wuillemain, P. H., Leray, P., Pourret, O., & Becker, A. (2011). *Réseaux bayésiens*. Paris: Eyrolles.
- Nakayama, M., Takahashi, K., & Shimizu, Y. (2002). The act of task difficulty and eye-movement frequency for the'Oculo-motor indices'. *Proceedings of the 2002 symposium on Eye tracking research & applications*, 37-42.
- Neapolitan, R. E. (2004). *Learning bayesian networks* (Vol. 38). Upper Saddle River: Prentice Hall.
- Noel, J. B., Bauer, K. W., & Lanning, J. W. (2005). Improving pilot mental workload classification through feature exploitation and combination: a feasibility study. *Computers & operations research*, 32(10), 2713-2730.
- Older, M. T., Waterson, P. E., & Clegg, C. W. (1997). A critical assessment of task allocation methods and their applicability. *Ergonomics*, 40(2), 151-171.
- Orchard, L. N., & Stern, J. A. (1991). Blinks as an index of cognitive activity during reading. *Integrative Physiological and Behavioral Science*, 26(2), 108-116.
- Pomranky, R. A., & Wojciechowski, J. Q. (2007). *Determination of mental workload during operation of multiple unmanned systems* (No. ARL-TR-4309). Army research lab Aberdeen proving ground md human research and engineering directorate.
- Parasuraman, R., Bahri, T., Deaton, J. E., Morrison, J. G., & Barnes, M. (1992). *Theory and design of adaptive automation in aviation systems*. Washington DC: Catholic univ of America, cognitive science Lab.
- Parasuraman, R. (1993). Effects of adaptive function allocation on human performance. *Human factors and advanced aviation technologies*, 147-157.
- Parasuraman, R., Sheridan, T. B., & Wickens, C. D. (2000). A model for types and levels of human interaction with automation. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics-Part A: Systems and Humans*, 30(3), 286-297.
- Parasuraman, A., & Grewal, D. (2000). The impact of technology on the quality-value-loyalty chain: a research agenda. *Journal of the academy of marketing science*, 28(1), 168-174.

- Parasuraman, R., Barnes, M., Cosenzo, K., & Mulgund, S. (2007). *Adaptive automation for human-robot teaming in future command and control systems*. Army research lab aberdeen proving ground md human research and engineering directorate.
- Paubel, P. V. (2011). *Évaluation d'un système de résolution de conflits, ERASMUS: apport de l'oculométrie comme mesure de la charge mentale chez les contrôleurs aériens en-route*. (Unpublished doctoral dissertation). Université Toulouse II, Toulouse, France.
- Piaget, J. (1974). *Adaptation vitale et psychologie de l'intelligence*. Paris: Hermann.
- Piolat, A., Olive, T., Roussey, J. Y., Thunin, O., & Ziegler, J. C. (1999). SCRIPTKELL: A tool for measuring cognitive effort and time processing in writing and other complex cognitive activities. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 31(1), 113-121.
- Pribram, K. H., & McGuinness, D. (1975). Arousal, activation, and effort in the control of attention. *Psychological review*, 82(2), 116.
- Rauffet, P., Chauvin, C., Morel, G., & Berruet, P. (2015, July). Designing sociotechnical systems: a CWA-based method for dynamic function allocation. *Proceedings of the European Conference on Cognitive Ergonomics 2015*, 21. ACM.
- Rasmussen, J. (1986). *Information Processing and Human/Machine Interaction: an Approach to Cognitive Engineering*. New York: North-Holland.
- Reason, J. (1988). Cognitive aids in process environments: prostheses or tools? In E. Hollnagel, G. Mancini, & D.D. Woods (Eds.), *Cognitive engineering in complex dynamic worlds* (pp. 7-14). London: Academic Press.
- Reason, J. (1990). *L'erreur Humaine*. Paris: PUF.
- Reason, J. (1997). *Managing the risks of organizational accidents*. Aldershot, UK: Ashgate.
- Recarte, M. Á., Pérez, E., Conchillo, Á., & Nunes, L. M. (2008). Mental workload and visual impairment: Differences between pupil, blink, and subjective rating. *The Spanish journal of psychology*, 11(02), 374-385.
- Recarte, M. A., & Nunes, L. M. (2000). Effects of verbal and spatial-imagery tasks on eye fixations while driving. *Journal of experimental psychology: Applied*, 6(1), 31.
- Reynaud, R. (1994). La fusion des données, du capteur au raisonnement. *Traitement du Signal*, 11(6), 431-434.
- Ricquebourg, V., Durand, D., Menga, D., Delahoche, L., Marhic, B., Logé, C., & Jolly-Desodt, A. M. (2008). La fusion multi-capteurs dans l'habitat communicant: une approche non-probabiliste. *Proceedings of the 4th French-speaking conference on Mobility and ubiquity computing*, 9-16.

