



# 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

Pierre-Vincent Paubel

► **To cite this version:**

Pierre-Vincent Paubel. 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. Psychologie. Université Toulouse le Mirail - Toulouse II, 2011. Français. <NNT : 2011TOU20053>. <tel-00630029>

**HAL Id: tel-00630029**

**<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00630029>**

Submitted on 7 Oct 2011

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

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



# THÈSE

En vue de l'obtention du

## DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par l'Université de Toulouse  
Discipline ou spécialité : *Psychologie Cognitive*

---

Présentée et soutenue par *Pierre-Vincent PAUBEL*  
Le 11 Juillet 2011

**Titre :** *Évaluation d'un système de résolution automatique de conflits, ERASMUS*  
*Apport de l'oculométrie comme mesure de la charge mentale chez les contrôleurs aériens en-route*

---

**École doctorale :** *École Doctorale Aéronautique Astronautique*  
**Unité de recherche :** *CLLE-LTC (UMR 5263 du CNRS)*  
**Directeur(s) de Thèse :** *Éric Raufaste, Professeur, Université Toulouse II*  
**Rapporteurs :** *Thierry Baccino, Professeur, Université Paris VIII*  
*Christine Chauvin, Professeur, Université de Bretagne-Sud*  
**Président du jury :** *Jean-Marie Cellier, Directeur d'études, E.P.H.E., Université Toulouse II*

Pierre-Vincent Paubel : *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.* Thèse de Doctorat, © Juillet 2011

---

## RÉSUMÉ

---

Le contrôle aérien doit faire face à une forte intensification du trafic aérien. Dans cette situation, la problématique de la charge mentale chez les contrôleurs aériens est une préoccupation majeure pour maintenir le niveau de sécurité actuel. Le système d'aide automatisé ERASMUS a été élaboré afin de réduire la charge mentale chez les contrôleurs aériens. L'objectif d'ERASMUS est de compenser les effets liés à l'intensification du trafic en réduisant de manière subliminale la charge mentale associée à l'augmentation des conflits potentiels. Les premières expérimentations mises en place pour tester le système d'aide ont révélé une réduction de la charge mentale perçue par les contrôleurs, mais seulement des mesures subjectives post-simulation ont été utilisées. L'objectif principal de cette thèse est de compléter ces premiers résultats en proposant pour la première fois une mesure objective de l'impact du système d'aide ERASMUS sur la charge mentale des contrôleurs aériens. La réalisation de cet objectif a nécessité le développement d'une plateforme originale d'enregistrement et de traitement des mouvements oculaires non intrusive dans un environnement de simulation hautement fidèle. Les mouvements oculaires d'un groupe de contrôleurs aériens experts ont été enregistrés. Chaque contrôleur était soumis à deux types de séquences de trafic (avec et sans ERASMUS). En accord avec l'hypothèse d'ERASMUS, les résultats ont montré des effets de tailles moyennes à grandes sur l'amplitude des saccades, le temps moyen passé sur les aéronefs et sur la distribution de l'attention allouée à la scène visuelle. De plus, sans ERASMUS, l'augmentation de la densité du trafic a augmenté de manière significative les diamètres pupillaires. À l'opposé, quand ERASMUS est actif, l'intensification du trafic n'a pas impacté significativement les diamètres pupillaires. Nous discutons l'impact d'ERASMUS sur la charge mentale ainsi que l'utilisation des mesures oculométriques dans un environnement de simulation écologique de contrôle aérien.

Mots-clés : Contrôle du trafic aérien, Charge mentale, Oculométrie, Pupillométrie, Attention visuelle, ACT-R.

---

## ABSTRACT

---

Air Traffic Control has to handle the strong and constant increase in air traffic density. In this context, mental workload experienced by air traffic controllers is a key research concept to maintain the actual safety level. ERASMUS is an automated aid system designed to reduce air traffic controllers' workload. The purpose of ERASMUS is to compensate the effects of the air traffic growth by reducing the increased mental workload associated with a greater number of potential conflicts. Prior experiments designed to validate the ERASMUS system showed a reduction in ratings of mental workload, but only subjective measures were used. In the present thesis, the first goal is to complete these first results by providing, for the first time, a real time objective measure of controllers' mental workload. In this purpose, we had to develop a new non-intrusive eye-tracking platform in a fully realistic simulation environment. The eye movements of seven controllers, placed in a high-fidelity simulation, were recorded. Traffic sequences were manipulated (with vs. without ERASMUS). Consistent with a reduced workload hypothesis, results showed medium to large effects of ERASMUS on the amplitude of saccades, on the time spent gazing aircraft, and on the distribution of attention over the visual scene. Moreover, without ERASMUS, growth in the traffic density significantly increased pupil diameters. In contrast, when ERASMUS was activated, traffic density growth did not impact significantly pupil diameters. Finally, we discuss the impact of ERASMUS on mental workload and the use of pupillometric measures in an ecological air traffic control environment.

Key-words : Air traffic control, Mental workload, Eye tracking, Pupillometry, Visual attention, ACT-R.

---

## REMERCIEMENTS

---

En premier lieu, je tiens à remercier profondément mon directeur de thèse Éric Raufaste pour avoir accepté de me prendre sous son aile après mon Master Professionnel d'informatique il y a six ans maintenant. Sa perspicacité et sa rigueur m'ont beaucoup appris et m'ont permis de progresser tout au long de ce projet.

Un grand merci également à Jean-Louis Garcia, directeur du Pole MTC (DSNA/DTI/R&D), Eric Blond, directeur du pôle PII, et Philippe Averty sans qui ce projet n'aurait pas vu le jour.

Merci également à toute l'équipe du pôle PII pour leur aide, notamment à François-Régis Colin et à Gwenaël Bothorel qui ont toujours été disponibles aux moments opportuns.

Merci, bien sûr, à toute l'équipe du laboratoire CLLE-LTC. Je tiens à remercier plus particulièrement Charles, Christelle, Franck, Julie, les deux Valérie, Virginie, Bastien, Marco, Sylvie, Isabelle, et tous les autres avec qui j'ai passé de très bons moments à table ou dans la salle à café. Sans eux, cette thèse n'aurait pas été la même.

Merci également à ma famille et ma belle famille pour leur soutien indéfectible. Un grand merci à ma moitié qui m'accompagne depuis onze ans maintenant. Étant toi même en thèse, tu as toujours été d'une aide inestimable. Merci aux amis qui ont toujours su me soutenir et être plein d'attention alors que je n'étais pas disponible, et à tous ceux qui ont su attendre patiemment que je les recontacte.

Je souhaite également adresser de sincères remerciements aux membres du Jury qui ont accepté d'examiner cette thèse.

Enfin, un grand merci à tous les contrôleurs aériens du centre d'Aix-en-provence pour avoir accepté de participer aux expérimentations.

---

## TABLE DES MATIÈRES

---

|          |   |          |
|----------|---|----------|
| 1        | INTRODUCTION  | 1        |
| <b>I</b> | <b>Partie Théorique</b>   | <b>5</b> |
| 2        | L'ACTIVITÉ DE CONTRÔLE AÉRIEN                                       | 6        |
| 2.1      | L'organisation générale de l'espace aérien                          | 6        |
| 2.2      | Description de la tâche du contrôleur aérien                        | 7        |
| 2.2.1    | Notion de conflit   | 8        |
| 2.2.2    | La détection de conflit   | 9        |
| 2.2.3    | La résolution de conflit  | 10       |
| 2.2.4    | Exemple concret   | 10       |
| 2.2.5    | Les outils  | 11       |
| 3        | LES EXIGENCES DE LA TÂCHE DANS LE CONTRÔLE AÉRIEN.                  | 15       |
| 3.1      | La densité du trafic  | 15       |
| 3.2      | Les caractéristiques des conflits potentiels entre aéro-<br>nefs    | 17       |
| 3.2.1    | Caractéristiques géométriques macroscopiques                        | 17       |
| 3.2.2    | Le temps avant conflit  | 18       |
| 3.2.3    | La complexité relationnelle de la détection de<br>conflit           | 19       |
| 4        | FONDEMENTS COGNITIFS DE LA CHARGE CHEZ LES CONTRÔ-<br>LEURS AÉRIENS | 22       |
| 4.1      | le rôle de l'attention  | 22       |
| 4.1.1    | L'attention sélective   | 23       |
| 4.1.2    | L'attention partagée  | 25       |
| 4.1.3    | La vigilance et la notion de charge « opti-<br>male »               | 30       |
| 4.2      | le rôle de la mémoire de travail                                    | 30       |
| 4.2.1    | La MDT dans l'architecture cognitive ACT-<br>R                      | 31       |
| 4.2.2    | La notion de capacité   | 33       |
| 4.2.3    | La notion de durée  | 37       |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 4.3   | Le rôle de l'expertise   | 44 |
| 4.3.1 | La mémoire de travail à long terme   | 45 |
| 4.3.2 | L'automatisation   | 46 |
| 4.3.3 | Les stratégies   | 49 |
| 4.4   | La théorie de la charge cognitive  | 53 |
| 4.4.1 | La charge cognitive intrinsèque  | 54 |
| 4.4.2 | La charge cognitive extrinsèque  | 55 |
| 4.4.3 | La charge cognitive essentielle  | 56 |
| 4.4.4 | Confrontation de la TCC au contrôle aérien                                   | 56 |
| 4.5   | Synthèse   | 57 |
| 5     | LES DIFFÉRENTES MESURES DE LA CHARGE MENTALE CHEZ<br>LES CONTRÔLEURS AÉRIENS | 60 |
| 5.1   | les mesures subjectives  | 60 |
| 5.2   | Les mesures objectives   | 62 |
| 5.2.1 | Les métriques de densités dynamiques   | 63 |
| 5.3   | L'oculométrie comme mesure objective de la charge<br>mentale                 | 64 |
| 5.3.1 | Les fixations  | 65 |
| 5.3.2 | Les saccades   | 65 |
| 5.3.3 | Les clignements des paupières  | 65 |
| 5.3.4 | Le balayage visuel   | 66 |
| 5.3.5 | Les diamètres pupillaires  | 66 |
| 6     | LE SYSTÈME D'AIDE ERASMUS  | 69 |
| 6.1   | Réduire le nombre de conflits  | 70 |
| 6.2   | Une intervention subliminale   | 71 |
| 7     | PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE   | 75 |

## **II Partie Empirique** **78**

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 8     | MATÉRIELS ET MÉTHODES                      | 79 |
| 8.1   | Participants                               | 79 |
| 8.2   | Dispositif expérimental                    | 79 |
| 8.2.1 | Le simulateur de contrôle du trafic aérien | 80 |
| 8.2.2 | L'oculomètre                               | 81 |
| 8.3   | Tâche et procédure                         | 81 |
| 8.4   | Matériel                                   | 83 |

|        |  |     |
|--------|--|-----|
| 8.5    | La définition des aires d'intérêts   | 83  |
| 8.5.1  | Algorithme d'appariement entre les fixations et les AOIs dynamiques            | 84  |
| 8.6    | Variables et hypothèses  | 86  |
| 8.6.1  | Variables  | 86  |
| 8.6.2  | Hypothèses opérationnelles   | 90  |
| 8.7    | Analyses   | 91  |
| 8.7.1  | Le traitement général des données oculométriques                               | 91  |
| 8.7.2  | Le traitement particulier des diamètres pupillaires                            | 91  |
| 9      | RÉSULTATS  | 92  |
| 9.1    | Nombre et durée moyenne des fixations  | 92  |
| 9.2    | H1 : Le temps moyen passé sur les aéronefs                                     | 92  |
| 9.3    | H2 : La distribution de l'attention  | 93  |
| 9.4    | H3 : L'amplitude des saccades  | 93  |
| 9.5    | H4 : Les diamètres pupillaires   | 93  |
| 9.5.1  | Effet global d'ERASMUS sur la variation de la taille des diamètres pupillaires | 93  |
| 9.5.2  | Interaction entre ERASMUS et le nombre d'aéronefs                              | 94  |
| 9.5.3  | Interaction entre la « densité du trafic » et ERASMUS                          | 94  |
| 10     | DISCUSSION   | 98  |
| 11     | CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES  | 103 |
| 11.1   | Limites et apports généraux  | 104 |
| 11.1.1 | Limites  | 104 |
| 11.1.2 | Apports  | 104 |
| 11.2   | Perspectives de Recherches   | 105 |
| A      | ANNEXE   | 108 |
|        | Références   | 115 |

---

## LISTE DES FIGURES

---

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| FIGURE 1  | Représentation schématique d'un conflit dans les centres de contrôle « en route »   | 8  |
| FIGURE 2  | Aperçu d'une image radar. La zone centrale de couleur différente correspond au secteur aérien à contrôler. Les lignes blanches continues représentent les voies aériennes.    | 12 |
| FIGURE 3  | Représentation radar d'un avion   | 13 |
| FIGURE 4  | Illustration de deux représentations de trafic possédant la même densité mais engendrant des niveaux d'exigences différents. Schéma issu de l'étude de van Gent et al. (1997) | 16 |
| FIGURE 5  | Le modèle des ressources multiples à 4 dimensions, d'après Wickens (2008)   | 27 |
| FIGURE 6  | Les bases neuro-anatomiques de l'architecture ACT-R   | 32 |
| FIGURE 7  | Représentation de la mémoire de travail dans la théorie ACT, d'après Anderson (1983)  | 34 |
| FIGURE 8  | Modèle simplifié de la charge mentale chez les contrôleurs aériens (d'après Hillburn et Jorna, 2001)  | 53 |
| FIGURE 9  | Illustration schématique du fonctionnement du système ERASMUS.  | 72 |
| FIGURE 10 | Aperçu général de l'action du système ERASMUS sur les différents types de conflits.   | 73 |
| FIGURE 11 | L'environnement de simulation incluant la caméra d'enregistrement à distance des mouvements oculaires   | 80 |
| FIGURE 12 | Positionnement de l'oculomètre par rapport au participant et à l'écran radar  | 82 |

- FIGURE 13 L'interface de surveillance dédiée à l'expérimentateur. Les rectangles représentent les étiquettes des aéronefs et le point jaune représente la localisation de la fixation en cours. 82
- FIGURE 14 Algorithme d'appariement entre les fixations et les AOIs dynamiques 87
- FIGURE 15 Caractéristiques pupillométriques avec et sans ERASMUS en fonction de la densité du trafic 95
- FIGURE 16 Dispositif technique générale. 109
- FIGURE 17 Interface nécessaire à la phase de calibration 110
- FIGURE 18 Les mécanismes de fonctionnement de l'oculomètre Eyelink 110

---

## LISTE DES TABLES

---

|         |  |
|---------|--|
| TABLE 1 | Les différents indicateurs oculométriques selon le niveau de charge mentale chez les contrôleurs aériens. 67 |
| TABLE 2 | Effets d'ERASMUS sur l'activité des mouvements oculaires (N = 7) 96  |
| TABLE 3 | Effets d'ERASMUS sur l'activité pupillaire (N = 7) 97  |

---

## ACRONYMES

---

|         |  |
|---------|--|
| ACT-R   | Adaptive Control of Thought-Rational               |
| ATC     | Air Traffic Control : le contrôle du trafic aérien |
| ATM     | Air Traffic Management                             |
| CRNA    | Centre Régional de la Navigation Aérienne          |
| DGAC    | Direction Générale de l'Aviation Civile            |
| DSNA    | Direction des Services de la Navigation Aérienne   |
| DTI     | Direction de la Technique et de l'Innovation       |
| ENAC    | École Nationale de l'Aviation Civile, Toulouse     |
| ERASMUS | En Route ATM Soft Management Ultimate System       |
| PII     | Performance et Innovation des IHM                  |
| SESAR   | Single European Sky ATM Research                   |

---

## INTRODUCTION

---

Depuis les débuts de l'aéronautique, le nombre d'aéronefs présents dans l'espace aérien n'a cessé d'augmenter. Ces vingt dernières années, le taux annuel de croissance du trafic aérien a atteint 5% ([International Civil Aviation Organization, 2007](#)) ; si ce rythme est maintenu constant, le trafic actuel aura doublé d'ici 2030. De plus, afin de répondre à cette demande, la vitesse et surtout la taille des aéronefs ont régulièrement augmenté. Par conséquent, les possibilités d'action des pilotes sont de plus en plus réduites. Un aéronef de forte taille nécessite physiquement un temps plus important pour effectuer un simple changement de direction, ce qui peut s'avérer particulièrement problématique dans une situation d'urgence.

Dans cette situation, la nécessité d'une supervision globale au sol semble plus que jamais déterminante. Les contrôleurs aériens ont en effet la lourde responsabilité de maintenir un niveau de sécurité irréprochable tout en veillant à la fluidité du trafic. Ils doivent tout mettre en oeuvre pour éviter les risques de collision entre les aéronefs en minimisant les répercussions sur les durées des vols aériens et les consommations en carburant. À titre indicatif, un contrôleur aérien actuel est déjà responsable en moyenne d'une dizaine d'avions simultanément, ce qui représente approximativement la responsabilité de la sécurité directe de plus de 2500 personnes.

Une des questions cruciales est de savoir comment gérer cette augmentation continue du trafic tout en conservant un niveau de sécurité optimal. Étant donné les enjeux humains, la problématique de la charge mentale chez les contrôleurs s'est vue octroyée une place centrale dès le début de l'aéronautique moderne et son importance n'a cessé de croître avec l'essor du trafic aérien. La définition générale la plus fréquemment reprise dans le domaine du contrôle aérien désigne

la charge mentale comme étant le « coût mental » nécessaire pour répondre aux exigences de la tâche (Wickens, 1992; Boag, Neal, Loft, & Halford, 2006; Stein, 1998). Le postulat est que chaque opération cognitive nécessaire à la réalisation de la tâche aurait un « prix à payer », d'un ordre variable, mais inévitable. Il est intéressant de noter que cette définition englobe celle proposée par les ergonomes (Chanquoy, Tricot, & Sweller, 2007). Ces derniers ont en effet une vision plus réductrice du concept de charge mentale. Ils s'attachent à définir les seuils au delà desquels les performances se dégradent (Sperandio, 1980). Par conséquent, les ergonomes s'intéressent principalement à la « surcharge » mentale.

Il existe une riche littérature traitant de la relation entre l'exigence de la tâche et la charge mentale dans le domaine du contrôle aérien. Un des rares consensus actuels est que la capacité des secteurs aériens<sup>1</sup> est limitée de manière drastique par le niveau de charge mentale des contrôleurs (Leiden, Koperdekar, & Green, 2003; Hillburn, 2004). Autrement dit, pour conserver un niveau de sécurité optimal, l'augmentation du trafic aérien doit être accompagnée d'une baisse de la charge mentale par avion à gérer. Une des seules solutions actuelles pour pallier les problèmes de surcharge est une procédure appelée « dé-groupage ». Elle consiste en une division temporaire de l'espace aérien afin de diminuer le nombre d'avions à gérer. Néanmoins, elle multiplie les difficultés de coordination entre les différents secteurs, ce qui rend cette procédure difficilement soutenable sur le long terme.

Dans ce contexte, de nombreuses recherches ont été effectuées depuis une trentaine d'années. Le projet SESAR « Single European Sky ATM Research » est le plus récent programme de recherche visant à refondre complètement la gestion de l'espace aérien pour faire face à l'augmentation du trafic. Une composante majeure de ce projet concerne En Route ATM Soft Management Ultimate System (ERASMUS), un système d'aide visant à réduire la charge mentale en mettant l'activité cognitive des contrôleurs au cœur de l'équation (Garcia, 2007; Villiers, 2004).

Le partage des tâches entre humains et systèmes artificiels s'est souvent révélé délicat à effectuer. Les retours des expériences passées sont clairs ; les facteurs humains doivent être pris en compte tout

---

1. Zone précise de l'espace aérien sous la responsabilité d'un contrôleur aérien (cf. chapitre 2 pour une explication plus détaillée)

au long du processus de création des systèmes d'aides, sous peine d'obtenir des effets inverses aux objectifs souhaités. Une aide (potentielle) peut perturber l'activité si elle nécessite le traitement d'une information supplémentaire non pertinente du point de vue de l'opérateur. Elle peut générer un coût en elle-même et, dans certains cas, la balance coût/bénéfice peut s'avérer négative (Sarter, 2000; Villiers, 2004) – particulièrement quand le système ne parvient pas (ou plus) à gérer les situations à forte charge (Norman, 1990). Autrement dit, les systèmes d'aides nécessitent des tests approfondis.

Or, la problématique de la mesure de la charge se pose depuis que le concept de la charge mentale existe. De nombreuses méthodes ont été développées durant ces trente dernières années, toutes avec leurs avantages et leurs inconvénients respectifs. Dans le contrôle aérien, la capacité à proposer une mesure fiable de la charge constitue en soi un véritable défi à relever. Cette tâche est particulièrement difficile pour trois principales raisons : (1) la nature multi-dimensionnelle de la charge, (2) la complexité de l'activité, et (3) les contraintes techniques dues à l'environnement de travail. Ainsi, la problématique de la mesure de la charge mentale est une question de recherche à part entière.

Fin 2008, le système ERASMUS a fait l'objet de tests préliminaires. Ces derniers suggèrent une réduction de la charge mentale perçue (Drogoul, 2008b). Toutefois, seules des mesures subjectives post-simulation ont été utilisées et la littérature indique clairement que ce type de mesure présente certaines limites majeures.

L'objectif principal de cette thèse est de compléter ces premiers résultats obtenus par Drogoul (2008b) en proposant, pour la première fois, une mesure objective non intrusive et en temps réel de l'impact du système d'aide ERASMUS sur la charge mentale des contrôleurs. Pour cela, nous proposons une méthodologie originale d'enregistrement et de traitement de données oculométriques au sein d'un environnement de simulation hautement fidèle de contrôle aérien. L'objectif secondaire de cette thèse est de démontrer que l'apport de ces nouvelles données oculométriques peut fournir de nouvelles informations sur la charge mentale des contrôleurs, complémentaires aux mesures subjectives classiques.

## Structure de la thèse

Nous débuterons par une définition de l'activité du contrôle aérien (chapitre 2) et le chapitre 3 présentera les principaux facteurs externes – propres à la tâche – considérés comme étant à l'origine de charge mentale dans la littérature sur le contrôle aérien.

Ensuite, nous tenterons d'expliquer pourquoi, d'un point de vue cognitif, ces différents facteurs externes sont susceptibles de faire varier fortement la charge mentale des contrôleurs aériens (chapitre 4). Pour cela, une analyse des fondements cognitifs de la charge mentale sera proposée, puis nous confronterons chaque facteur externe aux principaux modèles psychologiques explicatifs de la charge mentale. Le chapitre 5 sera consacré aux mesures de la charge mentale telles qu'elles ont été effectuées dans le domaine du contrôle aérien. Une place centrale sera accordée à l'oculométrie.

Enfin, le chapitre 6 conclura la partie théorique de cette thèse en présentant la solution proposée par ERASMUS pour répondre à la problématique de la charge mentale. Le principe de fonctionnement et les tests préliminaires du système d'aide ERASMUS seront décrits.

Les chapitres 8 et 9 traiteront de la contribution empirique de la thèse. Étant donnés les objectifs de la thèse, la méthodologie expérimentale sera abordée en détail. La mise en place de l'ensemble du dispositif technique a représenté une partie importante du travail effectué lors de cette thèse. Nous insisterons également sur les indicateurs oculométriques que nous avons utilisés afin d'étudier en détail les effets d'ERASMUS dans un tel environnement de simulation. Ceux qui n'existaient pas dans la littérature feront l'objet d'une attention particulière.

Le chapitre 10 proposera une discussion générale de nos résultats en fonction des objectifs fixés dans le cadre de cette thèse. Enfin, le chapitre 11 présentera les conclusions de ce travail ainsi que les perspectives de recherche ouvertes.

**Première partie**  
**Partie Théorique**

# 2

---

## L'ACTIVITÉ DE CONTRÔLE AÉRIEN

---

Avant de décrire en détail l'activité du contrôleur aérien, il nous semble important de préciser brièvement dans quel contexte organisationnel elle s'inscrit.

### 2.1 L'ORGANISATION GÉNÉRALE DE L'ESPACE AÉRIEN

La totalité de l'espace aérien est structuré en voies aériennes. Par analogie aux réseaux routiers, des balises dites de radio-navigation vont faire office de carrefour, c'est-à-dire des points de passage obligatoires permettant, entre autre, de s'orienter. Elles sont disposées à divers endroits stratégiques sur l'ensemble du territoire et l'intervalle entre deux balises peut être assimilé à une route.

L'espace aérien est découpé en plusieurs zones dont la responsabilité est répartie dans deux types de centres : les centres de contrôle régionaux en route et les centres de contrôle d'approche. Les centres d'« approche » sont en charge des phases de décollage et d'atterrissage ainsi que de la zone à proximité des aérodromes, alors que les centres « en route » ont pour mission de gérer les aéronefs sur le reste de l'espace aérien (i.e. globalement la quasi-totalité du temps de vol).

Les centres sont eux même divisés en sous-parties appelées « secteurs de contrôle ». La taille des secteurs dépend principalement de la densité du trafic qu'ils peuvent recevoir. Même si ce volume est initialement fixe, il est susceptible d'être ajusté ponctuellement (par subdivision) en raison de fortes charges de travail. Les secteurs correspondent à des unités élémentaires à l'intérieur desquelles le trafic est sous l'entière responsabilité des contrôleurs.

Il est intéressant de noter que chaque centre possède ses propres spécificités. En conséquence, un contrôleur – même expérimenté – ne pourra se voir attribuer la responsabilité d'un secteur qu'après

avoir passé au minimum deux ans de qualification dans le centre en question. Autrement dit, même si les bases de l'activité sont similaires, chaque centre requiert un niveau d'expertise spécifique élevé.

Enfin, chaque secteur est géré par deux types de contrôleurs, l'organique et le radariste. L'organique est en amont et possède une vision globale et stratégique du secteur et de ses interactions avec les zones voisines. Il informe notamment le radarariste de l'arrivée des aéronefs en décrivant leurs principales caractéristiques (type d'avion, altitude et direction). Le radariste est, comme son nom l'indique, face au radar en permanence. Il assure une gestion plus directe et tactique du trafic. Même si l'organique peut intervenir à tout moment, le radariste est au cœur de l'activité du contrôle aérien et il sera soumis à la plus forte charge de travail.

Dans cette thèse, nous nous focaliserons exclusivement sur le rôle des radaristes dans les centres de contrôle « en route » et nous allons décrire maintenant les principales composantes de leur activité.

## 2.2 DESCRIPTION DE LA TÂCHE DU CONTRÔLEUR AÉRIEN

Chaque contrôleur a pour fonction première d'assurer la sécurité des aéronefs présents dans le secteur aérien dont il a la charge tout en améliorant si possible la fluidité de l'ensemble du trafic. Cette activité vise principalement à prévenir les abordages entre aéronefs en donnant des instructions aux pilotes de manière suffisamment précoce.

Afin de clarifier la présentation de l'activité, nous avons opté pour un découpage arbitraire – mais classique dans la littérature – qui divise l'activité du contrôle aérien en deux principales sous-tâches successives : (1) la détection puis (2) la résolution de conflit. Cette distinction est à considérer avec précaution étant donné que ces deux phases sont en réalité étroitement liées (cf. [Loft, Bolland, Humphreys, & Neal, 2009](#) pour une revue récente sur ce point).

Avant de décrire ces deux sous-tâches, nous allons définir dans un premier temps la notion de conflit.

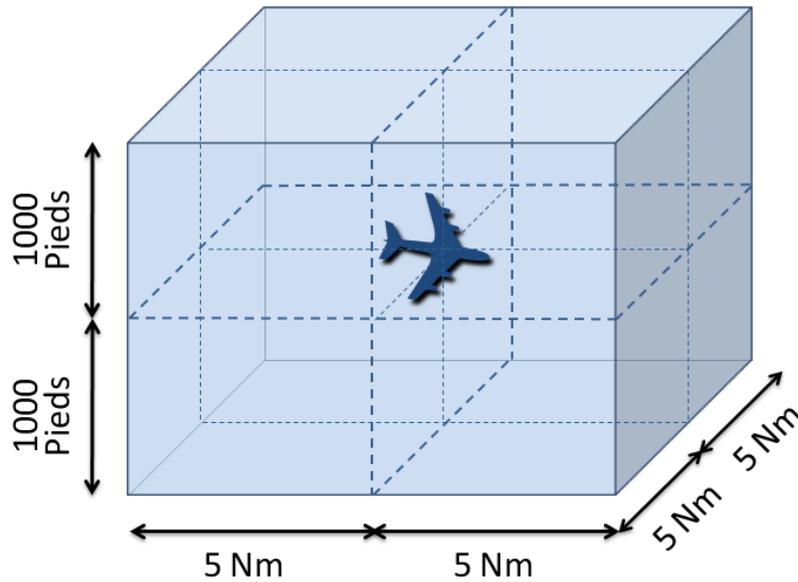


FIGURE 1: Représentation schématique d'un conflit dans les centres de contrôle « en route »

### 2.2.1 Notion de conflit

Un conflit est par nature « potentiel ». Il correspond à un état futur entre deux avions qui doit être évité à tout prix. D'un point de vue technique, un conflit est défini selon deux règles strictes. La première est basée sur la distance horizontale entre les aéronefs. Elle doit rester supérieure à 5 miles nautiques (MN<sup>1</sup>) pour les secteurs en route et 3 MN en approche. La deuxième concerne la distance verticale qui doit être d'au moins 1000 pieds<sup>2</sup>. Les deux distances sont obtenues par projection sur leurs plans respectifs et la combinaison simultanée de ces deux règles forme un conflit. Schématiquement, chaque aéronef est entouré d'une zone fictive qui doit rester libre en permanence afin éviter tout risque de collision (voir Figure 1).

Les principaux types de conflits ont été répertoriés par l'organisation européenne pour la sécurité de la navigation aérienne (Eurocontrol). Premièrement, ils varient selon la trajectoire. Eurocontrol distingue trois cas :

- 
1. 1 MN = 1819 m
  2. 1 Pied = 30 cm

1. Les deux aéronefs se suivent et le deuxième rattrape le premier ;
2. Les deux aéronefs sont en face à face sur la même voie aérienne ;
3. Les deux aéronefs sont sur deux voies différentes mais ont des trajectoires convergentes.

Ensuite, à chaque type de trajectoire peuvent être associés trois types d'évolution verticale :

1. Les deux aéronefs sont à des altitudes constantes ;
2. Un des deux aéronefs monte ou descend alors que le deuxième avion reste à altitude constante ;
3. Les deux changent d'altitude en même temps.

Enfin, il nous semble important de préciser que la moindre entorse aux règles qui définissent un conflit engendre automatiquement une procédure d'enquête, et cela même si aucune conséquence grave n'a été observée. Les sanctions encourues sont très différentes suivant les pays. En France, la loi prévoit toute une série de sanction en fonction de la gravité des faits. Elles varient du simple blâme à des peines d'emprisonnement de 5 ans accompagnées de fortes amendes.

### 2.2.2 *La détection de conflit*

Selon [Bisseret et Girard \(1973\)](#), la détection de conflit est le véritable pivot central de la tâche du contrôleur aérien. Basiquement, elle consiste à identifier quels sont les aéronefs (deux au minimum) qui risquent dans l'avenir de se retrouver géographiquement « trop » proches l'un de l'autre. [Averty \(1998\)](#) a défini cette phase comme une phase de tri en fonction des éléments d'information disponibles (i.e. déterminer quels sont les aéronefs qui sont, oui ou non, engagés dans un conflit potentiel). Comme toute prédiction, les aspects temporels sont déterminants ([Cellier, De Keyser, & Valot, 1996](#)), d'autant plus que les éléments à prendre en compte sont hautement dynamiques. Par exemple, certains conflits peuvent être générés quelquefois tardivement après l'arrivée des aéronefs dans le secteur ; d'autres encore ne génèrent que des doutes. Lors de tels cas, le contrôleur ne parvient pas toujours à juger initialement avec certitude de l'existence d'un conflit, ce qui engendrera diverses conséquences : (1) une phase d'attente et

de surveillance pour laisser « mûrir » la situation ; (2) une action précoce drastique (une requête de changement d'altitude par exemple) pour lever l'ambiguïté et assurer à terme une séparation minimale entre les deux aéronefs, ou encore (3) procéder à des traitements fins et coûteux pour parvenir à une estimation satisfaisante sur l'existence du conflit.

En résumé, l'activité de détection de conflit est loin d'être binaire. Elle est extrêmement hétérogène selon les types de conflit à diagnostiquer et selon le contexte dans lequel ils s'inscrivent.

### 2.2.3 *La résolution de conflit*

La résolution de conflit est consécutive au diagnostic. Elle se traduit concrètement par des requêtes radiophoniques auprès des pilotes afin de résoudre le ou les conflits potentiels entre les aéronefs. Techniquement, les instructions sont de trois ordres :

1. Les changements d'altitude (ou une variation du taux de montée/descente) ;
2. Les changements de vitesse ;
3. Les changements de cap.

La particularité de cette phase est qu'elle nécessite une prise en compte globale du contexte afin d'anticiper en amont des éventuelles interférences négatives avec le reste du trafic.

### 2.2.4 *Exemple concret*

Pour illustrer simplement ces deux sous-tâches, nous allons étudier un cas simple de détection et de résolution de conflit. Il permettra au lecteur de se construire une représentation globale des traitements effectués par les contrôleurs.

