



HAL
open science

La gestion de la charge mentale des contrôleurs aériens en-route : apports de l'eye-tracking dans le cadre du projet européen SESAR

Caroline Martin

► To cite this version:

Caroline Martin. La gestion de la charge mentale des contrôleurs aériens en-route : apports de l'eye-tracking dans le cadre du projet européen SESAR. Psychologie. Université Toulouse le Mirail - Toulouse II, 2013. Français. NNT : 2013TOU20055 . tel-00921212

HAL Id: tel-00921212

<https://theses.hal.science/tel-00921212>

Submitted on 20 Dec 2013

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 :

Université Toulouse 2 Le Mirail (UT2 Le Mirail)

Présentée et soutenue par :

Caroline Martin

Le Vendredi 06 Septembre 2013

Titre :

La gestion de la charge mentale des contrôleurs aériens En-Route :
Apports de l'eye-tracking dans le cadre du projet européen SESAR

ED CLESCO : Ergonomie

Unité de recherche :

CLLE-LTC

Directeur(s) de Thèse :

Marie-Françoise Valax,
Julien Cegarra

Rapporteurs :

Christine Chauvin,
Sébastien Tremblay

Autre(s) membre(s) du jury :

Philippe Averty,
Eric Blond,
Frédéric Dehais

Martin, C. (2013). La gestion de la charge mentale des contrôleurs aériens En-Route : Apports de l'eye-tracking dans le cadre du projet Européen SESAR. *Thèse de Doctorat en Ergonomie Cognitive*, Université de Toulouse 2, le Mirail.

Résumé

Les contrôleurs du trafic aérien ou « aigilleurs du ciel », dont l'activité consiste à assurer la sécurité de l'écoulement du trafic aérien, vont bientôt être confrontés à une évolution sans précédent de leur activité de travail. Pour pallier à une évolution de contexte, associée principalement à une augmentation significative du niveau de trafic aérien, la construction d'un nouvel environnement de contrôle induisant l'introduction de nouvelles technologies et de l'automatisation partielle de la tâche de contrôle est visée. Ces perspectives, qui ont pour objectif de diminuer les sollicitations des contrôleurs aériens, afin d'augmenter le seuil capacitaire de gestion du trafic aérien, suscitent l'interrogation. Notamment, comment assurer la validation de ces évolutions en vue des objectifs visés ?

Ce doctorat porte sur l'étude de la charge mentale de contrôleurs aériens dans différents contextes, afin d'évaluer les effets engendrés par de telles modifications apportées à leur environnement de travail quotidien. L'évaluation proposée repose sur une approche multidimensionnelle centrée sur l'analyse de paramètres oculaires enregistrés grâce à une technique d'*eye-tracking* dans des situations de contrôle écologiquement valides, en référence à la tâche de contrôle du trafic aérien.

La première étude a tout d'abord permis de caractériser la gestion de la charge mentale effectuée par les contrôleurs aériens au cours de leur activité dans une situation nominale (reflétant la situation de contrôle du trafic aérien actuelle). La deuxième étude porte sur les effets générés par l'introduction de nouveaux systèmes informatisés d'aide à la décision induisant une automatisation partielle de la tâche de contrôle. Enfin, la dernière étude souligne l'effet du niveau de formation sur les modes de gestion des ressources cognitives employés par les contrôleurs aériens.

Mots-clés : *Contrôle aérien En-Route, Charge mentale de travail, Eye-tracking, Pupillométrie, IHM, Apprentissage*

Abstract

The air traffic controllers, whose job is to ensure the safety of air traffic flow, will soon be faced to an unprecedented change in their work activity. To compensate a change of context, mainly associated with a significant increase of the air traffic density, the elaboration of a new air traffic control environment is considered. In particular, the introduction of new technologies (all electronic devices) causing the partial automation of the control task, has been defined as prospects for the En-Route air traffic control work position. These perspectives aim at reducing the air traffic controllers' requirements in order to increase the capability threshold of air traffic management associated with air traffic control service rendered. Such a change may however query. Indeed, how to ensure the validation of these developments to the objectives?

This research aims to study the air traffic controllers' mental workload in different contexts. The objective of this approach is to assess the effects caused by such changes in the air traffic controllers' daily work environment. The proposed assessment is based on a multidimensional approach mainly focused on the analysis of ocular parameters recorded through an eye-tracking technique in air traffic control situations ecologically valid with reference to the features of air traffic control task.

The results deduced from the empirical work of this research were first used to characterize the management of mental workload carried by air traffic controllers during their activity in the nominal situation (reflecting the current air traffic control situation). The results obtained through this research also focused on the effects generated by the introduction of new computerized systems inducing a partial automation of the control task, and those induced by the level of training dedicated to the use of such systems on the management methods of cognitive resources employed by air traffic controllers.

Keywords: *En-Route Air Traffic Control, Mental Workload, Eye-Tracking, Pupil Dilation, HMI, Learning*

Remerciements

Au terme de ces trois années de thèse, je crois pouvoir dire que j'ai été gâtée comme peu de doctorants le sont. Gâtée quant à la richesse du thème de recherche étudié, le domaine d'étude, mais aussi de par les rencontres et les collaborations que j'ai eu l'opportunité de faire. J'aimerais donc remercier toutes ces personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet très riche, tant sur un plan professionnel que personnel.

Ces remerciements sont notamment destinés à :

- ❖ *Philippe Averty, l'initiateur de ce projet. Sans toi rien n'aurait pu être entrepris... Merci pour la « mise en selle » à la DTI, avec toutes les connaissances et les contacts que tu as mis à ma portée. J'espère que tu ne seras pas trop déçu de ce qui en a été fait.*
- ❖ *Julien Cegarra, co-encadrant de thèse, et collaborateur à part entière. Votre investissement dans ce travail, malgré votre agenda toujours rempli à 150%, est vraiment considérable et rare de la part d'un encadrant, merci infiniment.*
- ❖ *Marie-Françoise Valax, directrice de thèse. Nos échanges ont été peu nombreux mais toujours plus stimulants les uns que les autres. J'en ai beaucoup appris et pour ça je voudrais vous exprimer toute ma reconnaissance.*
- ❖ *La DGAC/DTI, Direction Générale de l'Aviation Civile/Direction de la Technique et de l'Innovation, pour avoir soutenu financièrement ce travail de recherche et qui en plus de contribuer à mon confort personnel, a permis la réalisation d'expérimentations incluant des moyens techniques et humains de grande ampleur.*
- ❖ *L'association Midival, mon employeur durant ces trois années, et plus particulièrement Christine Surly. Merci Christine pour avoir permis un traitement optimal des aspects d'intendance, de gestion de mission, mais aussi pour l'accueil si chaleureux réservé à chacune de mes visites.*
- ❖ *François-Régis Colin, Jean-Paul Imbert, Philippe Ribet, Nicolas Courtel, Géraldine Beboux et Jean-Luc Vinot du pôle PII (Performance et Innovation des Interfaces). Grâce à vous on a pu intégrer un oculomètre dans un simulateur de contrôle, avoir une position de contrôle reliée à une position de pseudo-pilote qui « fonctionne », déplacer la position en salle de contrôle, réaliser des passations et ramener le tout en état de marche avec des données sauvegardées. Je crois que sans vous, je n'aurais pas beaucoup de résultats à discuter dans ce manuscrit, je vous exprime donc toute ma reconnaissance.*
- ❖ *Pascal Lezaud pour sa précieuse contribution à l'analyse des données du diamètre pupillaire, mais aussi pour l'ensemble des échanges que nous avons pu avoir depuis le début du projet...*