- Rouchouze, C. (1994). Fusion de données: exemples Défense et axes de recherche. *TS. Traitement du signal*, 11(6), 459-464.
- Rouse, W. B., & Rouse, S. H. (1983). *A framework for research on adaptive decision aids*. Technical Report AFAMRL-TR-83-082. Wright-Patterson Air Force Base, OH: Air Force Aerospace Medical Research Laboratory.
- Rosnay, J. DE. (1975). *Le Macroscopie: Vers Une Vision Globale*. Paris, Editions Du.
- Ross, D. T. (1977). Structured analysis (SA): A language for communicating ideas. *IEEE Transactions on software engineering*, 1, 16-34.
- Royer, V. (1994). Partage de croyances: condition nécessaire pour un système coopératif. *Systèmes Coopératifs de la Modélisation a la Conception*, 253-270.
- Ruff, H. A., Narayanan, S., & Draper, M. H. (2002). Human interaction with levels of automation and decision-aid fidelity in the supervisory control of multiple simulated unmanned air vehicles. *Presence: Teleoperators and virtual environments*, 11(4), 335-351.
- Ruff, H. A., Calhoun, G. L., Draper, M. H., Fontejon, J. V., & Guilfoos, B. J. (2004). Exploring automation issues in supervisory control of multiple UAVs. *Proceedings of the Human Performance, Situation Awareness, and Automation Technology Conference*, 218-222.
- Salembier, P., & Pavard, B. (2004). Analyse et modélisation des activités coopératives situées. Évolutions d'un questionnaire et apports à la conception. *Activités*, 1(1-1).
- Sanders, A. (1983). Towards a model of stress and human performance. *Acta psychologica*, 53(1), 61-97.
- Santana, H., Ramalho, G., Corruble, V., & Ratitch, B. (2004). Multi-agent patrolling with reinforcement learning. *Proceedings of the Third International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, 1122-1129.
- Sarter, N. B., & Woods, D. D. (1992, October). Mode error in supervisory control of automated systems. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 26-29.
- Scerbo, M. W. (1996). Theoretical perspectives on adaptive automation. In: R. Parasuraman & M. Mouloua (Eds.), *Automation and human performance: Theory and applications* (pp.37-63). Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Scerbo, M.W. (2007). Adaptive automation. In: Parasuraman, R, Rizzo, M. (Eds.) *Neuroergonomics: The brain at work* (pp.239-252). Oxford: Oxford University Press.

- Schmidt, K., Rasmussen, J., Brehmer, B., & Leplat, J. (1991). Cooperative work: A conceptual framework. *Distributed decision-making: Cognitive models for cooperative work*, 75-110.
- Segal, L. D., & Wickens, C. D. (1990). Taskillan II: Pilot strategies for workload management. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 66-70.
- Sequeira, H., & D'Hondt, F. (2013). Chapitre 6. L'activité électrodermale dans l'étude de la cognition. *Psycho Sup*, 137-156.
- Schulte, A., Donath, D., & Honecker, F. (2015). Human-System Interaction Analysis for Military Pilot Activity and Mental Workload Determination. *Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, 1375-1380.
- Shachter, R. D., & Peot, M. A. (1989). Simulation approaches to general probabilistic inference on belief networks. *Proc. of UAI*, 311-318.
- Sharkey, N. (2010). Saying 'no!' to lethal autonomous targeting. *Journal of Military Ethics*, 9(4), 369-383.
- Shaw, I. S. (1993). Fuzzy model of a human control operator in a compensatory tracking loop. *International journal of man-machine studies*, 39(2), 305-332.
- Sheridan, T. B., & Verplank, W. L. (1978). *Human and computer control of undersea teleoperators*. Massachusetts inst of tech Cambridge man-machine systems lab.
- Sheridan, T. B., & Stassen, H. G. (1979). Definitions, models and measures of human workload. In: Moray N. (Ed), *Mental Workload* (pp. 219-233). Springer US.
- Sheridan, T. B. (1988). Task allocation and supervisory control. In: M. Helander (Ed.), *Handbook of human-computer interaction* (pp. 159- 174). Amsterdam: North-Holland.
- Shiffrin, R. M., & Atkinson, R. C. (1969). Storage and retrieval processes in long-term memory. *Psychological Review*, 76(2), 179.
- Shiffrin, R. M., & Schneider, W. (1977). Controlled and automatic human information processing: II. Perceptual learning, automatic attending and a general theory. *Psychological review*, 84(2), 127-190.
- Siddle, D. A. (1991). Orienting, habituation, and resource allocation: An associative analysis. *Psychophysiology*, 28(3), 245-259.
- Smets, P. (1989). Constructing the Pignistic Probability Function in a Context of Uncertainty. In: R. P., Srivastava, (ed.), *Belief Functions in Business Decisions*. Heidelberg: Physica-Verlag.