Soit deux aéronefs A1 et A2 isolés, de même catégorie, évoluant sur des voies aériennes différentes dans un secteur aérien donné. Leurs trajectoires convergent et ils conservent le même niveau de vol. Enfin, ils sont à équidistance du point de croisement et ils possèdent des vitesses identiques et constantes. Dans ce contexte théorique idéal, le contrôleur diagnostiquera aisément l'existence d'un conflit potentiel. Afin de le résoudre, il pourra simplement demander à un des aéronefs

de changer d'altitude ou encore de moduler sa vitesse afin d'assurer à terme les distances minimales. Dans le cas présent, les deux aéronefs étant seuls sur le secteur, le contrôleur n'aura pas à anticiper un éventuel impact négatif de sa requête sur le reste du trafic.

### 2.2.5 *Les outils*

Pour satisfaire l'ensemble de ses fonctions, le contrôleur dispose de trois principaux outils, à savoir le radar, les strips et la radiotéléphonie. Les deux premiers sont avant tout des sources d'informations visuelles alors que la radiotéléphonie fait office d'effecteur et permet une réponse orale consécutive au traitement de ces informations.

Les deux premiers sont avant tout des sources d'informations visuelles alors que la radiotéléphonie fait office d'effecteur et permet une réponse orale consécutive au traitement de ces informations.

#### *Le radar*

Le radar fournit la quasi-totalité des informations nécessaires au contrôleur. Il propose une vision 2D (de dessus) de l'ensemble du secteur qui inclut l'affichage des voies aériennes (voir Figure 2).

Chaque aéronef est accompagné d'une étiquette rectangulaire (voir Figure 3). Elle indique au contrôleur trois principales informations, soit, de haut en bas :

1. La vitesse de l'aéronef ;
2. L'indicatif, propre à chaque aéronef. Il permet également de connaître le modèle de l'appareil (cette information permet notamment de savoir quelle manœuvre l'avion peut entreprendre) ;
3. Le niveau de vol (l'altitude en centaines de pieds, ici 165 = 16.500 pieds). Elle est accompagnée d'une flèche de tendance qui indique si l'avion est en montée, en descente ou en altitude constante.

Finalement, chaque aéronef est accompagné de deux indicateurs de mouvements, passés et futurs. Le premier est appelé « comète » et se situe à l'arrière de l'aéronef. Il est composé d'une série de ronds qui retrace les dernières positions occupées par l'aéronef. Le deuxième est situé à l'opposé. Il correspond à un « vecteur vitesse » dont la longueur est ajustable à tout moment par le contrôleur. Son extrémité

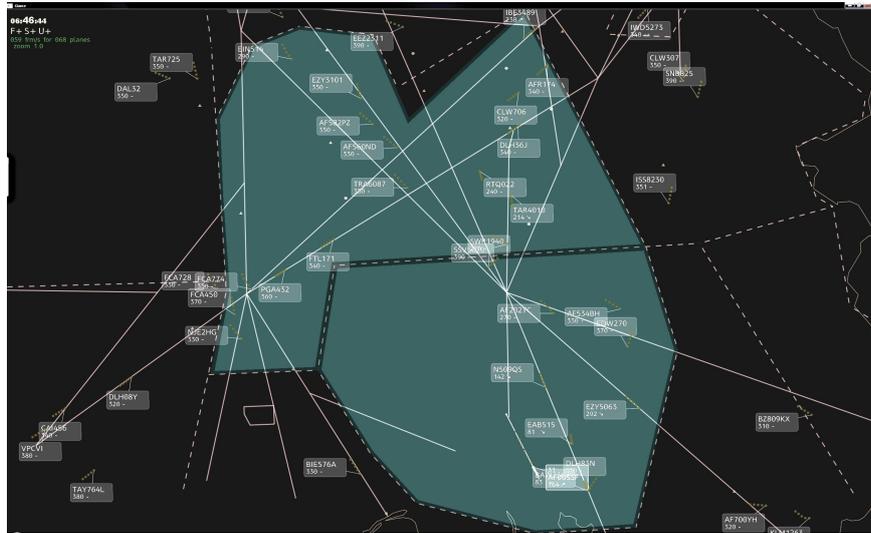


FIGURE 2: Aperçu d'une image radar. La zone centrale de couleur différente correspond au secteur aérien à contrôler. Les lignes blanches continues représentent les voies aériennes.

donne approximativement la position future de l'avion à 3, 6, 9 ou 12 minutes.

### *Les strips*

La seconde source d'information est présentée sur des papiers rectangulaires de petite taille nommés « *strips* ». Un strip contient le résumé du plan de vol tel qu'il a été déposé par le pilote de l'aéronef. Il parvient au contrôleur quelques minutes avant l'entrée de l'aéronef dans le secteur. Le contrôleur en prend alors connaissance et le dispose devant lui pendant la durée de présence de l'aéronef dans le secteur. Ils font office de véritables représentations matérielles de chaque aéronef.

Plus précisément, les strips indiquent les principales caractéristiques de l'avion, son indicatif, ainsi que l'itinéraire que l'aéronef va emprunter. L'indication de l'itinéraire est une information majeure sur laquelle s'appuie les contrôleurs pour planifier la gestion de l'aéronef. Enfin, les strips possèdent à leur extrémité un espace libre qui permet au contrôleur d'inscrire ce qu'il juge nécessaire pour assurer le suivi de l'aéronef (les changements d'altitude principalement).

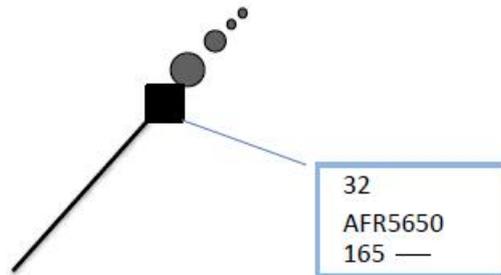


FIGURE 3: Représentation radar d'un aéronef

### *La Radiotéléphonie*

Finalement, la radiotéléphonie est le dernier outil majeur utilisé par les contrôleurs aériens. Elle permet au contrôleur d'interagir oralement avec les pilotes des aéronefs, principalement lors des requêtes envers les pilotes visant à réguler ou à résoudre les conflits potentiels.

Plus précisément, ce média sera utilisé dans deux principaux cas :

1. La prise de contact avec chaque aéronef pour informer les pilotes de leur entrée ou sortie du secteur ;
2. L'envoi des « clairances »<sup>3</sup> afin de résoudre un conflit ou simplement de fluidifier le trafic.

---

3. Une clairance est une autorisation délivrée à un aéronef afin de manœuvrer dans des conditions spécifiées

**Résumé du chapitre :**

- L'ensemble de l'espace aérien est géré par différents centres de contrôle répartis sur l'ensemble du territoire. Ils sont divisés en secteurs aériens dont les contrôleurs sont entièrement responsables.
- Un contrôleur aérien a pour mission principale de détecter puis de résoudre les conflits potentiels entre aéronefs. La phase initiale de détection des conflits constitue la tâche essentielle pour le contrôleur. Elle est définie comme étant une activité dynamique complexe qui nécessite le traitement de nombreuses variables.
- L'écran radar représente l'outil majeur actuel des contrôleurs. Il fournit la quasi-totalité des informations visuelles nécessaires à la réalisation de la tâche.

# 3

---

## LES EXIGENCES DE LA TÂCHE DANS LE CONTRÔLE AÉRIEN.

---

D'un point de vue macroscopique, la charge mentale est le résultat direct d'un ensemble d'exigences de la tâche (Wickens, 1992; Boag et al., 2006; Stein, 1998). Ces exigences – que nous retrouvons dans la littérature sous les différents termes de « task load » ou « task demand » – peuvent être définies comme une combinaison de différents facteurs strictement objectifs propres à la tâche, et, de ce fait, elle inclut la notion de complexité qui occupe également une place importante dans la recherche sur le contrôle aérien (Hillburn, 2004).

Brièvement, si la quantité d'information à traiter excède la capacité de traitement du contrôleur pendant une période de temps donnée, alors le risque de détérioration des conditions de sécurité augmente. Dans un contexte d'augmentation quasi continue du trafic aérien, de nombreuses études sont focalisées sur les facteurs relatifs à cette exigence de la tâche, avec pour objectif d'évaluer leur poids respectif en terme de prédiction de la charge mentale chez les contrôleurs aériens.

Dans ce chapitre, nous présenterons les principaux facteurs propres à l'exigence de la tâche, tels qu'ils sont décrits dans la littérature sur le contrôle aérien. Dans le chapitre suivant, nous tenterons d'expliquer pourquoi, d'un point de vue strictement cognitif, ces facteurs sont susceptibles de générer de la charge mentale.

### 3.1 LA DENSITÉ DU TRAFIC

Arad (1964) est un des premiers à mentionner le nombre d'avions comme prédicteur de ce qu'il nomme, je cite, « the controller load » (la charge des contrôleurs). Depuis, la densité du trafic a été l'objet de nombreuses études et elle est sans doute la plus citée dans la

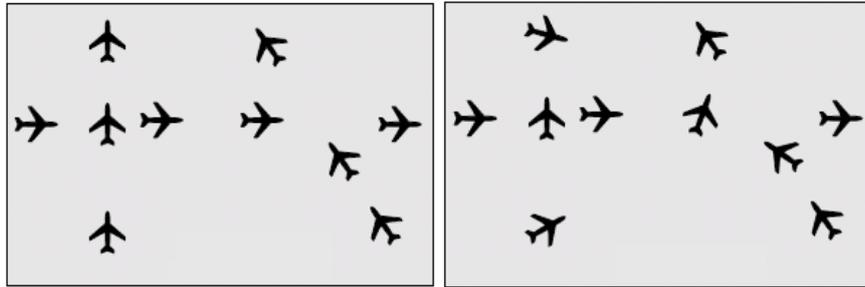


FIGURE 4: Illustration de deux représentations de trafic possédant la même densité mais engendrant des niveaux d'exigences différents. Schéma issu de l'étude de van Gent et al. (1997)

littérature en tant que facteur explicatif de la charge mentale chez les contrôleurs aériens (Boag et al., 2006). Toutefois, elle a également fait l'objet de nombreuses critiques (pour une revue voir Hillburn, 2004). Par exemple, Mogford, Guttman, Morrow, et Kopardekar (1995) ont démontré qu'un faible nombre d'aéronefs pouvait engendrer une forte charge mentale lorsqu'ils interagissent de manière complexe, notamment lorsqu'ils sont impliqués dans des conflits difficiles à diagnostiquer et à résoudre.

Les deux représentations de trafic de la figure 4 illustrent parfaitement l'absence de relation causale directe entre l'exigence de la tâche – et donc la charge mentale – et la densité du trafic. Les deux schémas présentent chacun 10 aéronefs situés aux mêmes emplacements. La densité de trafic est donc rigoureusement identique. Sur le schéma de droite, les caps de quatre aéronefs ont été écartés des routes aériennes établies dans le secteur. Il apparaît alors clairement que la détection des conflits sera plus difficile à effectuer.

Par conséquent, la relation entre l'exigence de la tâche et la charge mentale résultante n'est pas exclusivement explicable par le nombre d'avions (voir Figure 4). Ainsi, la densité du trafic (même si elle est un facteur de charge à part entière) n'expliquerait qu'en partie les phénomènes de charge chez les contrôleurs aériens. En réalité, son impact pourrait être de nature indirecte. Hillburn (2004) indique que la densité du trafic est fortement corrélée au nombre de conflits. Or, la simple augmentation du nombre de conflits (Laudeman, Shelden, Branstrom, & Brasil, 1998), ou encore l'accroissement de leur proximité temporelle (Chatterji & Sridhar, 2001) augmentent la charge

mentale chez les contrôleurs. De plus, l'augmentation du nombre d'avions autour d'un conflit a également des effets néfastes sur la charge mentale (Chatterji & Sridhar, 2001). Le contrôleur doit gérer de nombreuses variables et ses possibilités d'action pour résoudre le conflit sont réduites, ce qui engendre une pression temporelle forte et une sensation de charge accrue.

En conclusion, une forte densité du trafic pourrait jouer davantage le rôle d'accélérateur en augmentant la probabilité d'occurrence des conflits et en complexifiant leur gestion.

### 3.2 LES CARACTÉRISTIQUES DES CONFLITS POTENTIELS ENTRE AÉRONEFS

Nous avons commencé à évoquer précédemment le rôle central joué par les conflits en terme de charge mentale. Dans cette partie, nous allons décrire les différentes caractéristiques objectives propres aux conflits qui peuvent être considérées comme des facteurs sources – ou au moins modulateurs – de la charge mentale chez les contrôleurs aériens.

La plupart des résultats que nous allons exposer ont été obtenus par une approche réductionniste mettant en scène seulement deux avions, la plupart du temps statiques. Cette méthodologie est issue des travaux de Leplat et Bisseret (1966), véritables précurseurs dans le domaine. Elle consiste à présenter une série de photographies représentant des cas de conflits entre deux avions dans différentes configurations spatiales. Les participants devaient alors juger le plus rapidement possible de l'existence ou non d'un conflit. Cette méthode s'est depuis imposée et a largement contribué à l'étude des caractéristiques détaillées des conflits (pour une revue, voir Boag et al., 2006 et Loft, Sanderson, Neal, & Mooij, 2007).

#### 3.2.1 *Caractéristiques géométriques macroscopiques*

Une des premières approches originales a consisté à étudier l'impact de l'angle de convergence entre deux aéronefs impliqués dans un conflit (Enard, 1975). L'auteur base son raisonnement sur les distances séparant les aéronefs du point de croisement. Il émet l'hypothèse que

les contrôleurs utilisent un processus particulier consistant à projeter mentalement les deux distances l'une sur l'autre afin de les comparer et de juger si les aéronefs sont dans une situation de conflit. L'auteur prédit un effet de la taille des angles sur la précision et la difficulté du diagnostic. Afin de tester son hypothèse, il a soumis deux groupes de niveaux de qualification différents à une tâche de détection de conflit. Les résultats de l'étude ont permis de valider l'hypothèse. La capacité des contrôleurs à juger correctement de l'existence d'un conflit diminue fortement lorsque l'angle de convergence augmente, et cela quel que soit leur niveau de qualification. Récemment, [Remington, Johnston, Ruthruff, Gold, et Romera \(2000\)](#) ont confirmé ces résultats en enregistrant cette fois les temps de réponse. Les résultats indiquent que les contrôleurs mettent plus de temps à répondre lorsque les angles de convergence sont importants. De plus, [Remington et al. \(2000\)](#) ont constaté que la distance entre les aéronefs affecte également les temps de détection des conflits, plus elle est importante, plus les temps de réponse augmentent. Basiquement, lorsque deux aéronefs sont séparés par une longue distance, les contrôleurs éprouvent davantage de difficulté pour juger de l'existence d'un conflit potentiel.

Toutefois, il est important de noter que ces deux études ne proposaient pas de réelle mesure de la charge mentale. À notre connaissance, seule l'étude de [Pawlak, Brinton, Crouch, et Lancaster \(1996\)](#) a démontré expérimentalement l'existence d'un lien entre l'augmentation des angles de convergence et un accroissement de la sensation de charge mentale chez les contrôleurs aériens.

### 3.2.2 *Le temps avant conflit*

Le temps avant conflit correspond à la période de temps restante avant que les aéronefs ne soient en conflit. Il détermine directement la pression temporelle associée à la gestion du conflit ; plus le temps disponible est faible, plus la pression temporelle augmente. L'étude de [Rantanen et Levinthal \(2005\)](#) a récemment proposé d'examiner l'impact de la pression temporelle lors d'une tâche de détection et de résolution de conflit. Ils présentaient pour cela différentes configurations dynamiques d'aéronefs où le temps avant conflit différait. Les contrôleurs avaient pour unique consigne de gérer les conflits le plus rapidement possible. Les résultats indiquent que lorsque la pression temporelle est forte, les temps de réponses augmentent et

les performances de résolution diminuent. Là encore, aucune mesure réelle de charge mentale n'était effectué. Néanmoins, les auteurs insistent sur le fait que les performances et les mesures temporelles de l'exigence de la tâche permettent d'inférer les niveaux de charge mentale. Autrement dit, selon [Rantanen et Levinthal \(2005\)](#), lorsque le temps avant conflit est faible, la pression temporelle et la charge mentale augmente.

### 3.2.3 *La complexité relationnelle de la détection de conflit*

[Boag et al. \(2006\)](#) proposent une très intéressante analyse de la complexité relationnelle de la détection de conflit. L'objectif de cette recherche était d'élaborer une métrique de complexité classifiant les différents cas de conflits entre deux avions. Un des fondements théoriques majeurs de l'étude concerne les travaux effectués par [Lamoureux \(1999\)](#) quelques années auparavant. Ce dernier avait démontré l'importance des changements d'altitude des aéronefs engagés dans un conflit comme facteur explicatif de la charge mentale.

En conséquence, [Boag et al. \(2006\)](#) centrent leur analyse de la complexité sur ce qu'ils nomment les « transitions ». Ces transitions correspondent aux moments clés où les avions sortent ou entrent en conflit dans l'une des deux dimensions (i.e. passent en dessus ou en dessous de la séparation minimale sur la dimension verticale ou horizontale). Pour rappel, deux aéronefs sont considérés en conflit lorsqu'ils violent simultanément les règles de séparation minimale sur les deux dimensions. Selon [Boag et al. \(2006\)](#), chaque transition représente une variable à construire et à maintenir en mémoire de travail. Par conséquent, leur hypothèse est que le niveau de complexité croît linéairement avec le nombre de transitions. La métrique prédit donc une forte complexité lorsque le nombre de transitions augmente.

1. Illustration d'un cas simple à une transition : soient deux avions avec la même altitude qui se suivent sur la même voie aérienne. Le second est plus rapide que le premier et il rattrape donc le premier. Seule la prise en compte de l'entrée en conflit sur la dimension horizontale est nécessaire pour juger de l'existence du conflit.
2. Illustration d'un cas plus complexe à deux transitions : soient deux avions qui se suivent sur la même voie aérienne et le second est plus rapide que le premier. En revanche, cette fois,

il ne sont pas à la même altitude. Le deuxième avion monte progressivement vers le niveau de l'autre. En conséquence, le contrôleur devra estimer deux transitions : le moment où l'aéronef entre en conflit sur la dimension horizontale et le moment où il entre sur la dimension verticale.

Les auteurs ont éprouvé leur modèle en utilisant une méthode similaire à celle proposée par [Leplat et Bisseret \(1966\)](#). [Boag et al. \(2006\)](#) présentaient des photographies de trafics statiques à une vingtaine de contrôleurs et les participants devaient dans un premier temps juger de l'existence ou non d'un conflit le plus rapidement possible. Ensuite, les contrôleurs devaient préciser les niveaux de complexité et de charge engendrés par la gestion du conflit.

Les analyses statistiques indiquent que la métrique de complexité parvient à expliquer de manière significative les variances de l'ensemble des données, en particulier celle qui concerne la charge mentale perçue (76%). De plus, les résultats révèlent que les temps de réponse et les niveaux de charge mentale rapportés sont plus importants lorsque les séparations minimales (verticale ou horizontale) à estimer sont proches des limites qui définissent un conflit.

En conclusion, le nombre de transitions et l'amplitude des séparations minimales sont deux autres facteurs susceptibles de faire varier la charge mentale liée à la gestion des conflits chez les contrôleurs aériens.

**Résumé du chapitre :**

De nombreux facteurs explicatifs propres à la tâche ont été proposés dans la littérature comme sources ou modulateurs de la charge mentale chez les contrôleurs aériens.

Le facteur lié à la densité du trafic semble jouer un rôle majeur. Il est toutefois à considérer avec précaution. Il pourrait en effet seulement jouer le rôle d'accélérateur en augmentant le nombre et la proximité temporelle des conflits tout en complexifiant leur gestion. Les conflits peuvent être considérés comme les unités élémentaires à la base des phénomènes de charge. Leur nombre et leurs caractéristiques intrinsèques déterminent le temps nécessaire à la gestion du trafic. Étant donné que la pression temporelle est une caractéristique inhérente au contrôle aérien, ces variations de temps « nécessaire » semblent expliquer en grande partie le niveau de charge mentale chez les contrôleurs aériens. Nous reviendrons en détail sur ce point dans le prochain chapitre.

# 4

---

## FONDEMENTS COGNITIFS DE LA CHARGE CHEZ LES CONTRÔLEURS AÉRIENS

---

Dans ce chapitre, nous allons tenter de décrypter, d'un point de vue strictement psychologique, les facteurs explicatifs de la charge mentale propres aux exigences de la tâche que nous venons de décrire dans le précédent chapitre. Pour cela, nous allons nous concentrer sur les principaux fondements cognitifs de la charge mentale. Ils sont transversaux à la plupart des thématiques majeures de la psychologie cognitive de ces cinquante dernières années (Chanquoy et al., 2007). Ainsi, afin de structurer notre argumentation, nous avons opté pour un découpage en trois parties, à savoir l'étude du rôle de l'attention, de la mémoire et finalement de l'expertise. Nous avons choisi de traiter cette dernière séparément étant donné l'importance qu'elle semble avoir sur les phénomènes de charge mentale dans le contrôle aérien. À chaque fois, nous décrirons les principaux modèles (de manière volontairement classique et consensuelle) et nous essayerons d'expliquer en quoi ils permettent de rendre compte des phénomènes de charge mentale chez les contrôleurs aériens.

### 4.1 LE RÔLE DE L'ATTENTION

Dans les ouvrages de psychologie, nous trouvons une multitude de définitions de l'attention. Celle proposée par James (1890), un des pères de la psychologie américaine, est probablement la plus citée et elle semble encore tout à fait valable aujourd'hui : « L'attention est la prise de possession par l'esprit, sous une forme claire et vive, d'un objet ou d'une suite de pensées parmi plusieurs qui semblent possibles ». Il précise également qu'« Elle implique le retrait de certains objets afin de traiter plus efficacement les autres ».

Depuis, de nombreux travaux ont été effectués. Selon la conception la plus communément acceptée, deux principales catégories d'attention se distinguent : l'attention sélective et l'attention partagée. Les deux reposent sur la notion centrale de ressources attentionnelles. Elles sont nécessaires à la réalisation de n'importe quelle activité mais elles ne sont pas en quantité illimitée. Ce concept est souvent associé à celui de la charge mentale. Barrouillet (1996) propose sur le sujet une très intéressante revue théorique. Brièvement, selon l'auteur, la notion de ressources renverrait davantage aux « propriétés » de l'individu, c'est-à-dire la quantité d'énergie disponible qu'il peut allouer pour effectuer les différentes opérations mentales nécessaires à la réalisation de la tâche. A l'opposé, la notion de charge mentale serait davantage une propriété propre à la tâche, elle correspondrait à la quantité de ressources nécessaires à la réalisation de la tâche.

L'étude des caractéristiques des ressources attentionnelles a fait l'objet de nombreux travaux et elle alimente un riche débat dans la littérature depuis de nombreuses années. Le postulat de leur existence n'a toutefois jamais été remis en question étant donné qu'il s'appuie sur de nombreuses observations naturelles difficilement contestables. Un individu ne peut pas accumuler indéfiniment l'exécution simultanée de différentes tâches, même s'il en est expert.

Nous allons voir maintenant pourquoi l'attention sélective et l'attention partagée fournissent un cadre théorique explicatif particulièrement pertinent des phénomènes de charge chez les contrôleurs aériens.

#### 4.1.1 *L'attention sélective*

Basiquement, elle peut être définie comme la sélection d'une information à traiter. Le mécanisme consiste à se focaliser sur une information pertinente en filtrant les autres informations périphériques non utiles pour la réalisation de la tâche. De nombreux modèles théoriques ont été proposés. Broadbent (1958), un des premiers protagonistes dans le domaine, évoque l'idée de filtres attentionnels en amont qui permettent de ne pas saturer le système central de traitement des informations.

Cette aptitude semble tout à fait cruciale étant donné que chaque individu est soumis en permanence à une multitude d'informations

présentes dans son environnement. Toutefois, l'attention sélective peut également engendrer des effets indésirables, notamment lorsqu'elle nécessite une allocation de ressources importante. Dans le domaine de l'attention sélective visuelle – cadre particulièrement pertinent dans le domaine du contrôle aérien étant donné la nature de la tâche (cf. chapitre 2) –, l'expérience de Kosslyn et al. (1978, citée dans Chanquoy et al., 2007) illustre parfaitement les caractéristiques et surtout les « limites » de l'attention sélective. Les auteurs présentaient aux participants une carte d'une île contenant différents objets. Dans une des conditions expérimentales, les expérimentateurs demandaient aux participants de fixer attentivement un seul des objets – donc d'allouer une partie importante de leurs ressources sur un point précis. Ensuite, dans un deuxième temps, ils présentaient à nouveau la carte et les sujets devaient juger si les objets étaient ou non présents lors de la première présentation. Les résultats indiquent que les temps de décision augmentent linéairement en fonction de la distance séparant l'objet à juger de l'objet initialement fixé. La métaphore du projecteur permet d'illustrer les différents mécanismes à l'œuvre : les performances se dégradent de façon linéaire en fonction de l'éloignement entre les éléments périphériques « non éclairés » et le « centre de la lumière ».

Si l'attention est focalisée sur un élément particulier, le risque de « manquer » d'autres événements annexes augmente. La résultante mécanique de cette focalisation est que les autres éléments de l'environnement deviennent davantage secondaires. L'hypothèse principale sous-jacente étant que l'événement saillant accapare une partie importante des ressources à un moment donné (effet tunnel).

#### *L'attention sélective chez les contrôleurs aériens*

Dans le domaine du contrôle aérien, plusieurs recherches ont rapporté cet effet « tunnel » lors de situations où la charge mentale était élevée (Cabon, Farbos, & Mollard, 2000; Endsley & Rodgers, 1998; Willems, Allen, & Stein, 1999b). Toutes ont montré que le balayage visuel était davantage structuré et focalisé dans des conditions où l'exigence de la tâche était élevée. Plus précisément, un conflit est par définition un élément saillant qui doit faire l'objet d'une attention particulière sur une zone précise de l'écran radar. Sa gestion nécessite mécaniquement une focalisation de l'attention, autrement

dit, un ensemble de ressources attentionnelles et temporelles qui ne pourront pas être allouées sur les autres aéronefs. En conséquence, le risque statistique de manquer un autre événement important en périphérie augmente. Plus simplement, le risque de prendre du retard sur la gestion du reste du trafic augmente également – ce qui peut engendrer une augmentation de la pression temporelle.

De plus, Kopardekar et Magyarits (2003, cités par Boag et al., 2006) ont montré que la présence de conflits en proximité des frontières du secteur aérien (i.e. en périphérie sur l'écran radar) pouvait augmenter la sensation de charge mentale perçue par les contrôleurs aériens. Ce résultat nous semble là encore très intéressant pour illustrer les effets de l'attention dite focalisée. En effet, nous pouvons raisonnablement émettre l'hypothèse que cette allocation de ressources en périphérie sera particulièrement coûteuse lorsque le contrôleur focalise son attention sur la gestion des aéronefs (et donc des conflits potentiels) présents sur le centre de l'écran.

En résumé, ce premier type d'attention, dite sélective, peut vraisemblablement constituer une première explication des phénomènes de charge mentale liés à la gestion des conflits potentiels entre aéronefs.

#### 4.1.2 *L'attention partagée*

Cette fois, par opposition à l'attention sélective, l'attention partagée rend compte de la capacité d'un individu à effectuer plusieurs tâches en même temps, autrement dit, comment il peut allouer des ressources sur plusieurs activités cognitives de manière simultanée – le terme « *multitâches* » est souvent employé dans la littérature par analogie aux systèmes informatiques. Cette aptitude joue un rôle central dans de nombreuses activités, mais elle semble particulièrement déterminante dans une tâche complexe et dynamique comme le contrôle aérien. De manière extrêmement simplifiée, la capacité d'un individu à effectuer une deuxième tâche en parallèle dépend de la quantité de ressources qu'il pourra lui allouer.

Dans ce contexte, de nombreuses études se sont intéressées aux modalités d'allocation des ressources attentionnelles. Deux principales théories s'affrontent sur le sujet. Kahneman (1973) et Just et Carpenter (1992) considèrent qu'il existe un réservoir unique de ressources pour accomplir une tâche. A l'inverse, Wickens (1984); Baddeley (1986) considèrent qu'il existe de multiples réservoirs de ressources, tous spé-

cifiques aux modalités de traitement des informations nécessaires à la réalisation de la tâche. Les théories divergent mais il existe un relatif consensus sur les deux principaux facteurs explicatifs (Chanquoy et al., 2007). Le premier concerne **la difficulté de la tâche**. Elle peut être assimilée trivialement à la quantité d'informations à traiter. Ce facteur est probablement le plus intuitif, mais il est également le plus délicat à étudier étant donné qu'il interagit de manière extrêmement forte avec le niveau de familiarité (processus automatisés vs contrôlés) et/ou le niveau d'expertise de l'individu sur les tâches à effectuer. Nous reviendrons en détail sur ces notions en fin de chapitre. Le deuxième facteur concerne **la similarité entre les tâches**. Le traitement de deux stimuli via des modalités sensorielles similaires peut engendrer des effets d'interférence et ainsi une baisse de la performance pour l'une, l'autre ou même pour les deux tâches à réaliser. À l'inverse, une utilisation de modalités sensorielles différentes (visuelle et auditive par exemple) impacte moins les performances. Les exemples dans la littérature sont nombreux. Par exemple, Posner, Nissen et Klein (1976, cités par Metzger & Parasuraman, 2005) ont montré que l'utilisation d'un signal auditif était plus efficace qu'un signal visuel pour réduire les temps de réponse lorsque le participant réalise une simple tâche visuelle de détection de cible.

Les théories « strictes » à réservoir unique peinent à décrire ces phénomènes. En revanche, Wickens (1984) propose un cadre théorique très intéressant qui permet d'explicitier ces différents effets.

#### *La théorie des ressources multiples*

Wickens (1984) a proposé une théorie visant à expliquer les performances d'opérateurs soumis à des conditions de forte charge (de type multitâche) dans des environnements écologiques complexes. Depuis, elle semble s'être progressivement imposée dans le domaine du contrôle aérien (pour une revue récente de la théorie, voir Wickens, 2002, 2008). L'une des forces du modèle théorique est qu'il parvient à prédire avec finesse les cas de surcharge en situation de multitâches, c'est-à-dire les situations où les performances du participant chutent en raison d'un manque de ressources attentionnelles. C'est d'ailleurs pour cette raison que cette théorie est souvent associée au concept de charge mentale – même si Wickens (2008) considère qu'il existe seulement un simple recouvrement (« *overlap* ») entre les deux concepts.

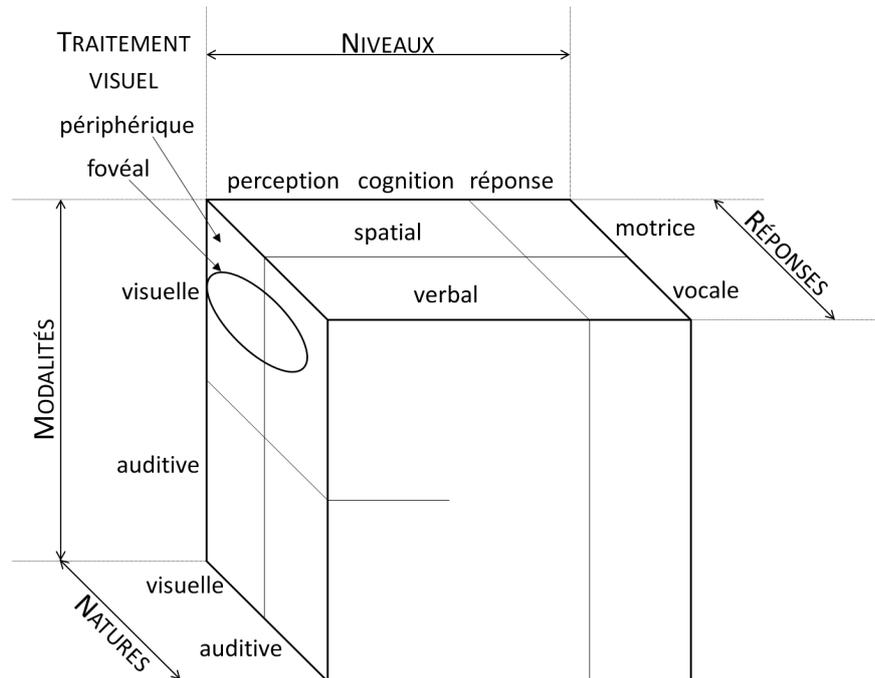


FIGURE 5: Le modèle des ressources multiples à 4 dimensions, d'après Wickens (2008)

Le modèle distingue quatre dimensions concernant la gestion des ressources lors du traitement d'une information (cf. Figure 5).

1. La nature de l'information : le traitement des informations spatiales et verbales utilise des ressources différentes.
2. La modalité sensorielle : l'encodage des informations visuelles et auditives utilise des ressources différentes.
3. Le type de traitement visuel : les traitements effectués en vision périphérique et en vision fovéale utilisent des ressources différentes.
4. Le niveau de traitement de l'information : les phases d'encodage et de traitement (mémoire de travail) d'une part, et les phases liées aux réponses d'autre part, utilisent des ressources différentes.

Enfin, le mode de réponse doit également être pris en compte. L'exécution d'une réponse motrice (ou d'ordre spatial) s'effectuera en utilisant son propre réservoir de ressources, distinct de celui dédié

aux réponses vocales (ou d'ordre verbal). Il est important de préciser toutefois que le mode de réponse n'est étrangement pas considéré comme une dimension à part entière.

Sur cette base, Wickens (1984) établit deux combinaisons optimales en terme d'« efficacité » du traitement d'une information, ou plutôt d'adéquation entre les différents réservoirs contenant les ressources attentionnelles.