❖ *L'équipe du projet SESAR 4.7.2 qui m'a permis de participer à l'expérimentation réalisée dans le cadre du projet au printemps 2012. Merci notamment aux « FH », Mapie, Charlie, Roland et Robert pour ces réunions avec des calculs improbables quant au choix du protocole expérimental à suivre, ou le choix d'une question plutôt qu'une autre pour les questionnaires... Je vous remercie également pour vos retours sur les analyses effectuées à partir des données oculaires et incluses au rapport final d'expérimentation.*

J'adresse mes plus sincères remerciements aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail. À M^{me} Christine Chauvin et à M. Sébastien Tremblay pour l'honneur qu'ils me font d'être les rapporteurs de cette thèse. Je remercie vivement M. Frédéric Dehais pour avoir accepté de faire partie de ce jury. Enfin, je remercie très chaleureusement les deux personnes qui complètent ce jury : Eric Blond et Philippe Averty.

Ce projet a été réalisé en étroite collaboration avec son terrain d'étude, le domaine du contrôle aérien. Cette opportunité a notamment été possible grâce à :

❖ *Claude Chamayou. Ces heures passées en ta compagnie à mettre en place et analyser les séquences de trafic ont été des plus formatrices. Elles ont été également très agréables grâce à ta bonne humeur et tes blagues légendaires...*

❖ *Michel Kast et Anne Depoilly, du CRNA Sud-Ouest de Bordeaux qui ont accepté d'accueillir et de veiller au bon déroulement des expérimentations réalisées en salle de contrôle. Ces trois semaines passées en votre compagnie, incluant de belles découvertes culinaires, ont vraiment été parfaites et je ne saurais comment vous remercier pour cela.*

❖ *Carole, « LA » pseudo-pilote des deux premières expérimentations, à qui il ne fait pas peur d'utiliser une nouvelle interface suite à une formation de quelques heures. Te rencontrer à Bordeaux a été vraiment une belle surprise et a rendu mon séjour que plus agréable.*

❖ *L'ensemble des contrôleurs aériens, 65 au total, qui ont accepté de participer bénévolement et pendant leurs périodes de pause aux expérimentations réalisées au sein de la salle de contrôle ou en salle d'expérimentation de la DTI. Merci pour vos observations, vos remarques, votre intérêt et votre enthousiasme quant aux travaux de recherche réalisés dans le domaine.*

❖ *Les contrôleurs du CCR Bordeaux avec lesquels j'ai pu faire office de trinôme, assister à des démonstrations de plateformes, suivre des simulations, aller en position de contrôle aérien militaire, qui m'a permis d'apprendre en très peu de temps beaucoup sur leur métier.*

❖ *L'ensemble des contrôleurs et des non-contrôleurs issus des centres de contrôle que j'ai pu rencontrer durant les expérimentations réalisées et les conférences auxquelles j'ai pu assister. Je pense notamment à Eric et Christian du CCR de Bordeaux, mais aussi à Cathy et Stéphanie, contrôleurs aériens rencontrés à Ergo'IHM 2012, M. Nicoleau rencontré aux SESAR Innovation Days 2012...*

❖ *Durant ma thèse j'ai également eu l'occasion de suivre des formations et de vivre des expériences très enrichissantes, et pour cela j'aimerais remercier:*

❖ *Annick Charansol grâce à laquelle j'ai pu suivre la formation d'initiation au contrôle aérien proposée par l'ENAC et me prendre pour un contrôleur aérien le temps d'une semaine.*

❖ *L'Université de Toulouse, et plus particulièrement le comité scientifique ainsi que l'école doctorale pour m'avoir accordé une AMID (Aide à la Mobilité International des Doctorants) qui m'a permis de vivre une riche expérience en Australie.*

❖ *Merci à Dédale, et plus précisément à Jean Pariès, Brent Hayward et Andrew Lawe, pour m'avoir permis de passer plusieurs semaines dans leur antenne localisée à Melbourne. Brent, Andrew, I do not know how to thank you for the opportunity you gave me to spend few weeks in your lovely office in South Melbourne. It has been for me a great experience to learn new methods of assessment dedicated to aeronautics, and as well to link aeronautic and railway operations in a human factors point of view.*

❖ *Sylvain Hourlier, pour l'organisation et la possibilité de participer aux réunions du réseau HE2Net. Cela fut notamment l'occasion de rencontrer les chercheurs spécialistes des facteurs humains dans le domaine de l'aéronautique, et de suivre des démonstrations illustrant les voies explorées actuellement par l'industrie aéronautique. Ca a été également un plaisir de collaborer avec toi pour écrire un article de revue de la littérature sur la gestion de la charge mentale dans l'aéronautique.*

❖ *Le Laboratoire CLLE-LTC, Axe D – Compatibilité entre agent humain et agent artificiel, et plus particulièrement Patrice Terrier, pour m'avoir donné la possibilité de participer aux Doctoriales. Ce séminaire a été l'occasion de rencontrer des doctorants issus de domaines d'étude divers, essentiellement de sciences dites « dures » et avec lesquels il a été très enrichissant et stimulant de collaborer durant une semaine...*

❖ *Aline Chevalier pour avoir accepté d'être ma « marraine » lors de la journée des doctorants du laboratoire CLLE-LTC. Cette préparation en commun a été pour moi l'occasion de réaliser un bilan intermédiaire du travail réalisé jusqu'alors. Ce bilan a été très formateur car évalué par un chercheur expert d'un autre domaine et dont les observations et conseils ont été très pertinents pour la suite du projet.*

❖ *L'école doctorale CLESCO pour mettre à disposition une offre de formations très variée, grâce à laquelle j'ai pu suivre des formations très intéressantes qui m'ont aidé à parfaire certains des champs de compétences requis pour mener du mieux qu'il soit une thèse de recherche. Merci également pour le prix scientifique de l'école doctorale qui m'a été attribué.*

La thèse a également été pour moi l'opportunité de dispenser des heures d'enseignement à des populations d'étudiants très hétérogènes. Cette expérience qui m'a été très bénéfique, a été possible grâce à la confiance de/du :

❖ *Département HSE (Hygiène, Sécurité, Environnement) de l'IUT d'Auch qui m'a permis d'animer des travaux pratiques d'ergonomie.*