- Smets, P. (1990). The combination of evidence in the transferable belief model. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 12(5), 447-458.
- Smets, P. (1997). Imperfect information: Imprecision and uncertainty. In: A. Motro and P. Smets, (Eds.). *Uncertainty Management in Information Systems*. Berlin: Springer-Verlag.
- Smith, P. J., McCoy, C. E., & Layton, C. (1997). Brittleness in the design of cooperative problem-solving systems: The effects on user performance. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, 27(3), 360-371.
- Sorin, J. L., & Lesage, Y. (2003). Projet de surveillance du trafic routier par drones. *Journées Micro-Drones*.
- Sperandio, J. C. (1971). Variation of operator's strategies and regulating effects on workload. *Ergonomics*, 14(5), 571-577.
- Sperandio, J. C. (1977). La régulation des modes opératoires en fonction de la charge de travail chez les contrôleurs de trafic aérien. *Le Travail Humain*, 249-256.
- Sperandio, J. C. (1988). *L'ergonomie du travail mental*. Paris: Masson.
- Stern, R. M., Ray, W. J., & Quigley, K. S. (2001). *Psychophysiological recording*. Oxford : Oxford University Press.
- Sweller, J., & Chandler, P. (1991). Evidence for cognitive load theory. *Cognition and instruction*, 8(4), 351-362.
- Tatler, B. W., & Vincent, B. T. (2008). Systematic tendencies in scene viewing. *Journal of Eye Movement Research*, 2, 1-18.
- Tecce, J. J. (1992). Psychology, physiology and experimental. *McGraw-Hill. Yearbook of Science and Fechnology*, 375-377.
- Tricot, A., & Chanquoy, L. (1996). La charge mentale, "vertu dormitive" ou concept opérationnel?: La charge mentale. *Psychologie française*, 41(4), 313-318.
- Tsai, Y. F., Viirre, E., Strychacz, C., Chase, B., & Jung, T. P. (2007). Task performance and eye activity: predicting behavior relating to cognitive workload. *Aviation, space, and environmental medicine*, 78, B176-B185.
- Vanderhaegen, F. (1999). Cooperative system organisation and task allocation: illustration of task allocation in air traffic control. *Le Travail Humain*, 197-222.
- Vanderhaegen, F. (2012). Cooperation and learning to increase the autonomy of ADAS. *Cognition, Technology & Work*, 14(1), 61-69.

- Van Orden, K. F., Limbert, W., Makeig, S., & Jung, T. P. (2001). Eye activity correlates of workload during a visuospatial memory task. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 43(1), 111-121.
- Veltman, J. A., & Gaillard, A. W. K. (1996). Physiological indices of workload in a simulated flight task. *Biological psychology*, 42(3), 323-342.
- Veltman, J. A., & Gaillard, A. W. K. (1998). Physiological workload reactions to increasing levels of task difficulty. *Ergonomics*, 41(5), 656-669.
- Venables, P. H., & Christie, M. J. (1980). Electrodermal activity. In: I. Martin & P. H. Venables (Eds.). *Techniques in psychophysiology* (pp. 4– 67). New York: Wiley.
- Venables, P. H., & Mitchell, D. A. (1996). The effects of age, sex and time of testing on skin conductance activity. *Biological psychology*, 43(2), 87-101.
- Vernet-Maury, E., Robin, O., & Dittmar, A. (1995). The ohmic perturbation duration, an original temporal index to quantify electrodermal responses. *Behavioural brain research*, 67(1), 103-107.
- Vicente, K. J. (1999). *Cognitive work analysis: Toward safe, productive, and healthy computer-based work*. Mahwah, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates.
- Von Bertalanffy, L. (1950). An outline of general system theory. *The British Journal for the Philosophy of science*, 1(2), 134.
- Wagner, I. A., Lindenbaum, M., & Bruckstein, A. M. (1996). *Cooperative covering by ant-robots using evaporating traces*. Technical report CIS-9610, Department of Computer Science.
- Welford, A. T. (1977). Motor performance. *Handbook of the psychology of aging*, 2(450), 95.
- Wickens, C. (1984). *Engineering Psychology and Human Performance*. Columbus, OH: Charles E.
- Wickens, C., (1992). *Engineering Psychology and Human Performance (2nd Ed.)*. New York, NY, US: HarperCollins Publishers.
- Wickens, C. D. (2008). Multiple resources and mental workload. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 50(3), 449-455.
- Wickens, C., Dixon, S., Goh, J., & Hammer, B. (2005). *Pilot dependence on imperfect diagnostic automation in simulated UAV flights: An attentional visual scanning analysis*. Urbana Savoy: University of Illinois.
- Wickens, C.D. (2017, June). Mental Workload: assessment, prediction and consequences. Keynote abstract, in *the 1st International Symposium on Human Mental Workload: Models and Applications (H-Workload)*. Dublin, Ireland

- Wiener, N. (1950). *The Human Use of Human Beings: Cybernetics and Society*. Boston: Houghton Mifflin.
- Wiener, E. L. (1987). Application of vigilance research: rare, medium, or well done? *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 29(6), 725-736.
- Willems, B. & Truitt, T. R. (1999). *Implications of Reduced Involvement in En Route Air Traffic Control*. Atlantic City International Airport: Federal Aviation Administration
- Wilson, G. F. (2002). An analysis of mental workload in pilots during flight using multiple psychophysiological measures. *The International Journal of Aviation Psychology*, 12(1), 3-18.
- Wilson, G. F., & Russell, C. A. (2007). Performance enhancement in an uninhabited air vehicle task using psychophysiological adaptive aiding. *Human factors: the journal of the human factors and ergonomics society*, 49(6), 1005-1018.
- Zakay, D., & Wooller, S. (1984). Time pressure, training and decision effectiveness. *Ergonomics*, 27(3), 273-284.
- Zelinsky, G. J., & Sheinberg, D. L. (1997). Eye movements during parallel–serial visual search. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 23(1), 244.