1. matériel verbal × modalité auditive × réponse vocale
2. matériel spatial × modalité visuelle × réponse motrice

A l'inverse, les autres combinaisons sont considérées comme sous-optimales.

Pour ce qui nous intéresse plus particulièrement, le modèle définit la charge mentale (CM) par un ratio entre deux durées : le temps nécessaire à la réalisation de la tâche divisé par le temps disponible pour effectuer la tâche (cf. l'équation 4.1).

$$CM = \frac{\text{Temps nécessaire}}{\text{Temps disponible}} \quad (4.1)$$

La récente version computationnelle du modèle permet de prédire les cas de surcharge dans des environnements écologiques complexes (Wickens, 2008). Le modèle prédit des risques de saturation (ou de surcharge mentale) en cas de sur-utilisation d'un des réservoirs. Par exemple, au niveau sensoriel, le modèle prédit un risque accru de surcharge si les deux tâches à effectuer nécessitent un encodage utilisant la même modalité (visuelle par exemple). À l'inverse, l'utilisation de modalités différentes (visuelles et auditives par exemple) permet d'éviter les interférences étant donné qu'elles ont chacune leur propre réservoir de ressources.

Pour conclure, un des intérêts majeurs de la théorie des ressources multiples est qu'elle se détache des purs aspects quantitatifs (nombre d'opérations, réservoir unique) pour se concentrer davantage sur la façon dont les ressources sont partagées et allouées dans le temps selon les différentes caractéristiques des traitements. Enfin, il est intéressant de noter qu'elle est une des rares théories à posséder des corrélats neuro-anatomiques forts. En effet, il est clairement établi que les réseaux de neurones impliqués sur les niveaux perceptifs et

moteurs – a minima – sont indépendants (Buser & Imbert, 1993). Cela renforce donc le postulat de l'existence de réservoirs de ressources distincts.

#### *Confrontation du modèle de Wickens au contrôle aérien*

L'activité d'un contrôleur aérien implique fréquemment l'exécution simultanée de plusieurs tâches. Selon le modèle de Wickens (2008), certaines combinaisons peuvent être considérées comme optimales. Par exemple, un contrôleur peut communiquer avec un aéronef (i.e. typiquement lorsqu'il gère une entrée ou une sortie d'aéronef du secteur), tout en effectuant en parallèle un traitement spatial sur la gestion d'un conflit. Dans cette configuration, les deux tâches ne devraient que peu ou pas interférer étant données qu'elles nécessitent des ressources issues de réservoirs distincts.

En revanche, toujours selon le modèle de Wickens (2008), certaines caractéristiques de la tâche peuvent être considérées comme sous-optimales, notamment du point de vue de la quantité des ressources utilisées. Tout d'abord, l'encodage des informations s'effectue principalement par la modalité visuelle. Nous avons évoqué précédemment que le radar est de loin le média le plus utilisé par les contrôleurs. Ensuite, la gestion des conflits nécessite de nombreux traitements d'ordre spatial (comparaison de trajectoires, estimation des distances entre les aéronefs et le point de croisement, estimation de la future position de l'avion selon sa vitesse, etc.). Enfin, la résolution des conflits implique à terme une intervention vocale auprès des pilotes – un type de réponse considéré dans le modèle comme sous-optimal à la suite d'un traitement d'ordre spatial.

En résumé, les risques de saturations des niveaux perceptifs et centraux sont réels et doivent être pris en considération dans une tâche comme le contrôle aérien (Parasuraman, 2000; Sarter, 2000). Ils peuvent expliquer en partie les phénomènes de charge mentale. Sklar et Sarter (1999) attribuent d'ailleurs la plupart des dysfonctionnements de la relation homme-machine à une sur-utilisation des informations visuelles.

### 4.1.3 *La vigilance et la notion de charge « optimale »*

La vigilance est une autre composante majeure de l'attention (Posner & Petersen, 1990). Pour ce qui nous intéresse ici, elle peut être basiquement définie comme la capacité à détecter des événements pertinents rares lors de tâches longues et monotones.

Dans le domaine du contrôle aérien, Redding (1992) rapporte que les principaux cas d'erreurs et d'incidents se produisent lors de condition de trafic à moyenne ou faible densité. Même si Hillburn (2004) critique ces résultats – il souligne un biais statistique dû au fait que les deux conditions de trafic sont largement majoritaires (de l'ordre de 90% par jour) – ces données suggèrent qu'il existe une relation causale possible entre hypo-vigilance et sécurité. Cette problématique serait alors cruciale pour la plupart des systèmes d'aide basés sur une forte automatisation. Une interprétation alternative serait qu'un niveau de charge minimal est nécessaire à la réalisation de la tâche. Nous reviendrons en détail sur ce point à la fin de ce chapitre en abordant le rôle des stratégies et de l'expertise sur la charge mentale. Nous verrons que les contrôleurs aériens tentent en permanence de rester avec un niveau de charge «optimal», c'est-à-dire au dessus du seuil d'hypo-vigilance et au dessous du seuil de surcharge mentale.

## 4.2 LE RÔLE DE LA MÉMOIRE DE TRAVAIL

Le concept de mémoire de travail (MDT) semble être particulièrement pertinent pour rendre compte des phénomènes de charge mentale, et cela d'autant plus qu'il est généralement admis que la MDT gère le focus attentionnel (Cowan, 1988; Chanquoy et al., 2007). De ce fait, la MDT renvoie à la plupart des notions relatives à l'attention que nous avons développées précédemment. De manière extrêmement simplifiée, une surcharge attentionnelle peut être assimilée à une surcharge de la MDT. Baddeley et Hitch (1974) ont été les premiers à proposer ce concept de mémoire de travail. Il a succédé à celui de mémoire à court terme, trop réduit à une simple fonction de stockage. Brièvement, les auteurs introduisent un aspect dynamique et fonctionnel en intégrant le traitement des informations stockées (i.e. une « mémoire qui travaille ». Cette notion s'est depuis largement imposée et de nombreux nouveaux modèles ont vu le jour.

Tout d’abord, nous présenterons la MDT telle qu’elle est définie dans le modèle ACT d’Anderson (1983), probablement un des plus reconnus dans le domaine de la psychologie cognitive. Plus précisément, nous allons l’aborder dans le cadre de l’architecture cognitive nommée Adaptive Control of Thought-Rational (ACT-R) (i.e. la version computationnelle la plus récente du modèle initial, Anderson & Lebiere, 1998; Anderson et al., 2004; Anderson, 2007). Ensuite, nous étudierons les liens étroits qui unissent la MDT au concept de charge mentale. Pour cela, – et seulement afin de clarifier notre exposé – nous présenterons séparément ce qui nous semble être les deux notions majeures sous-jacentes au concept de MDT : (1) la notion de capacité et (2) la notion de durée. Après les avoir définies rigoureusement dans le cadre de l’architecture cognitive ACT-R, nous verrons pourquoi elles peuvent expliquer la relation entre la mémoire de travail et la charge mentale, et comment elles peuvent rendre compte des phénomènes de charge dans le contrôle aérien.

#### 4.2.1 La MDT dans l’architecture cognitive ACT-R

Brièvement, ACT-R se présente comme une théorie unifiée de la cognition humaine. L’architecture a été conçue dans l’objectif de simuler différents comportements psychologiques en conservant une validité neurobiologique forte. D’ailleurs, depuis quelques années, certains chercheurs ont recours aux techniques d’imagerie (IRMf) afin de valider et d’améliorer leurs modèles cognitifs<sup>1</sup>. L’architecture est composée d’un ensemble de modules parallélisés qui implémentent des aires cérébrales (cf. Figure 6). Elle inclut quatre modules périphériques (deux sensoriels et deux moteurs) et quatre modules centraux ; les centraux sont responsables du traitement de l’information alors que les périphériques simulent l’interaction avec l’environnement. L’ensemble des liens entre les différents modules s’effectuent par des mémoires tampon (ou « buffers »), et le contenu de l’ensemble des buffers représente l’« état » de l’architecture à un moment donné (i.e. à chaque période de 50 ms environ). Par ailleurs, il nous semble intéressant de noter que les buffers relatifs aux modules sensoriels sont relativement similaires aux filtres évoqués par Broadbent (1958)

---

1. Cf. le site web dédié à ACT-R pour un aperçu des derniers résultats <http://act-r.psy.cmu.edu>

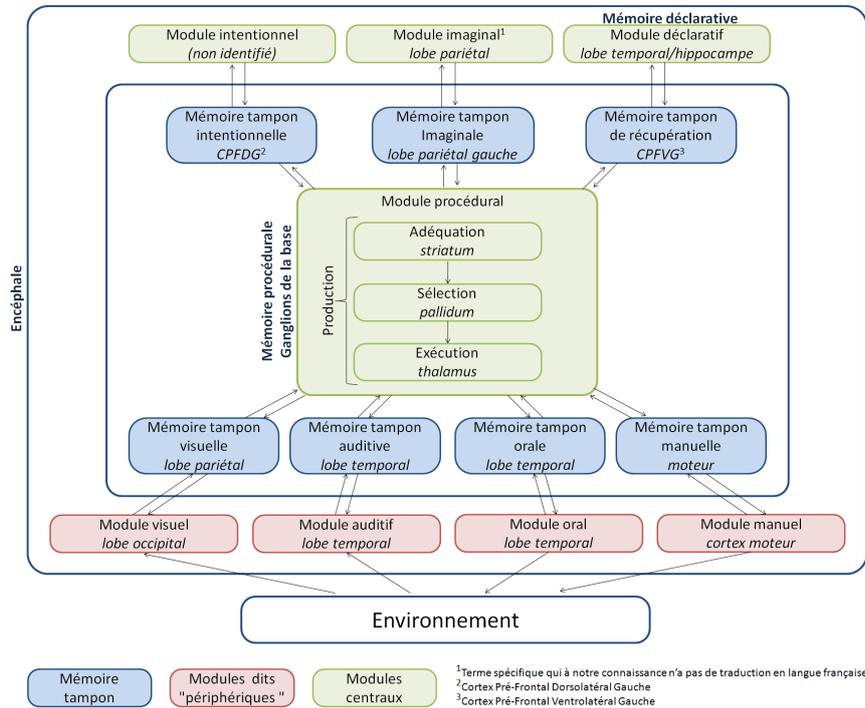


FIGURE 6: Les base neuro-anatomiques de l'architecture ACT-R

dans sa théorie sur l'attention sélective.

ACT-R est un système dit hybride étant donné qu'elle possède à la fois un niveau « symbolique » et un niveau « sub-symbolique ». Autrement dit, ACT-R utilise un système de symboles régi par une couche de calcul connexionniste afin de décrire les unités et le fonctionnement de la cognition.

Au niveau symbolique, l'un des piliers de la théorie repose sur la division de la mémoire à long terme en deux composantes, la déclarative et la procédurale. La mémoire déclarative contient des connaissances générales sous forme de chunks, des unités de connaissance du type : « Paris est la capitale de la France » ou « 2 + 2 = 4 ». Ces unités sont manipulées par l'intermédiaire des différents buffers de l'architecture. La mémoire procédurale contient des « règles de productions », c'est-à-dire un ensemble de savoir-faire de type « Si A alors B ». « A » représente la ou les conditions à réunir et « B » la production d'un comportement. Chaque règle peut être assimilée à

une représentation symbolique d'un réseau de neurones artificiels ; de manière simplifiée, un réseau de neurone engendre une action précise au niveau de sa couche de sortie lorsqu'il rencontre un pattern d'activation particulier sur sa couche d'entrée (pour une explication plus détaillée, voir la notion de « Perceptron », Rosenblatt, 1958).

Le niveau sub-symbolique peut se résumer à un ensemble d'équations mathématiques qui simule le rôle des connexion neuronales et qui vient contrôler chaque règle et chaque connaissance au niveau symbolique. Il existe notamment une équation centrale qui calcule à chaque cycle le niveau d'activation de chaque chunk en mémoire déclarative. Ce niveau rend compte de l'utilité générale du chunk et de sa pertinence d'utilisation. L'équation prend en compte deux principaux critères : (1) la fréquence d'utilisation du chunk – plus il est traité dans un des modules de l'architecture, plus son niveau d'activation augmente ; (2) le mécanisme de diffusion de l'activation dans un réseau sémantique. La mémoire déclarative est organisée en réseau dont chaque chunk représente un nœud. Lorsqu'un chunk est utilisé, les voisins proches verront leur niveau d'activation augmenter.

La MDT dans l'architecture cognitive ACT-R peut être définie à deux niveaux. Le premier est d'ordre structurel (cf. Figure 7). La MDT peut être assimilée au lieu d'appariement des connaissances procédurales et déclaratives. Cette conception est toutefois à considérer avec prudence étant donné que la MDT gère également les interactions avec les modules périphériques sensoriels, c'est-à-dire des chunks qui n'ont pas encore « transité » pas la mémoire déclarative. Ensuite, d'un point de vue « énergétique », la MDT est constituée par l'ensemble des unités (ou chunks) activées à un moment donné. Elle représente ainsi la partie active de la mémoire à long terme. Plus précisément, elle correspond à la somme des niveaux d'activation à l'œuvre à un moment donné. Nous aurons l'occasion d'y revenir plus en détail au cours de ce chapitre.

#### 4.2.2 *La notion de capacité*

La problématique générale de la « capacité » de la MDT a fait l'objet de nombreuses recherches. Elle trouve son origine dans les travaux sur la période réfractaire publiés dans les années 50 (Fraissee,

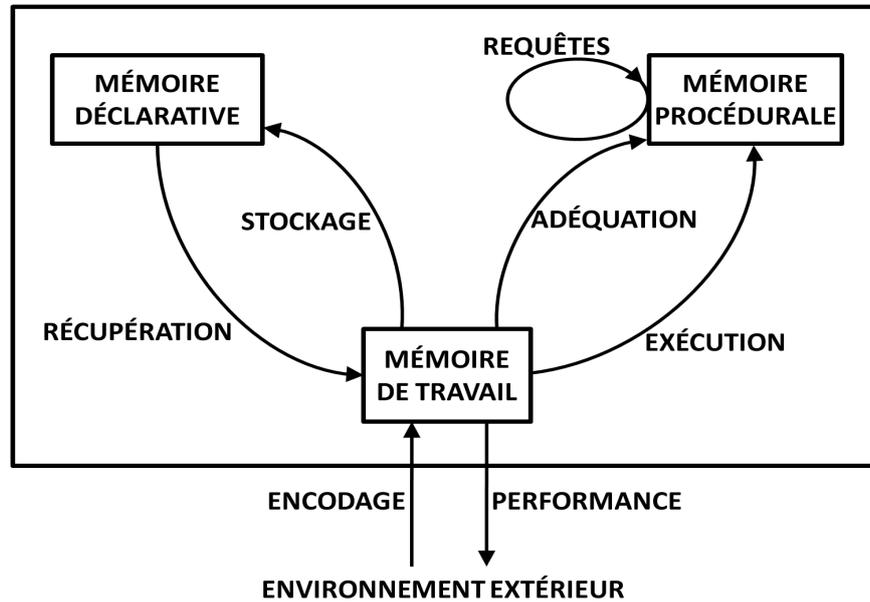


FIGURE 7: Représentation de la mémoire de travail dans la théorie ACT, d'après Anderson (1983)

1957; Welford, 1952) (i.e. des modèles basés sur l'hypothèse de l'existence d'un canal unique de traitement de l'information). Ces premières recherches permettront ensuite de formaliser le caractère universel de certaines limitations en terme de capacité de traitement de l'information. Le modèle de la MDT de Baddeley (1986) s'inscrit dans cette logique.

A l'heure actuelle, le consensus général est que la MDT a une capacité limitée, de nature unique ou multiple (pour rappel, voir ci-dessus la notion de réservoir contenant les ressources attentionnelles). Dans la littérature, une charge mentale élevée est souvent assimilée à une surcharge de la MDT (Barrouillet, 1996). Cela se traduit concrètement par une dégradation importante des performances lors de la réalisation d'une tâche. Autrement dit, le degré d'occupation de la MDT reflète – au moins en partie – le niveau de charge mentale à un moment donné.

Selon Anderson et Lebiere (1998), la notion d'empan de la MDT – i.e. la mesure de la capacité de la MDT – se retrouve sur les deux niveaux de l'architecture (symbolique et sub-symbolique).

Au niveau symbolique, l'ensemble des interactions entre les différents modules de l'architecture s'effectue par l'intermédiaire des buffers. Or, chaque buffer ne peut contenir qu'un seul chunk à un instant donné. Cette caractéristique limite par conséquent de manière drastique la quantité d'informations pouvant être traitées simultanément. Toutefois, à l'instar de la théorie proposée par Wickens (1984), chaque module possède son propre buffer. Ainsi, l'exécution de traitements parallélisés reste possible lorsque que les modules utilisés diffèrent – ce qui est le cas par exemple lors de l'utilisation des modules sensoriels visuel et auditif au même moment. À l'inverse, deux stimuli visuels (par exemple) nécessiteront forcément un traitement sériel. Par ailleurs, chaque chunk possède un nombre limité d'emplacements (ou « *slots* ») et chaque emplacement peut contenir une information élémentaire ou un autre chunk. Autrement dit, chaque chunk peut être représenté sous forme d'arborescence à plusieurs niveaux de profondeur. Toutefois, lorsque qu'un chunk est utilisé en MDT, il est important de préciser que les contenus des chunks situés dans les niveaux inférieurs de l'arborescence ne sont pas directement accessibles en MDT.

Au niveau sub-symbolique, la notion d'empan s'exprime en terme de niveau d'activation. Plus précisément, la « quantité d'utilisation » de la MDT correspond à la somme des degrés d'activation propres à chaque chunk. L'empan total de la MDT demeure donc une valeur relativement « floue ». Elle correspond à une valeur théorique maximale d'activation, propre à chaque individu, et variable selon le « poids attentionnel » attribué par le participant à la réalisation de l'objectif en cours de réalisation (Lovett, Reder, & Lebiere, 1999).

#### *La capacité de la MDT chez les contrôleurs aériens*

L'étude réalisée par Bisseret (1970) fournit de précieux éléments d'informations sur la capacité de la mémoire de travail chez les contrôleurs aériens. L'auteur soumettait un groupe de contrôleurs à différentes simulations variables selon trois densités de trafic (faible, moyenne et forte) et par conséquent variables selon le nombre d'informations à traiter et à mémoriser (respectivement 35, 56 et 77). Ensuite, à différents moments et sans prévenir le participant, l'expérimentateur interrompait la simulation et les contrôleurs étaient alors soumis à plusieurs tâches de rappel. Bisseret (1970) rapporte deux résultats

majeurs. Premièrement, quel que soit le trafic, le nombre d'informations par avion rappelé est stable (trois en moyenne). Deuxièmement, lorsque la densité du trafic augmente, les aéronefs qui n'étaient pas engagés dans un conflit sont plus fortement omis. Selon l'auteur, ces résultats peuvent refléter les limites de la capacité de la MDT. Lorsque le trafic est faible, la MDT peut contenir l'ensemble des aéronefs (qu'ils soient engagés dans un conflit ou non). En revanche, lorsque la charge augmente, la MDT ne contiendra que les avions qui ont nécessité des traitements et une attention soutenue, autrement dit, principalement les aéronefs engagés dans un conflit.

Confrontons maintenant ces résultats au modèle d'Anderson. Pour cela, nous reprenons le postulat de [Niessen et Eyferth \(2001\)](#), c'est-à-dire la présence en mémoire d'un chunk par aéronef lors d'une tâche de contrôle aérien. Dans le cadre de l'architecture cognitive [ACT-R](#), deux avions impliqués dans un conflit posséderont « mécaniquement » des niveaux d'activations nettement supérieurs aux autres aéronefs. En effet, étant donné qu'ils peuvent nécessiter de nombreux traitements (parfois long), ils sont susceptibles d'être manipulés fréquemment par le contrôleur (i.e. un temps de présence important dans le focus attentionnel). Pour rappel, dans [ACT-R](#), les niveaux d'activations des chunks dépendent fortement de leur fréquence d'utilisation. De plus, leur voisins proches dans le réseau (i.e. par exemple le deuxième aéronef impliqué dans le conflit) profiteront du mécanisme de diffusion de l'activation.

Sur cette base, les résultats obtenus par [Bisseret \(1970\)](#) peuvent être interprétés de la manière suivante : lorsque le trafic augmente, la somme des niveaux d'activations élevés des aéronefs en conflit va progressivement atteindre la valeur théorique maximale d'activation qui définit l'empan de la MDT. Dans ce contexte, les autres aéronefs seront omis lors de la tâche de rappel. À l'inverse, lorsque le trafic est faible, les aéronefs isolés peuvent être maintenus suffisamment actifs pour être rappelés.

En conclusion, une forte augmentation du nombre de conflits (liée à un accroissement du trafic) peut vraisemblablement engendrer une saturation de la MDT avec, à terme, un risque éventuel de baisse significative des performances et un impact négatif sur le maintien de la sécurité. Dans la littérature, de telles circonstances sont souvent

décrites comme des cas de surcharge mentale. Il existe donc un lien étroit entre ces deux concepts. Le degré d'occupation de la MDT reflète en partie le niveau de charge mentale. Ainsi, la notion de la capacité de la MDT, telle qu'elle est présentée dans l'architecture cognitive **ACT-R**, permet d'expliquer en partie pourquoi les conflits jouent un rôle central dans les mécanismes de charge mentale chez les contrôleurs aériens.

Nous verrons à la fin de ce chapitre que cela engendre diverses conséquences chez les contrôleurs, notamment en terme de stratégie de régulation de la charge mentale.

#### 4.2.3 *La notion de durée*

Par définition, la notion de mémoire implique une dimension liée au temps. Elle est complémentaire à la notion de capacité que nous venons de traiter. Selon nous, cette deuxième composante de la MDT est déterminante pour rendre compte des phénomènes de charge mentale dans le contrôle aérien. Après une brève description de la notion dans l'architecture **ACT-R**, nous présenterons trois modèles de la charge mentale qui accordent une place centrale au facteur « temps ».

Dans l'architecture **ACT-R**, la notion de durée s'exprime sous deux formes.

La première concerne ce que nous pouvons assimiler à **la durée du stock** de la MDT. Au niveau sub-symbolique, la fonction mathématique qui détermine les niveaux d'activation inclut un paramètre de « déclin » lié au temps. Il détermine la vitesse de l'oubli des chunks. Elle sera maximale si un chunk (et ses voisins dans le réseau) ne sont pas réactivés en MDT (i.e. lors d'un passage dans un des buffers centraux de l'architecture). Étant donné que la MDT utilisée est constituée par l'ensemble des chunks activés à un moment donné, le temps détermine donc indirectement le « poids » de chaque chunk en MDT.

La deuxième concerne **la durée d'exécution** des traitements effectués en MDT. Chaque opération réalisée en mémoire de travail par des règles de production nécessite du temps (50 ms environ). Par conséquent, chaque règle possède un coût temporel incompressible d'ordre physiologique. Autrement dit, l'enchaînement des microprocessus – basé sur les productions – sera forcément sériel et nécessitera

du temps. Dans le cas où ces temps de traitement sont supérieurs au temps disponible pour réaliser la tâche, des risques de « surcharge » de la MDT sont prédits. Nous allons voir maintenant que ces aspects temporels de la MDT semblent tout à fait cruciaux pour rendre compte des phénomènes de charge mentale chez les contrôleurs aériens.

#### *Le modèle hiérarchique de la détection de conflit*

L'étude de [Rantanen et Nunes \(2005\)](#) est l'une des rares à proposer un modèle psychologique explicatif de la charge mentale chez les contrôleurs aériens. Pour cela, les auteurs ont manipulé en détail différentes caractéristiques intrinsèques aux conflits. Cette étude s'inscrit dans la continuité des travaux effectués par [Leplat et Bisseret \(1966\)](#) puis [Bisseret \(1995\)](#).

L'approche des auteurs est basée sur l'hypothèse que le temps nécessaire à la détection d'un conflit serait en lui-même un excellent indicateur de la charge mentale étant donné la nature de la tâche des contrôleurs. Plus précisément, les auteurs s'appuient sur le constat unanime que les contrôleurs sont soumis à une pression temporelle forte. Chaque seconde perdue peut impacter négativement le conflit en lui-même mais également la gestion ultérieure du reste du trafic. Les contrôleurs cherchent donc en permanence à accomplir leur tâche de la manière la plus rapide et efficace possible (pour une revue récente, voir [Loft et al., 2007](#)). D'ailleurs, il est intéressant de noter que [Leplat et Bisseret \(1966\)](#) avait déjà insisté sur l'aspect « économique » des procédures de traitements mises en place par les contrôleurs lors de la détection des conflits.

En conséquence, [Rantanen et Nunes \(2005\)](#) postulent que les différentes étapes successives de la détection d'un conflit sont classées de manière croissante selon le coût mental et le temps qu'elles nécessitent. Les plus longues et coûteuses ne seraient mises en place que tardivement, c'est-à-dire seulement quand les premières – courtes et non coûteuses – ne suffisent pas pour juger de l'existence ou non d'un conflit. Sur cette base, les auteurs ont élaboré un modèle dit « hiérarchique » de la détection de conflit. Il distingue quatre étapes d'évaluation successives dans les cas des conflits les plus coûteux.

1. Évaluation de l'altitude afin d'estimer si la distance verticale minimale est assurée.  
=> si oui (la différence des deux altitudes est supérieure à 1000

- pieds) : pas de conflit.  
 => si non : passer à l'étape suivante.
2. Évaluation globale des trajectoires afin de juger si les avions sont susceptibles de se croiser ou non.  
 => si les trajectoires sont divergentes : pas de conflit.  
 => si les trajectoires sont convergentes : passer à l'étape suivante.
  3. Évaluation de la vitesse. Si elles sont identiques, alors le contrôleur évalue les deux distances qui séparent les avions du point de croisement. Il estime ensuite si la différence entre ces deux distances est supérieure au minimum requis.  
 => si oui : pas de conflit.  
 => si non : passer à l'étape suivante.
  4. Si les vitesses sont différentes, alors le contrôleur doit évaluer la distance minimale au point où les avions seront les plus proches. Cela nécessite de calculer quel avion arrivera en premier au point de croisement tout en estimant en parallèle où sera le second.  
 => si cette distance minimale est supérieure au minimum requis : pas de conflit.  
 => si non : Conflit

Ainsi, deux avions qui diffèrent suffisamment par leurs altitudes sont rapidement jugés comme ne pouvant pas entraîner de conflit. Une simple comparaison de deux chiffres permet de répondre avec certitude et les contrôleurs ne traiteront pas d'autres informations. A l'inverse, deux avions ayant la même altitude, des directions convergentes et des vitesses différentes, nécessiteront un temps et un coût de traitement important pour juger s'ils sont oui ou non engagés dans un conflit potentiel.

Afin d'éprouver leur modèle, les expérimentateurs ont présenté à 27 contrôleurs (13 novices et 14 experts) une série de scénarios impliquant deux avions en évolution. Les participants devaient détecter le plus rapidement possible la présence ou non d'un conflit. Les résultats indiquent que les cas de conflits nécessitant obligatoirement le traitement consécutif de l'altitude, des trajectoires et finalement de la vitesse entraînent des temps de réponse plus long. Autrement dit, selon le postulat initial des auteurs, ils sont considérés comme étant les plus coûteux en terme de charge mentale.

Une question reste toutefois en suspens. La nature exacte de la relation entre les temps de réponse (TR) et le traitement des différentes informations n'est pas précisé. Selon le modèle, les TR devraient augmenter de manière exponentielle en fonction des étapes successives d'évaluation. Si la relation s'avère juste additive, cela pourrait indiquer que les TR traduisent seulement une accumulation d'opérations à effectuer (et non pas que les traitements relatifs à la vitesse sont plus coûteux).

Très récemment, Pompanon et Raufaste (en révision) ont effectué une réplique quasi complète du paradigme expérimental de Rantanen et Nunes (2005), en ajoutant cette fois un dispositif d'enregistrement des mouvements oculaires. Un de leurs résultats nous intéresse tout particulièrement. En effet, ils ont relevé une forte corrélation (.96) entre les TR et les diamètres pupillaires, un indicateur oculométrique reconnu de charge mentale (cf. chapitre 5). Ce résultat constitue un argument fort en faveur du postulat initial émis par Rantanen et Nunes (2005). En effet, dans une tâche à forte pression temporelle comme la détection de conflit, il pourrait exister effectivement une relation implicite entre les temps de réponse (i.e. la somme des durées des opérations nécessaires en MDT) et la charge mentale.

#### *Le modèle de la charge mentale de Lebiere (2001)*

À notre connaissance, la théorie d'Anderson et Lebiere (1998) n'évoque jamais clairement le concept de charge mentale. Cependant, Lebiere (2005) a proposé récemment une première ébauche d'un modèle de la charge mentale chez les contrôleurs aériens. Nous allons voir qu'il accorde une place centrale à la dimension du temps dans la relation entre la MDT et la charge mentale.

Lebiere (2005) a entrepris cette démarche dans le cadre du projet de recherche « *Agent-Based Modeling Behavior Representation* » (AMBR). L'objectif de ce projet était d'évaluer la validité des prédictions fournies par différents modèles computationnels en fonction de l'architecture cognitive dans laquelle ils étaient développés. Le principe consistait à soumettre les participants et les différents modèles exactement aux mêmes stimuli à l'aide d'une interface sobre et adaptée à cet effet. Ensuite, au cas par cas, les chercheurs examinaient quel modèle et surtout quelle architecture cognitive parvenait à simuler le plus finement (et en temps réel) l'activité des participants. Une

des tâches à modéliser concernait une activité sommaire de contrôle aérien – i.e. une simple gestion des entrées/ sorties d’avions dans un secteur donné. De plus, pour ce qui nous intéresse ici, des mesures subjectives de la charge mentale étaient effectuées auprès des participants à la fin de chaque passation. En conséquence, les modèles devaient également fournir des prédictions en terme de charge mentale en parallèle de la modélisation psychologique de l’activité.

**Lebiere (2005)** définit la charge mentale (CM) comme le pourcentage de temps passé à des sous-tâches effectuées en MDT (considérées comme « critiques ») divisé par le temps total disponible pour effectuer la tâche (cf. l’équation 4.2).

$$CM = \frac{\% \text{Temps tâches critiques effectuées en MDT}}{\text{Temps total disponible}} \quad (4.2)$$

Nous retrouvons donc l’idée d’un ratio de temps similaire à celui évoqué par **Wickens (1992)** (cf. paragraphe 4.1.2). Selon **Lebiere (2005)**, les sous-tâches « critiques » correspondent aux périodes où le modèle est « pressured » (pressurisé) ou occupé. Plus précisément, le modèle est parfois contraint d’effectuer une série d’opérations sur un laps de temps réduit pour répondre aux exigences de la tâche – typiquement, lorsque plusieurs aéronefs arrivent en même temps sur le secteur. Sur cette base, le modèle parvient à prédire correctement les moyennes générales des mesures subjectives de charge mentale effectuées sur les participants. Il a obtenu d’ailleurs les meilleurs résultats parmi les autres architectures cognitives utilisées dans le projet AMBR, à savoir COGNET/iGEN<sup>2</sup>(**Zachary, Ryder, & Hicinbothom, 1998**), SOAR<sup>3</sup>(**Laird, Newell, & Rosenbloom, 1987**) et D-COG (cf. **Eggleston, Young, & McCreight, 2000**)

*La mémoire de travail et la charge mentale selon Barrouillet et al. (2004)*

**Barrouillet, Bernardin, et Camos (2004)** ont proposé récemment un nouveau modèle permettant de rendre compte des limites de la MDT lors d’une tâche d’empan. Il s’intitule « time-based resource-sharing model » (le modèle du partage des ressources basé sur le temps).

---

2. COGNET/iGEN <http://www.chisystems.com>

3. SOAR <http://soartechnology.com/>

Nous allons voir qu'il possède de nombreux points communs avec le modèle d'Anderson et Lebiere (1998) et qu'il semble particulièrement pertinent pour étudier l'importance de la durée des traitements dans la relation entre la MDT et la charge mentale.

Barrouillet et al. (2004) distinguent deux types d'activité au cours d'une tâche d'empan de la MDT : une propre au maintien des items à rappeler et une dédiée à leur traitement. Les deux activités nécessitent de l'attention, elles doivent se partager la quantité limitée des ressources attentionnelles disponibles. Plus précisément, chaque information présente en MDT possède un niveau d'activation qui décroît dans le temps dès qu'elle n'est plus dans le focus attentionnel. En conséquence, pour être maintenue en MDT, elle doit être réactivée plusieurs fois au cours de la tâche. Selon les auteurs, cette phase de réactivation nécessite ponctuellement une allocation attentionnelle totale et donc un temps minimal incompressible. Ainsi, le modèle prédit que le maintien en MDT des items à rappeler dépend du nombre de fois où ils doivent être réactivés et surtout **du temps « allouable » à ces ré-activations**. Si la vitesse des traitements est lente (chez les jeunes enfants par exemple), alors le temps disponible pour réactiver les items sera limité. Autrement dit, la taille de l'empan de la MDT sera davantage réduite.