- ❖ *CUFR Jean-François Champollion d'Albi pour lequel j'ai pu dispenser des travaux dirigés de psychologie cognitive, de méthodologie et des travaux pratiques d'ergonomie.*
- ❖ *L'ENAC, et plus précisément Nadia Mas de l'équipe des facteurs humains grâce à laquelle j'ai eu l'opportunité d'animer à plusieurs reprises un cours d'environnement de travail, ou plutôt « Work environment » destiné à des élèves contrôleurs aériens provenant de différents pays d'Europe.*
- ❖ *Les conditions de travail dans lesquelles j'ai réalisé ce travail de recherche ont été d'une qualité telle, que peu de personnes peuvent prétendre au même confort de vie au travail. Cette ambiance, c'est celle de l'équipe PII que j'ai eu la chance d'intégrer durant ces trois années.*
- ❖ *Dans cette équipe, où la bonne humeur règne avec un humour parfois très décalé, se trouvent des personnes possédant des compétences techniques et des qualités humaines qui poussent à la collaboration. Y réaliser un travail de recherche en ergonomie a été très stimulant car m'a à la fois permis de collaborer avec de nombreuses personnes, mais aussi d'apprendre beaucoup du domaine de l'informatique et de l'IHM. Il m'est difficile de penser que ce ne sera bientôt plus le cas, et que je vais devoir me « déPiiser ». Merci à vous tous pour votre accueil et pour toutes ces aventures partagées... Et plus particulièrement merci à Eric dit « chef », à François, Gwen, Bob, JP, Philippe, Jean-Luc, Rémi, Nico, Géraud, FRC, Alex, Sapo & François, Isabelle, Sonia, Amérique, Géraldine, Christophe, Benjamin, Gilles, Roland, David, Jean... Les parties de badminton, de beach-volley et de football, la séance de piscine hebdomadaire, les sorties ski, moto et vélo, les séances de ciné, les repas partagés ensemble, et sans oublier « Le » petit déjeuner quotidien partagé avec les lèves tôt vont terriblement manquer à mon quotidien.*

Je tiens à remercier, Irène Gaillard, Nadine Matton et Robert Parise, experts en facteurs humains, dont les conseils avisés partagés dans des contextes plus ou moins formels ont été d'une grande utilité. Merci beaucoup pour le temps que vous m'avez accordé et pour m'avoir considéré avec tant d'égard.

J'aimerais également inclure dans ces remerciements, mes « compagnons de galère » qui se sont eux aussi mis en tête de faire une thèse de recherche dans des domaines plus ou moins proches du mien... Maxime avec qui nous avons débuté l'aventure en même temps ; Brunilde, Laureline et Olga les « matheuses » venues nous rejoindre dans l'open space de PII et avec qui il a été très agréable de cohabiter et d'échanger au quotidien ; Jean-Paul, Gwenaël et Jean-Luc les doctorants « expérimentés » ; mes collègues représentants de l'école doctorale CLESCO et notamment Caroline et Fanny avec qui j'ai eu le plus d'occasions de collaborer ; les doctorants Albigeois, Coralie, Pauline, Gilles et Koosha avec lesquels j'ai eu le plaisir de passer une journée de travail au CUFR de temps en temps ; Coralie merci pour ton soutien particulier et puis pour tous ces moments de réflexion et de décompression partagés; et enfin Valérie, pour laquelle l'expérience de la thèse est déjà « loin » désormais, mais pour laquelle j'ai une pensée particulière, ainsi que pour tout ce que l'on a vécu en commun depuis cette école d'été du GDR de psycho-ergo...

Je clôturerai mes remerciements par une note un peu plus personnelle, car elle concerne mes proches. Je tiens notamment et surtout à te remercier Fred pour avoir toujours trouvé le moyen de me donner des « échappatoires temporaires » à ce projet très, sans doute souvent trop, prenant... Ces breaks, le temps d'un week-end, souvent passés à des centaines de kilomètres de la région Toulousaine, m'ont beaucoup aidé à débiter chaque semaine avec un niveau d'énergie et de motivation optimum. Je remercie également ma famille et mes belles familles, qui même si elles ne savent pas exactement ce que j'ai fait durant ces trois dernières années, ont fait preuve d'un soutien sans faille.

« Ce que signifie le mot recherche ? Vivre pleinement la question. »

Edgar Morin

« S'appuyer sur l'expérience du passé devrait suffire à démontrer que la plupart des révolutions technologiques sont issues de recherche dont la seule motivation était le progrès de la connaissance. »

Pierre Joliot

Ce manuscrit de thèse vient clôturer et synthétiser trois années de recherche réalisées au sein du service recherche et développement (DTI/EEI) de la Direction Générale de l'Aviation Civile (DGAC). Le domaine d'application de cette recherche en ergonomie cognitive est le contrôle aérien. La thèse a été inscrite dans le projet européen SESAR (Single European Sky Air traffic management Research) et trouve sa problématique dans les interrogations englobant une restructuration du système de contrôle du trafic aérien. Cette caractéristique met en exergue l'applicabilité visée par cette recherche et justifie la place principale qui a été accordée au domaine d'application dans la détermination des pistes de recherche et des hypothèses évaluées.

La recherche effectuée dans le cadre de ce projet de thèse fait suite à de nombreux travaux en facteurs humains conduits par la DGAC/DTI/EEI (Averty, 1998 ; Paubel, 2011). Cette continuité a permis de guider les choix méthodologiques en fonction de l'expertise et du retour d'expérience acquis à travers les résultats des travaux préalablement réalisés.

Les connaissances relatives au domaine du contrôle aérien et aux facteurs humains offertes par l'environnement dans lequel la thèse a été réalisée a notamment permis de distinguer les pistes et bases d'une approche d'évaluation de la charge mentale de contrôleurs aériens.

La description du travail de recherche proposé dans ce manuscrit vise dans un premier temps la mise en exergue des caractéristiques, notions, observations, constats et réflexions à partir desquels les besoins, les théories et les bonnes pratiques associées à une évaluation de la charge mentale de contrôleurs aériens ont été déduits. Dans un second temps, le manuscrit propose de détailler la façon dont ces caractéristiques ont été intégrées, tout d'abord lors de l'élaboration, puis de l'application d'une méthode d'évaluation de la charge mentale de contrôleurs aériens, pour enfin en déduire certaines caractéristiques de la gestion de la charge mentale de contrôleurs aériens dans des situations de contrôle différentes (situations actuelle et prospective).

Table des Matières

Remerciements	5
Avant-propos	13
Introduction	27
Chapitre 1	31
<i>Le contrôle aérien, et le passage du système de contrôle actuel à celui d'après-demain</i>	
1. Présentation du système de contrôle aérien	33
1.1. Des prémices au système de contrôle aérien actuel.....	33
1.2. Le trafic aérien contrôlé.....	34
1.3. Un ou des contrôles aériens ?	35
1.4. Les missions confiées au contrôle aérien	36
1.5. Les contrôleurs aériens En-Route.....	37
1.6. La position de contrôle En-Route	39
1.7. Caractérisation de la tâche de contrôle.....	42
2. Caractéristiques principales associées à la situation de contrôle aérien	42
3. Les transformations d'envergure du système de contrôle du trafic aérien envisagées.....	45
3.1. Pourquoi changer le système de contrôle actuel ?	45
3.2. Les pistes d'évolutions explorées	46
3.3. Le projet SESAR, Single European Sky Air traffic management Research	49
4. Les besoins d'évaluation en résultant.....	52
Chapitre 2	55
<i>La gestion de la charge mentale : définition, modélisation et méthodes d'évaluation</i>	
1. La charge mentale : Approches lui ayant été dédiées et observations relatives à son étude	57
1.1. L'étude de la charge mentale : Démodée, inappropriée ou essentielle et toujours d'actualité ?	57
1.2. Description d'une sélection de définitions de la charge mentale et caractéristiques associées	58