Annexes

A. Autres indicateurs de charge mentale issus de l'activation du SNA

A.1. Température cutanée périphérique (TCP)

La température cutanée périphérique varie en fonction du flux sanguin. Plus le flux est faible, plus la température sera faible. Nous avons vu précédemment que lors d'une dominance du SNS le flux sanguin peut être réorienté vers les organes principaux. Ceci entraîne une diminution du flux sanguin périphérique, et donc de la température cutanée. La température cutanée est donc sous le contrôle du SNS. Néanmoins elle est également sous le contrôle du SNP, même si celui-ci a des effets négligeables.

Les variations de la température cutanée périphérique sont lentes et de petite amplitude. Ces variations peuvent être, entre autres, mesurées à partir d'un thermistor positionné à l'extrémité d'un doigt.

Son évolution lente et de petite amplitude la rend moins sensible que l'AED ou le système cardiovasculaire. Néanmoins, elle reste sous l'influence de différents stimuli ce qui réduit sa sélectivité et sa capacité de diagnostic.

B. Autres indicateurs issus du SNS : le balayage visuel

Di Nocera et al. (2006) implémente le NNI (Nearest Neighbor Index). Cet index statistique fournit une information sur la répartition des points de fixation. Une valeur de l'index proche de 0 signifie que les points sont rapprochés, alors qu'une valeur de l'index proche de 1 signifie que les points sont dispersés de manière aléatoire. Di Nocera et al. ont montré qu'une charge mentale élevée entraînait une valeur de NNI importante.

C. Description de la tâche du système SUSIE

Nous présentons ici les diagrammes SADT de chaque tâche et sous-tâche.

Lecteur d'un message (T1) :

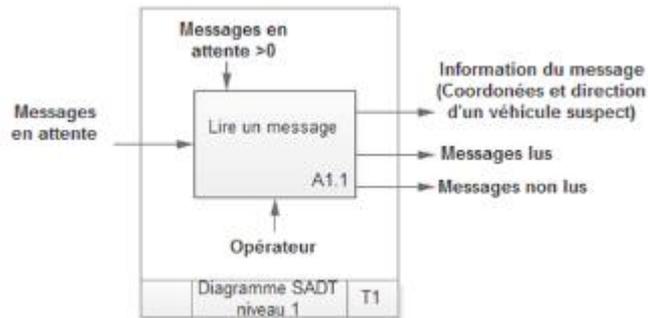


Figure 82 : La tâche T1 de lecture d'un message (SADT niveau 1)

La recherche de mobiles (T2) :

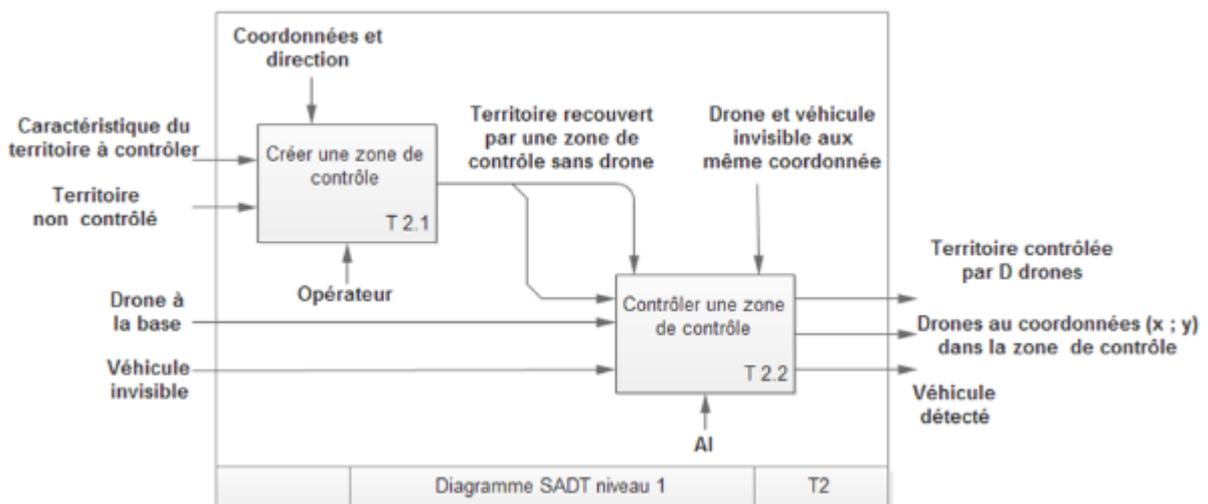
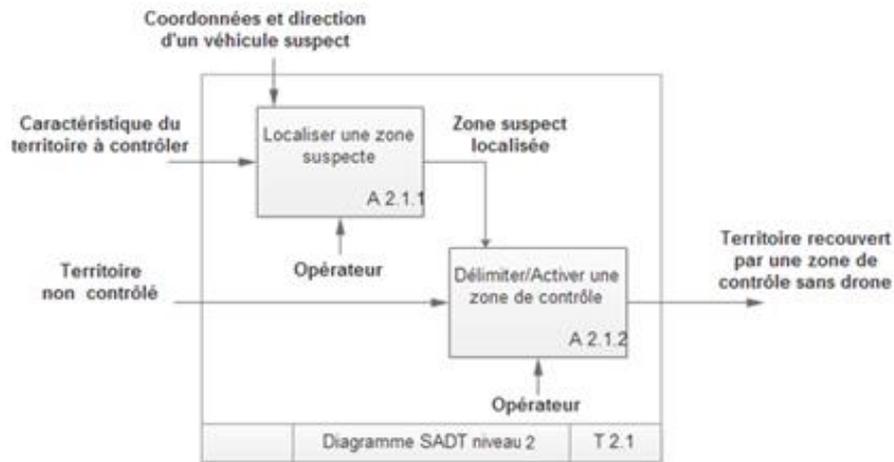