Il est clair que ce modèle partage de nombreuses similarités avec le modèle d'Anderson et Lebiere (1998). Nous retrouvons notamment le concept d'activation des traces mémorielles qui décroissent dans le temps et qu'il est nécessaire de réactiver régulièrement pour être maintenues en MDT. Dans ACT-R, ces ré-activations peuvent être assimilées aux « retrievals » (récupérations). Ces dernières représentent le passage des chunks vers le focus attentionnel (i.e. de la mémoire déclarative vers la mémoire procédurale). Anderson et Lebiere (1998) précisent également que ces opérations nécessitent une durée incompressible. Enfin, la théorie prédit que les personnes effectuant des récupérations d'informations rapides en MDT auront une capacité attentionnelle accrue (Rosen & Engle, 1997). Ainsi, en accord avec les prédictions Barrouillet et al. (2004), les individus possédant une faible vitesse de traitement (comme les enfants) seront davantage contraints par le temps et ils auront par conséquent des performances inférieures lors d'une tâche d'empan de la MDT.

Contrairement à Anderson et Lebiere (1998), Barrouillet et al. (2004) ont extrait de leur modèle de MDT une mesure précise de la charge mentale (CM), définie par l'équation mathématique 4.3 :

$$CM = \frac{\sum \alpha_i n_i}{T} \quad (4.3)$$

$\alpha_i$  est le coût associé à chaque type de ré-activation  $i$  (i.e le temps durant lequel ces ré-activations capturent totalement l'attention),  $n_i$  le nombre de ré-activations nécessaires et  $T$  est la durée totale de l'activité.

Il est intéressant de noter que le ratio de temps décrit ici par Barrouillet et al. (2004) reste globalement similaire à ceux proposés dans les modèles de Lebiere (2005) (cf. paragraphe 4.2.3) ou Wickens (1984) (cf. paragraphe 4.1.2). Lorsque le temps nécessaire à la réalisation de la tâche tend vers le temps disponible, le niveau de charge mentale augmente. En revanche, le rôle des durées associées aux réactivations n'était pas explicitée aussi clairement.

En résumé, Barrouillet et al. (2004) considèrent que la charge cognitive dépend (1) du nombre de fois où il faut ré-activer les différentes traces mnésiques et (2) de la difficulté associée à chacune de ces ré-activations – i.e. un « temps attentionnel » variable selon la nature de l'information à ré-activer. Le modèle prédit une forte charge lorsque la somme de ces « temps » est proche du temps total disponible pour effectuer la tâche. Barrouillet et al. (2004) ont validé leur modèle sur sept expériences. Ainsi, les auteurs indiquent que la charge mentale détermine l'empan de la MDT. Dans le cas où, faute de temps, ces ré-activations ne peuvent pas être réalisées, la taille de l'empan de la MDT décroît.

#### *Confrontation du modèle de Barrouillet (2004) au contrôle aérien*

A notre connaissance, ce modèle n'a jamais été étudié dans le cadre du contrôle aérien. Néanmoins, nous allons voir maintenant qu'il permet de rendre compte de manière satisfaisante des principaux phénomènes de charge mentale chez les contrôleurs aériens.

Tout d'abord, la théorie proposée par Barrouillet et al. (2004) permet une nouvelle interprétation des résultats obtenus par Bisseret (1970) sur une tâche de rappel (voir précédemment). Il avait indiqué que l'augmentation de la charge diminuait le nombre d'aéronefs rap-

pelés. Le modèle de [Barrouillet et al. \(2004\)](#) prédit exactement une telle réduction de l'empan lorsque la charge mentale augmente.

Ensuite, nous avons vu que le modèle de charge mentale proposé par [Lebiere \(2005\)](#) repose sur les chaînes d'actions où le système est « pressurisé ». Typiquement, lors de tels cas, nous pouvons supposer que les temps nécessaires au traitement et aux ré-activations tendent vers le temps total disponible. Autrement dit, la théorie de [Barrouillet et al. \(2004\)](#) prédit également de la charge mentale dans de telles conditions.

Enfin, le modèle proposé par [Barrouillet et al. \(2004\)](#) prédit une forte augmentation de la charge lors de la gestion d'un conflit dans un contexte de trafic dense (cf. l'équation 4.3). Plus précisément,  $T$  peut correspondre à la durée totale fixe nécessaire à la détection puis à la résolution d'un conflit particulier.  $N$  représente le nombre de fois où les informations relatives aux aéronefs à gérer devront être réactivées pour être maintenues en MDT. Le terme de ré-actualisation serait plus exact ici étant donné que les informations peuvent varier dans le temps et doivent être mise à jour en MDT. Finalement,  $\alpha$  indique le temps nécessaire à la ré-activation des différentes informations. La valeur de ce paramètre variera en fonction de la nature de l'information à traiter. Par exemple, nous pouvons raisonnablement supposer que l'information relative à la distance verticale entre les aéronefs possèdera une valeur élevée étant donné qu'elle ne possède pas de représentation alphanumérique sur l'écran radar.

Sur cette base, le modèle prédit un risque accru de charge lorsque les conflits nécessitent de nombreux traitements (comme le suggèrent [Rantanen & Nunes, 2005](#)). En effet, ils nécessiteront « mécaniquement » davantage de temps de traitement. Dans l'éventualité où ce dernier viendrait à manquer – i.e. dans les cas de trafic à forte densité – le modèle prédit une forte augmentation de la charge mentale.

### 4.3 LE RÔLE DE L'EXPERTISE

La problématique de l'expertise et de son élaboration nous semble transversale à l'ensemble des composantes que nous venons d'aborder. L'expertise est le résultat d'une pratique et d'un apprentissage intensif, souvent pendant de nombreuses années. Dans cette partie, nous allons aborder plusieurs concepts majeurs attachés à la notion d'expertise. Nous verrons à chaque fois comment ces notions peuvent

rendre compte des variations de la charge mentale chez les contrôleurs aériens.

#### 4.3.1 *La mémoire de travail à long terme*

Comme [Anderson et Lebiere \(1998\)](#) dans l'architecture [ACT-R](#), [Ericsson et Kintsch \(1995\)](#) définissent la MDT comme une sous partie active de la mémoire à long terme (MLT). En complément de ces deux composantes classiques (MLT et MDT), les auteurs postulent l'existence d'une structure particulière nommée « mémoire de travail à long terme » (MDT-LT). Elle serait spécialisée dans le stockage d'indices de récupération afin de faciliter la réactivation en MDT des unités présentes en MLT. Plus précisément, la MDT-LT disposerait de véritables structures de récupération dont les caractéristiques seraient étroitement liées au degré d'expertise de l'individu dans la tâche à réaliser. Selon [Ericsson et Kintsch \(1995\)](#), ces structures permettent d'optimiser les transitions entre la MDT et la MLT, ce qui pourrait expliquer pourquoi les experts peuvent interrompre leur activité pendant un laps de temps relativement long (plusieurs minutes, suite à un incident par exemple) sans que cela dégrade leur performance sur la tâche. Un simple indice stocké initialement dans ces structures au début de l'activité serait suffisant pour réactiver ultérieurement (et très rapidement) un ensemble d'informations pertinentes issu de la MLT.

À notre connaissance, il n'existe pas de travaux dans la littérature relatifs au concept de MDT/LT dans l'architecture cognitive [ACT-R](#). Néanmoins, il nous semble intéressant de discuter cette notion dans le cadre théorique décrit par [Anderson et Lebiere \(1998\)](#). Dans [ACT-R](#), chaque chunk présent en mémoire déclarative (MLT) repose sur la définition au préalable de son type (« *chunk type* »). Elle consiste à préciser le nom du *chunk type* (i.e la catégorie du chunk) ainsi que le nom des différents *slots* qui vont le constituer (i.e les propriétés associées à cette catégorie). Par exemple, la représentation du concept « oiseau » en mémoire déclarative pourra être défini par un *chunk type* nommé « oiseau » avec deux *slots* nommés respectivement « couleur » et « taille ». Autrement dit, le chercheur souhaitant modéliser une tâche dans [ACT-R](#) doit commencer par déterminer quels sont les types de chunks qui vont être manipulés. Ils peuvent être simples (un seul

*slot*) ou complexes. Par exemple, nous pouvons supposer qu'un expert en ornithologie possédera un *slot* particulier nommé « caractéristique » qui permettra de stocker une propriété spécifique rare d'un oiseau – ce qui ne sera pas le cas chez un novice.

La récupération en MDT d'un chunk présent en mémoire déclarative (MLT) s'effectue à l'intérieur d'une règle de production sous la forme d'une requête. Cette requête consiste à formuler explicitement une « demande » d'un type de chunk particulier en précisant au minimum le contenu d'un des *slots* qui le compose. Par exemple, un ornithologue à qui nous avons présenté une liste importante de photographies d'oiseaux pourra répondre rapidement à une question du type : quel est le nom de l'oiseau qui avait une couleur jaune ? Autrement dit, un individu expert a potentiellement la possibilité de réactiver en MDT un groupe d'informations pertinent (un chunk précis) en effectuant **une seule requête à l'aide d'un seul indice sur un *slot* particulier.**

Par conséquent, selon nous, les caractéristiques de la MDT-LT semblent – au moins en partie – intégrées dans ACT-R. Basiquement, chaque type de chunk peut être assimilé à une structure de récupération (variable selon l'expertise de l'individu) et chaque *slot* de cette structure peut stocker un indice au cours de la tâche qui sera réutilisable ultérieurement pour récupérer efficacement le chunk en MLT.

Dans le domaine du contrôle aérien, la MDT-LT pourraient effectivement jouer un rôle central. Avec l'augmentation du trafic, le contrôleur est susceptible d'effectuer de nombreuses autres tâches en parallèle, notamment la surveillance de l'évolution de plusieurs conflits potentiels. Dans ce contexte, la possibilité de réactiver l'ensemble des informations relatives à un conflit particulier à partir d'un seul indice (l'indicatif de l'aéronef par exemple) pourrait s'avérer très efficace pour satisfaire les exigences de la tâche rapidement et donc éviter un risque d'augmentation de la charge mentale.

#### 4.3.2 *L'automatisation*

Les travaux de [Schneider et Shiffrin \(1977\)](#) demeurent une référence majeure dans le domaine. Ces auteurs ont été parmi les premiers à formaliser la distinction entre les processus « contrôlés » et les processus « automatisés ». Cette dichotomie a depuis été largement

ré-utilisée dans de nombreux domaines de recherche (cf. par exemple la « *Dual Process Theory* » sur le raisonnement, Evans, 2003). Selon les auteurs, les deux types de processus possèdent des propriétés radicalement opposées.

Les processus « contrôlés » sont conscients, manipulables et ils nécessitent une forte mobilisation de ressources attentionnelles, ce qui peut se traduire par un encombrement conséquent de la MDT et donc l'impossibilité de réaliser des traitements parallèles. Ce type de processus se retrouve en particulier chez les novices.

À l'opposé, nous trouvons les processus automatisés qui eux, naissent 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 et, pour ce qui nous intéresse ici, ils nécessitent peu ou pas de ressources attentionnelles. Ainsi, ils « soulagent » la MDT, ce qui permet cette fois l'exécution d'autres traitements en parallèle.

Dans l'architecture cognitive ACT-R, Anderson et Lebiere (1998) se sont attachés à décrire les mécanismes généraux à l'œuvre lors d'une activité d'apprentissage, et ainsi – au moins en partie – les mécanismes permettant la mise en place progressive de processus automatisés (cf. Anderson, 1992 pour un aperçu détaillé sur ce point particulier). Dans ACT-R, nous avons vu que l'exécution d'une tâche repose principalement sur une suite sérielle de règles de production. Au niveau sub-symbolique, l'enchaînement de ces microprocessus est régie principalement par une fonction mathématique d'« utilité ». Basiquement, si une suite de productions parvient à satisfaire l'objectif de la tâche, chacune des règles utilisées verra son niveau d'« utilité » augmenté. Les règles « utiles » aux objectifs se verront renforcées progressivement au cours d'un apprentissage prolongé. Ainsi, selon Anderson (1992), le **degré d'utilité** des productions détermine en partie leur degré d'automatisation.

De plus, les travaux de Taatgen et Lee (2003) ont permis récemment d'ajouter à l'architecture un mécanisme de **compilation des productions** (Anderson, 1983). Il permet de réduire la taille d'une série de règles de productions. Par exemple, si un traitement nécessite initialement un enchaînement sériel de quatre règles de productions, une passerelle (ou shunt) sera créée progressivement par renforcement afin de passer directement de la règle 1 à la règle 4 sans passer par

les règles 2 et 3. Selon nous, un tel mécanisme de compilation peut raisonnablement être assimilé à la création de processus automatiques de type heuristique. Par ailleurs, nous remarquons là encore le soin d'Anderson à intégrer uniquement des mécanismes qui possèdent une validité neurobiologique forte. En effet, ces types de spécialisations progressives (comme la compilation des productions) sont aisément explicables dans le cadre des modèles biologique sur la maturation neuronale (Van Ooyen, Van Pelt, & Corner, 1995).

Dans le domaine du contrôle aérien, de nombreux travaux ont été réalisés autour des notions d'expertise et d'automatisation – indépendamment de la problématique des stratégies que nous évoquerons dans la prochaine partie.

Enard (1975) a montré que les novices parvenaient à mieux estimer la séparation minimale entre deux avions. Ils mettent en place des traitements plus précis mais également plus coûteux, alors que les experts utiliseraient davantage des indices perceptifs et logiques lors de la détection d'un conflit. Cette notion a été reprise ensuite par Averty (1998). Ce dernier postule l'existence d'**heuristiques perceptives précoces**, c'est à dire quasiment au moment où les aéronefs entrent dans le secteur aérien (donc en périphérie sur l'écran radar). Ces dernières seraient moins précises et donc exagérément prudentes, mais surtout elles sont supposées moins coûteuses en terme de charge mentale qu'une procédure impliquant des estimations et des calculs de distance. Par conséquent, en accord avec les principales théories sur l'expertise (cf. par exemple la synthèse de Ericsson, 1996), les novices utiliseraient davantage des processus contrôlés lors de la phase de détection de conflit (i.e. des raisonnements de type analytique, fins et coûteux), alors que les experts utiliseraient davantage des processus automatiques perceptifs, au moins initialement.

Nous remarquons sur ce point que l'étude de Rantanen et Nunes (2005) ne rapporte aucune différence entre les experts et les novices. Cependant, nous pouvons attribuer ce résultat aux particularités de la méthode employée pour satisfaire les objectifs de l'étude. En effet, les participants étaient contraints de répondre « correctement ». Pour cela, ils étaient soumis initialement à une phase d'apprentissage et ils ne pouvaient poursuivre que lorsqu'ils obtenaient au moins 95% de réponses correctes. Ainsi, pour atteindre le niveau de performance requis, les experts ne pouvaient pas utiliser leurs heuristiques per-

ceptives précoces de nature prudentes et donc trop souvent erronées. Nous pouvons supposer qu'ils étaient donc « contraints » d'utiliser les mêmes mécanismes que les novices, coûteux, mais plus précis sur ce type de tâche. D'ailleurs, lorsque les contrôleurs ont pour consigne de seulement évaluer les risques de conflit, les experts sont plus rapides que les novices et ils n'utilisent pas les mêmes informations (Stankovic, Raufaste, & Averty, 2008).

Les conditions météorologiques exceptionnelles permettent d'étudier indirectement les effets de l'expertise. En effet, lors de la présence d'orage intenses, les aéronefs sont contraints de s'écarter des voies aériennes standard afin d'éviter les cumulus potentiellement dangereux. Cela engendre des configurations spatiales désordonnées nouvelles où l'ensemble des automatismes perceptifs – et autres stratégies optimales – ne peuvent plus s'appliquer. Les rapports des contrôleurs sont clairs. Ils ressentent un sentiment intense de « surcharge », ce qui pourrait s'expliquer simplement par un retour ponctuel à un état similaire aux novices. Autrement dit, les contrôleurs sont davantage contraints à mettre en place des processus contrôlés coûteux dans une situation par ailleurs dégradée<sup>4</sup>.

#### 4.3.3 *Les stratégies*

Les travaux de Sperandio (1971, 1978) sur les contrôleurs aériens ont largement contribué à expliciter les liens entre l'expertise, les stratégies et la charge mentale. Le postulat central est que les experts auraient la possibilité de changer de type de stratégie à tout moment afin de réguler leur degré de charge mentale, l'objectif étant de rester en permanence avec un niveau de charge « optimal » – i.e. inférieur à un niveau trop important, synonyme de surcharge, mais également supérieur à un niveau trop faible qui pourrait être source cette fois d'hypo-vigilance (cf. paragraphe 4.1.3). Lors d'un recueil effectué sur un groupe de contrôleur aériens experts, Sperandio (1971) a en effet observé des changements de stratégies en fonction du nombre d'avions à gérer – les autres caractéristiques du trafic étaient maintenues constantes. Sur cette base, il a établi la classification suivante :

---

4. Incidemment, nous pouvons noter l'analogie avec le passage du mode « automatique » au mode « manuel » effectué par les pilotes lorsqu'ils doivent gérer des situations complexes.

- De 1 à 3 avions : les contrôleurs utilisent des stratégies sophistiquées. Ils utilisent l'ensemble des informations disponibles afin d'assurer un suivi optimal pour chaque vol (cela inclura par exemple une optimisation de la consommation en carburant des aéronefs).
- De 4 à 8 avions : les contrôleurs utilisent des stratégies plus efficaces en privilégiant la sécurité. Seules les informations les plus utiles sont traitées. Les informations annexes comme la consommation du carburant sont cette fois négligées.
- Plus de 8 avions : les contrôleurs utilisent des stratégies minimalistes et extrêmement efficaces. Les critères pour juger des conflits sont basés sur les informations strictement essentielles (comme la comparaison de l'altitude). Ils mettent en places des procédures standard stéréotypées. Seule la sécurité est prise en compte.

Enfin, [Sperandio \(1971\)](#) précise que lorsque le nombre d'aéronef n'est plus « gérable » par le contrôleur, une manoeuvre de « dégroupage » est alors mise en place. Elle consiste à diviser la surface du secteur en plusieurs sous parties de tailles plus réduites en positionnant un contrôleur sur chacune d'elle.

Là encore, la théorie d'[Anderson et Lebiere \(1998\)](#) permet de rendre compte – au moins en partie – de certains de ces mécanismes. Dans l'architecture [ACT-R](#), une stratégie se traduit par un enchaînement spécifique de règles de production. Nous avons évoqué précédemment que la probabilité qu'une règle soit sélectionnée dépendait notamment de son degré d'utilité. Pour rappel, si une suite de règles procédurales parvient à la réalisation de l'objectif, le degré d'utilité de chaque production augmentera. Néanmoins un deuxième facteur s'avère déterminant en matière d'apprentissage. Il concerne la durée de la série de production. Les enchaînements de productions utiles et courts doivent être renforcés par rapport aux enchaînements utiles mais qui nécessitent un temps important. Pour cela, [Anderson et Lebiere \(1998\)](#) ajoutent une deuxième fonction mathématique qui va déterminer la probabilité que la production soit sélectionnée. Elle va attribuer cette fois à chaque production un **degré d'effort**. Il sera relatif à la quantité de temps nécessaire pour parvenir au but si la production est sélectionnée. A l'instar du degré d'utilité, il est for-

cément le résultat d'une expérience préalable plus ou moins longue. Autrement dit, il est relatif en partie à l'acquisition d'une expertise.

La combinaison de ces deux degrés (utilité et effort) va déterminer la probabilité qu'une production particulière soit sélectionnée, et donc, indirectement, la stratégie mise en place. Sur cette base, Lovett et Anderson (1996) sont parvenus à modéliser correctement les différents choix de stratégies effectués par des participants au cours d'une tâche de résolution de problèmes en fonction de leurs apprentissages préalables. Cependant, à l'instar de Anderson et Lebiere (1998), le lien avec la charge mentale n'est pas clairement formulé.

Dans le domaine du contrôle aérien – a minima –, la classification proposée par Sperandio (1971) a fait date dans la littérature. Elle démontre concrètement la forte flexibilité des contrôleurs aériens dits experts. Lorsque le nombre d'avions à gérer est faible, ils mettent en place des stratégies fines et coûteuses afin de maintenir un niveau de charge minimal satisfaisant. A l'inverse, quand la charge augmente, ils optimisent l'utilisation de leurs ressources en utilisant des stratégies efficaces, peu coûteuses mais qui n'impactent pas le niveau de sécurité.

Par ailleurs, quelques années plus tôt, ce même chercheur avait également observé que les durées moyennes des communications audio sol-bord variaient en fonction de l'exigence de la tâche (Sperandio, 1969). Elles reflètent – au moins en partie – les différentes stratégies mises en place par les contrôleurs. En présence d'une faible charge, les durées des communications tendent à s'allonger. Les contrôleurs s'octroient du temps et des ressources pour interagir avec les pilotes. En revanche, lorsque l'exigence de la tâche augmente, les durées des communications se réduisent progressivement au strict minimum.

Dans la même lignée, l'étude de Bisseret et Girard (1973) nous semble particulièrement pertinente. Les auteurs considèrent comme extrêmement coûteux les cas de diagnostics incertains qui peuvent parfois nécessiter une longue phase d'attente et de surveillance de la part du contrôleur afin de prendre une décision optimale. Ainsi, Bisseret et Girard (1973) indiquent que lorsque l'exigence de la charge augmente, les contrôleurs experts opteraient davantage pour des stratégies prudentes basées – lorsque cela est possible – sur des décisions d'interventions drastiques précoces afin de désambigüiser en amont ces cas problématiques de conflits coûteux en temps et

en ressources. Plus récemment, pour illustrer ce type de stratégie, [Bisseret \(1995\)](#) a retranscrit le témoignage verbal d'un contrôleur :

*« Tout ce que je peux dire c'est qu'il y a des cas où je suis sûr que ça passe, des cas où je suis sûr que ça passe pas, et des cas où je ne sais pas, alors là, j'attends pour voir l'évolution... **quoique que si je suis très chargé je fais tout de suite comme si cela ne passait pas.** »*  
*cité dans Représentation et décision experte, Bisseret, A., 1995, p.33*

Par ailleurs, les travaux de [Seamster, Redding, Cannon, Ryder, et Purcell \(1993\)](#) insistent sur le fait que l'utilisation de ces différentes stratégies de régulation de la charge mentale est une aptitude propre aux experts. En effet, les auteurs montrent que les novices éprouvent plus de difficultés à mettre en place des stratégies « efficaces » et par conséquent à gérer leur charge. Ainsi, le niveau de charge mentale chez les novices augmenterait de façon quasi linéaire en fonction de l'exigence de la tâche avec un risque accru en terme de surcharge et donc en terme de sécurité. Or, les stratégies « efficaces » reposent principalement sur la capacité à sélectionner uniquement les informations utiles. Autrement dit, le problème des novices pourrait s'expliquer en partie par un déficit de « pertinence », une des caractéristiques principales des experts ([Raufaste, 2001](#)).

Plus récemment, [Hillburn \(2004\)](#) propose une version simplifiée de son précédent modèle sur la relation entre l'exigence de la tâche et la charge mentale chez les contrôleurs aériens (voir Figure 8). Elle illustre le degré d'importance que l'auteur accorde à l'expertise et aux stratégies.

Enfin, [Loft et al. \(2007\)](#), dans une très intéressante revue critique de la charge mentale dans le contrôle aérien, considèrent que la prise en considération de ces stratégies est une des principales raisons pour lesquelles le courant de recherche sur les métriques de « densités dynamiques » (cf. paragraphe 5.2.1 dans le chapitre 5) ne parvient pas à prédire plus de 40% de la variance de la charge mentale chez les contrôleurs. Les auteurs proposeront en conséquence eux aussi un modèle de l'activité des contrôleurs où les stratégies occupent un rôle majeur. Ils considèrent qu'elles sont contrôlées en amont (avant une action) et en aval (une fois l'action réalisée) par le niveau de charge

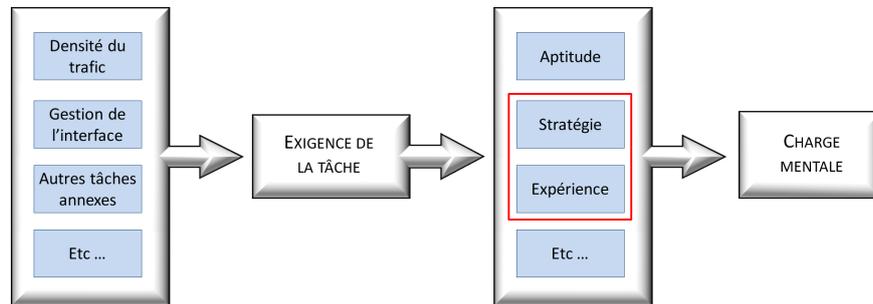


FIGURE 8: Modèle simplifié de la charge mentale chez les contrôleurs aériens (d'après Hillburn et Jorna, 2001)

mentale des contrôleurs.

Pour conclure, il existe une relation étroite entre l'expertise, les stratégies et la charge mentale. L'acquisition et l'utilisation de stratégies semblent cruciales pour pallier ponctuellement les risques de surcharge mentale engendrés par une saturation de la MDT. Elles constituent de véritables variables d'ajustement – du moins dans les situations où les niveaux d'exigence de la tâche sont encore « gérable ». Dans le domaine du contrôle aérien, les récents travaux que nous venons d'évoquer accordent tous des places centrales à l'expertise et aux stratégies comme variables médiatrices de la charge mentale. En revanche, leur approche reste souvent strictement descriptive et ils peinent à décrire les mécanismes cognitifs sous-jacents.

#### 4.4 LA THÉORIE DE LA CHARGE COGNITIVE

Contrairement à Anderson, Wickens ou Barrouillet – qui ne prétendent pas s'intéresser « directement » à la charge mentale – Sweller (1988) a proposé une véritable théorie dite de la charge cognitive (TCC, pour une revue récente, voir Ayres & Gog, 2009). Dès lors, elle a fait l'objet de nombreux travaux et s'est progressivement spécialisée dans l'explication des phénomènes de charge lors des activités d'apprentissage (Chanquoy et al., 2007). Après une brève description du modèle, nous verrons en quoi elle permet de rendre compte des phénomènes de charge mentale chez les contrôleurs aériens.

A la manière d'[ACT-R](#), la TCC s'appuie sur une architecture cognitive centrée sur les relations entre la MDT et la MLT. De manière relativement classique, la MDT est considérée comme extrêmement limitée en terme de stockage et de traitement, alors que la MLT posséderait une capacité de stockage quasi illimitée. La définition de la MLT englobe ici les deux types de mémoire (déclarative et procédurale). Selon la TCC, une activité d'apprentissage nécessite la mise en place de deux étapes successives. La première repose sur la construction progressive de « schémas » en MLT (i.e. des structures de connaissances organisées autour de concepts centraux) et la deuxième consiste à automatiser ces schémas en les utilisant de manière fréquente et régulière. Ainsi, la TCC assimile une activité d'apprentissage au développement d'une expertise, c'est-à-dire l'acquisition de schémas automatisés en MLT dont l'utilisation ultérieure soulagera la capacité de la MDT.

La TCC insiste sur le fait que les phases de construction et d'automatisation de tels schémas seront contraintes fortement par les limites de la MDT. Si la somme des ressources utilisées dépasse la capacité de la MDT, alors le système cognitif ne parviendra plus à traiter l'information et les performances déclineront. Cette quantité de ressources allouées constitue la charge cognitive globale investie durant une activité d'apprentissage. Plus précisément, elle serait le résultat de l'addition de trois types de charge : la charge intrinsèque, extrinsèque et essentielle.

#### 4.4.1 *La charge cognitive intrinsèque*

La charge cognitive intrinsèque est relative à la complexité des informations que l'apprenant aura à traiter mentalement. Cette forme de charge varie selon trois principaux facteurs. Le premier est le nombre d'éléments à traiter par l'apprenant pour réaliser la tâche. Le deuxième concerne le niveau d'interactivité entre les éléments à traiter. Brièvement, deux éléments sont considérés comme fortement interactifs s'ils nécessitent d'être traités simultanément. Enfin, le troisième concerne la présence de schémas en MLT. Ces derniers permettent de diminuer la charge intrinsèque en favorisant la rapidité du traitement des informations. Ainsi, en résumé, un grand nombre d'éléments nouveaux hautement interactifs engendrera de nombreux traitements coûteux de manière simultanée et donc une charge intrin-

sèque élevée.

Le facteur des schémas antérieurs en MLT nous semble particulièrement intéressant à discuter dans le cadre de la théorie ACT-R. Pour rappel, selon Anderson et Lebiere (1998), chaque chunk présent en mémoire déclarative repose sur la définition au préalable de son type (le « *chunk type* »). Ils peuvent être simples (un chunk de type « fleur » avec un seul *slot* pour leur couleur) ou complexes (un chunk de type « fleur » avec un *slot* pour leur espèce, un *slot* pour leur taille et un *slot* pour leur couleur).

Selon nous, ces types de chunk peuvent être assimilés aux schémas évoqués dans la TCC. En effet leur degré de complexité détermine le nombre d'informations pertinentes que les chunks pourront gérer en un seul traitement et autrement dit, leur capacité à soulager la MDT. Ainsi, la taille et le degré de complexité des « *chunk type* » en mémoire déclarative peuvent rendre compte du degré d'expertise de l'apprenant. Toutefois, contrairement à la TCC, il est important de préciser que Anderson et Lebiere (1998) ne s'intéressent pas aux mécanismes responsables de la création de ces « *chunk type* » lors d'un apprentissage, ces derniers doivent être établis en amont par le chercheur. De manière simplifiée, un modèle ACT-R sera soit novice, soit expert en terme de « *chunk type* » en MLT.

#### 4.4.2 *La charge cognitive extrinsèque*

Cette deuxième catégorie de charge correspond à l'ensemble des ressources utilisées à des fins non-nécessaires au processus d'apprentissage en lui-même. Ainsi, elle est considérée comme inutile et donc à réduire au maximum. Elle est souvent le résultat de supports ou techniques d'enseignement non adaptés qui viennent interférer négativement avec l'activité centrale d'apprentissage. De nombreux arguments empiriques ont été apportés en faveur de l'existence d'une telle charge (pour une revue exhaustive récente, voir Chanquoy et al., 2007). Trois effets nous semblent pertinents dans le cadre du contrôle aérien :

- L'effet de redondance : même lorsque les modalités d'encodage sont optimales, un simple doublement de l'information peut s'avérer perturbant chez les experts. Il mobilise des ressources

précieuses qui ne pourront pas être investies sur d'autres éléments.

- L'effet de l'attention partagée : deux informations liées (i.e. nécessaires à la réalisation de la tâche) qui sont présentées de manière géographiquement séparées génèrent également une interférence et une charge accrue.
- L'effet de la modalité : l'utilisation de deux modalités sensorielles distinctes (visuelle et auditive) augmente les performances d'apprentissage par rapport à une utilisation strictement visuelle.

#### 4.4.3 *La charge cognitive essentielle*

Elle est également appelée charge « pertinente ». Ce dernier type de charge correspond à la mobilisation des ressources utilisées pour construire et automatiser les schémas en MLT. A l'inverse de la charge extrinsèque, elle réfère cette fois au coût strictement utile aux apprentissages.

#### 4.4.4 *Confrontation de la TCC au contrôle aérien*

Chaque contrôleur aérien est considéré comme un expert du secteur dont il est responsable. Il ne se trouve donc plus dans une situation d'apprentissage, ce qui réduit par conséquent l'application stricte de la TCC au cas du contrôle aérien. Par exemple, nous pouvons raisonnablement exclure les phénomènes de charge essentielle. En revanche, les deux autres catégories de charge (intrinsèque et extrinsèque) permettent de rendre compte de certains phénomènes de charge mentale chez les contrôleurs aérien.

La gestion des conflits nécessite par nature le traitement de plusieurs informations de manière quasi simultanée. Le contrôleur devra a minima comparer les trajectoires et les altitudes des deux aéronefs qui sont impliqués potentiellement dans un conflit. Ainsi, le rôle joué par les schémas stockés en MLT semble particulièrement important dans une activité comme le contrôle aérien. Ils permettent d'optimiser les ressources de la MDT en utilisant des groupes d'informations pertinents pour la réalisation de la tâche. Comme les autres modèles de la MDT (cf. ci-dessus), la TCC prédit une augmentation de la

charge intrinsèque lorsque le trafic et le nombre de conflits augmente.

La charge mentale extrinsèque semble également être non négligeable dans une tâche comme le contrôle aérien. Quelques constats peuvent être dressés après une simple analyse globale de la tâche. Tout d'abord, la gestion d'un conflit nécessite obligatoirement un partage attentionnel étant donné que les informations sur les aéronefs sont géographiquement séparées sur l'écran radar (les informations supplémentaires contenues sur les strips papiers rajoutent ponctuellement un troisième pôle attentionnel). De plus, le radar est de loin le média le plus utilisé par les contrôleurs, ce qui signifie une utilisation intensive de la modalité visuelle avec un risque accru de saturation (cf. également [Wickens, 2002](#) sur ce point). Dans ce contexte, les résultats des études sur la charge extrinsèque nous semblent extrêmement précieux. Ils peuvent servir de base pour la conception et le développement des futurs systèmes d'aide dans le contrôle aérien. En effet, ces derniers consistent souvent à rajouter des informations sur l'interface. Si ces informations supplémentaires sont redondantes avec d'autres éléments, elles risquent d'interférer et donc de créer de la charge inutile – ce qui semble contre intuitif au premier abord.

#### 4.5 SYNTHÈSE

Dans la littérature sur le contrôle aérien, la plupart des études tentent d'identifier les facteurs propres à la tâche qui sont susceptibles de faire varier la charge mentale (cf. chapitre 3). Peu de travaux proposent de véritables explications des mécanismes cognitifs sous-jacents au concept de charge mentale. Dans ce chapitre, nous avons opté pour une description des principaux modèles psychologiques actuels de la charge mentale afin d'étudier leur capacité à rendre compte des phénomènes de charge chez les contrôleurs.