1.3.	Les notions associées au concept de charge mentale.....	60
1.3.1.	La capacité de l'opérateur.....	60
1.3.2.	Les ressources mobilisables par l'opérateur.....	60
1.3.3.	La performance visée et atteinte.....	61
1.3.4.	Synthèse des observations relatives à la définition de la charge mentale.....	61
2.	La gestion dynamique de la charge mentale à travers les modèles de gestion de la charge mentale.....	62
2.1.	La présence de zones de confort.....	62
2.2.	La dimension temporelle.....	65
2.3.	Le parallélisme de tâches.....	67
2.4.	Résumé relatif à la gestion dynamique de la charge mentale.....	68
3.	Les modèles de gestion dédiés à la charge mentale des contrôleurs aériens.....	69
3.1.	Les deux principales architectures de modèles dédiés à la charge mentale de contrôleurs aériens.....	69
3.2.	La place occupée par les facteurs de trafic aérien dans le cadre de l'étude de la charge mentale des contrôleurs aériens.....	71
3.3.	Vers une approche centrée sur l'activité de travail des contrôleurs aériens.....	72
4.	Les méthodes d'évaluation proposées dans le cadre de l'étude de la charge mentale.....	74
4.1.	Évaluer la charge mentale par l'analyse de la performance.....	74
4.2.	Évaluer la charge mentale par l'approche « subjective ».....	75
4.3.	Évaluer la charge mentale par l'approche « objective ».....	77
4.4.	Contributions de l'approche multidimensionnelle dans le cadre de l'étude de la charge mentale.....	79

Problématique de la thèse 81

Le couplage entre « besoins opérationnels » et « questions de recherche »

Chapitre 3 87

La détermination et la mise en place d'une méthode d'évaluation adaptée à l'étude de la charge mentale de contrôleurs aériens

1.	Les choix méthodologiques effectués dans le cadre de l'étude de la gestion de la charge mentale de contrôleurs aériens.....	89
1.1.	Prérequis à intégrer aux protocoles expérimentaux des études réalisées.....	89
1.1.1.	Une tâche expérimentale écologiquement valide.....	89
1.1.2.	Une population nécessairement experte.....	90
1.1.3.	Une position expérimentale reflétant la position de contrôle.....	91

1.2. Les choix méthodologiques portant sur la méthode d'évaluation de la charge mentale	91
1.2.1. <i>Les caractéristiques de la situation de contrôle aérien intégrées aux choix méthodologiques</i>	91
1.2.2. <i>Confrontation des exigences associées à l'évaluation de la charge mentale et des caractéristiques des approches d'évaluation disponibles</i>	92
2. L'approche mise en place : Une évaluation de la charge mentale centrée sur l'analyse de la relation entre exigences de la tâche de contrôle et répercussions sur le contrôleur aérien.....	94
2.1. L'évaluation du niveau d'exigences de la tâche de contrôle.....	94
2.1.1. <i>La place occupée par la présence de conflits dans la détermination du niveau d'exigences de la tâche de contrôle</i>	94
2.1.2. <i>La catégorisation envisageable des séquences de trafic aérien</i>	94
2.1.3. <i>L'enregistrement et l'analyse des données relatives aux séquences de trafic aérien utilisées</i>	95
2.2. L'évaluation « objective » du niveau de charge mentale ressentie par l'analyse de données oculaires	96
2.2.1. <i>L'intégration d'une technique d'eye-tracking ou oculométrie aux études réalisées</i>	96
2.2.2. <i>Les indicateurs enregistrés par le biais d'une méthode d'eye-tracking ou oculométrie</i>	99
2.2.3. <i>L'analyse du diamètre pupillaire dans le cadre de l'évaluation de la charge mentale</i>	100
2.2.4. <i>Les prérequis à la réalisation d'expérimentations utilisant une technique d'eye-tracking</i>	101
2.3. Relier les données de trafic et les données oculaires pour « contextualiser » l'évaluation de la charge mentale.....	102
2.4. Une approche multifactorielle intégrant une évaluation subjective de la charge mentale ressentie	103
3. Pré-analyse des données enregistrées grâce à la méthode multifactorielle d'évaluation de la charge mentale mise en place.....	103
3.1. La génération des fichiers de données à partir du logiciel OCTAVE.....	103
3.2. Le filtrage des données oculaires effectué	105
3.3. Les résultats visés par l'analyse des données oculaires et de trafic aérien.....	106

Chapitre 4 **107**

Régulations de la charge mentale des contrôleurs aériens en situation nominale

1. Théories et résultats empiriques relatifs à la gestion de la charge mentale effectuée par les contrôleurs aériens	109
1.1. La régulation caractérisant la gestion de la charge mentale effectuée par les contrôleurs aériens	109
1.2. L'évaluation de charge mentale de contrôleurs aériens basée sur une technique d'eye-tracking.....	110
1.3. Les analyses complémentaires utilisées dans le cadre d'une évaluation multifactorielle de la charge appliquée au contrôle aérien	111
2. Problématique de l'étude et hypothèses de recherche déduites	112

3. L'étude réalisée : L'évaluation de la charge mentale de contrôleurs aériens dans une situation de contrôle nominale.....	113
3.1. Principe de l'expérimentation.....	113
3.2. La tâche expérimentale.....	113
3.3. Participants.....	114
3.4. Matériel et méthode.....	114
3.4.1. La position expérimentale.....	115
3.4.2. La séquence de trafic aérien.....	116
3.4.3. La consigne communiquée aux participants.....	118
3.5. Appareillage de la position expérimentale.....	118
3.6. Procédure de l'expérimentation.....	118
4. Analyse des données effectuée.....	118
4.1. Analyse des données oculaires « contextualisées ».....	119
4.2. Analyse subjective du niveau de charge mentale ressentie.....	119
4.3. Analyse complémentaire centrée sur des indicateurs caractérisant l'activité de contrôle.....	120
4.3.1. Analyse des communications contrôleurs-pilotes.....	120
4.3.2. Analyse de la performance relative à la sécurité d'écoulement du trafic aérien supervisé.....	120
4.4. Analyse complémentaire centrée sur la gestion des conflits.....	121
4.4.1. Analyse de la variation de la charge mentale au cours des phases de gestion de situations conflictuelles.....	121
4.4.2. Analyse de la durée du Maturing-Time.....	122
5. Résultats.....	122
5.1. Résultats de l'analyse des données oculaires « contextualisées ».....	122
5.2. Résultats issus de l'analyse subjective.....	127
5.3. Résultats issus des analyses d'indicateurs caractérisant l'activité de contrôle.....	127
5.3.1. Les communications entre contrôleurs et pilotes.....	127
5.3.2. La performance relative à la sécurité d'écoulement du trafic aérien supervisé.....	128
5.4. Résultats déduits de l'analyse complémentaire centrée sur la gestion des conflits.....	129
5.4.1. Les phases caractérisant la gestion des conflits.....	129
5.4.2. La durée du Maturing-Time.....	130
6. Conclusions de l'étude portant sur la gestion de la charge mentale effectuée par les contrôleurs aériens en situation nominale.....	131
7. Discussion quant aux aspects méthodologiques, et perspectives déduites pour les analyses de données des études suivantes.....	132

Chapitre 5 135

Automatisation partielle de la tâche de contrôle du trafic aérien : Quels impacts sur la gestion de la charge mentale effectuée par les contrôleurs aériens ?