Figure 83 : La tâche T2 de recherche de mobile (SADT niveau 1)

Créer une zone de contrôle (T2.1) :



Contrôler la zone (T2.2) :

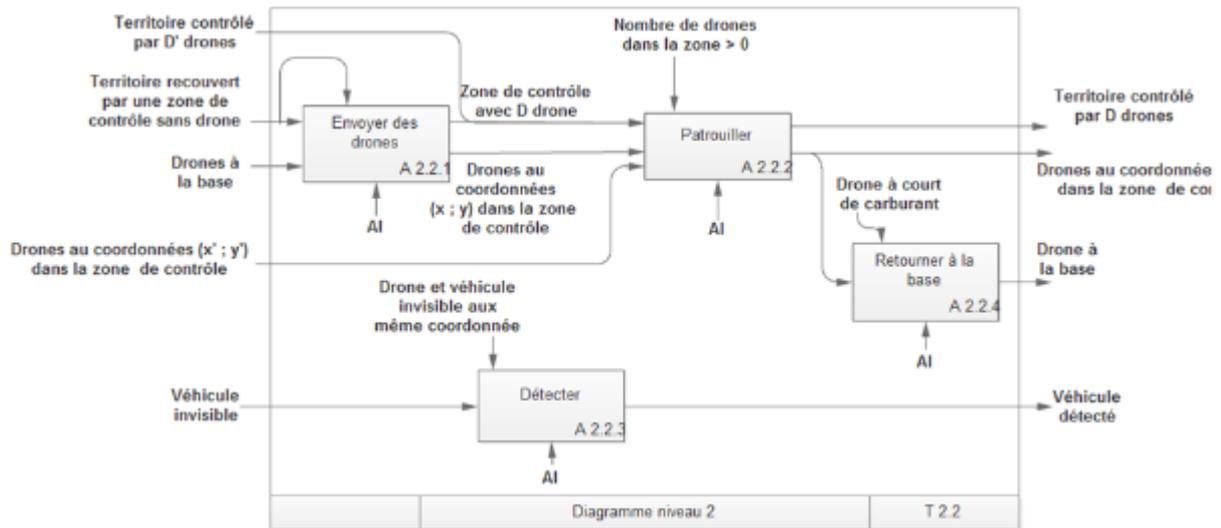


Figure 84 : Les actions relatives à la tâche T2 de recherche de mobiles (SADT niveau 2)

Le traitement d'un mobile (T3) :