Le concept de MDT – notamment celui décrit par [Anderson et Lebiere \(1998\)](#) dans l'architecture ACT-R – se distingue nettement, d'autant plus qu'il intègre la gestion du focus attentionnel et qu'il se situe à l'interface avec les différentes composantes de la mémoire à long terme. Plusieurs notions clés se dégagent autour de la notion de mémoire de travail, la MDT semble jouer le rôle d'un véritable goulot

d'étranglement. Tout d'abord, la capacité de la MDT est soumise à trois principales contraintes :

1. La MDT possède une capacité globale limitée qui s'exprime en terme de niveau d'activation.
2. Le nombre de traitements simultanés réalisables en MDT est également limité. Le nombre de buffers est restreint et chaque buffer ne peut contenir qu'un seul chunk en même temps.
3. Chaque chunk a une taille limitée. Il ne peut contenir qu'un certain nombre d'informations à un instant donné.

Ensuite, en parallèle de la capacité, la MDT est fortement contrainte par le temps :

1. Les niveaux d'activation des chunks décroissent rapidement et doivent être réactivés pour être maintenus en MDT. Chaque réactivation nécessite de l'attention et donc un minimum de temps qui ne pourra pas être alloué à d'autres processus.
2. Chaque opération réalisée en MDT par les règles de productions nécessite un temps incompressible.

La combinaison de l'ensemble de ces contraintes déterminent le flux de traitement réalisable en MDT dans une période de temps donnée. Sur cette base, un consensus se dégage, **si le temps « nécessaire » aux processus en MDT tend vers le temps disponible pour réaliser la tâche, alors le niveau de charge mentale augmente.**

Dans une tâche comme le contrôle aérien, la gestion d'un seul conflit est susceptible d'accroître le niveau de charge par rapport à la gestion de deux avions isolés, et cela pour plusieurs raisons :

1. Un conflit peut nécessiter un nombre important de traitement en MDT, en particulier si ce dernier est complexe.
2. L'enchaînement de ces traitements est effectué principalement de manière sérielle étant donné qu'ils transitent pour la plupart par la modalité visuelle.
3. Des réactivations sont nécessaires pour maintenir en MDT les informations relatives au conflit (en particulier lorsque les contrôleurs préfèrent attendre pour laisser mûrir la situation).
4. Le temps imparti pour gérer un conflit est par nature limité.

Si la somme des durées des différentes opérations en MDT qui sont nécessaires à la gestion du conflit tend vers le temps disponible pour le résoudre, la charge mentale augmente. Ainsi, la gestion d'un nombre important de conflit dans un temps limité est susceptible de fortement éprouver la MDT, avec des risques éventuels en termes de sécurité. Autrement dit, le fonctionnement de la MDT peut expliquer en grande partie les phénomènes de la charge mentale consécutifs à une multiplication des cas de conflits sur une période de temps donnée.

Les travaux sur l'expertise fournissent de nombreux compléments d'informations sur la relation entre la MDT et la charge mentale. Plus précisément, ils permettent d'expliquer comment les contraintes de la MDT peuvent être modulées suite à un apprentissage prolongé.

Dans le cadre de l'architecture ACT-R, l'effet de l'expertise se retrouve sur les deux composantes de la MLT, à savoir la mémoire déclarative et la mémoire procédurale.

Au niveau de la mémoire déclarative, l'individu expert possède des types de chunks complexes. Leur profondeur et leur spécialisation déterminent le nombre d'informations pertinentes récupérables et manipulables rapidement en MDT. La TCC et le modèle de MDT-LT insistent fortement sur l'importance de la construction et de l'utilisation de ces structures particulières en MLT. Elles permettent d'optimiser les interactions entre la MDT et la MLT.

Au niveau de la mémoire procédurale, l'individu expert possède un ensemble de règles de production optimal à la réalisation tâche. Elles sont le résultat d'un long processus de sélection et de maturation au cours de l'apprentissage de l'individu. Elles permettent d'effectuer différents traitements utiles à la tâche plus rapidement et de manière moins coûteuse (de type heuristiques automatisées) ; elles supportent également – au moins en partie – la mise en place de stratégies efficaces qui permettent de réguler la charge mentale.

Ainsi, la particularité des experts est qu'ils ont la possibilité d'optimiser davantage l'utilisation de la MDT en mettant en place des traitements efficaces moins coûteux en temps. Dans une tâche comme le contrôle aérien, l'expertise semble jouer un rôle crucial pour parvenir à gérer les fortes exigences et pressions temporelles imposées par l'activité. Néanmoins, elle ne supprime pas les limites de la MDT, l'expertise permet seulement de retarder les cas surcharges.

# 5

---

## LES DIFFÉRENTES MESURES DE LA CHARGE MENTALE CHEZ LES CONTRÔLEURS AÉRIENS

---

Mesurer la charge mentale est une problématique de recherche à part entière. De nombreuses mesures ont été proposées dans le contrôle aérien. Deux catégories majeures de mesures se distinguent, les subjectives et les objectives. Nous débuterons ce chapitre en décrivant ces deux catégories générales. Puis, compte tenu des objectifs de cette thèse, nous tenterons de dresser un aperçu exhaustif de l'ensemble des études réalisées dans le contrôle aérien qui ont utilisé l'oculométrie comme mesure de charge mentale.

### 5.1 LES MESURES SUBJECTIVES

Les mesures subjectives consistent à demander aux participants d'estimer la charge qu'ils éprouvent durant une tâche donnée. De nombreuses métriques ont été proposées. Nous décrirons ici les trois plus utilisées dans le contrôle aérien et nous insisterons sur leurs avantages et inconvénients respectifs.

Le « *National Aeronautics and Space Administration Task Load Index* » (NASA-TLX, [Hart & Staveland, 1988](#)) considère six facteurs : la demande mentale, la demande physique, la demande temporelle, l'effort, la performance et la frustration. Le questionnaire est divisé en deux parties. La première comprend des questions associées à chaque facteur et le participant doit assigner un score sur une échelle de Lickert allant de « faible » à « élevé ». La deuxième comprend des questions demandant de comparer deux à deux l'ensemble des dimensions, ce qui permet d'établir une hiérarchie entre les six facteurs.

La « *Subjective Workload Assessment Technique* » (SWAT, Reid, Nygren, Hancock, & Meshkati, 1988) considère trois dimensions : (1) la charge temporelle (« *time load* »), (2) la charge de l'effort mental (« *mental effort load* ») et (3) la charge du stress psychologique (« *psychological stress load* »), possédant chacune trois niveaux, faible, moyen et fort. Comme pour le NASA-TLX, la méthode d'évaluation s'effectue en trois étapes. La première consiste à cerner ce que représente la charge mentale chez le participant avant la passation de l'expérience. Pour cela, l'expérimentateur présente au participant l'ensemble des combinaisons possibles entre les trois dimensions et les trois niveaux, soit au total 27 binômes. Pour chacune des paires, le participant doit juger quel est selon lui le cas qui est le plus chargé. Ensuite, à la fin de chaque session expérimentale, le participant doit affecter une valeur allant de 1 à 3 sur chacune des trois dimensions. Enfin, le niveau de charge global est calculé en combinant ces notes au référentiel du participant établi lors de la première étape.

Ces deux premières techniques présentent l'intérêt majeur d'être relativement facile à mettre en place. De plus, l'utilisation des dimensions permet d'obtenir des compléments d'informations sur la nature de la charge. En revanche, les questionnaires sont systématiquement effectués à la fin des expérimentations. Par conséquent, ces deux techniques ne peuvent pas rendre compte des variations de la charge au cours de la tâche (Cegarra & Chevalier, 2008). De plus, lorsque les sessions expérimentales sont longues, les biais de rappel sont également à prendre en considération (Manning, Mills, Fox, & Pfleiderer, 2001). Les oublis et les post-rationalisations sont les deux biais les plus courants.

Enfin, la « *Air Traffic Workload Input Technique* » (ATWIT, Stein, 1985) est probablement la plus citée dans le domaine du contrôle aérien (Ahlstrom & Friedman-Berg, 2006). A l'inverse des deux précédentes, la ATWIT propose une mesure pendant la tâche (une chaque minute environ) et sur une seule dimension. Les participants doivent simplement indiquer leur sentiment de charge « instantané » en appuyant sur un clavier contenant des boutons étiquetés de un à dix. Le bouton « *un* » pour indiquer la charge la plus faible et le « *dix* » pour exprimer un sentiment de charge maximale. Elle permet donc cette fois d'évaluer les variations de charge au cour de la tâche. En re-

vanche, la principale critique concerne l'interférence entre la mesure et la tâche principale. Le simple ajout de la mesure est susceptible de générer une charge supplémentaire extrinsèque à la tâche. (e.g., Manning et al., 2001; Manning, Mills, Fox, Pfeleiderer, & Mogilka, 2002).

## 5.2 LES MESURES OBJECTIVES

Les mesures objectives se répartissent dans deux catégories : (1) les mesures physiologiques et (2) les mesures de performances.

Plus précisément, dans la catégorie des métriques de performances, nous trouvons majoritairement des mesures de la dégradation de la performance d'une deuxième tâche réalisée simultanément (Galster, Duley, Masalonis, & Parasuraman, 2001; Metzger & Parasuraman, 1999). Elles reposent sur le paradigme de la double tâche proposé depuis les années 1950 et fondé sur l'hypothèse du canal unique de traitement de l'information (Broadbent, 1958). Les performances à la deuxième tâche permettent de déduire la quantité de ressources allouées à la tâche principale. Une faible performance à la deuxième tâche peut traduire une forte charge (et cela particulièrement si les mêmes types de ressources sont utilisées dans les deux tâches Wickens, 1984). Globalement, ces mesures indirectes de la charge présentent les mêmes limites que le ATWIT. La résolution temporelle reste moyenne (de l'ordre de la minute) et l'interférence avec la tâche principale est toujours présente. D'autre part, les modalités de la deuxième tâche doivent être contrôlées rigoureusement.

Les mesures physiologiques font également partie des mesures objectives, du moins si nous considérons que l'aspect physiologique soit le garant d'une relative objectivité. Elles reposent sur le simple postulat que la charge mentale peut induire des modifications physiologiques mesurables. Dans le contrôle aérien, le rythme cardiaque est probablement la mesure la plus utilisée. Les résultats des recherches sont contrastés. Par exemple, Averty, Athenes, Collet, et Dittmar (2002) et Cabon et al. (2000) rapportent des corrélations positives importantes entre la charge et le rythme cardiaque. A l'inverse, Brookings, Wilson, et Swain (1996) ne trouvent pas de variations

significatives. En revanche, ces derniers rapportent un effet de la charge sur le rythme respiratoire (qui augmenterait avec l'exigence de la tâche). Nous trouvons également dans la littérature des mesures d'activité cérébrale avec l'utilisation de l'EEG (Cabon et al., 2000; Brookings et al., 1996) ainsi que l'étude des réponses électrodermales (Averty et al., 2002; Vogt, Hagemann, & Kastner, 2006). Dans les deux cas, ces indicateurs augmentent avec le niveau de charge.

Deux critiques majeures sont formulées à l'encontre des mesures physiologiques. Premièrement, de plus en plus de chercheurs s'interrogent sur leur sensibilité et leur sélectivité. Par exemple, les rythmes cardiaques et respiratoires ne sont pas sensibles aux faibles variations de charge et ils réagissent à d'autres phénomènes, notamment d'ordre émotionnel ou physique, qui ne sont pas liés à la charge mentale. Deuxièmement, ces mesures nécessitent souvent des dispositifs techniques lourds et intrusifs qui peuvent dégrader fortement l'aspect écologique des simulations (Averty et al., 2002). Les prometteuses mesures obtenues récemment via l'imagerie cérébrale illustrent parfaitement ce deuxième point (Hasegawa, Carpenter, & Just, 2002). Elles fournissent d'excellentes résolutions spatiales (localisation des structures cérébrales impliquées) et temporelles. Néanmoins, le dispositif qu'elles nécessitent (pièce sans objet métallique, bruit, etc.) ne permet pas d'envisager leur application dans le contrôle aérien à l'heure actuelle.

### 5.2.1 *Les métriques de densités dynamiques*

Depuis la fin des années 1990, un courant de recherche s'est développé en parallèle des travaux que nous venons d'évoquer. Les divers résultats obtenus sont regroupés sous le titre de « métriques de densité dynamiques » (Laudeman et al., 1998). L'objectif de ces recherches est de fournir des modèles mathématiques capables de prédire la charge mentale avec une résolution temporelle fine (de l'ordre de la seconde) en se basant exclusivement sur la mesure d'un ensemble d'informations objectives présentes sur le radar. Pour cela, les chercheurs manipulent uniquement des modèles statistiques de régression linéaire multiple. Chaque prédicteur est représenté par une variable et il se voit attribuer un poids fixe selon son degré d'importance. Les différentes variables sont ensuite alimentées selon la résolution

temporelle souhaitée (chaque seconde par exemple) en extrayant les caractéristiques des objets affichés sur l'écran radar (nombre d'avions, position, angle de convergence, proximité des frontières, etc.) Enfin, en fonction des résultats de la modélisation, les poids sont ajustés afin d'obtenir la meilleure corrélation possible avec les données recueillies sur les contrôleurs.

L'approche utilisée diffère donc nettement des autres mesures classiques de charge mentale. Récemment, [Kopardekar et Magyarits \(2003\)](#) ont proposé une métrique de densité dynamique « unifiée » qui parvient à expliquer jusqu'à 39% de la variance de la charge mentale perçue par les contrôleurs, ce qui représente une prédiction relativement forte d'un point de vue psychologique.

Selon [Boag et al. \(2006\)](#), cette approche strictement objective présente un véritable intérêt pour étudier les poids des différents prédicteurs. Néanmoins, étant donné que la relation entre l'exigence de la tâche et la charge mentale n'est pas linéaire ([Athènes, Averty, Puechmorel, Delahaye, & Collet, 2002](#)), l'absence de prise en compte des facteurs psychologiques pourrait limiter fortement les possibilités d'améliorations des métriques de densités dynamiques en termes de prédiction de la charge mentale ressentie par les contrôleurs aériens ([Boag et al., 2006](#)) – typiquement, les métriques de densités dynamiques ne peuvent pas rendre compte des différentes stratégies mises en place par les contrôleurs pour gérer les différents niveaux d'exigences de la tâche ([Sperandio, 1971](#)). De plus, l'ajustement des poids des prédicteurs s'effectue par comparaison avec une mesure classique de la charge mentale faisant office de référence. Autrement dit, les métriques de densités dynamiques tendent à reproduire – au moins en partie – les caractéristiques (positives ou négatives) de la mesure de référence.

### 5.3 L'OCULOMÉTRIE COMME MESURE OBJECTIVE DE LA CHARGE MENTALE

Le postulat majeur des mesures oculométriques de charge mentale est que l'activité visuelle peut refléter – au moins en partie – le coût des différents processus cognitifs nécessaires à la réalisation de la tâche. Plusieurs corrélats oculométriques de charge ont été décrits dans la littérature sur le contrôle aérien (cf. [Table 1](#) pour un résumé). Afin d'être tout à fait rigoureux, il est important de préciser que la

plupart des études dans le domaine du contrôle aérien se sont attardées sur la relation entre l'oculométrie et l'exigence de la tâche (que nous retrouvons dans la littérature sous le terme de « *task load* »). Le lien avec la charge mentale est donc parfois seulement implicite.

### 5.3.1 *Les fixations*

Tout d'abord, en présence d'une forte charge, la moyenne des durées de fixation augmente alors que le nombre de fixations diminue (Stein, 1992). Auparavant, Togami (1984) avait rapporté des résultats similaires chez les pilotes de l'air. Par ailleurs, cet auteur a également précisé que l'amélioration de la performance se traduisait davantage par l'augmentation de la durée des fixations plutôt que par leur nombre. Willems et al. (1999b) ont révélé que la durée moyenne des fixations sur les aéronefs était plus longue que pour l'ensemble des autres objets présents sur l'écran radar, mais ils n'ont pas trouvé d'effet significatif de l'exigence de la tâche sur la moyenne globale des durées des fixations. Globalement, la durée des fixations pourrait refléter le degré d'effort mental investi.

### 5.3.2 *Les saccades*

La durée des saccades ne fait pas l'objet d'un consensus. Stein (1992) a montré que la durée des saccades sur l'interface radar décroît avec un haut niveau de charge tandis que l'étude de Willems et Truitt (1999a) suggère que la durée tend à augmenter. En revanche, les résultats sur l'amplitude des saccades semblent plus cohérents. Ahlstrom et Friedman-Berg (2006) ont montré que l'amplitude décroît en présence d'un fort nombre d'aéronefs et Stein (1992) a obtenu des résultats similaires, mais seulement sur le groupe de contrôleurs novices (i.e. celui le plus exposé à l'exigence de la tâche).

### 5.3.3 *Les clignements des paupières*

Les résultats rapportés par Ahlstrom et Friedman-Berg (2006) et Veltman et Gaillard (1998) indiquent que la fréquence et la durée des clignements diminuent avec le nombre d'informations à traiter.

#### 5.3.4 *Le balayage visuel*

Tole, Stephens, Harris, et Ephrath (1982) ont montré que les pilotes de l'air présentent une activité de balayage visuel (« *scanning* ») plus focalisée lorsque l'exigence de la tâche augmente. Dans le domaine du contrôle aérien, Cabon et al. (2000) et Endsley et Rodgers (1998) ont retrouvé ces effets dits « tunnels ». L'étude de Willems et al. (1999b) indique également que l'activité de balayage visuel est davantage focalisée sur les zones où la densité du trafic est élevée, ce qui implique selon l'auteur que les informations périphériques tendent à être négligées.

#### 5.3.5 *Les diamètres pupillaires*

Finalement, dans la littérature générale sur l'oculométrie, les diamètres pupillaires occupent une place particulière. A notre connaissance, Hess (1965) a été parmi les premiers à étudier le lien entre le coût d'une activité mentale et la variation de taille du diamètre pupillaire. Le dispositif technique se basait à l'époque sur un ingénieux système de photographie de la pupille. De nombreux travaux ont suivi, notamment ceux de Kahneman et Beatty (1966) sur des tâches simples de mémoire à court terme, et ceux de Just et Carpenter (1993) sur le langage. Kahneman et Beatty (1966) présentaient oralement aux participants des suites de trois à sept chiffres au rythme de un chiffre par seconde. Cette étape était suivie d'une pause de deux secondes. Les sujets devaient alors répondre en répétant la suite de chiffres toujours sur le même rythme. Les résultats montrent que les diamètres augmentent (de manière quasi linéaire) en fonction du nombre de chiffres à mémoriser. Plus récemment, plusieurs recherches ont re-démontré sur des oculomètres de dernière génération que les diamètres pupillaires augmentent en fonction de la demande cognitive (Klingner, Kumar, & Hanrahan, 2008; Porter, Troscianko, & Gilchrist, 2007).

Cependant, dans le domaine du contrôle aérien, les diamètres pupillaires ont été rarement utilisés et les résultats avancés sont mitigés. Willems et Truitt (1999a) et Willems et al. (1999b) ne trouvent pas d'effet significatif de l'exigence de la tâche sur la variation de la taille de la pupille. En revanche, Ahlstrom et Friedman-Berg (2006) montrent une augmentation de la taille des diamètres en fonction du

TABLE 1: Les différents indicateurs oculométriques selon le niveau de charge mentale chez les contrôleurs aériens.

| <i>Indicateurs</i>     | Faible Charge |       | Forte charge |        |
|------------------------|---------------|-------|--------------|--------|
|                        | Durée         | Nb    | Durée        | Nb     |
| Fixations              | courte        | élevé | longue       | faible |
| Saccades               | indéterminée  | élevé | indéterminée | faible |
| Clignements            | longue        | élevé | courte       | faible |
| Balayage (Scanning)    | Large         |       | Focalisé     |        |
| †Diamètres pupillaires | faible ?      |       | fort ?       |        |

† Ampleur moyenne de la dilatation de la pupille.

nombre d'avions et [Stein \(1992\)](#) rapporte également une différence significative de taille en fonction de la charge chez les contrôleurs experts. Néanmoins, Stein ne rapporte aucune différence chez les contrôleurs novices, alors que ces derniers sont particulièrement exposés à l'exigence de la tâche et aux phénomènes de charge.

L'oculométrie semble permettre d'évaluer sensiblement les variations de charge au cours de la tâche avec une excellente résolution temporelle – à minima de l'ordre de la seconde – (cf. Table 1 pour un résumé de l'ensemble des indicateurs oculométriques recensés dans le contrôle aérien). Toutefois, les dispositifs techniques mis en place étaient relativement intrusifs (casque sur la tête du participant, environnements de simulation adaptés) et les oculomètres possédaient une résolution spatiale souvent moyenne. À notre connaissance, seule

l'étude de [Willems et al. \(1999b\)](#) est parvenue à atteindre un niveau de résolution spatiale suffisant pour distinguer les aéronefs des autres éléments de l'interface.

#### **Résumé du chapitre :**

L'ensemble des mesures de la charge mentale se divisent en deux catégories, les objectives et les subjectives. La littérature indique clairement qu'il n'existe pas de mesure idéale, elles possèdent chacune leurs avantages et inconvénients respectifs.

Schématiquement, la plupart des mesures subjectives sont relativement sensibles et non intrusives vis à vis de la tâche, mais elle ne permettent pas de rendre compte des variations de la charge au cours de la tâche (NASA-TLX, SWAT) et elles peuvent être biaisées.

A l'opposé, la majorité des mesures objectives physiologiques possèdent une excellente résolution temporelle, mais elles souffrent d'un manque de sensibilité et de sélectivité et elles nécessitent souvent des dispositifs techniques lourds qui dégradent les conditions de passation (EEG, IRM).

La ATWIT et la technique de la double tâche peuvent être considérées comme des intermédiaires dans leur catégorie respective. Elles possèdent des résolutions temporelles satisfaisantes mais les deux mesures sont susceptibles d'interférer avec la tâche principale.

Les métriques de densités dynamiques se distinguent des autres mesures objectives de la charge mentale. Leur principal intérêt est de pouvoir identifier les poids des différents prédicteurs propres à la tâche. En revanche, la non prise en compte des facteurs psychologiques rend ces métriques difficilement améliorables et elles sont susceptibles de reproduire les limites de la mesure de charge utilisée comme point de référence.

Enfin, l'oculométrie semble constituer un compromis satisfaisant. Elle permet d'évaluer objectivement de faibles variations de charge avec une excellente résolution temporelle. Néanmoins, les dispositifs techniques mis en place sont relativement intrusifs et possèdent une résolution spatiale moyenne, ce qui ne permet pas d'identifier finement le type d'information traité à un moment particulier.

---

## LE SYSTÈME D'AIDE ERASMUS

---

Pour faire face à l'augmentation constante du trafic aérien, de nombreux systèmes d'aides ont été proposés depuis une trentaine d'années, avec un impact sur les contrôleurs parfois à l'opposé des objectifs souhaités. L'exemple le plus caractéristique concerne le projet « *Free Flight* » développé dans les années 90 aux États-Unis par le RTCA<sup>1</sup>. Un des objectifs du projet était de réduire la charge des contrôleurs en donnant les moyens techniques aux pilotes de gérer eux-mêmes – en partie – les éventuels conflits. De nombreuses expérimentations ont été réalisées afin de tester le système. À l'inverse des objectifs initiaux, les résultats indiquent une augmentation de la charge mentale ainsi qu'une baisse globale des performances de la part des contrôleurs aériens (Galster et al., 2001; Metzger & Parasuraman, 1999; Gent, Hoekstra, & Ruigrok, 1997).

Le projet ERASMUS est un nouveau concept de gestion du trafic aérien européen<sup>2</sup>. Il s'inscrit dans une optique différente en mettant la charge mentale des contrôleurs au cœur de la problématique (Garcia, 2007; Villiers, 2004). L'objectif du projet est de pallier les effets négatifs de l'augmentation du trafic en réduisant le nombre de conflits (source de charge mentale) et en intervenant de manière « subliminale » pour ne pas interférer avec l'activité du contrôleur.

Dans ce chapitre, nous allons revenir sur chacun de ces deux points principaux. Toutefois, il est important de préciser que le niveau de des-

---

1. RTCA, 'Radio Technical Commission for Aeronautics', est une organisation privée à visée non lucrative qui produit un ensemble de recommandations sur les systèmes de gestion du trafic aérien (communications, navigation, surveillance) cf. <http://www.rtca.org>

2. Une description générale ainsi que les documentations techniques non confidentielles sont disponibles à l'adresse internet suivante <http://www.atm-erasmus.com>

cription restera volontairement général en raison de la confidentialité de l'algorithme mathématique exact sur lequel repose le système.

## 6.1 RÉDUIRE LE NOMBRE DE CONFLITS

Nous avons vu dans les précédents chapitres que la gestion des conflits est à l'origine de la plupart des phénomènes de charge dans l'ATC et qu'elle engendre des coûts variables selon de nombreux facteurs. Le postulat central d'ERASMUS est que la distance minimale à terme entre les aéronefs est une des rares informations calculables informatiquement (avec une fiabilité suffisante) qui peut permettre de classer – au moins approximativement – les conflits selon leur coût (Garcia, 2007). Sur cette base, un algorithme de détection de conflit a été élaboré. Il classe les différentes configurations de conflits dans trois grandes catégories :

*Type 1* La séparation minimale à terme est strictement inférieure à 7 NM. Ces conflits sont dits « sûrs » (i.e qui sont potentiellement facilement identifiables et peu coûteux mais qui nécessiteront une intervention). Pour rappel, la définition stricte d'un conflit repose sur une distance de 5 NM seulement.

*Type 2* La séparation minimale à terme est comprise entre 7 NM et 14 NM. Cette catégorie englobe les conflits qui peuvent générer du doute et qui sont potentiellement les plus coûteux (ils nécessitent du temps des traitements coûteux et/ou de l'attente afin de désambiguïser la situation).

*Type 3* La séparation minimale à terme est supérieure à 14 NM. Cette catégorie est définie comme étant la moins coûteuse. Dans cette configuration, le diagnostic de « non conflit » peut être réalisé rapidement et aucune intervention ou surveillance active n'est nécessaire.

Une fois cette classification opérée, l'algorithme de résolution d'ERASMUS prend le relais. Il va agir sur le trafic dans l'optique de fournir aux contrôleurs un maximum de configurations du type 3, c'est-à-dire les cas considérés comme étant les moins coûteux pour le contrôleur. Concrètement, l'algorithme de résolution de conflit d'ERASMUS se base sur l'émission de requêtes auprès des pilotes à l'aide d'une liaison directe sol-aéronef. Elles impliquent exclusive-

ment de légers changements de vitesses qui à terme vont modifier les positions futures des avions de telle sorte que leur séparation minimale soit de 14 NM (cf. figure 9).

Jusqu'à présent, le fait d'utiliser des variations de vitesse n'avait jamais été réalisé dans une optique de résolution de conflit. Récemment, Ehrmanntraut (2004) décrit les principaux types d'effets qui peuvent être engendrés en fonction de l'ampleur des variations de vitesse effectuées. Il démontre notamment que des modifications mineures peuvent engendrer des changements de positions des aéronefs conséquents s'ils sont effectués de manière précoce.

A l'heure actuelle, l'algorithme de résolution de conflit du système ERASMUS est limité par trois contraintes : (1) Au delà d'une durée de 15 minutes, la prédiction de trajectoire n'est plus considérée comme suffisamment fiable. Donc, les requêtes de changement de vitesse seront envoyées aux pilotes au plus tôt 15 minutes environ avant le conflit ; (2) Les variations de vitesse ne doivent pas excéder 6% afin de rester « subliminales » auprès des contrôleurs (cf. prochain paragraphe) ; (3) L'augmentation des séparations ne doit pas impacter le reste du trafic.

En conséquence, l'ampleur des actions ERASMUS (issues de l'algorithme de résolution) est au maximum de 7 NM environ, autrement dit, seulement une partie des conflits pourra être résolus. Les passages du type 1 au type 3 seront donc plus rares (seuls les conflits estimés avec une distance de séparation autour de 7 NM seront traités). Par contre, les passages du 2 au 3 seront plus fréquents (cf. figure 10).

## 6.2 UNE INTERVENTION SUBLIMINALE

La deuxième préoccupation majeure du projet ERASMUS est d'éviter au maximum de perturber l'activité du contrôleur. Les problèmes de modalités de feedback des systèmes d'aides ont fait l'objet d'un riche débat dans la littérature. En effet, et en particulier quand la pression temporelle est forte, l'ajout de nouvelles informations à traiter peut s'avérer plus perturbant qu'informatif, même si elles apportent une aide (Norman, 1990; Sarter, 2000; Villiers, 2004). En accord avec la théorie de Wickens (1984), l'utilisation de feedbacks multimodaux devrait permettre de limiter certains coûts de traitements. Récemment, Metzger et Parasuraman (2006) ont proposé de tester cette hypothèse, mais ils ne rapportent aucun bénéfice significatif

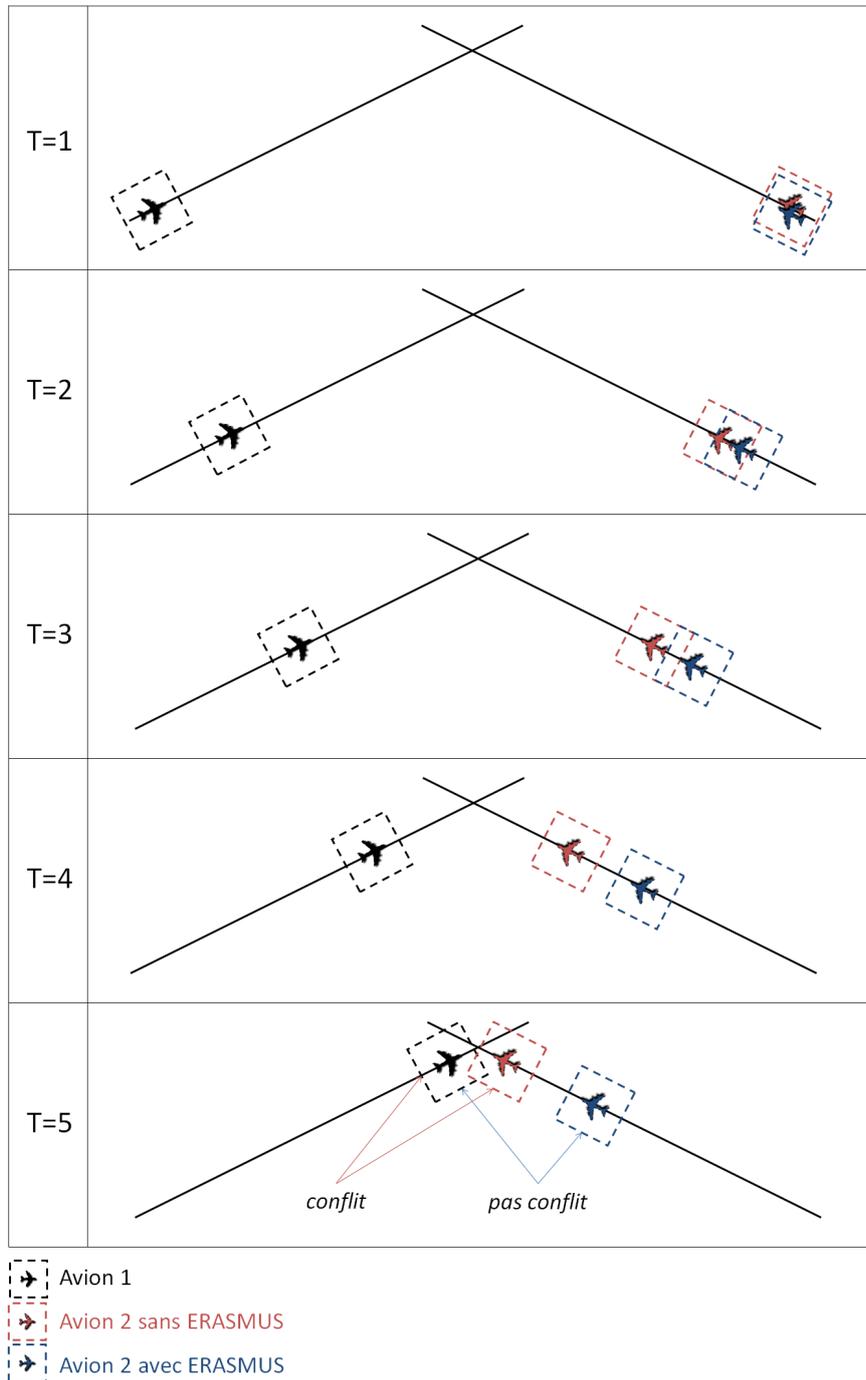


FIGURE 9: Illustration schématique du fonctionnement du système ERASMUS.