1. Evolutions apportées à l'environnement de travail d'opérateurs et conséquences sur la gestion de leur charge mentale	137
1.1. Les évolutions de la position de contrôle aérien En-Route envisagées dans le cadre du projet SESAR.....	137
1.2. Les modifications de la tâche de contrôle résultant de telles évolutions	137
1.3. L'automatisation d'une tâche complexe : Entre facilitation de la tâche visée et paradoxes encourus	139
1.4. Evaluer l'effet généré par l'automatisation partielle de la tâche de contrôle sur les opérateurs.....	139
2. Problématique de l'étude et hypothèses de recherche lui étant associées.....	140
3. L'étude réalisée : L'évaluation de la charge mentale de contrôleurs aériens dans une situation de contrôle « futuriste ».....	141
3.1. Principe de l'expérimentation.....	141
3.2. La tâche expérimentale.....	141
3.3. Participants.....	142
3.4. La réalisation d'une phase préliminaire de formation.....	142
3.5. Les conditions expérimentales	143
3.6. Matériel et méthode	144
3.6.1. La position expérimentale.....	144
3.6.2. Les séquences de trafic aérien.....	148
3.6.3. La consigne communiquée aux participants.....	149
3.7. Appareillage de la position expérimentale.....	149
3.8. Procédure de l'expérimentation	150
4. Analyse des données effectuée.....	151
4.1. Analyse des données oculaires "contextualisées"	151
4.2. Analyses complémentaires	151
4.2.1. Analyse subjective.....	151
4.2.2. Analyse des communications.....	152
4.2.3. Analyse de la performance	152
5. Résultats.....	153
5.1. Résultats de l'analyse des données oculaires "contextualisées"	153
5.2. Résultats issus des analyses complémentaires	159
5.2.1. Résultats de l'évaluation subjective.....	159
5.2.2. Résultats issus de l'analyse des communications	159
5.2.3. L'évaluation de la performance relative à la sécurité d'écoulement du trafic aérien supervisé.....	160
6. Discussion des effets générés par l'automatisation partielle de la tâche de contrôle sur la charge mentale de contrôleurs aériens	161
7. Conclusion et perspectives	162

Chapitre 6 163

Approche développementale de la charge mentale : L'influence de la formation sur la gestion de la charge mentale des contrôleurs aériens dans une situation de contrôle toute électronique

- 1. L'évolution de la situation de contrôle et l'impact à anticiper sur la gestion de la charge mentale des contrôleurs en fonction du niveau de formation suivi 165
 - 1.1. Entre évolution de la plateforme de contrôle et appropriation nécessaire des nouveaux outils par les contrôleurs aériens 165
 - 1.2. L'impact de l'apprentissage sur le niveau de charge mentale lors de l'appropriation à un nouveau système de travail..... 166
- 2. Problématique de l'étude et hypothèses de recherche émises 167
- 3. L'étude réalisée : L'évaluation de la charge mentale de contrôleurs aériens lors de l'utilisation d'une nouvelle plateforme de contrôle avec un niveau de formation particulier différent 168
 - 3.1. Objectifs de l'étude et principe de l'expérimentation 168
 - 3.2. La tâche expérimentale..... 168
 - 3.3. Participants..... 169
 - 3.4. La phase préliminaire de formation 169
 - 3.5. Matériel et méthode 169
 - 3.5.1. La position expérimentale..... 170
 - 3.5.2. La séquence de trafic aérien 170
 - 3.5.3. La consigne communiquée aux participants..... 171
 - 3.6. Appareillage de la position expérimentale..... 171
 - 3.7. Procédure de l'expérimentation 171
- 4. Analyse des données effectuée..... 172
 - 4.1. Comparaison des données enregistrées pour deux niveaux de formation..... 172
 - 4.2. L'analyse des données centrée sur la comparaison de paramètres oculaires 174
- 5. Résultats obtenus à partir de la comparaison des données oculaires..... 174
 - 5.1. La répartition des fixations oculaires significatives entre les zones d'intérêt et en fonction des conditions expérimentales..... 174
 - 5.2. La variation de la durée des fixations oculaires significatives en fonction de la zone d'intérêt regardée et de la condition expérimentale..... 176
 - 5.3. La dilatation pupillaire maximale relevée au cours des fixations oculaires significatives sur les différentes zones d'intérêt de l'interface et fonction de la condition expérimentale 178
- 6. Discussion et conclusion de l'étude 180

Synthèse des résultats obtenus	183
Conclusions des recherches menées	185
Perspectives de la recherche	189
Références bibliographiques	193
Les productions de la thèse	205

Table des Figures

Figure 1. Le concept de police aérienne imaginé par les dessinateurs de l'assiette au beurre (1908).....	33
Figure 2. Table de plotting utilisée à Aix en Provence, 1939.	34
Figure 3. Les premiers écrans radar introduits dans les positions de contrôle.....	34
Figure 4. Illustration de la division et de l'espace aérien soumis à contrôle	35
Figure 5. Les trois types de contrôle aérien existants	36
Figure 6. Illustration des différentes catégories de conflit.....	37
Figure 7. Les Centres de Contrôle En-Route Français et les zones de contrôle associées.....	38
Figure 8. Un binôme de contrôleurs En-Route du CCR d'Aix-En-Provence (CRNA Sud-Est).....	39
Figure 9.1. L'image radar ODS utilisée en CCR – Figure 9.2. Le plot et l'étiquette radar d'ODS – Figure 9.3. Une alarme STCA	40
Figure 10. Le strip papier et le tableau de strips	41
Figure 11. Les moyens de communication des contrôleurs organique (gauche) et radariste (droite).....	41
Figure 12. Le cycle de la tâche de contrôle	42
Figure 13. Évolution de la densité du trafic aérien mondial de 1990 à 2029 (Boeing, 2010).....	46
Figure 14. L'interface DigiStrips.....	47
Figure 15. Les images radar d'ERATO (gauche) et de 4-Flight (droite)	48
Figure 16. La plateforme ERASMUS	48
Figure 17. L'architecture du projet SESAR à travers la répartition des work packages.....	49
Figure 18. Cycle de fonctionnement du service d'aide à la détection et à la résolution des conflits proposé dans le cadre du projet SESAR, WP4.7.2.....	50
Figure 19. L'action du solveur et du détecteur illustrée par l'interface	51
Figure 20. Traduction du Compensatory Control Model (Hockey, 1993, 1997)	65
Figure 21. Traduction du modèle de gestion de la charge mentale proposé par Hancock & Chignell (1988)	66
Figure 22. Traduction du modèle du processeur central (Kahneman, 1973).....	68
Figure 23. L'architecture de modèles centrés sur les exigences de la tâche de contrôle	70
Figure 24. L'architecture de modèles centrés sur la stratégie opératoire des contrôleurs aériens en fonction du niveau d'exigences de la tâche de contrôle.....	70
Figure 25. La deuxième partie du TLI (Task Load Index) relative à la détection et à la gestion des conflits	73