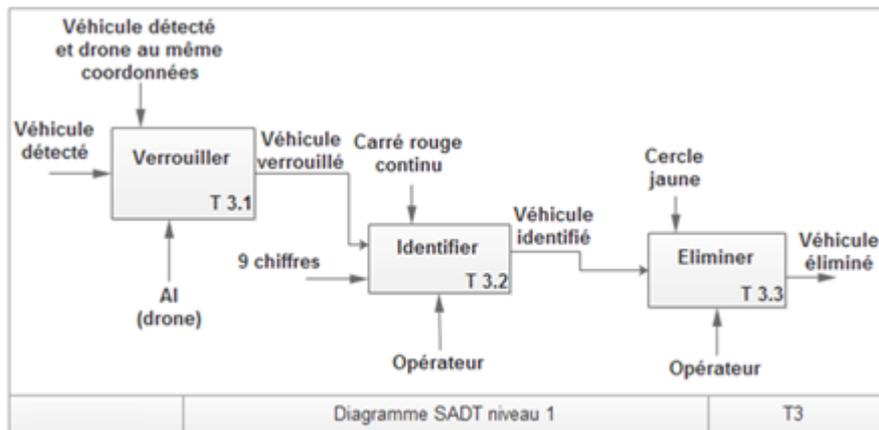
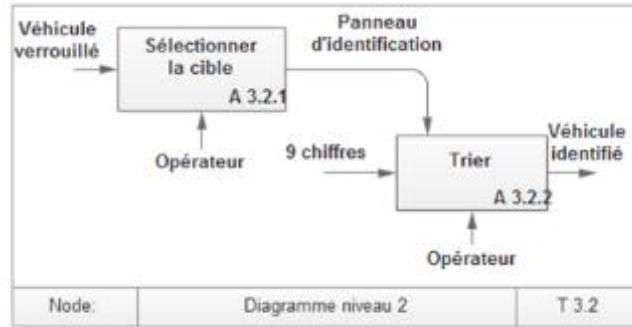


Figure 85: Les tâches T3 de traitement de mobile (SADT niveau 1)

L'identification (T3.2) :



Neutralisation (T3.3) :

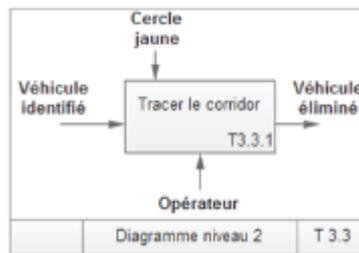


Figure 86 : Les actions relatives au traitement du mobile T3 (SADT niveau 2)

Gestion des messages (T4) :

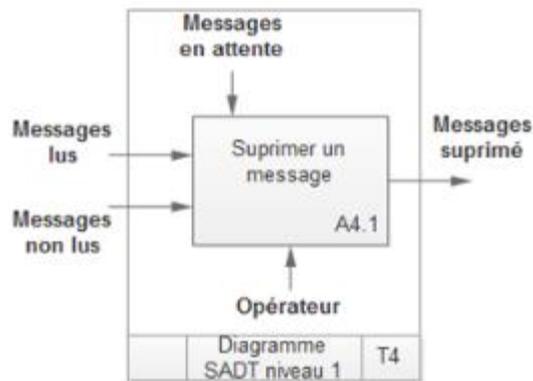


Figure 87 : La tâche T4 de gestion des messages (SADT niveau 1)

Gestion des zones (T5) :

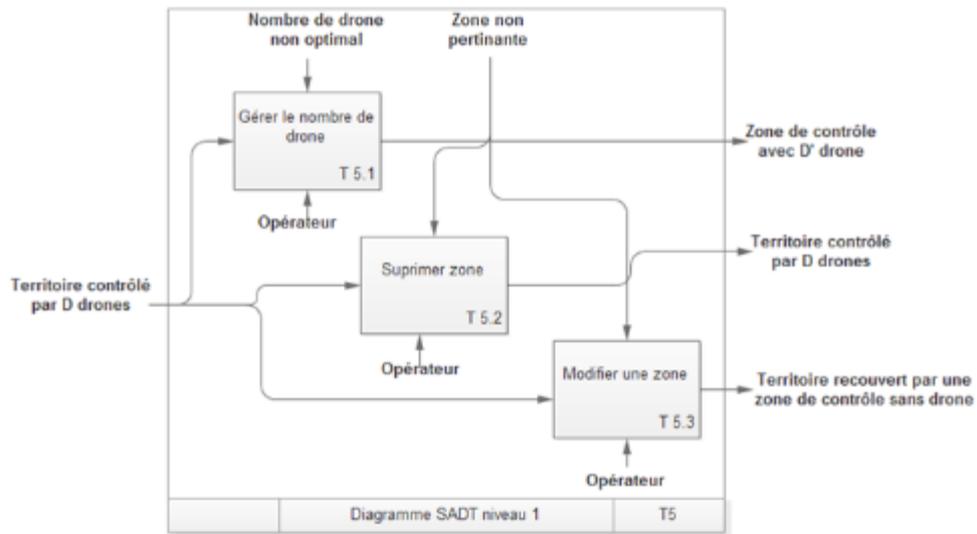


Figure 88 : La tâche T5 de gestion de zones (SADT niveau 1)

Inspection (T6) :

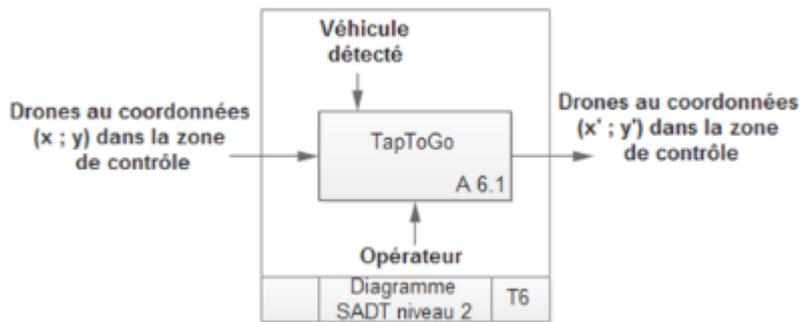


Figure 89 : La tâche T6 d'inspection (SADT niveau 1)