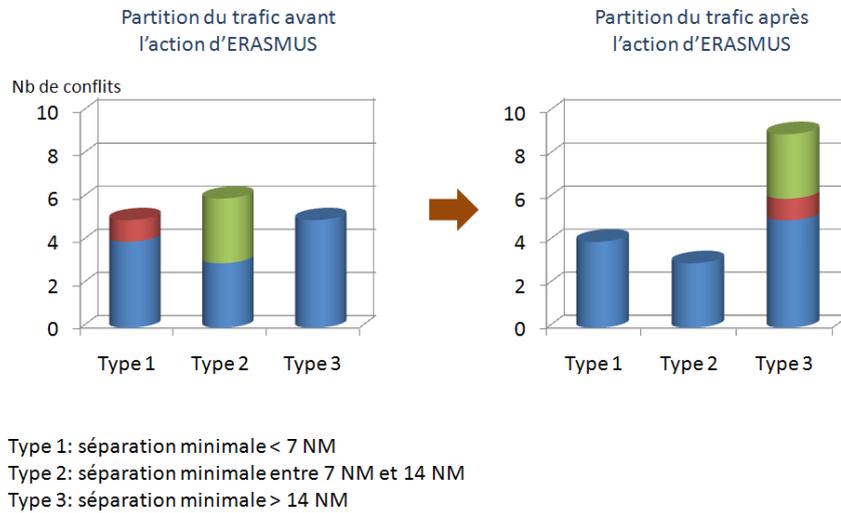


FIGURE 10: Aperçu général de l'action du système ERASMUS sur les différents types de conflits.

d'une d'aide multimodale sur les performances et l'attention visuelle dans l'ATC.

Dans ce contexte, une des idées fortes du projet **ERASMUS** est de proposer une intervention dite subliminale, c'est-à-dire non perceptible par les contrôleurs (Villiers, 2004). Le principe consiste à exploiter le fait que la perception du contrôleur est relativement opaque dans le temps et l'espace. L'échelle des données affichées sur l'écran radar ne permet pas de percevoir les légères variations de vitesse des avions.

Afin de tester cet aspect « subliminal », Averty, Johansson, et Wise (2007) ont soumis un groupe de contrôleur expert à des simulations de trafic aérien sur lesquelles l'algorithme d'**ERASMUS** faisait varier les vitesses des avions pour résoudre en amont une partie des conflits. L'amplitude de ces variations était fixée à 6 et 12 % de la vitesse de chaque avion (soit environ 30 et 60 NM<sup>1</sup> par heure). Les participants avaient pour principale consigne de repérer les variations de vitesses effectuées par **ERASMUS** (i.e. autres que celles dues au vent ou consécutives à une action d'un pilote). Les résultats indiquent clairement que les variations de 12% sont plus souvent repérées que celles de 6%. Plus précisément, 53% des fortes variations (les 12%)

1. 1 MN = 1819 m

sont indiquées alors que seulement 24% des faibles variations (les 6%) sont perçues.

Étant donné que la variation de vitesse de 6% représente l'action maximale que ERASMUS peut effectuer, l'aspect « subliminal » du système ERASMUS est confortablement validé.

**Résumé du chapitre :**

L'objectif du projet ERASMUS est de pallier les effets négatifs de l'augmentation du trafic en tentant de diminuer au maximum la charge mentale des contrôleurs. Pour cela, son action repose sur deux piliers :

1. Réduire le nombre de conflits (source de charge mentale)
2. Intervenir de manière « subliminale » pour ne pas interférer avec l'activité du contrôleur.

# 7

---

## PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE

---

Le trafic aérien est en constante augmentation. Il est susceptible de doubler dans les vingt prochaines années. Dans ce contexte, la problématique de la charge mentale est plus que jamais une préoccupation majeure de l'aéronautique moderne. Elle constitue un véritable « goulot d'étranglement » qui détermine la capacité des secteurs aériens.

Les travaux réalisés sur l'exigence de la tâche nous informent que la relation entre la densité du trafic et la charge mentale n'est pas triviale. En effet, la densité pourrait seulement jouer le rôle d'un catalyseur en augmentant la probabilité des cas de conflits tout en complexifiant leur gestion. Autrement dit, la problématique de l'impact de l'augmentation du trafic sur la charge mentale repose davantage sur l'accumulation du nombre de conflits que sur l'augmentation du nombre d'aéronefs.

Les principales théories cognitive de la charge mentale permettent d'expliquer ce constat ; la gestion d'un conflit nécessite, par nature, un nombre et un temps de traitement plus important en MDT par rapport à la gestion de deux aéronefs isolés. Plus le temps de traitement nécessaire sera proche du temps disponible pour réaliser la tâche, plus le niveau de charge mentale augmentera. Par conséquent, une augmentation de la fréquence des conflits favorise inévitablement une augmentation de la charge mentale – a fortiori lorsque les conflits sont complexes (Boag et al., 2006).

Le système d'aide [ERASMUS](#) s'insère dans ce courant et tente de proposer des solutions concrètes pour réduire le niveau de charge mentale des contrôleurs aériens. Pour cela, [ERASMUS](#) place l'activité cognitive des contrôleurs au cœur de l'équation en proposant de réduire de manière subliminale le nombre global de conflits, en s'atta-

quant notamment aux cas considérés comme étant les plus coûteux (i.e. les cas de conflits dont les diagnostics nécessitent des traitements importants et/ou une surveillance prolongée). L'aspect subliminal est particulièrement important. Il permet d'éviter tous risques collatéraux de perturbation de l'activité dû à l'ajout d'une nouvelle information à traiter (Norman, 1990; Sarter, 2000; Villiers, 2004).

Une première phase de test a été mise en place afin de tester la capacité du système ERASMUS à réduire la charge mentale des contrôleurs dans des conditions de trafic à fortes densités incluant de nombreux conflits. En dehors des nombreux aspects strictement techniques, les résultats ont confirmé l'aspect subliminal ainsi qu'une réduction de la charge mentale perçue (Drogoul, 2008b).

Toutefois, ces premières mesures de charge étaient seulement subjectives et nous avons vu que ces techniques présentent certaines limites majeures (cf. chapitre 5), notamment le fait de ne pas capturer l'ensemble des composantes de la charge mentale (i.e., Averty, Collet, Dittmar, Vernet-Maury, & Athènes, 2004; Cegarra & Chevalier, 2008). De plus, les expériences passées comme le projet Free flight appellent à la plus grande prudence en la matière. Les effets des systèmes d'aide peuvent parfois être à l'opposé des objectifs souhaités.

Dans ce contexte, nous avons décidé de compléter ces résultats en proposant, cette fois, une mesure d'évaluation objective d'ERASMUS basée sur l'oculométrie. De manière générale, la littérature indique clairement qu'il n'existe pas de mesure idéale, elles possèdent chacune leurs avantages et inconvénients. Il existe un réel besoin de produire des mesures davantage sensibles, sélectives, en temps réel et qui n'interfèrent pas avec la tâche. De plus, une combinaison de mesures peut s'avérer particulièrement pertinente (Cegarra & Chevalier, 2008).

Selon nous, l'oculométrie présente plusieurs intérêts majeurs. Tout d'abord, les précédents travaux dans la littérature ont montré que l'oculométrie parvient à discriminer objectivement de faibles variations de charge avec une excellente résolution temporelle. Ensuite, les récents développements des techniques d'enregistrement permettent d'utiliser une caméra à distance qui laisse libre la tête du participant et qui possède une résolution spatiale suffisante pour identifier précisément l'objet traité par le participant. Autrement dit, elle permet de

distinguer si le participant regarde ou non un aéronef particulier.

Sur cette base, et afin d'atteindre les objectifs fixés dans le cadre de cette thèse, nous avons formulé les deux principales hypothèses suivantes :

1. L'action d'ERASMUS devrait octroyer aux contrôleurs davantage de temps et de ressources pour le même nombre d'aéronefs à gérer, ce qui devrait permettre ainsi la gestion d'un trafic plus dense dans le futur. Les récents dispositifs oculométriques, avec une caméra à distance, devraient nous fournir des mesures objectives non-intrusives du système d'aide, même dans un environnement de simulation extrêmement réaliste.
2. Étant donné que les nouveaux systèmes d'enregistrement des mouvements oculaires possèdent une excellente résolution temporelle (de l'ordre de la milliseconde) et une résolution spatiale satisfaisante (au niveau d'un aéronef), l'oculométrie devrait nous permettre d'examiner finement les effets d'ERASMUS sur les ressources mentales et la charge mentale des contrôleurs ; elle devrait permettre l'élaboration de nouveaux indicateurs de charge mentale applicables a minima dans le contrôle aérien et, pourquoi pas, généralisables à d'autres domaines.

**Deuxième partie**  
**Partie Empirique**

---

## MATÉRIELS ET MÉTHODES

---

Pour éprouver nos hypothèses, nous avons soumis un groupe de contrôleurs experts à une simulation extrêmement réaliste de contrôle aérien. Les scénarios différaient uniquement par la présence ou non du système ERASMUS. Autrement dit, dans les deux conditions, les mêmes avions – et donc la même densité du trafic – étaient présentés aux contrôleurs.

### 8.1 PARTICIPANTS

Les données ont été recueillies sur 7 contrôleurs en route issus du centre de contrôle aérien d'Aix-en-Provence (Tranche d'âge 27–55,  $M = 35$ ,  $\sigma = 10.6$ ; 5 hommes, 2 femmes). Leur niveau d'expérience dans le centre était compris dans un intervalle de 2 à 27 ans ( $M = 10.7$ ,  $\sigma = 11.1$ ). Tous les participants avaient une vision normale non corrigée. Un huitième volontaire a dû être exclu des analyses en raison d'un problème technique qui a endommagé les données oculométriques.

### 8.2 DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

L'expérimentation a été réalisée dans les locaux de la DTI/DSNA à Toulouse en France. Un effort conséquent a été effectué afin de proposer un environnement de simulation aussi réaliste que possible (cf. Figure 11 pour un aperçu général du dispositif ainsi que l'Annexe A, Figure 16, pour un schéma global de l'architecture technique).



FIGURE 11: L'environnement de simulation incluant la caméra d'enregistrement à distance des mouvements oculaires

### 8.2.1 *Le simulateur de contrôle du trafic aérien*

Nous avons utilisé un simulateur de contrôle du trafic aérien haute fidélité. La plateforme d'expérimentation était similaire à une station de travail opérationnelle. Nous avons utilisé un écran radar BARCO 30" possédant un taux de rafraîchissement de 75Hz et une résolution de  $2560 \times 1600$  pixels.

Un contrôleur expert en activité (issu du même centre que les participants) jouait le rôle de contrôleur organique. Il avait pour consigne de seulement fournir les strips (résumé du plan de vol) au participant au moment opportun (i.e. quand les aéronefs étaient sur le point de rentrer dans le secteur aérien).

De plus, un pilote de l'air professionnel était positionné dans une salle adjacente afin de simuler les interactions entre les pilotes et les contrôleurs. Le pilote était équipé également d'un modulateur de voix qui permettait de générer une voix différente pour chaque vol simulé (une par pilote fictif). Enfin, le pilote était capable de changer les paramètres des différents vols en réponse aux indications des contrôleurs.

### 8.2.2 L'oculomètre

L'enregistrement des mouvements oculaires a été effectué en utilisant un « *Eyelink 1000 remote eye tracker* » (SR Research Ltd., Mississauga, Ontario, Canada). Son principe de fonctionnement repose sur l'émission d'infra rouge en direction de l'œil (cf. Annexe A, figure 18). Les reflets engendrés sont ensuite enregistrés via une caméra haute définition. Basiquement, le traitement informatique de ces reflets permet, dans un laps de temps très court (de l'ordre de la milliseconde), d'extraire différentes informations sur le regard (orientation, dilatation de la pupille, etc.). Ce type de dispositif dit « *Remote* » (à distance) a pour principale caractéristique de laisser la tête du participant libre (seule une pastille collée sur le front du participant suffit comme point de référence). Ce type d'oculomètre possède une précision spatiale supérieure à  $0.5^\circ$ , et une résolution spatiale de  $0.05^\circ$  (spécifications techniques fournies par le fabricant). Le taux d'échantillonnage a été fixé à 250Hz, soit un échantillon de données toutes les 4 millisecondes. L'ensemble des données oculométriques ont été extraites en utilisant les algorithmes fournis par la société Eyelink.

La caméra était placée à une distance de 20cm de l'écran et la distance entre l'œil enregistré et la caméra était de 70cm. Pour maintenir cette distance constante, le siège des contrôleurs était fixé au sol. La luminosité de la salle de simulation était maintenue constante afin de ne pas parasiter la dilatation de la pupille (cf. figure 12). L'oculomètre était connecté à un ordinateur Pentium IV à 3.0GHz qui faisait office de relais avec le simulateur d'ATC. Il était également connecté à un écran de contrôle permettant à l'expérimentateur de vérifier en temps réel le bon déroulement de la passation (cf. figure 13).

## 8.3 TÂCHE ET PROCÉDURE

Chaque participant a dû gérer quatre séquences de trafic réparties sur deux jours. Chaque jour, les participants étaient soumis à deux séquences de trafic séparées par une pause de 45 minutes. Chaque passation était précédée d'une courte phase de calibration pour régler le dispositif d'enregistrement des mouvements oculaires (cf. Annexe A, figure 17 pour un aperçu de l'interface nécessaire à la phase de calibration).

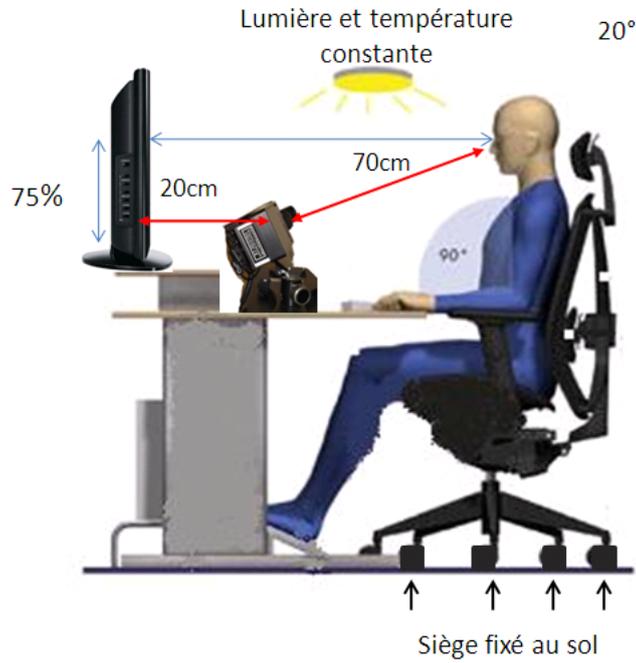


FIGURE 12: Positionnement de l’oculomètre par rapport au participant et à l’écran radar

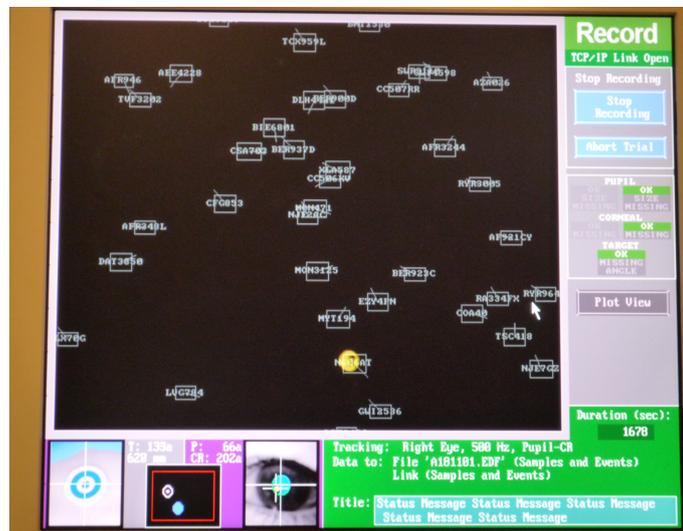


FIGURE 13: L’interface de surveillance dédiée à l’expérimentateur. Les rectangles représentent les étiquettes des avions et le point jaune représente la localisation de la fixation en cours.

Durant la phase expérimentale, le contrôleur avait pour consigne de satisfaire l'ensemble des tâches nécessaires à la gestion d'un secteur aérien, à savoir, tout particulièrement, la détection et la résolution des conflits, mais également toutes les communications associées à la gestion d'une traversée de l'espace aérien d'un aéronef.

#### 8.4 MATÉRIEL

Les séquences de trafic ont été construites à partir de deux échantillons de trafic. Chacun de ces échantillons a été élaboré en agençant des vols réels issus du secteur sur lequel les participants étaient certifiés. Le niveau de complexité global et le nombre d'avions étaient maintenus constants. Ensuite, pour chaque échantillon, une copie a été construite en activant la présence d'ERASMUS. Les quatre séquences résultantes étaient donc toujours équilibrées en terme de nombre d'avions. La densité du trafic a été basée sur un profil de trafic considéré comme dense de nos jours, avec une augmentation de 20% pour tenir compte des prévisions de croissance du trafic ([International Civil Aviation Organization, 2007](#)). Enfin, pour chaque type de trafic, nous avons assigné différents indicatifs aux avions afin d'éviter des effets de similarité, et la présentation des séquences était effectuée selon un ordre pseudo-aléatoire.

#### 8.5 LA DÉFINITION DES AIRES D'INTÉRÊTS

La quantité des données oculométriques rend leur traitement potentiellement très lourd. Pour diminuer les temps d'analyse, il est usuel de définir au préalable des aires d'intérêts (« *Area of interest* », AOI). Elles permettent de segmenter le flux continu des données dans l'espace et le temps. Concrètement, elles correspondent à des zones particulières où une information – pertinente vis-à-vis des objectifs de l'étude – est affichée sur l'écran radar à un moment donné.

Ici, nous avons défini une AOI pour chacune des étiquettes des aéronefs. Ce choix a été effectué selon deux principaux critères. Le premier est d'ordre théorique. Avec l'arrivée des interfaces modernes dans le contrôle aérien, [Willems et Truitt \(1999a\)](#) ont montré que 92% du temps passé par les contrôleurs sur l'image radar sert à traiter les étiquettes des aéronefs (i.e. pour rappel, l'indicatif, l'altitude et la vitesse du vol). [Crawford, Burdett, et Capron \(1993\)](#) rapportent

également des résultats similaires. Autrement dit, ces faits viennent confirmer objectivement sur des interfaces modernes ce que [Leplat et Bisseret \(1966\)](#) avaient déjà démontré. Le deuxième critère est strictement technique. Un écran radar affiche une multitude d'informations simultanément, ce qui peut parfois engendrer des superpositions d'informations – en particulier quand le trafic est dense. Ce problème est particulièrement récurrent pour l'affichage des vecteurs vitesses ou des plots radars des avions. En revanche, l'affichage des étiquettes utilise un algorithme particulier dit d'« anti recouvrement » qui permet d'éviter tous chevauchements éventuels entre deux étiquettes. Cette caractéristique est cruciale pour un enregistrement oculométrique. La présence de plusieurs informations au même emplacement ne permet pas de déterminer avec certitude quelle information est traitée.

La gestion des AOI a nécessité un travail de développement spécifique. En effet, dans une tâche comme le contrôle aérien, les événements affichés sur le radar sont dynamiques, c'est à dire variables dans l'espace et le temps. Chaque aéronef – et donc chaque AOI – change de position toutes les huit secondes. Or, la grande majorité des logiciels actuels de traitement de données oculométriques ne parviennent pas à gérer cet aspect « dynamique » des AOIs ([Mandran, Meillon, Mille, & Roux, 2007](#)). De plus, dans notre cas, le système d'enregistrement des données oculaires était distinct du dispositif d'affichage et de simulation du trafic aérien. Autrement dit, l'un enregistrerait les événements radar tandis que l'autre enregistrerait les données oculaires. En conséquence, afin de pouvoir affecter les fixations aux zones d'intérêts nécessaires à l'analyse, nous avons dû développer un nouvel algorithme de traitement spécifique afin d'apparier temporellement et spatialement les deux composantes – selon nous, ces différentes contraintes techniques expliquent en partie pourquoi, à notre connaissance, un très faible nombre d'études oculométriques sont descendues à ce niveau de granularité dans le contrôle aérien.

### 8.5.1 *Algorithme d'appariement entre les fixations et les AOIs dynamiques*

Nous avons à notre disposition deux fichiers par participant et par passation. Le premier, issu de l'oculomètre, contenait la succession chronologique de l'ensemble des fixations  $f$  enregistrées au cours de

la passation. Chaque ligne  $i$  du fichier contenait le temps du début de la fixation  $tf_i$  ainsi que ces coordonnées  $xf_i$  et  $yf_i$  sur l'écran. Le deuxième fichier, issu du simulateur, contenait l'ensemble des informations sur les étiquettes  $e$  des aéronefs, autrement dit sur les AOIs. À chaque rafraîchissement de l'écran radar, l'ensemble des nouvelles positions des étiquettes étaient inscrites séquentiellement à la fin du fichier (soit, toutes les 2ms environ compte tenu du temps d'écriture physique dans le fichier). Chaque ligne  $j$  du fichier contenait trois types d'information :

1. L'identifiant  $IDe_j$  de l'étiquette.
2. Les coordonnées de l'étiquette. Étant donné leur forme rectangulaire, deux coordonnées étaient enregistrées. La coordonnée du coin haut gauche du rectangle,  $(xe, ye)_{\min,j}$ , et la coordonnée du coin bas droite du rectangle  $(xe, ye)_{\max,j}$ .
3. Le moment précis  $te_j$  de l'apparition ou du rafraîchissement de l'étiquette sur l'écran radar.

Sur cette base, nous avons établi l'algorithme d'« appariement » suivant (cf. figure 14<sup>1</sup>). Le point de départ du traitement se situait au niveau du fichier des fixations, issu de l'oculomètre (cf. boucle 1 rouge sur la figure 14). À chaque ligne  $i$  de ce fichier, deux opérations étaient réalisées. Tout d'abord, les différentes variables sur les caractéristiques de la fixation courante  $f_i$  étaient affectées. Ensuite, l'algorithme consistait à parcourir séquentiellement le fichier des étiquettes (cf. boucle 2 bleue sur la figure 14) afin de déterminer si  $f_i$  était associable ou non à une étiquette (ou AOI) particulière présente sur l'écran radar à un moment donné. À chaque ligne  $j$  de ce fichier, plusieurs opérations successives étaient réalisées.

Premièrement, les différentes variables propres à l'étiquette  $e_j$  considérée étaient affectées. Ensuite, la période temporelle maximale pendant laquelle l'étiquette  $e_j$  était présente sur l'écran radar était calculée. Étant donné que les rafraîchissements de l'écran radar étaient toutes les 8 secondes, la période était délimitée par  $te_{\min,j}$  (i.e.  $te_j$ ) et par  $te_{\max,j}$  (i.e.  $te_{\min,j} + 8\text{secondes}$ ). Enfin, après ces phases d'affectation et de définition, deux évaluations successives (cf. les

---

1. La traduction de cet algorithme dans le langage de programmation Visual Basic est disponible à l'Annexe A, cf. listing A.1

losanges verts sur la figure 14) étaient effectuées afin de tester l'adéquation temporelle et spatiale entre la fixation  $f_i$  et l'étiquette  $e_j$ .

1. Test de la présence de  $tf_i$  dans la fenêtre temporelle d'affichage de l'étiquette  $e_j$   
 => Si non (i.e.  $tf_i$  n'est pas compris entre  $te_{\min,j}$  et  $te_{\max,j}$ ), passage direct à l'étiquette suivante.  
 => Si oui, passage au test suivant.
2. Test de la localisation géographique de  $(xf, yf)_i$  dans le rectangle de l'étiquette (i.e la zone spatiale entre  $(xe, ye)_{\min,j}$  et  $(xe, ye)_{\max,j}$ )  
 => Si non, passage directe à la l'étiquette suivante.  
 => Si oui, passage à l'étape suivante.

Dans le cas où les deux évaluations précédentes étaient validées, l'identifiant  $IDe_j$  de l'étiquette  $e_j$  était enregistré au niveau de la ligne  $i$  de la fixation  $f$ . Autrement dit, une étiquette d'aéronef précise était appariée à la fixation  $f$ .

## 8.6 VARIABLES ET HYPOTHÈSES

### 8.6.1 Variables

#### *Variables indépendantes*

L'activation du système ERASMUS différait entre les deux conditions expérimentales. Ainsi, la variable indépendante avait deux modalités, « ERASMUS » et « NO ERASMUS » (i.e. avec ou sans l'activation du système d'aide). Dans la condition ERASMUS, 20% des aéronefs recevaient une modification de vitesse de la part de l'algorithme ERASMUS.

Chaque séquence de trafic contenait une cinquantaine d'avions. En moyenne, 16 aéronefs étaient affichés par minute sur l'écran radar. Plus précisément, pour chaque période de 8 secondes (fréquence de rafraîchissement du radar), le contrôleur avait sa charge 7 à 22 aéronefs affichés sur l'écran radar pour chaque séquence.

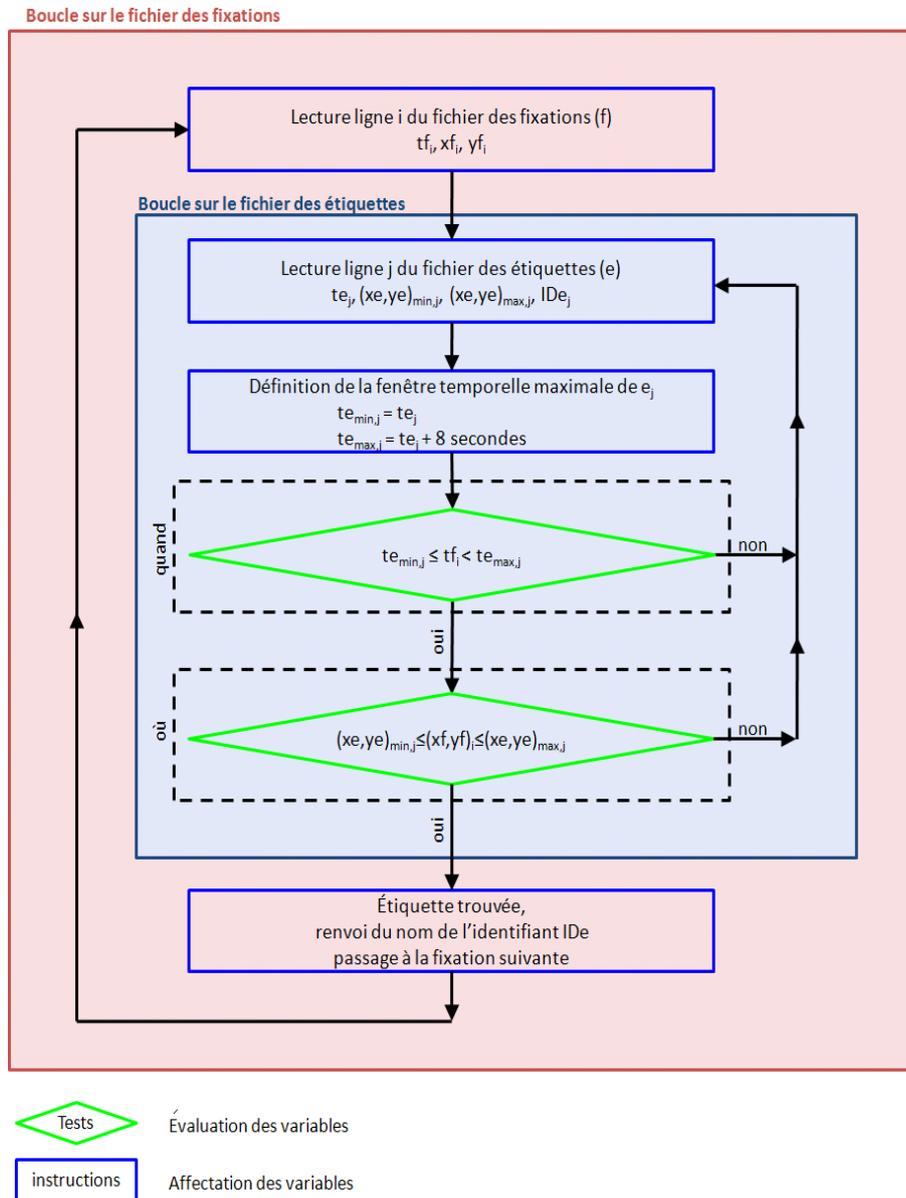


FIGURE 14: Algorithme d'appariement entre les fixations et les AOIs dynamiques

### *Variables dépendantes*

Tout d'abord, nous avons étudié les variables dépendantes classiques en oculométrie, à savoir le nombre moyen et la durée moyenne des fixations pour l'ensemble des AOIs. Ensuite, étant donné l'aspect dynamique des AOIs (cf. ci dessus), nous avons dû séquencer le déroulement temporel en périodes de 8 secondes, c'est-à-dire le degré de précision le plus élevé selon les caractéristiques matérielles du radar. En effet, les avions étaient susceptibles d'apparaître ou de disparaître du secteur à tout moment. En conséquence, durant chaque période, chaque avion pouvait être fixé entre 0 et 8 secondes. Sur cette base, nous avons défini quatre principales variables dépendantes oculométriques :

#### 1. **Le temps moyen passé sur les avions traités**

Si nous considérons la  $j^{\text{ème}}$  période de 8 secondes, nous notons  $t_{ij}$  le temps passé par les contrôleurs fixant le  $i^{\text{ème}}$  avion durant cette période. Nous avons calculé alors la moyenne des temps passés sur les avions fixés (i.e., la moyenne de tous les  $t_{ij}$  tel que  $t_{ij} > 0$ ).

#### 2. **L'hétérogénéité de la distribution de l'attention visuelle**

Chaque avion constituait une unité d'analyse par période de 8 secondes. Pour chaque période, nous avons calculé le temps théorique  $T_j$  que les contrôleurs auraient passé sur chaque avion si leur attention était parfaitement partagée entre l'ensemble des avions.  $T_j$  est égal à la durée de la  $j^{\text{th}}$  période divisée par le nombre d'avions présents  $n_j$  sur le radar durant cette période (cf. équation 8.1).

$$T_j = \frac{8}{n_j} \quad (8.1)$$

Sur cette base, pour chaque unité d'analyse, nous avons calculé un index d'hétérogénéité  $H_{ij}$  (cf. équation 8.2).

$$H_{ij} = \frac{|T_j - t_{ij}|}{T_j} \quad (8.2)$$

Enfin, la mesure globale de l'hétérogénéité  $H$  est la moyenne de tous les  $H_{ij}$ .

Cette mesure fournit un indice du degré de distribution de l'attention par rapport à une simulation d'un simple balayage réparti sur tous les aéronefs. Un simple balayage engendre une homogénéité parfaite. Plus précisément, si le contrôleur scanne simplement les aéronefs les uns après les autres, sans jamais se concentrer sur un aéronef en particulier, H tendra vers zéro. En revanche, plus l'attention du contrôleur se focalisera sur certain groupe d'avions (ou sur n'importe quelle autre zone d'intérêt), plus H augmentera. Il faut préciser que H ne peut pas réellement atteindre zéro étant donné qu'une partie de l'attention sera inévitablement perdue sur des cibles autres que les aéronefs.

### 3. L'amplitude des saccades

Nous avons étudié également l'amplitude des saccades. Les saccades ne sont pas spécifiques aux AOIs mais aux transitions entre les points de fixations (produites sur les AOIs ou non). Les saccades vers les autres périphériques de la station de travail que le radar (en particulier les « *strips* » papiers) ont été incluses.

### 4. Les diamètres pupillaires

Le dernier type de variable dépendante concerne l'amplitude moyenne de la dilatation de la pupille associée aux fixations effectuées sur les AOIs (toujours pour chaque période de 8 secondes).

Le calcul de cette VD s'est effectué en deux étapes. Tout d'abord, étant donné que la taille de la pupille est dépendante de la phase de calibration préalable à chaque session, nous avons dû, pour chaque contrôleur, ajuster les données pupillaires afin de les rendre comparables. Pour cela, pour chaque séquence effectuée par le participant, nous avons retiré de toutes les mesures la différence entre (1) la moyenne générale calculée à partir de l'ensemble des données enregistrées lors des premières minutes des différentes séquences, et (2) la moyenne spécifique obtenue sur la première minute de la séquence considérée.

Enfin, la taille de base de la pupille peut varier en fonction des personnes pour des raisons d'ordre morphophysiologique (tel que la taille de l'œil par exemple) qui ne sont pas pertinentes vis à vis des objectifs de l'expérimentation. Pour annuler

cette source de variation, nous avons standardisé l'ensemble des diamètres pupillaires recueillis sur un même participant en fonction de son niveau de base et de son écart-type. Plus précisément, pour chaque participant, nous avons procédé à une centration-réduction de l'ensemble des données recueillies. Concrètement, pour chacune des données enregistrées sur un participant, nous avons retiré la moyenne générale calculée à partir de l'ensemble des données enregistrées sur le participant (la centration) puis nous avons divisé cette différence par l'écart type de la moyenne générale (la réduction).

### **Les clignements des paupières**

Les clignements des paupières (« *blinks* ») n'ont pu faire l'objet d'analyse en raison des contraintes techniques dues au dispositif. En effet, aucun critère objectif ne permettait de les distinguer des fixations hors radar.

#### 8.6.2 *Hypothèses opérationnelles*

L'activité oculaire devrait refléter l'effet attendu d'ERASMUS sur la charge mentale des contrôleurs aériens. Étant donné nos quatre types de variables dépendantes, les hypothèses sont :

- H1 : Les avions en conflit sont supposés engendrer des temps de traitements plus long que les autres avions. Par conséquent, en diminuant le nombre de conflits, ERASMUS devrait réduire le temps moyen passé sur les avions fixés :

$$\text{Moyenne } t_{ij}(\text{ERASMUS}) < \text{Moyenne } t_{ij}(\text{NON ERASMUS}) \quad (8.3)$$

- H2 : ERASMUS est supposé favoriser un balayage diffus de la scène visuelle en diminuant le nombre d'événements problématiques à gérer. Ainsi, l'hétérogénéité devrait être plus faible dans les séquences de trafic avec ERASMUS :

$$\text{Moyenne } H_{ij}(\text{ERASMUS}) < \text{Moyenne } H_{ij}(\text{NON ERASMUS}) \quad (8.4)$$

- H3 : Pour les mêmes raisons que H2 (i.e. un balayage plus diffus de la scène visuelle en présence d'ERASMUS), l'amplitude des saccades devrait être plus forte lorsque ERASMUS est actif.
- H4 : Enfin, l'amplitude de la dilatation de la pupille devrait refléter l'effet d'ERASMUS sur la charge mentale. Plus précisément, les moyennes globales des diamètres pupillaires devraient être plus petites avec ERASMUS. De plus, la variation intra-scénario du nombre d'aéronefs devrait impacter l'amplitude de la dilatation de la pupille surtout dans la condition sans ERASMUS ; l'augmentation du nombre d'aéronefs devrait se traduire par une augmentation plus forte de l'amplitude de la dilatation de la pupille lorsque ERASMUS est inactif.