Figure 26. Illustration de la méthode du reflet cornéen utilisé par les oculomètres ou eye-trackers de dernière génération	97
Figure 27. Les modèles d'eye-trackers ou oculomètres actuellement disponibles.....	98
Figure 28. L'eye-tracker Tobii X-120 utilisé lors des études empiriques de la recherche	99
Figure 29. Le TEPR, Task Evoked Pupillary Response (à gauche, les résultats de Beatty, 1982 ; à droite ceux de Klingner, Kumar & Hanrahan, 2008).....	101
Figure 30. L'interface du logiciel d'analyse de données oculaires, OCTAVE.....	104
Figure 31. Un signal de diamètre pupillaire avant (figure de gauche) et après (figure de droite) la phase de traitement des données	105
Figure 32. La position de contrôle expérimentale	115
Figure 33. Les différentes parties de la plateforme expérimentale	116
Figure 34. Le secteur T choisi pour l'expérimentation.....	117
Figure 35. Evolution du nombre d'avions potentiellement impliqués dans les situations conflictuelles incluses dans la séquence de trafic aérien de l'expérimentation	117
Figure 36. L'échelle d'évaluation complétée par les participants à l'issue de la passation	120
Figure 37. Détails du calcul de la performance moyenne de la tâche par participant	121
Figure 38. Répartition du nombre moyen de blinks réalisés par seconde en fonction des catégories d'avions composant la séquence de trafic supervisée par les participants	123
Figure 39. Répartition du nombre moyen de fixations oculaires reparties entre les différentes catégories d'avions	124
Figure 40. Durée moyenne des fixations oculaires en fonction de la catégorie d'avions faisant l'objet des fixations oculaires (millisecondes)	124
Figure 41. Valeur moyenne de la dilatation pupillaire en fonction de la catégorie d'avions regardée (score z).....	125
Figure 42. Maximum de la dilatation pupillaire moyenne en fonction de la catégorie d'avions visée par les fixations oculaires (score z).....	126
Figure 43. Effectif de participants par valeur de l'échelle d'évaluation subjective du niveau de ressources cognitives mobilisées au cours de l'exécution de la tâche de contrôle expérimentale.....	127
Figure 44. Nombre moyen de communications passées par minute en fonction du niveau de difficulté associé à la tâche de contrôle expérimentale.....	128
Figure 45. Liste des situations conflictuelles relevées pour l'ensemble des participants.....	129
Figure 46. Valeurs moyennes de la dilatation pupillaire maximale relevée pour les différentes phases du modèle TLI (score z).....	130
Figure 47. La valeur moyenne de Maturing-Time des participants (millisecondes) répartie selon les groupes de participants distingués.....	130
Figure 48. Descriptif de la phase de formation qui a précédé l'expérimentation.....	142

Figure 49. Description des quatre scénarios de situations de contrôle composant l'expérimentation	143
Figure 50. La position de contrôle « futuriste » de l'expérimentation.....	144
Figure 51. La position de contrôle actuellement mise en place en centre de contrôle En-Route (gauche) et la position de contrôle utilisée lors de l'expérimentation (droite)	145
Figure 52. La partie haute de la plateforme de contrôle utilisée lors de l'expérimentation	145
Figure 53. La partie basse de la plateforme de contrôle utilisée lors de l'expérimentation	146
Figure 54. Un avion sous contrainte de vitesse (TC-SA).....	146
Figure 55. L'agenda intégré sur la droite de l'image radar pour illustrer les conflits détectés par le service CD Aid	147
Figure 56. Les positions de pseudo-pilotage et de pseudo-contrôle adjacent de la plateforme expérimentale	148
Figure 57. Le secteur générique RU choisi pour l'expérimentation (figure de gauche) et illustration des routes le traversant (figure de droite)	148
Figure 58. Le planning des passations de l'expérimentation illustrant le croisement entre scénarios et services d'Aide	149
Figure 59. L'échelle d'évaluation ISA complétée toutes les cinq minutes par les participants au cours de l'expérimentation.....	152
Figure 60. Nombre moyen de fixations oculaires entre les différentes catégories d'avions en fonction des conditions expérimentales.....	153
Figure 61. Nombre moyen de fixations oculaires sur les avions sur secteur conflictuels en fonction de la condition expérimentale.....	154
Figure 62. Nombre moyen de fixations oculaires sur l'interface en fonction de la condition expérimentale	155
Figure 63. Durée des fixations oculaires entre les différentes catégories d'avions en fonction de la condition expérimentale.....	155
Figure 64. Durée des fixations oculaires portées sur l'interface en fonction de la condition expérimentale	156
Figure 65. Dilatation pupillaire maximale pour les fixations oculaires significatives réparties entre les zones d'intérêt en fonction des conditions expérimentales.....	157
Figure 66. Dilatation pupillaire maximale pour les fixations oculaires significatives réalisées sur les avions conflictuels en fonction des conditions expérimentales.....	157
Figure 67. Dilatation pupillaire maximale lors des fixations oculaires significatives réalisées sur l'interface en fonction de la condition expérimentale	158
Figure 68. Les scores moyens ISA déterminés par les participants au cours de l'exécution de la tâche de contrôle en fonction des conditions expérimentales.....	159

Figure 69. La durée d'occupation moyenne de la fréquence radio en fonction des conditions expérimentales (HH:MM:SS).....	160
Figure 70. Le nombre de situations Hors-Normes relevées en fonction des conditions expérimentales.....	160
Figure 71. La position expérimentale composée d'une interface tout électronique et dans laquelle un eye-tracker a été intégré.....	170
Figure 72. Tableau résumant le détail des deux niveaux de formation associés aux conditions expérimentales	173
Figure 73. Les différences de méthodes d'évaluation distinguant les deux conditions expérimentales.....	173
Figure 74. Nombre moyen de fixations oculaires significatives réalisées sur les différentes catégories d'avions en fonction du niveau de formation.....	175
Figure 75. Nombre moyen de fixations oculaires significatives sur l'interface en fonction du niveau de formation.....	175
Figure 76. Durée moyenne des fixations oculaires significatives réalisées sur les différentes zones d'intérêt de l'image radar en fonction du niveau de formation (millisecondes)	177
Figure 77. Durée moyenne des fixations oculaires sur l'interface en fonction du niveau de formation (millisecondes)	177
Figure 78. Moyenne de la dilatation pupillaire maximale durant les fixations oculaire significatives réalisées sur les différentes catégories d'avions en fonction du niveau de formation (score z).....	179
Figure 79. Moyenne de la dilatation pupillaire maximale au cours des fixations oculaires significatives dédiées à l'interface en fonction du niveau de formation (score z).....	179

Introduction

L'aéronautique désigne, par définition, l'ensemble des disciplines scientifiques et des technologies leur étant associées, qui sont dédiées à la construction et à l'évolution des aéronefs dans l'atmosphère terrestre (espace aérien). À ses débuts situés au début du XX^{ème} siècle, ce domaine est caractérisé comme très instable et en quête perpétuelle de records, dépendant principalement de la distance parcourue par les aéronefs dans les airs. Au lendemain de la première guerre mondiale et de la signature de la convention de Chicago (7 Décembre 1944), les moyens techniques ont évolué d'une façon telle que l'exploitation commerciale est envisageable. Cette transition de l'aéronautique a causé une augmentation importante du nombre de déplacements d'avions dans l'espace aérien. Pour assurer un niveau de sécurité optimal et nécessaire à l'activité du transport aérien, les vols ont été régulés et procéduralisés. Ils ont notamment été soumis à une autorité de contrôle de la navigation aérienne, communément appelé « contrôle aérien », dont l'objectif principal consiste à espacer suffisamment les avions les uns par rapport aux autres pour éviter l'occurrence d'accidents engendrant des dommages humains et matériels de grande ampleur. Dorénavant, l'aviation qui s'est démocratisée, est devenue le mode de transport le plus sûr qu'il soit avec une occurrence d'accident inférieure à 10-5 (Amalberti, Auroy, Berwick, & Barach, 2005). La démocratisation du transport aérien s'illustre notamment par le franchissement symbolique des 200 milliards de passagers-kilomètres peu avant les années 2000 (IFEN, 2004).