D. Le log du démonstrateur SUSIE

Lors de la réalisation de la tâche, un grand nombre d'événements (action de l'opérateur, apparition d'un véhicule, etc.) sont répertoriés dans un log. Le log est un fichier texte dans lequel chaque ligne correspond à un évènement (cf. Figure 90) :

```
000211271 ConfirmOK MOB852903 130 732
000211567 Track MOB361598 710 180
000212144 NewIntel 2 ATTENTION_-CONVOI<BR>SUSPECT_EN_ZONE_UZ6311<BR>SE_DIRIGE_SUD
000212831 CorridorStart CORR_NE 954 61
000213977 VÉHICULE MOB921419
000214102 Track MOB852903 130 732
000215288 Lock MOB453909 538 614
```

Figure 90 : le log

Le tableau suivant présente les différents évènements enregistrés par le Log.

Tableau 28 : la description du log

Événement	Log				
Démarrage	START	(TRAINING SHOW NOSHOW)			
Fin	OVER				
Message					
Nouveau message	NewIntel	<nombre messages>	<message_>		
Suppression d'un message	DeleteIntel	<nombre messages>	<message_>		
Zone					
Activation d'une zone prédéfinie	Activate	<zone ID>	<X> (px)	<Y> (px)	
Activation sur transfert	ActivateTransfer	<zone ID>	<X> (px)	<Y> (px)	<from zone>
Création d'une zone libre	CreateFreeZone	<zone ID>	<X center> (px)	<Y center> (px)	<other description>
Désactivation d'une zone (appui long)	DeactivateZone	<zone ID>	<X> (px)	<Y> (px)	
Nombre de drones dans la zone optimale	ZoneOptimale	<zone ID>			
Aucun drone dans la zone	Zonevide	<zone ID>			
Nombre de drones dans la zone en sous-effectif	ZoneSousEffectif	<zone ID>			
Nombre de drones dans la zone en sureffectif	ZoneSurEffectif	<zone ID>			
Déplacement d'un Panel	MovePanel	<zone ID>			
Transfert					
Transfert automatique d'un drone	TransferAuto	<start zone>	<end zone>		
Transfert d'un drone zone à zone	TransferFinger	<start zone>	<end zone>		
Transfert d'un drone par action	TransferOnRibbon	<start zone>	<end zone>		

sur le Ribbon					
Transfert d'un drone par action sur le panel	TransferOnPanel	<start zone>	<end zone>		
Inspection					
Inspection	TapToGo	<zone ID>	<X> (px)	<Y> (px)	
Véhicule					
Démarrage d'un véhicule (encore caché)	Véhicule	<track ID>			
Détection (base)	Track	<track ID>	<X> (px)	<Y> (px)	
Verrouillage (carré)	Lock	<track ID>	<X> (px)	<Y> (px)	
Confirmation de cible (début, affichage)	ConfirmStart	<track ID>	<X> (px)	<Y> (px)	
Confirmation réussie (rond)	ConfirmOK	<track ID>	<X> (px)	<Y> (px)	
Confirmation échouée (piste disparaît)	ConfirmFailed	<track ID>	<X> (px)	<Y> (px)	
Cible traitée (triangle)	Cleared	<track ID>	<X> (px)	<Y> (px)	
Corridor					
Déplacement d'un corridor (début)	CorridorStart	<corridor ID>	<X> (px)	<Y> (px)	
Déplacement d'un corridor (fin)	CorridorEnd	<corridor ID>	0	0	
Erreur					
Erreur de priorité	OubliCorridor	<track ID>			
	OubliIdf	<track ID>			

E. Questionnaire de la première expérience

Nous présentons ici le questionnaire post-test proposé aux participants lors de la première expérience.

Question 1 : Pensez-vous avoir neutralisé toutes les cibles prioritaires ? Oui Non

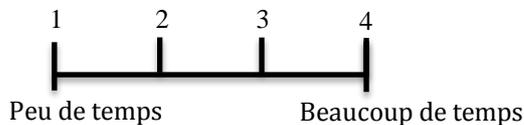
Question 2 : D'après vous le nombre de mobiles neutralisés répond-il à l'objectif ? Oui Non

Question 3 : Vous êtes-vous senti plus chargé à un moment du scénario (*C'était plus difficile au début, à la fin, pareil tout le temps*)? Oui Non

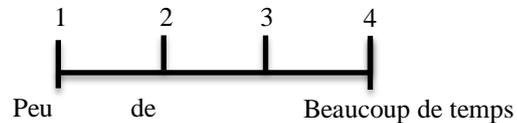
Si oui, avez-vous noté un changement de situation (*plus de mobiles/messages ou moins de mobiles/messages à un certain moment*)?