## 8.7 ANALYSES

### 8.7.1 *Le traitement général des données oculométriques*

Les données issues des séquences de trafic ont été moyennées dans chaque condition (avec et sans ERASMUS). L'ensemble des résultats étaient dans la direction attendue. En conséquence, des test t appariés unilatéraux ont été utilisés pour comparer les moyennes entre les deux états d'ERASMUS (avec et sans). Les tailles d'effets ont été rapportées en utilisant le  $d$  de Cohen (1988).

### 8.7.2 *Le traitement particulier des diamètres pupillaires*

Dans l'objectif d'étudier l'impact du nombre d'avions sur la taille des pupilles de chaque participant, nous avons calculé deux poids « bêta » en utilisant deux modèles de régression linéaire, le premier avec ERASMUS et le second sans ERASMUS. Chaque bêta représente le poids du prédicteur (i.e. ici le nombre d'avion) sur les variations de la taille de la pupille. Ainsi, à l'instar des autres traitements, des test t appariés unilatéraux ont été utilisés pour comparer les moyennes des bêtas entre les deux conditions expérimentales. Enfin, nous avons testé la contribution absolue du nombre d'avions en utilisant un test t à échantillon unique avec 0 comme valeur de référence (unilatéral).

---

## RÉSULTATS

---

La table 2 résume les effets d'ERASMUS sur l'ensemble des indicateurs oculométriques que nous avons utilisés à l'exception des diamètres pupillaires. Les résultats obtenus sur ces derniers seront présentés séparément dans le tableau 3.

### 9.1 NOMBRE ET DURÉE MOYENNE DES FIXATIONS

Malgré le fait que nous n'avions pas d'hypothèses spécifiques concernant le nombre et la durée moyenne des fixations sur les AOIs, ces données sont traditionnellement rapportées par les chercheurs en oculométrie. Ici, nous n'avons pas trouvé de différence significative entre les deux conditions expérimentales. Toutefois, à un niveau strictement descriptif, nous constatons que le nombre de fixations semble plus élevé en présence d'ERASMUS,  $t(7) = 1.59$ ,  $p = .16$  (bilatéral) ; alors que le  $d$  de Cohen indique une taille d'effet moyenne ( $d = 0.61$ ). Ce constat est également valable pour les moyennes des durées des fixations. D'un point de vue descriptif, elles apparaissent plus courtes quand ERASMUS est actif, mais la différence n'est pas significative  $t(7) = 1.57$ ,  $p = .16$  bilatéral,  $d = 0.60$ . Étant donné le faible nombre de participants, ces tailles d'effets suggèrent un manque de puissance statistique.

### 9.2 H1 : LE TEMPS MOYEN PASSÉ SUR LES AÉRONEFS

En accord avec notre prédiction, le temps passé sur les aéronefs fixés (moyennés sur l'ensemble des aéronefs et des différents périodes) est plus faible avec ERASMUS,  $t(7) = 2.5$ ,  $p = .02$ ,  $d = 1.01$ .

### 9.3 H2 : LA DISTRIBUTION DE L'ATTENTION

En accord avec notre prédiction, le degré d'hétérogénéité de la distribution de l'attention sur l'ensemble des aéronefs est réduit par ERASMUS,  $t(7) = 5.06$ ,  $p = .001$ ,  $d = 1.87$ . Autrement dit, la différence entre (1) le temps réellement passé sur chaque aéronef et (2) le temps théorique calculé sur le postulat d'un balayage de l'écran radar régulier et parfaitement divisé entre les aéronefs (i.e. sans halte prolongée sur un aéronef particulier), est plus forte sans ERASMUS. En d'autres termes, ERASMUS pourrait aider les contrôleurs en limitant des allocations importantes de ressources (et des efforts mentaux) sur des points spécifiques de l'écran radar.

### 9.4 H3 : L'AMPLITUDE DES SACCADÉS

Nous avons observé un fort effet d'ERASMUS sur l'amplitude des saccades ( $t(7) = 4.31$ ,  $p = .002$ ,  $d = 1.81$ ). Les distances moyennes des saccades, incluant les transitions vers les autres composantes de l'interface (i.e. en particulier les « *strips* » papier) sont plus fortes avec ERASMUS que sans ERASMUS. Ce résultat est cohérent avec les précédents et suggère que l'activité des mouvements oculaires est moins focalisée sur des points particuliers de l'écran radar quand ERASMUS est actif.

### 9.5 H4 : LES DIAMÈTRES PUPILLAIRES

#### 9.5.1 *Effet global d'ERASMUS sur la variation de la taille des diamètres pupillaires*

Au niveau global, nous n'avons pas observé de différence significative entre les deux conditions expérimentales. Toutefois, d'un point de vue descriptif, la taille moyenne des pupilles semble être plus grande sans ERASMUS,  $t(7) = 1.67$ ,  $p = .07$ ; alors que le  $d$  de Cohen indique une taille d'effet moyenne ( $d = 0.63$ ). Là encore, un manque de puissance statistique dû au faible nombre de participants pourrait en être la cause. De plus, les effets d'interactions avec d'autres variables pourraient également expliquer ce premier résultat. Nous allons nous attarder maintenant sur ce dernier point.

### 9.5.2 Interaction entre ERASMUS et le nombre d'aéronefs

La relation entre le nombre d'aéronefs et les diamètres pupillaires a été étudiée en calculant les poids bêtas dans une régression linéaire. En accord avec notre prédiction, nous avons observé une différence significative entre les moyennes des bêtas. Le nombre d'aéronefs influence davantage les variations de taille de la pupille sans la présence d'ERASMUS,  $t(7) = 3.25$ ,  $p = .008$ , ( $d = 1.23$ ). Autrement dit, les diamètres pupillaires augmentent davantage en fonction du nombre d'avions quand ERASMUS est inactif. Nous notons également que le  $d$  de Cohen indique une grande taille d'effet. En complément de la comparaison de moyennes entre les bêtas, le test  $t$  à échantillon unique a révélé que le bêta était significativement supérieur à zéro dans la condition sans ERASMUS,  $t(7) = 2.28$ ,  $p = .03$ , ( $d = 0.86$ ); alors qu'il ne diffère pas significativement de zéro dans la condition avec ERASMUS,  $t(7) = -.39$ ,  $p = .35$ , ( $d = 0.14$ ). En conséquence, une première observation importante peut être formulée : l'augmentation du nombre d'aéronefs à contrôler semble impacter négativement la charge mentale des contrôleurs seulement quand ERASMUS est inactif.

### 9.5.3 Interaction entre la « densité du trafic » et ERASMUS

Les résultats précédents ont montré une interaction entre ERASMUS et le nombre d'aéronefs sur les diamètres pupillaires. Afin de caractériser plus finement cette interaction, nous avons défini deux niveaux de densité du trafic en fonction du nombre moyen global d'aéronefs par minute présents sur l'écran radar. Les séquences de trafic au dessous de la moyenne ont été labellisées « Faibles » et les séquences au dessus de la moyenne ont été labellisées « Fortes ». Sur cette base, nous avons comparé les deux conditions ERASMUS pour chaque type de densité du trafic. Dans la condition à faible densité, nous n'avons pas trouvé d'effet significatif d'ERASMUS,  $t(7) = 1.23$ ,  $p = .13$ , probablement en raison d'un effectif faible au regard de la taille d'effet ( $d = 0.46$ ). À l'opposé, pour la condition à forte densité, nous avons trouvés une différence significative, avec des diamètres pupillaires plus grands sans ERASMUS,  $t(7) = 1.99$ ,  $p = .04$ , ( $d = 0.74$ ). Ainsi, nous observons un effet significatif d'ERASMUS seulement lorsque le nombre d'aéronefs est élevé (voir

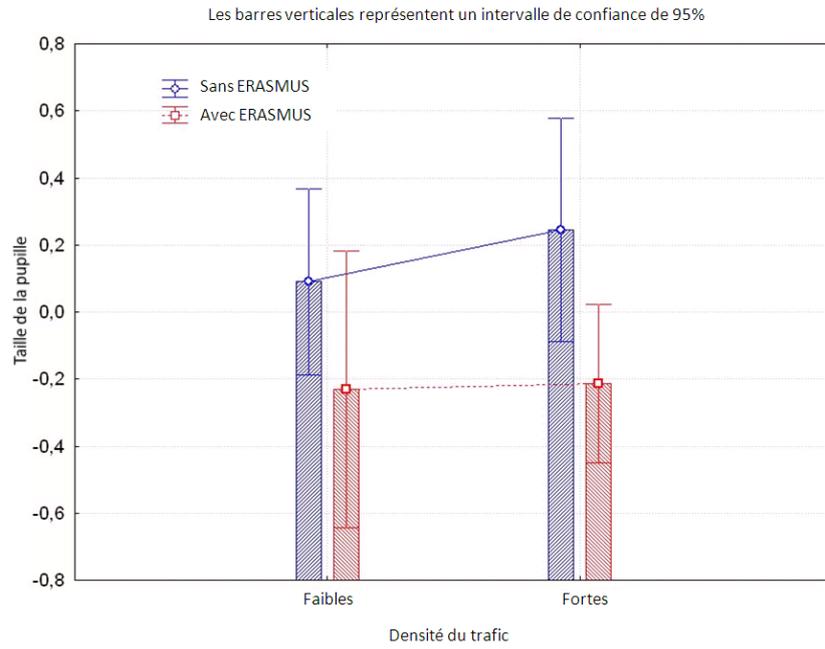


FIGURE 15: Caractéristiques pupillométriques avec et sans ERASMUS en fonction de la densité du trafic

Figure 15).

**Une note générale sur les performances**

Le lecteur pourra trouver utile de savoir que 100% des conflits ont été détectés et résolus.

TABLE 2: Effets d'ERASMUS sur l'activité des mouvements oculaires  
(N = 7)

| <i>Variables</i>                | avec ERASMUS |               | sans ERASMUS |               | Différence | Taille d'effet<br>d de Cohen |
|---------------------------------|--------------|---------------|--------------|---------------|------------|------------------------------|
|                                 | <i>M</i>     | ( <i>SD</i> ) | <i>M</i>     | ( <i>SD</i> ) |            |                              |
| †Temps passé (ms)               | 545.64       | (43.36)       | 560.58       | (49.22)       | -14.94*    | 1.01                         |
| Hétérogénéité                   | 0.90         | (0.02)        | 0.92         | (0.02)        | -0.02**    | 1.87                         |
| Amplitude des saccades (degrés) | 4.84         | (0.33)        | 4.56         | (0.40)        | 0.28**     | 1.81                         |
| ‡Nombre des fixations           | 1410.14      | (193.08)      | 1355.35      | (168.79)      | 54.79      | 0.61                         |
| ‡Durée des fixations (ms)       | 289.78       | (22.44)       | 294.08       | (22.51)       | -4.3       | 0.6                          |

† Temps moyen passé à fixer un aéronef durant une période de 8 secondes.

‡ Fixations sur les aéronefs durant l'ensemble de la séquence de trafic

\* $p < .05$ ; \*\* $p < .01$

TABLE 3: Effets d'ERASMUS sur l'activité pupillaire (N = 7)

|                          | avec ERASMUS |        | sans ERASMUS |        | Différence | Taille d'effet<br>d de Cohen |
|--------------------------|--------------|--------|--------------|--------|------------|------------------------------|
|                          | M            | (SD)   | M            | (SD)   |            |                              |
| <i>Densité du trafic</i> |              |        |              |        |            |                              |
| Faible                   | -0.23        | (0.44) | 0.09         | (0.29) | 0.32       | 0.46                         |
| Forte                    | -0.21        | (0.25) | 0.24         | (0.36) | 0.45*      | 0.74                         |
| Globale                  | -0.19        | (0.29) | 0.19         | (0.31) | 0.38       | 0.63                         |
| † Poids Bêtas            | -0.01        | (0.12) | 0.12         | (0.14) | 0.14**     | 1.23                         |

† Poids bêtas de la densité du trafic sur la taille de la pupille

\*p < .05 ; \*\*p < .01

---

## DISCUSSION

---

Le projet ERASMUS a été développé dans l'objectif d'assister les contrôleurs pour faire face à l'augmentation continue du trafic. L'action d'ERASMUS s'effectue via des légers changements de vitesse sur les aéronefs en amont du secteur surveillé afin d'engendrer à terme un trafic plus fluide et ordonné. Autrement dit, l'objectif est de résoudre certains conflits potentiellement coûteux sans nécessiter une intervention consciente de la part du contrôleur.

Avant la présente étude, les effets d'ERASMUS sur l'activité mentale des contrôleurs avaient seulement été testés en utilisant des mesures subjectives (Drogoul, 2008a, 2008b). Dans cette thèse, nous nous sommes focalisés délibérément sur les mesures objectives de la charge mentale. Pour cela, l'activité oculométrique a été enregistrée durant des sessions de 30 minutes de contrôle aérien.

Les résultats rapportés dans le précédent chapitre montrent un impact positif d'ERASMUS sur l'activité visuelle des contrôleurs : dans un contexte où 100% des conflits ont été détectés, (1) le temps moyen passé à fixer les aéronefs était significativement plus court en présence d'ERASMUS ; (2) l'hétérogénéité, qui reflète les disparités dans la circulation de l'attention visuelle, a été réduit également par ERASMUS ; (3) l'amplitude des saccades a été significativement augmentée par ERASMUS, ce qui, là encore, reflète un balayage de l'écran radar plus réparti et homogène entre les différents éléments de l'interface ; (4) la taille moyenne de la pupille était significativement plus petite avec ERASMUS dans les situations de trafic à forte densité ; et (5) le nombre d'aéronefs n'a engendré des effets significatifs sur les diamètres pupillaires que dans la condition sans ERASMUS.

Nos résultats peuvent apporter des éclaircissements sur les précédentes observations basées sur des mesures subjectives. Ces dernières avaient montré que la charge mentale perçue était plus faible avec ERASMUS.(Drogoul, 2008a, 2008b). En effet, nous avons pu observer de réelles différences dans l'activité des contrôleurs. Elles pourraient être interprétées comme une réduction des efforts mentaux investis pour atteindre un niveau de performance satisfaisant. Développons maintenant plus en détail ce point. Chaque aéronef implique un coût cognitif susceptible de varier fortement en fonction de son implication dans un conflit. Les situations de conflits sont par nature plus coûteuses à gérer pour un contrôleur étant donné qu'elles impliquent le risque inacceptable de ce que le jargon du contrôle aérien nomme « *Airprox*<sup>1</sup> ». Les contrôleurs mettront donc en œuvre toutes les actions nécessaires afin d'éviter l'apparition de ce cas de figure. Tout d'abord, le risque d'occurrence du conflit doit être estimé. Cette phase initiale de diagnostique est susceptible d'engendrer différents niveaux de charge en fonction du nombre et du type de traitement que le contrôleur aura à gérer (Boag et al., 2006; Rantanen & Nunes, 2005; Pompanon & Raufaste, 2010). Ensuite, lorsque deux aéronefs sont considérés comme étant engagés dans un conflit potentiel, les contrôleurs devront également investir une partie de leurs ressources attentionnelles sur divers types d'actions. Ils peuvent décider d'attendre et voir comment la situation évolue. Ils peuvent également entreprendre des calculs complexes afin de diagnostiquer finement si le risque est réel ou non. Ils peuvent également intervenir en donnant des instructions aux pilotes afin de placer l'aéronef dans une configuration plus sûre. Ce dernier type d'action peut être réalisé de manière précoce même si l'existence du conflit n'est pas avérée afin de simplifier la situation et de libérer de précieuses ressources (Bisseret & Girard, 1973; Loft et al., 2009).

Les différentes phases évoquées ici nécessitent toutes du temps pour être effectuées. Or, le temps disponible pour gérer un conflit est par nature limité, il diminue progressivement dès l'entrée dans le secteur de l'un des deux aéronefs impliqués. Ces contraintes temporelles occupent une place centrale dans l'activité des contrôleurs aériens. Selon la plupart des modèles cognitifs, la charge mentale varie en fonction du ratio entre le temps nécessaire et le temps disponible.

---

1. Situations extrêmes dans laquelle la distance entre deux aéronefs est en dessous des seuils de sécurité, i.e. un risque élevé de collision

Autrement dit, la simple gestion d'un conflit peut être source d'une charge importante s'il nécessite de nombreux traitements dans un temps imparti court. Ainsi, une augmentation du nombre de conflits (engendrée statistiquement par une augmentation du nombre d'aéronefs) peut générer des niveaux de charge élevés avec un risque accru en terme de sécurité.

Dans ce contexte, quel pourraient être les effets d'un système comme ERASMUS ? L'algorithme d'ERASMUS fonctionne en ajustant les vitesses des aéronefs de manière dite « subliminale », c'est-à-dire que le contrôleur n'est pas forcément conscient de son action (Averty et al., 2007). Ces ajustements sont calculés de telle manière à ce que les configurations physiques des aéronefs impliquent moins de conflits à terme. Un dispositif comme ERASMUS, conçu afin de réduire le nombre de conflits potentiels, peut ainsi réduire la charge mentale des contrôleurs. Au delà des stricts aspects quantitatifs de la charge mentale, ERASMUS peut potentiellement changer la nature de l'activité mentale des contrôleurs. Les travaux de Sperandio (1971) sont clairs sur ce point, les contrôleurs peuvent adapter leurs stratégies en fonction de l'exigence de la tâche.

Considérons maintenant qu'il existe deux types d'activités, la supervision (ou « monitoring ») et ce que nous pouvons assimiler à de la « réflexion ».

Lors d'une activité de monitoring, le contrôleur passe un minimum de temps sur chaque aéronef. Le contrôleur effectue un balayage de l'environnement en effectuant un effort cognitif relativement faible, ce qui laisse disponible la plupart des ressources attentionnelles pour répondre aux exigences d'autres activités. Plus précisément, la MDT n'est pas « pressurisée ». Le temps disponible pour effectuer les traitements est suffisant et la somme des niveaux d'activation globale reste dans des proportions correctes. Autrement dit, lors d'une activité de monitoring, la distribution de l'attention est répartie également entre les différents éléments de l'interface, l'hétérogénéité est réduite et la charge mentale reste dans des proportions correctes, ce qui se traduit par des diamètres pupillaires globalement constants et de faible taille.

A l'opposé, lors d'une activité de réflexion, le contrôleur se concentrera sur des zones d'intérêt concernées par les conflits potentiels. Il ou elle focalise son attention sur un élément particulier, ce qui

signifie une prise en considération particulière de cet élément, des processus davantage contrôlés, et donc une allocation de ressources et de temps. Dans de tel cas, l'augmentation du nombre d'aéronefs va progressivement limiter les temps disponibles pour les différents traitements. La MDT est davantage « pressurisée » et la somme des activations globales tend vers les limites de la capacité de la MDT. Autrement dit, la distribution de l'attention est davantage focalisée sur les conflits, l'hétérogénéité est plus importante et le niveau de charge mentale est globalement plus important. De plus, à l'instar de l'occupation de la MDT, le niveau de charge augmente cette fois de manière linéaire avec le nombre d'aéronefs.

Maintenant, comment les contrôleurs utilisent les ressources libérées par l'action d'ERASMUS ? Nous pouvons imaginer raisonnablement que l'attention visuelle sera moins captée par certains éléments saillants (tels que les conflits potentiels, les zones d'intersection, etc.) En limitant cette nécessité de se focaliser sur certains points particuliers, ERASMUS devrait changer les proportions relatives initiales de monitoring et de réflexion dans l'activité des contrôleurs. Plus précisément, avec ERASMUS, le monitoring occupera une place plus importante. Autrement dit, nos résultats sont clairement compatibles avec un effet d'ERASMUS interprétable en terme de facilitation du monitoring d'une part, et de la réduction des phases de réflexion d'autre part.

Le même type de raisonnement peut être effectué pour l'amplitude des saccades. Les saccades sont plus longues lors d'une activité de type monitoring et plus courtes lors d'une activité nécessitant davantage de réflexion. Cependant, en ce qui concerne les saccades, nos résultats peuvent être interprétés différemment. Comme nous l'avons noté précédemment, les caractéristiques des saccades suggèrent une activité relativement dispersée et diffuse sur l'ensemble de l'écran. Néanmoins, les saccades ne relient pas seulement les aéronefs, elles peuvent également impliquer des mouvements entre les aéronefs et les « strips<sup>2</sup> ». Par conséquent, il est possible que les contrôleurs investissent davantage de ressources mentales libérées par ERASMUS dans un autre type d'activité basé précisément sur le traitement des « strips ». Toutefois, les deux interprétations sont compatibles. Dans

---

2. Pour rappel, un strip contient le résumé du plan de vol tel qu'il a été déposé par le pilote de l'aéronef.

les deux cas, cela traduit une libération de ressources qui peuvent ainsi être investies sur d'autres activités jugées valables/pertinentes par le contrôleur ; en l'occurrence ici, une activité de planification en amont plus poussée basée sur la prise en compte détaillée des plans de vol (une des informations importantes contenues dans les « strips »).

---

## CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

---

Étant donné les enjeux humains, la problématique de la charge mentale et de sa mesure semble cruciale dans le domaine du contrôle aérien. Elle joue un rôle central dans la conception et la validation des systèmes d'aides qui sont ou seront mis en place pour faire face à l'intensification continue du trafic aérien.

L'objectif général de cette thèse était d'explicitier en détail les effets du système d'aide ERASMUS en fournissant, pour la première fois, une mesure objective en temps réel de la charge mentale chez les contrôleurs aériens avec et sans ERASMUS.

Les systèmes d'aide peuvent représenter un coût cognitif en eux-mêmes et, dans certains cas, le rapport coût/bénéfice n'est pas positif. Dans ce contexte, ERASMUS offre une solution potentielle au problème de l'augmentation de la charge mentale engendrée par l'accroissement du trafic. ERASMUS ne nécessite aucune ressource de la part du contrôleur étant donné qu'il agit de manière subliminale. Aucune caractéristique visible ne sera présente sur l'interface. Ainsi, aucun investissement spécifique de ressource ne peut être attribué à ERASMUS.

Les résultats ont confirmé un effet positif d'ERASMUS sur l'activité des mouvements oculaires. Plus précisément, l'attention accordée par les contrôleurs était moins focalisée sur des avions particuliers quand ERASMUS était actif. Les ressources économisées par ERASMUS ont pu être alors redistribuées plus équitablement sur les autres éléments de la scène visuelle. De plus, l'étude détaillée des diamètres pupillaires a révélé un résultat fort vis à vis de la problématique générale sur la gestion de la forte augmentation du trafic aérien dans les prochaines années. En effet, sans ERASMUS, l'accroissement du

nombre d'aéronefs engendre une augmentation des diamètres pupillaires. A l'opposé, avec ERASMUS, les diamètres pupillaires sont plus faibles et l'accroissement de la densité du trafic n'entraîne pas d'augmentation significative. Par conséquent, selon nos résultats actuels, ERASMUS pourrait constituer un élément de solution efficace pour faire face à la forte augmentation du transport aérien.

## 11.1 LIMITES ET APPORTS GÉNÉRAUX

### 11.1.1 *Limites*

La principale limite de notre l'étude concerne le faible nombre de participants. Il a entraîné un manque de puissance statistique non négligeable. Les analyses statistiques ont révélé que les effets dont la taille n'était pas suffisamment élevée ( $> 0.7$ ) ne pouvaient pas être significatifs avec un si faible nombre de participants.

### 11.1.2 *Apports*

Les résultats obtenus dans cette thèse permettent de valider – au moins en partie – l'apport de l'oculométrie comme outil de mesure objectif, sensible et non intrusif de la charge mentale au sein d'un environnement de simulation de contrôle aérien hautement fidèle. Ils ont été soumis sous forme d'article à la revue internationale de psychologie de l'aviation « International Journal of Aviation Psychology » et les premiers retours sont extrêmement positifs (Paubel, Averty, & Raufaste, soumis). Les résultats concernant les diamètres pupillaires ont également fait l'objet d'un article de recherche complet et d'une communication orale à la conférence internationale « HCI-AERO » (Human Computer Interaction in Aerospace) (Paubel, Averty, & Raufaste, 2010).

Tout d'abord, à l'inverse des mesures subjectives classiques (effectuées post-session), l'utilisation de l'oculométrie permet d'éviter les biais de rappel comme les oublis et les post-rationalisations (deux problèmes majeurs lorsque les sessions expérimentales sont de longue durée). Ensuite, les résultats sur les diamètres pupillaires et sur la distribution de l'attention démontrent que l'oculométrie peut fournir des informations sensibles et en temps réel sur le traitement d'items

particuliers – en l’occurrence, les aéronefs. De plus, contrairement aux mesures objectives de type double tâche, l’oculométrie n’interfère pas avec la tâche principale. Enfin, nous avons démontré qu’il était possible de recueillir des mesures oculométriques précises de manière non intrusive dans des conditions de simulation extrêmement écologiques.

Par ailleurs, l’intégration non intrusive d’un oculomètre au sein d’une plateforme de simulation réaliste ainsi que la mise en place de la gestion des AOI dynamiques de faibles tailles représentent selon nous deux avancées significatives à exploiter lors de futures recherches dans le domaine du contrôle aérien. A notre connaissance, la quasi totalité des études sur le contrôle aérien qui ont eu recours à l’oculométrie utilisaient des dispositifs relativement lourds et intrusifs avec une résolution spatiale moyenne qui ne leur permettait pas d’étudier de manière isolée le traitement d’un aéronef particulier à un moment donné. La possibilité d’étudier finement et de manière non intrusive quand et comment une information particulière est traitée est l’un des principaux atouts de l’oculométrie. A l’heure actuelle, seule l’oculométrie possède cette capacité. En association avec une analyse cognitive fine de l’activité, cette dernière pourrait être déterminante pour concevoir et tester de nouveaux systèmes d’aide dans le domaine du contrôle aérien.

Dans cette optique, il nous semble important de préciser que la plateforme d’enregistrement des mouvements oculaires ainsi que les différents algorithmes de traitements élaborés au cours de cette thèse sont opérationnels et directement réutilisables pour de futures expérimentations au sein des locaux de la DTI/DSNA. Par ailleurs, l’algorithme de gestion des AOI dynamiques que nous avons mis en place dans cette thèse n’est pas spécifique au matériel que nous avons utilisé. Étant donné son importance, il est envisageable de prévoir un développement logiciel afin de le rendre généralisable à l’ensemble des interfaces de simulation de contrôle aérien.

## 11.2 PERSPECTIVES DE RECHERCHES

Selon nous, il serait particulièrement intéressant de développer une réelle modélisation de la charge mentale dans l’architecture ACT-R.

En effet, notre analyse des fondements cognitifs de la charge mentale semble démontrer que l'architecture cognitive proposée par Anderson est la plus pertinente et surtout la plus complète pour rendre compte de la plupart des mécanismes cognitifs à l'oeuvre lors des phénomènes de charge mentale. Elle permet une description fine et en temps réel des opérations réalisées en MDT et elle est vraisemblablement la plus à même de rendre compte de manière détaillée les différents effets liés à l'expertise (cf. synthèse chapitre 4).

Le modèle de [Lebiere \(2005\)](#) a posé des bases prometteuses à exploiter. L'auteur considère d'ailleurs qu'à terme, la charge mentale devrait pouvoir être calculée en temps réel en exploitant l'aspect modulaire de l'architecture ACT-R, à l'image du modèle de [Wickens \(1984\)](#) et des autres fonctions mathématiques du niveau sub-symbolique de l'architecture.

De plus, deux modélisations computationnelles de l'activité de détection de conflit ont récemment vu le jour dans l'architecture ACT-R ([Raufaste, 2006](#); [Pompanon & Raufaste, 2009](#)). La problématique de la charge mentale n'était pas l'objet d'étude de ces recherches. Néanmoins, les deux modèles ont permis de rendre compte des TR obtenus dans l'étude de [Rantanen et Nunes \(2005\)](#) avec des corrélations supérieures à .90. Autrement dit, la somme des durées d'exécution des différents traitements cognitifs simulés en MDT dans ces modèles ACT-R permet de rendre compte des temps de réponse des contrôleurs lors d'une tâche simple de détection de conflit entre deux avions. Par conséquent, si nous reprenons scrupuleusement le postulat de [Rantanen et Nunes \(2005\)](#), – i.e. que les TR sont d'excellents indicateurs de la charge mentale dans une tâche à forte pression temporelle comme le contrôle aérien (cf. paragraphe 4.2.3). Ces modèles ACT-R constituent, à minima, une base prometteuse pour le développement d'une modélisation de la charge mentale propre à la tâche de détection de conflit chez les contrôleurs aériens.

L'oculométrie jouera un rôle crucial dans la réalisation de ce projet.

Tout d'abord, l'élaboration d'un modèle ACT-R doit intégrer la simulation des opérations réalisées au niveau des modules perceptifs, en l'occurrence ici le module visuel étant donné la nature de l'activité du contrôle aérien. Autrement dit, il semble indispensable de posséder des données oculométriques sur l'enchaînement temporel des prises d'informations visuelles afin de modéliser la composante périphérique

sensorielle d'un modèle ACT-R. Sur ce point, la possibilité d'étudier les aéronefs séparément en utilisant la gestion des AOI dynamiques sera déterminante. Cette dernière permettra également d'étudier au cas par cas quelles sont les situations réellement problématiques à gérer pour les contrôleurs aériens. Pour atteindre cette finesse d'étude, les diamètres pupillaires et les parcours oculaires devraient être deux indicateurs particulièrement précieux.

Ensuite, nous avons vu que les différents modèles de la charge s'accordent tous sur l'importance du facteur « temps ». Si le temps « nécessaire » aux processus en MDT tend vers le temps disponible pour réaliser la tâche, alors le niveau de charge mentale augmente. L'oculométrie est probablement le seul outil à l'heure actuelle capable de fournir une approximation du temps passé sur le traitement d'une information particulière à un moment donné. Cette piste de recherche devra toutefois être abordée avec une extrême précaution étant donné que la relation entre le temps de fixation d'un item visuel et le temps de traitement cognitif de cet item n'est pas triviale (Posner, 1980; Rayner, 1998).

Enfin, étant donné que l'architecture ACT-R accorde une importance centrale à la plausibilité neurologique, il serait extrêmement intéressant de coupler un oculomètre avec un dispositif d'enregistrement de données électro-encéphalographiques (Baccino & Manunta, 2005). Cette combinaison des données devrait fournir de précieuses informations sur la localisation cérébrale et les modalités de traitement – notamment d'un point de vue temporel – de certaines informations considérées comme étant coûteuses.

Selon nous, un tel modèle ACT-R de la charge mentale pourrait être appliqué à terme à de nombreuses tâches dans divers environnements écologiques. A l'image du modèle de Wickens (2008), il devrait potentiellement permettre de prédire finement et en temps réel les situations de surcharge. Dans le cadre du contrôle aérien, ce type de prédiction représente en soi un atout non négligeable pour la conception et la validation des futurs systèmes d'aides comme ERASMUS.

# A

---

ANNEXE

---

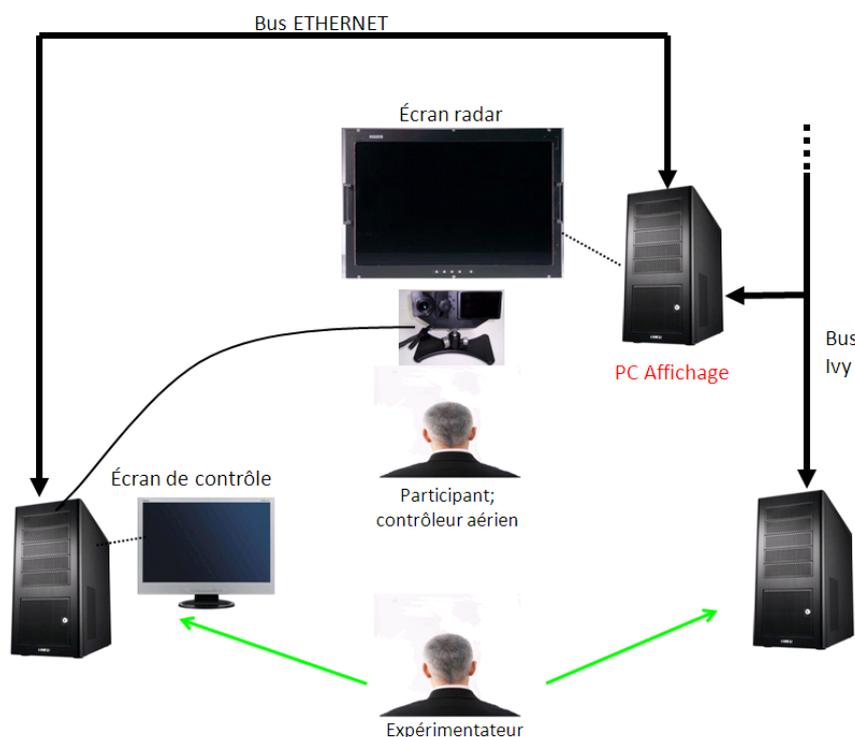


FIGURE 16: Dispositif technique générale.