La demande relative au transport aérien n'est pas amenée à stagner, au contraire les prévisionnistes annoncent une augmentation significative de la densité du trafic aérien pour les prochaines dizaines d'années à venir (Eurocontrol, 2007). Cette augmentation de la demande engendre une hausse des sollicitations pour le contrôle aérien. De fait, une telle évolution de contexte questionne quant à la capacité du système de contrôle aérien actuel pour faire face à une augmentation du nombre de vols à superviser. Le système actuel de contrôle aérien ne se confronterait-il pas à une saturation susceptible de réduire le niveau de sécurité associé aux déplacements des avions dans l'espace aérien ? Ce constat est actuellement redouté par les autorités nationales de l'aviation civile qui ont entrepris une refonte des systèmes de contrôle aérien menée à partir de projets de recherche de grande envergure. Au niveau Européen, le projet SESAR (Single European Sky Air traffic management Research) a été initié en 2004 pour déterminer les évolutions qu'il faudrait intégrer au système de contrôle aérien existant, afin d'augmenter ses capacités de gestion, tout en optimisant le niveau de sécurité lui étant associé. Ce projet vise un déploiement des nouveaux systèmes de contrôle à l'horizon 2020.

L'élaboration de nouveaux systèmes de contrôle aérien, visée par le projet SESAR, étudie notamment l'alternative qui consisterait à intégrer dans le système de contrôle aérien, des agents informatisés et « intelligents » en mesure d'analyser, voire même d'agir sur le trafic aérien, qui est actuellement supervisé exclusivement par l'opérateur humain. De telles aides à la décision sont principalement rendues possibles grâce à l'émergence de nouvelles technologies, issues de l'expansion du domaine de l'informatique et de l'automatique, couplée à celle de l'algorithmie.

L'introduction de nouveaux systèmes de contrôle aérien intégrant des agents artificiels, correspond à la mise en place de services d'aide à disposition de l'opérateur humain. Ces derniers visent à limiter les sollicitations de l'opérateur, et ainsi à limiter le coût (mental) qu'engendre l'exécution de la tâche de contrôle chez ce dernier. L'intégration de systèmes intelligents dans le système de contrôle aérien existant, dont le fonctionnement dépend essentiellement de l'activité des opérateurs humains, engendrerait une transformation de la tâche de contrôle. En effet, cette dernière amènerait les opérateurs humains à collaborer avec des agents artificiels.

Le changement de la position de contrôle va donc impacter la façon dont les contrôleurs aériens opèrent. Cependant, l'impact généré sera-t-il bénéfique pour les contrôleurs aériens ? Dès lors, les changements envisagés par le projet SESAR pour définir la situation de contrôle aérien de nouvelle génération sont-ils acceptables ? De telles interrogations justifient le besoin de venir évaluer la validité des impacts générés par de tels changements de l'environnement de contrôle aérien, sur les opérateurs humains. Dans des études précédentes portant sur l'évaluation de l'impact généré par l'introduction de systèmes d'aide destinés aux contrôleurs aériens, un des indicateurs étudié pour évaluer cet impact, a porté sur l'évaluation de la charge mentale de contrôleurs aériens. Cette analyse vise à déterminer le niveau de ressources cognitives que le contrôleur aérien mobilise pour répondre aux exigences de la tâche qu'il réalise (Hilburn, 2004). Les services d'aide évalués dans le cadre de ces études peuvent être distingués en deux catégories. Le premier d'entre eux représente une aide à la détection de problèmes, alors que le second est une aide à la résolution de problèmes. Les évaluations réalisées ont majoritairement montré un effet plutôt néfaste du service d'aide à la détection (Endsley & Rogers, 1998 ; Metzger & Parasuraman, 2001), alors que le service d'aide à la résolution de problèmes est quant à lui associé à un effet positif (Drogboul, 2008 ; Paubel, 2011). Ces résultats contradictoires relatifs à l'impact généré par l'introduction de systèmes d'aide destinés aux contrôleurs aériens, sur leur niveau de charge mentale, suggèrent qu'une aide à la détection de situations problématiques ne constituerait pas une aide utile, alors qu'une aide à la résolution de problèmes serait bénéfique pour les contrôleurs aériens.

Dans le cadre du projet SESAR, c'est un couplage entre services d'aide à la détection et à la résolution de problèmes qui a été proposé au niveau Européen. On peut dès lors s'interroger sur l'effet que cette alternative pourrait engendrer sur la gestion de la charge mentale de contrôleurs aériens.

L'objectif principal de la thèse a été de déterminer les caractéristiques de la gestion de la charge mentale de contrôleurs aériens réalisée au cours de leur activité s'effectuant dans un environnement de contrôle « variable ». En effet, le but a été de caractériser, dans un premier temps, la gestion de la charge mentale des contrôleurs aériens dans une situation de contrôle reflétant la situation de contrôle actuelle, puis d'évaluer la façon dont elle est impactée dans une situation de contrôle de nouvelle génération, proposée comme une solution à l'augmentation de la densité de trafic aérien, et à la possible saturation du système de contrôle aérien actuel.

La présentation du travail de recherche proposée par le biais de ce manuscrit est composée de trois parties principales. La première d'entre elles vise à présenter le contexte qui englobe la recherche. Ainsi, dans un premier chapitre le domaine d'application de la recherche, le contrôle aérien, est présenté en vue de décrire son fonctionnement actuel, les raisons illustrant la nécessité d'y introduire des changements, et enfin les évolutions, en cours d'élaboration dans le cadre du projet Européen SESAR (Single European Sky Air traffic management Research), dont il pourrait faire l'objet. Le second chapitre de cette première partie porte quant à lui sur la théorie de la charge mentale, et plus particulièrement sur celle de la gestion de la charge mentale. Ce chapitre théorique vise à distinguer les principales caractéristiques associées au concept de charge mentale, mais aussi celles propres à la gestion de la charge mentale des contrôleurs aériens et enfin les différentes approches pouvant être employées dans le cadre de l'évaluation de la charge mentale.

- La description du contexte de la recherche proposée dans la première partie du manuscrit est poursuivie par la présentation de la problématique de la recherche qui définit la cible du travail empirique effectué dans le cadre de la recherche, et celles des hypothèses de recherche qui ont été évaluées.
- La seconde partie du manuscrit est principalement constituée par la description des études empiriques réalisées. Dans le premier chapitre de cette partie (chapitre 3 du manuscrit), la méthode d'évaluation de la charge mentale centrée sur l'analyse d'indicateurs oculaires, qui a été mise en place pour évaluer la charge mentale de contrôleurs aériens au cours d'une tâche de contrôle, est détaillée. Ce chapitre dédié à la méthodologie permet de pointer les différents choix effectués tant en ce qui concerne les situations expérimentales mises en place, que ceux relatifs aux dispositifs d'évaluation intégrés à la position expérimentale. Il met également l'accent sur la phase de pré-analyse qui a été dans un premier temps mise en place, puis appliquée avant chacune des phases d'analyse de données réalisées. Les trois chapitres suivants (Chapitre 4 à 6) décrivent les études menées afin d'évaluer dans des environnements de contrôle distincts, la charge mentale de contrôleurs aériens, et les résultats qui en ont été tirés pour caractériser la gestion de la charge mentale effectuée par ces experts du contrôle de la navigation aérienne.