Question 4 : Evaluer sur une échelle de 1 à 4 le temps passé pour chaque tâche ? Pour chaque tâche vous avez passé :

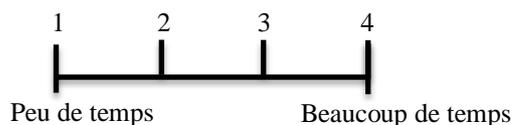
Traitement des messages



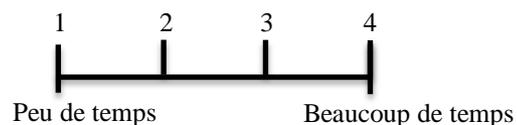
Recherche de véhicule



Traitement d'un véhicule

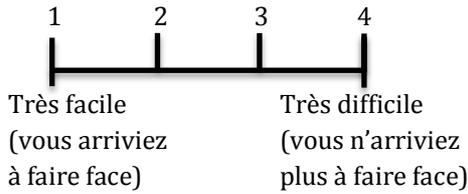


Gestion des

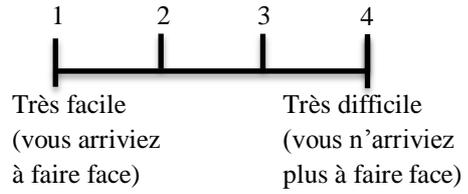


Question 5 : Quelles sont les tâches que vous avez eu le plus de mal à traiter ? Pour chaque tâche, préciser si cela vous a paru :

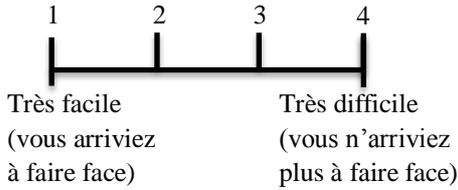
Traitement des messages



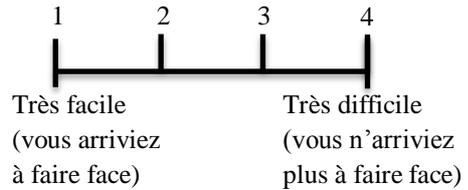
Recherche de véhicule



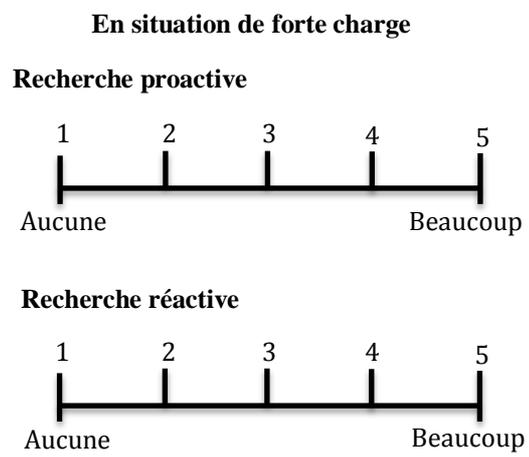
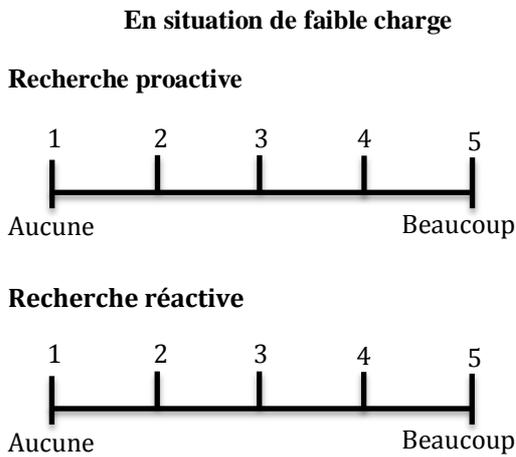
Traitement d'un véhicule



Gestion des drones



Question 6 : Avez-vous souvent réalisé des recherches réactives et/ou proactives ?



Question 7 : Avez-vous respecté les stratégies prescrites concernant :

La recherche de véhicule : Oui Non

Si non, quelle était la cause ?

- Vous aviez oublié les stratégies
- Vous n'arriviez plus à gérer
- Vous aviez choisi de ne pas respecter les stratégies

Le traitement des véhicules : Oui Non

Si non, quelle était la cause ?

- Vous aviez oublié les stratégies
- Vous n'arriviez plus à gérer

Vous aviez choisi de ne pas respecter les stratégies

La gestion des drones : Oui Non

Si non, quelle était la cause ?

Vous aviez oublié les stratégies

Vous n'arriviez plus à gérer

Vous aviez choisi de ne pas

respecter les stratégies

La gestion des zones : Oui Non

Si non, quelle était la cause ?

Vous aviez oublié les stratégies

Vous n'arriviez plus à gérer

Vous aviez choisi de ne pas

respecter les stratégies