Trois unités centrales sont nécessaires : le premier PC dit « Hôte » gère l'enregistrement en direct des données issues de l'oculomètre. Il permet à l'expérimentateur d'effectuer les phases de calibration et de contrôle du déroulement de la passation. Il est relié à un deuxième PC dit « Affichage » via une simple carte réseau Ethernet dédiée à cette communication. Ce deuxième PC est responsable de l'affichage de l'image radar (« RadarGL » dans le cas présent) et du contenu de la simulation. Enfin, le PC « Affichage » est relié à un troisième PC dit « Simulateur ». Ce dernier possède une application « Rejeu » qui permet la génération du trafic souhaité pour la simulation. Elle communique avec le PC « Affichage » via le bus logiciel « Ivy ». Le PC « Simulateur » permet également à l'expérimentateur de lancer ou d'arrêter la simulation.

RadarGL, Rejeu et le Bus Ivy sont des produits développés par le pôle PII (cf. le site web <http://pii.tls.cena.fr> pour un complément d'information sur ces différentes applications informatiques).

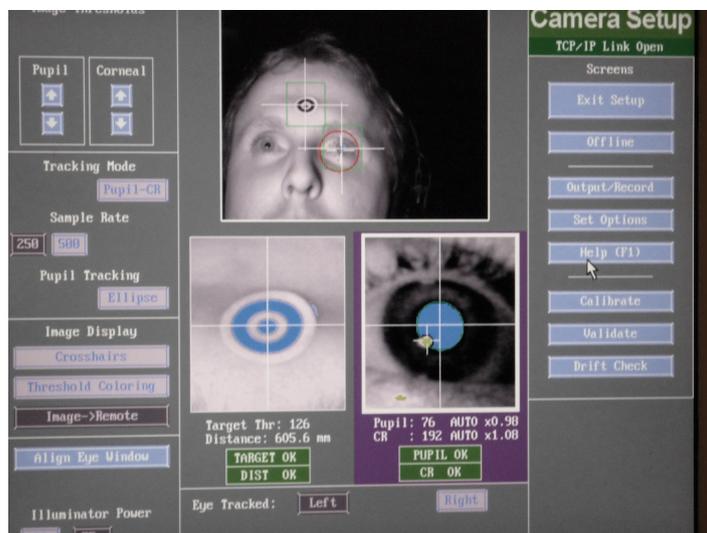


FIGURE 17: Interface nécessaire à la phase de calibration

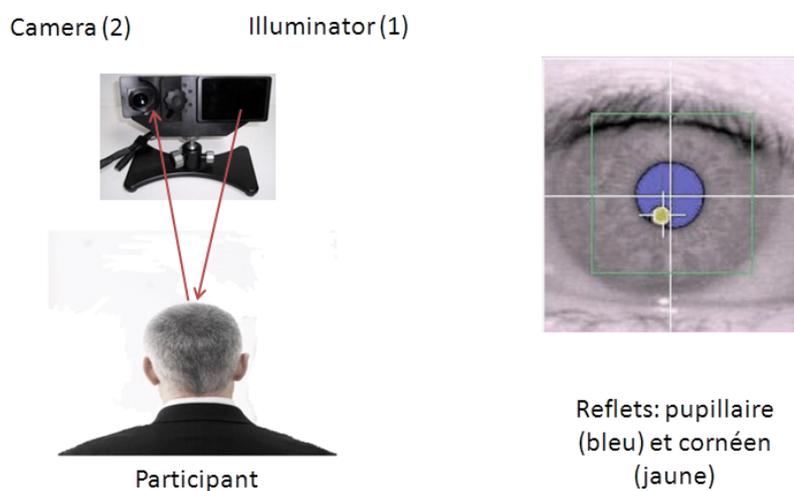


FIGURE 18: Les mécanismes de fonctionnement de l'oculomètre Eye-link

Listing A.1: Traduction de l'algorithme d'appariement entre les fixations et les AOIs dynamiques dans le langage de programmation Visual Basic

```

Sub Algo_AOIs_Dynamiques ()

Application.Calculation = xlCalculationManual
Application.ScreenUpdating = False

'Déclaration des variables
Dim Tf, Xf, Yf As Double
Dim col_Tf, col_Xf, col_Yf, col_IDf As Integer
Dim Te, Te_min, Te_max, Xe_min, Xe_max, Ye_min,
    Ye_max As Double
Dim col_Te, col_Xe_min, col_Xe_max, col_Ye_min,
    col_Ye_max As Integer
Dim IDe As Integer

Dim i, j, Etiquette_ok As Integer

Dim Nom_fic_AOI As String
Dim Nom_fic_FIX As String
Dim Px, Sx As String

'Constantes selon la définition du format de
    sortie des fichiers
col_Tf = 2
col_Xf = 3
col_Yf = 4
col_IDf = 5

col_Te = 2
col_Xe_min = 3
col_Xe_max = 4
col_Ye_min = 5
col_Ye_max = 6

'Boucle participant
For Participant = 1 To 7
Px = "P" & Participant

```

```

'Boucle scénario
For Scenario = 1 To 4
Sx = "T" & Scenario

Nom_fic_FIX = Px & Sx & "FIX.txt"
Nom_fic_AOI = Px & Sx & "AOI.txt"

'Initialisation des variables
i = 0
j = 0
Etiquette_ok = 0

Tf = 0
Xf = 0
Yf = 0

Te = 0
Xe_min = 0
Xe_max = 0
Ye_min = 0
Ye_max = 0
Te_min = 0
Te_max = 0
IDe = 0

'Boucle sur le fichier des fixations
i = 0
Windows(Nom_fic_FIX).Activate

While Cells(i, 1) <> ""

Tf = Cells(i, col_Tf)
Xf = Cells(i, col_Xf)
Yf = Cells(i, col_Yf)

    'Boucle sur le fichier des étiquettes
    j = 0
    Etiquette = 0
    Windows(Nom_fic_AOI).Activate

    While ((Cells(j, 1) <> "") And (Etiquette_ok =
        0))

```

```

Te = Cells(j, col_Xe)
Xe_min = Cells(j, col_Xe_min)
Xe_max = Cells(j, col_Xe_max)
Ye_min = Cells(j, col_Ye_min)
Ye_max = Cells(j, col_Ye_max)

Te_min = Te
Te_max = Te + 8000 ' en milli-seconde

'Vérifie si la fixation correspond à l'
  étiquette
If ((Tf >= Te_min) And (Tf < Te_max)) Then

    If ((Xf >= Ye_min) And (Yf < Ye_max)) Then

        If ((Yf >= Ye_min) And (Yf < Ye_max))
            Then
                'Si oui, récupération du n° ID de l'
                  étiquette
                IDe = Cells(j, col_Ide)

                'et écriture dans le fichier des
                  fixations
                Windows(Nom_fic_FIX). Activate
                Cells(i, col_IDf) = IDe

                'Définition de étiquette_ok à 1 pour
                  sortir du while du fichiers des
                  étiquettes
                Etiquette_ok = 1

                Windows(Nom_fic_AOI). Activate

            End If

        End If

    End If

End If

'Incrément ligne fichier des étiquettes
j = j + 1

```

```
Wend

'Incrément ligne fichier des fixations
i = i + 1
Wend

Next Scenario
Next Participant

'Message de confirmation final
MsgBox ("Appariement Effectué")

Application.ScreenUpdating = True
Application.Calculation = xlCalculationAutomatic

End Sub
```

---

## RÉFÉRENCES

---

- Ahlstrom, U., & Friedman-Berg, F. J. (2006). Using eye movement activity as a correlate of cognitive workload. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 36, 623–636. (Cité pages 61, 65, et 66.)
- Anderson, J. R. (1983). *The architecture of cognition*. Cambridge, MA : Harvard University Press. (Cité pages 31 et 47.)
- Anderson, J. R. (1992). Automaticity and the act\* theory. *American Journal of Psychology*, 105, 165–180. (Cité page 47.)
- Anderson, J. R. (2007). *How can the human mind occur in the physical universe ?* New York, NY : Oxford University Press. (Cité page 31.)
- Anderson, J. R., Bothell, D., Byrne, M. D., Douglass, S., Lebiere, C., & Qin, Y. L. (2004). An integrated theory of the mind. *Psychological Review*, 111, 1036–1060. (Cité page 31.)
- Anderson, J. R., & Lebiere, C. (1998). *The atomic components of thought*. Mahwah, NJ : LEA. (Cité pages 31, 34, 40, 42, 43, 45, 47, 50, 51, 55, et 57.)
- Arad, B. A. (1964 May). The controller load and sector design. *Journal of Air Traffic Control*. (Cité page 15.)
- Athènes, S., Averty, P., Puechmorel, S., Delahaye, D., & Collet, C. (2002). Complexity and controller workload : Trying to bridge the gap. In *Proceedings of the 2002 international conference on human-computer interaction in aeronautics (HCI-Aero 2002)*. Cambridge, MA, USA : Massachusetts Institute of Technology. (Cité page 64.)
- Averty, P. (1998). *Les effets de la charge de trafic sur le niveau d'activation psychophysiological du contrôleur aérien*. Thèse de doctorat non publiée, Université Lumière Lyon II, Lyon. (Cité pages 9 et 48.)
- Averty, P., Athènes, S., Collet, C., & Dittmar, A. (2002). Evaluating a new index of mental workload in real ATC situation using psychophysiological measures. In *Proceedings of the 21st digital avionics systems conference, 7A4* (Vol. 2, pp. 1–13). Irvine, CA : IEEE Press. (Cité pages 62 et 63.)

- Averty, P., Collet, C., Dittmar, A., Vernet-Maury, E., & Athènes, S. (2004). Mental workload in air traffic control : An index constructed from field tests. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 75, 333–341. (Cité page 76.)
- Averty, P., Johansson, B., & Wise, J. (2007 July). *Could ERASMUS speed adjustments be identifiable by air traffic controllers ?* Paper presented at the 7th R&D ATM Seminar, Barcelona, Spain. (Cité pages 73 et 100.)
- Ayres, P., & Gog, T. van. (2009 mars). State of the art research into cognitive load theory. *Computers in Human Behavior*, 25(2), 253–257. (Cité page 53.)
- Baccino, T., & Manunta, Y. (2005). Eye-fixation-related potentials : Insight into parafoveal processing. *The Journal of Psychophysiology*, 19(3), 204–215. (Cité page 107.)
- Baddeley, A. D. (1986). *Working memory*. Oxford : Clarendon Press. (Cité pages 25 et 34.)
- Baddeley, A. D., & Hitch, G. (1974). Working memory. In G. A. Bower (Ed.), *Recent advances in learning and motivation*. (Vol. 8, pp. 47–90). New York : Academic Press. (Cité page 30.)
- Barrouillet, P. (1996). Ressources, capacités cognitives et mémoire de travail : Postulats, métaphores et modèles. *Psychologie Française*, 41, 319–338. (Cité pages 23 et 34.)
- Barrouillet, P., Bernardin, S., & Camos, V. (2004 mars). Time constraints and resource sharing in adults' working memory spans. *Journal of Experimental Psychology. General*, 133(1), 83–100. (Cité pages 41, 42, 43, et 44.)
- Bisseret, A. (1970). Mémoire opérationnelle et structure de travail. *Bulletin de Psychologie*, 24(5-6), 280–294. (Cité pages 35, 36, et 43.)
- Bisseret, A. (1995). *Représentation et décision experte. psychologie cognitive de la décision chez les aiguilleurs du ciel*. Toulouse : Octares Editions. (Cité pages 38 et 52.)
- Bisseret, A., & Girard, Y. (1973). *Le traitement des informations par le contrôleur du trafic aérien ; rapport*. (No. C0. R37). Toulouse : I.R.I.A./C.E.N.A. (Cité pages 9, 51, et 99.)
- Boag, C., Neal, A., Loft, S., & Halford, G. (2006). An analysis of relational complexity in an air traffic control conflict detection task. *Ergonomics*, 49, 1508–1526. (Cité pages 2, 15, 16, 17, 19, 20, 25, 64, 75, et 99.)

- Broadbent, D. E. (1958). *Perception and communication*. London : Pergamon. (Cité pages 23, 31, et 62.)
- Brookings, J. B., Wilson, G. F., & Swain, C. R. (1996 février). Psychophysiological responses to changes in workload during simulated air traffic control. *Biological Psychology*, 42, 361–377. (Cité pages 62 et 63.)
- Buser, P., & Imbert, M. (1993). *Neurophysiologie fonctionnelle tome i : Mécanismes fondamentaux et centres nerveux*. Paris : Hermann. (Cité page 29.)
- Cabon, P., Farbos, B., & Mollard, R. (2000). *Gaze analysis and psychophysiological parameters : A tool for the design and the evaluation of man-machine interfaces* (Rapport technique N° 2000-015). Bretigny, France : EUROCONTROL Experimental Center. (Cité pages 24, 62, 63, et 66.)
- Cegarra, J., & Chevalier, A. (2008 novembre). The use of tholos software for combining measures of mental workload : Toward theoretical and methodological improvements. *Behaviour Research Methods*, 40, 988–1000. (Cité pages 61 et 76.)
- Cellier, J.-M., De Keyser, V., & Valot, C. (1996). *La gestion du temps dans les environnements dynamiques*. Paris : PUF. (Cité page 9.)
- Chanquoy, L., Tricot, A., & Sweller, J. (2007). *La charge cognitive : théories et applications*. Paris : Armand Collin. (Cité pages 2, 22, 24, 26, 30, 53, et 55.)
- Chatterji, G. B., & Sridhar, B. (2001). Measures for air traffic controller workload prediction. In *Proceedings of the 1st aiaa aircraft, technology, integration, and operations forum*. Reston, VA : American Institute of Aeronautics and Astronautics. (Cité pages 16 et 17.)
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. (2d ed.) Hillsdale, NJ : Lawrence Erlbaum. (Cité page 91.)
- Cowan, N. (1988 septembre). Evolving conceptions of memory storage, selective attention, and their mutual constraints within the human information-processing system. *Psychological Bulletin*, 104(2), 163–191. (Cité page 30.)
- Crawford, J. D., Burdett, D. W., & Capron, W. R. (1993). *Techniques used for the analysis of oculometer eye-scanning data obtained from an air traffic control display* (N° NASA-CR-

- 191559). Hampton, VA : NASA, Langley Research Center. (Cité page 83.)
- Drogoul, F. (2008a). *ERASMUS Baseline Scenario - First Dynamic Assessment of the ERASMUS Concept* (Rapport technique N° 2008-010). Bretigny, France : EUROCONTROL Experimental Center. (Cité pages 98 et 99.)
- Drogoul, F. (2008b). *ERASMUS Baseline Scenario - Second Experiment of the Performance Assessment : Refinement of the Initial Findings* (Rapport technique N° 2008-013). Bretigny, France : EUROCONTROL Experimental Center. (Cité pages 3, 76, 98, et 99.)
- Eggleston, R. G., Young, M. J., & McCreight, K. L. (2000). Distributed cognition : A new type of human performance model. In *Proceedings of the aiaa fall symposium series technical reports*. North Falmouth, Massachusetts : American Institute of Aeronautics and Astronautics. (Cité page 41.)
- Ehrmanntraut, R. (2004). The potential of speed control. In *Proceedings of the 23rd Digital Avionics Systems Conference*. Salt Lake City, Utah. (Cité page 71.)
- Enard, C. (1975). *Le degré de certitude dans l'estimation de séparation entre deux avions convergeants*. (No. C.0. R44). Toulouse : I.R.I.A./C.E.N.A. (Cité pages 17 et 48.)
- Endsley, M. R., & Rodgers, M. D. (1998). Distribution of attention, situation awareness, and workload in a passive air traffic control task : Implications for operational errors and automation. *Air Traffic Control Quarterly*, 6, 21–44. (Cité pages 24 et 66.)
- Ericsson, K. A. (1996). The acquisition of expert performance : An introduction to some of the issues. In (p. 369). Lawrence Erlbaum Associates. (Cité page 48.)
- Ericsson, K. A., & Kintsch, W. (1995). Long-term working memory. *Psychological Review*, 102, 211–245. (Cité page 45.)
- Evans, J. S. B. T. (2003 octobre). In two minds : dual-process accounts of reasoning. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(10), 454–459. (Cité page 47.)
- Fraisse, P. (1957). La période réfractaire psychologique. *L'année psychologique*, 57(2), 315–328. (Cité pages 33 et 34.)
- Galster, S. M., Duley, J. A., Masalonis, A. J., & Parasuraman, R. (2001). Air traffic controller performance and workload under mature free flight : Conflict detection and resolution of

- aircraft Self-Separation. *The International Journal of Aviation Psychology*, 11, 71. (Cité pages 62 et 69.)
- Garcia, J. L. (2007). *ERASMUS : En route air traffic soft management ultimate system* (Rapport technique N° 2007-05). Toulouse, France : DGAC/DSNA/DTI. (Cité pages 2, 69, et 70.)
- Gent, R. v., Hoekstra, J. M., & Ruigrok, R. C. J. (1997). Free flight with airborne separation assurance. In *Proceedings of the confederation of european aerospace societies (CEAS) 10th european aerospace conference*. Amsterdam, The Netherlands. (Cité page 69.)
- Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). Development of nasa-tlx (task load index) : Results of empirical and theoretical research. In P. A. Hancock & N. Meshkati (Eds.), *Human mental workload* (pp. 139–184). Elsevier Science Publishers : North-Holland. (Cité page 60.)
- Hasegawa, M., Carpenter, P. A., & Just, M. A. (2002). An fmri study of bilingual sentence comprehension and workload. *NeuroImage*, 15, 647–660. (Cité page 63.)
- Hess, E. H. (1965). Attitude and pupil size. *Scientific American*, 212(4), 46–&. (Cité page 66.)
- Hillburn, B. (2004). *Cognitive complexity in air traffic control : A literature review* (Rapport technique N° 2004-007). Bretigny, France : EUROCONTROL Experimental Center. (Cité pages 2, 15, 16, 30, et 52.)
- International Civil Aviation Organization. (2007). *Outlook for air transport to the year 2025*. (Cité pages 1 et 83.)
- James, W. (1890). Attention. In G. Holt (Ed.), *The principles of psychology* (Vol. 1, pp. 403–104). New York : Academic Press. (Cité page 22.)
- Just, M. A., & Carpenter, P. A. (1992). A capacity theory of comprehension : Individual differences in working memory. *Psychological Review*, 99, 122–149. (Cité page 25.)
- Just, M. A., & Carpenter, P. A. (1993). The intensity dimension of thought : Pupillometric indices of sentence processing. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 47, 310–339. (Cité page 66.)
- Kahneman, D. (1973). *Attention and effort*. Englewood Cliffs, NJ : Prentice-Hall. (Cité page 25.)

- Kahneman, D., & Beatty, J. (1966). Pupil diameter and load on memory. *Science*, *154*, 1583–1585. (Cité page 66.)
- Klingner, J., Kumar, R., & Hanrahan, P. (2008). Measuring the Task-Evoked pupillary response with a remote eye tracker. In *Proceedings of the 2008 symposium on eye tracking research & applications* (pp. 69–72). Savannah, Georgia. (Cité page 66.)
- Kopardekar, P., & Magyarits, S. (2003 June). *Measurement and prediction of dynamic density*. Paper presented at the 5th R&D ATM Seminar, Budapest, Hungary. (Cité page 64.)
- Laird, J. E., Newell, A., & Rosenbloom, P. S. (1987). Soar : An architecture for general intelligence. *Artificial Intelligence*, *33*(1), 1–64. (Cité page 41.)
- Lamoureux, T. (1999). The influence of aircraft proximity data on the subjective mental workload of controllers on the air traffic control task. *Ergonomics*, *42*, 1482–1491. (Cité page 19.)
- Laudeman, I., Shelden, S., Branstrom, R., & Brasil, C. (1998). *Dynamic density : An air traffic management metric* (N° NASA-TM-1998–112226). Moffett Field, CA : NASA Ames Research Center. (Cité pages 16 et 63.)
- Lebiere, C. (2005). Constrained functionality : Application of the act-r cognitive architecture to the ambr modeling comparison. In K. A. Gluck & R. W. Pew (Eds.), *Modeling human behavior with integrated cognitive architectures* (pp. 63–112). Mahwah, NJ : Erlbaum. (Cité pages 40, 41, 43, 44, et 106.)
- Leiden, K. J., Koperdekar, P., & Green, S. (2003 November). *Controller workload analysis methodology to predict increases in airspace capacity*. Paper presented at the AIAA’s 3rd Annual Aviation Technology, Integration, and Operations Technical Forum, Denver, CO. (Cité page 2.)
- Leplat, J., & Bisseret, A. (1966). Analysis of the processes involved in the treatment of information by the air traffic controller. *Controller*, *1*, 13–22. (Cité pages 17, 20, 38, et 84.)
- Loft, S., Bolland, S., Humphreys, M. S., & Neal, A. (2009). A theory and model of conflict detection in air traffic control : Incorporating environmental constraints. *Journal of Experimental Psychology : Applied*, *15*(2), 106–124. (Cité pages 7 et 99.)
- Loft, S., Sanderson, P., Neal, A., & Mooij, M. (2007). Modeling and predicting mental workload in en route air traffic control : Critical review and broader implications. *Human Factors*, *49*,

- 376–399. (Cité pages 17, 38, et 52.)
- Lovett, M. C., & Anderson, J. R. (1996). History of success and current context in problem solving : Combined influences on operator selection. *Cognitive Psychology*, 31, 168–217. (Cité page 51.)
- Lovett, M. C., Reder, L. M., & Lebiere, C. (1999). Modeling working memory in a unified architecture : An ACT-R perspective. In A. Miyake & P. Shah (Eds.), *Models of working memory* (pp. 135–152). Cambridge, MA : Cambridge. (Cité page 35.)
- Mandran, N., Meillon, B., Mille, P., & Roux, C. (2007 11-13 septembre). *Méthodologie d'analyse d'une activité complexe : le cas du contrôle aérien*. Nantes, France : Congrès EPIQUE 2007. (Cité page 84.)
- Manning, C., Mills, S., Fox, C., & Pfeiderer, E. (2001). *Investigating the validity of performance and objective workload evaluation research (POWER)* (N° DOT/FAA/AM-01/10). Washington, DC : FAA Office of Aviation Medicine. (Cité pages 61 et 62.)
- Manning, C., Mills, S., Fox, C., Pfeiderer, E., & Mogilka, H. (2002). The relationship between air traffic control communication events and measures of controller taskload and workload. *Air Traffic Control Quarterly*, 10, 69–83. (Cité page 62.)
- Metzger, U., & Parasuraman, R. (1999). Free flight and the air traffic controller : Active control versus passive monitoring. *Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting Proceedings*, 43, 1–5(5). (Cité pages 62 et 69.)
- Metzger, U., & Parasuraman, R. (2005). Automation in air traffic management : effects of decision aid reliability on controller performance and mental workload. *Human Factors*, 47(1), 35–49. (Cité page 26.)
- Metzger, U., & Parasuraman, R. (2006). Effects of automated conflict cuing and traffic density on air traffic controller performance and visual attention in a datalink environment. *International Journal of Aviation Psychology*, 16, 343–362. (Cité page 71.)
- Mogford, R. H., Guttman, J., Morrow, S. L., & Kopardekar, P. (1995). *The complexity construct in Air Traffic Control : A Review and Synthesis of the Literature* (Rapport technique N° DOT/FAA/CT-TN95/22). Atlantic City, NJ : FAA William Hughes Technical Center. (Cité page 16.)

- Niessen, C., & Eyferth, K. (2001). A model of the air traffic controller's picture. *Safety Science*, 37, 187–202. (Cité page 36.)
- Norman, D. A. (1990). The 'problem' of automation : Inappropriate feedback and interaction, not 'over-automation. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B*, 327, 585–593. (Cité pages 3, 71, et 76.)
- Parasuraman, R. (2000). Designing automation for human use : empirical studies and quantitative models. *Ergonomics*, 43(7), 931–951. (Cité page 29.)
- Paubel, P.-V., Averty, P., & Raufaste, E. (2010). Evaluation of an automated conflict solver, erasmus, using pupillometric measures. In *Proceeding of the conference human-computer interaction in aeronautics*. HCI-AERO'2010, Cap Canaveral, Florida. (Cité page 104.)
- Paubel, P.-V., Averty, P., & Raufaste, E. (soumis). Effects of an automated conflict solver-erasmus-on the visual activity of air traffic controllers. *International Journal of Aviation Psychology*. (Cité page 104.)
- Pawlak, W., Brinton, C., Crouch, K., & Lancaster, K. (1996). *A framework for the evaluation of air traffic control complexity*. Presented at the AIAAGuidance, Navigation and Control Conference, San Diego, CA. (Cité page 18.)
- Pompanon, C., & Raufaste, E. (2009). The Intervention Trigger Model : Computational Modelling of Air Traffic Control. In *Cogsci*. Amsterdam, NL. (Cité page 106.)
- Pompanon, C., & Raufaste, E. (2010). Making detection conflict judgments versus intervention judgments in air traffic control : Eye tracking data and a computational model. X. (Cité page 99.)
- Porter, G., Troscianko, T., & Gilchrist, I. (2007 février). Effort during visual search and counting : Insights from pupillometry. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 60(2), 211–229. (Cité page 66.)
- Posner, M. I. (1980). Orienting of attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 32(1), 3. (Cité page 107.)
- Posner, M. I., & Petersen, S. E. (1990). The attention system of the human brain. *Annual Review of Neuroscience*, 13, 25–42. (Cité page 30.)
- Rantanen, E. M., & Levinthal, B. (2005). Time-based modelling of human performance. In *Proceedings of the human factors*

- and ergonomics society 49th annual meeting* (pp. 1200–1204). Santa Monica, CA : Human Factors and Ergonomics Society. (Cité pages 18 et 19.)
- Rantanen, E. M., & Nunes, A. (2005). Hierarchical conflict detection in air traffic control. *International Journal of Aviation Psychology*, 15, 339–362. (Cité pages 38, 40, 44, 48, 99, et 106.)
- Raufaste, E. (2001). *Les mécanismes cognitifs du diagnostic médical : optimisation et expertise*. Paris : PUF. (Cité page 52.)
- Raufaste, E. (2006). ATC in ACT-R : A model of conflict detection between planes. In F. Reuzeau, K. Corker, & G. Boy (Eds.), *Proceedings of the international conference on human-computer interaction in aeronautics HCI-Aero'06 (Seattle, USA)* (pp. 258–259). Toulouse, France : Cepadues Editions. (Cité page 106.)
- Rayner, K. (1998). Eye movements in reading and information processing : 20 years of research. *Psychological Bulletin*, 124(3), 372–422. (Cité page 107.)
- Redding, R. E. (1992). Analysis of operational errors and workload in air traffic control. *Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting Proceedings*, 36, 1321–1325. (Cité page 30.)
- Reid, G. B., Nygren, T. E., Hancock, P. A., & Meshkati, N. (1988). The subjective workload assessment technique : A scaling procedure for measuring mental workload. In *Human mental workload* (Vol. Volume 52, pp. 185–218). North-Holland. (Cité page 61.)
- Remington, R. W., Johnston, J. C., Ruthruff, E., Gold, M., & Romera, M. (2000). Visual search in complex displays : Factors affecting conflict detection by air traffic controllers. *Human Factors*, 42, 349–366. (Cité page 18.)
- Rosen, V. M., & Engle, R. W. (1997). The role of working memory capacity in retrieval. *Journal of Experimental Psychology. General*, 126(3), 211–227. (Cité page 42.)
- Rosenblatt, F. (1958 novembre). The perceptron : a probabilistic model for information storage and organization in the brain. *Psychological Review*, 65(6), 386–408. (Cité page 33.)
- Sarter, N. B. (2000). The need for multisensory interfaces in support of effective attention allocation in highly dynamic Event-Driven domains : The case of cockpit automation. *The International Journal of Aviation Psychology*, 10, 231. (Cité pages 3, 29, 71, et 76.)

- Schneider, W., & Shiffrin, R. M. (1977). Controlled and automatic human information processing : 1. detection, search, and attention. *Psychological Review*, *84*, 1–66. (Cité page 46.)
- Seamster, T. L., Redding, R. E., Cannon, J. R., Ryder, J. M., & Purcell, J. A. (1993). Cognitive task analysis of expertise in air traffic control. *International Journal of Aviation Psychology*, *3*, 257–283. (Cité page 52.)
- Sklar, A. E., & Sarter, N. B. (1999). Good vibrations : Tactile feedback in support of attention allocation and Human-Automation coordination in Event-Driven domains. *Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *41*(4), 543–552. (Cité page 29.)
- Sperandio, J.-C. (1969). *Analyse des communications air-sol en contrôle d'approche ; rapport*. (No. C0. 6909-R21). Toulouse : I.R.I.A./C.E.N.A. (Cité page 51.)
- Sperandio, J.-C. (1971). Variation of operator's strategies and regulating effects on workload. *Ergonomics*, *14*, 571–577. (Cité pages 49, 50, 51, 64, et 100.)
- Sperandio, J.-C. (1978). The regulation of working methods as a function of workload among air traffic controllers. *Ergonomics*, *21*, 195–202. (Cité page 49.)
- Sperandio, J.-C. (1980). *La psychologie en ergonomie*. Paris : PUF. (Cité page 2.)
- Stankovic, S., Raufaste, E., & Averty, P. (2008). Determinants of conflict detection : A model of risk judgments in air traffic control. *Human Factors*, *50*, 121–134. (Cité page 49.)
- Stein, E. S. (1985). *Air traffic controller workload : an examination of workload probe* (Rapport technique N° DOT/FAA/CT-TN84/24). Atlantic City, NJ : FAA William Hughes Technical Center. (Cité page 61.)
- Stein, E. S. (1992). *Air traffic control visual scanning* (Rapport technique N° DOT/FAA/CT-TN92/16). Atlantic City, NJ : FAA William Hughes Technical Center. (Cité pages 65 et 67.)
- Stein, E. S. (1998). Human operator workload in air traffic control. In M. W. Smolensky & E. S. Stein (Eds.), *Human factors in air traffic control* (pp. 155–183). San Diego, CA : Academic Press. (Cité pages 2 et 15.)
- Sweller, J. (1988 avril). Cognitive load during problem solving : Effects on learning. *Cognitive Science*, *12*(2), 257–285. (Cité

- page 53.)
- Taatgen, N. A., & Lee, F. J. (2003). Production compilation : A simple mechanism to model complex skill acquisition. *Human Factors*, 45(1), 61–76. (Cité page 47.)
- Togami, H. (1984). Affects on visual search performance of individual differences in fixation time and number of fixations. *Ergonomics*, 27, 789–799. (Cité page 65.)
- Tole, J. R., Stephens, A. T., Harris, R. L., & Ephrath, A. R. (1982). Visual scanning behavior and mental workload in aircraft pilots. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 53, 54–61. (Cité page 66.)
- Van Ooyen, A., Van Pelt, J., & Corner, M. A. (1995). Implications of activity dependent neurite outgrowth for neuronal morphology and network development. *Journal of Theoretical Biology*, 172(1), 63–82. (Cité page 48.)
- Veltman, J. A., & Gaillard, A. W. K. (1998). Physiological workload reactions to increasing levels of task difficulty. *Ergonomics*, 41, 656–669. (Cité page 65.)
- Villiers, J. (2004). *Automatisation du contrôle de la circulation aérienne, "ERASMUS", une voie conviviale pour franchir le "mur de la capacité"*. Paris : Institut du Transport Aérien. (Cité pages 2, 3, 69, 71, 73, et 76.)
- Vogt, J., Hagemann, T., & Kastner, M. (2006). The impact of workload on heart rate and blood pressure in en-route and tower air traffic control. *The Journal of Psychophysiology*, 20, 297–314. (Cité page 63.)
- Welford, A. T. (1952). The "psychological refractory period" and the timing of high speed performance – a review and a theory. *British Journal of Psychology*, 43, 2–19. (Cité page 34.)
- Wickens, C. D. (1984). Processing resources in attention. In R. Parasuram (Ed.), *Varieties of attention* (pp. 63–101). New York : Academic Press. (Cité pages 25, 26, 28, 35, 43, 62, 71, et 106.)
- Wickens, C. D. (1992). *Engineering psychology and human performance*. New York : Harper Collins. (Cité pages 2, 15, et 41.)
- Wickens, C. D. (2002 avril). Multiple resources and performance prediction. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 3(2), 159–177. (Cité pages 26 et 57.)
- Wickens, C. D. (2008 juin). Multiple resources and mental workload. *Human Factors*, 50(3), 449–455. (Cité pages 26, 28, 29, et 107.)

- Willems, B., Allen, R. C., & Stein, E. S. (1999b). *Air traffic control specialist visual scanning II : Task load, visual noise, and intrusions into controlled airspace* (Rapport technique N° DOT/FAA/CT-TN99/23). Atlantic City, NJ : FAA William Hughes Technical Center. (Cité pages 24, 65, 66, et 68.)
- Willems, B., & Truitt, T. R. (1999a). *Implications of reduced involvement in en route air traffic control* (Rapport technique N° DOT/FAA/CT-TN99/22). Atlantic City, NJ : FAA William Hughes Technical Center. (Cité pages 65, 66, et 83.)
- Zachary, W. W., Ryder, J. M., & Hicinbothom, J. H. (1998). Cognitive task analysis and modeling of decision making in complex environments. In J. Cannon-Bowers & E. Salas (Eds.), *Making decisions under stress* (pp. 1–43). American Psychological Association. (Cité page 41.)