- Dans la première étude, la gestion de la charge mentale des contrôleurs aériens a été évaluée dans un environnement de contrôle nominal.
- Dans la deuxième étude, l'évaluation a porté sur un environnement de contrôle de nouvelle génération qui correspond à une plateforme de contrôle tout électronique incluant des services d'aide à la décision.
- Dans la troisième étude, il s'agit d'évaluer la gestion de la charge mentale de contrôleurs aériens en fonction du niveau de formation.
- Enfin, une dernière partie, centrée sur les conclusions et les perspectives qui peuvent être tirées quant au travail de recherche réalisé, conclut le manuscrit.

Chapitre 1

Le contrôle aérien, et le passage du système de contrôle actuel à celui d'après-demain



Ce chapitre est dédié à la présentation du domaine du contrôle aérien. Il porte principalement sur le fonctionnement actuel du contrôle aérien en France et sur les transformations qui sont encore en cours d'étude pour définir ce que sera la situation de contrôle dans un futur proche. L'objectif d'une telle présentation est de décrire le contrôle aérien actuel, pourquoi et comment il va être amené à évoluer, pour enfin en déduire le besoin d'évaluation qui résulte des évolutions envisagées par les autorités de contrôle.

1. Présentation du système de contrôle aérien

1.1. Des prémices au système de contrôle aérien actuel

Le contrôle du trafic aérien est un système assez récent car il a réellement vu son expansion au milieu du XX^{ème} siècle. Au début du XX^{ème} siècle, alors même que les avions ne volent pas, des dessinateurs anticipent déjà l'importance de réguler les déplacements des avions durant leurs vols (Cf. Figure 1). Bien que très simpliste, ce dessin montre ici le besoin ultérieur d'un service de contrôle aérien, à savoir : réguler les déplacements des avions dans l'espace aérien pour en assurer leur sécurité.



Figure 1. Le concept de police aérienne imaginé par les dessinateurs de l'assiette au beurre (1908)

Les prémices du contrôle aérien font leur apparition en France dans les années 1920. Suite à un accident impliquant deux avions de ligne entre Paris et Londres (Accident de Thieuloy-Saint-Antoine, France, 1922), l'obligation d'avoir un télégraphiste, pratiquant le morse à bord des avions de plus de dix places, est établie. Cela marque le début du contact entre le sol et les airs. Cette communication entre sol et air a été par la suite améliorée par les systèmes de radio. Le contrôle aérien est réellement implanté dans les années 1940. Il vient répondre à des besoins militaires relatifs à la seconde guerre mondiale, visant à surveiller les avions en vol. À ce stade, le contrôle aérien utilise des tables de plotting pour illustrer la position des avions dans l'espace aérien (Cf. Figure 2). Cette illustration de l'état du trafic aérien est rendue fiable grâce à l'utilisation de données radar fournissant les données géographiques relatives à la position des avions qui vont permettre de placer et de déplacer les différents vols sur la table de plotting. La table de plotting permet donc de mettre à disposition une représentation globale de la situation de trafic supervisée.



Figure 2. Table de plotting utilisée à Aix en Provence, 1939

Dans les années 1960, le contrôle aérien connaît un bon technologique considérable avec l'introduction des radars au sol et des images radar dans la position de travail des opérateurs. Ces dernières correspondent à illustration graphique de la situation de trafic aérien et des données collectées par les radars (Cf. Figure 3). Le déplacement manuel des avions effectué sur la table de plotting est dès lors automatisé et affiché sur un écran. Cette évolution se justifie certes par l'avancée technologique, mais également par un besoin d'augmentation des capacités de gestion du contrôle aérien, de par l'essor de l'aviation civile commerciale.



Figure 3. Les premiers écrans radar introduits dans les positions de contrôle

L'évolution du trafic aérien impliquant une augmentation significative du nombre de vols à superviser a nécessité en parallèle une division plus détaillée de l'espace aérien.

1.2. Le trafic aérien contrôlé

Tout l'espace aérien n'est pas soumis à contrôle. Les zones d'espace aérien très peu fréquentées où la circulation aérienne est très faible ne sont pas soumises à contrôle. Les zones soumises à contrôle sont quant à elle divisées afin de séparer les différents types de trafics : aviation légère, militaire, commerciale... Dans l'espace aérien contrôlé un ensemble de règles et de procédures doit être suivies par les avions. Chaque vol doit notamment déposer et faire valider un plan de vol suffisamment à l'avance pour définir les caractéristiques du vol (les destinations de départ et

d'arrivée, l'itinéraire, les heures de vol prévus notamment). Ce prérequis permet aux contrôleurs d'anticiper les flux de vols qui vont composer le trafic aérien soumis à contrôle, et dès lors d'adapter les ressources de contrôle à déployer pour répondre à la demande.

La division de l'espace aérien soumis à contrôle est adaptée à la densité et au type de trafic s'y écoulant. La division de l'espace aérien (Cf. Figure 4) définit, au sein de portions de l'espace, un ensemble de zones que l'on appelle secteurs. Les secteurs sont composés de routes aériennes qui comprennent des points de passage appelés balises. Les routes aériennes sont déterminées à partir des flux de trafic reliant les destinations de départ et d'arrivée. Le service de contrôle aérien s'articule en fonction des différents secteurs déterminés et des déplacements se déroulant dans chacun d'entre eux.

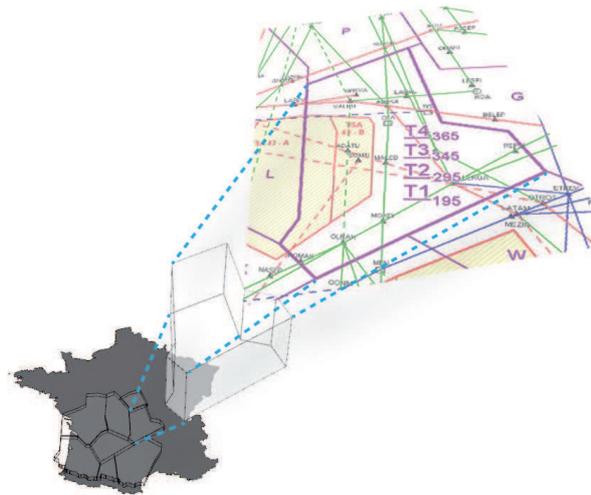


Figure 4. Illustration de la division et de l'espace aérien soumis à contrôle

1.3. Un ou des contrôles aériens ?

Le principe général du contrôle aérien est de guider les avions évoluant dans l'espace aérien soumis à contrôle (Smolensky & Stein, 1998). Cependant le contrôle aérien n'est pas unique, mais divisible en trois catégories de contrôle. Pour chaque vol contrôlé, les différents services de contrôle aérien se relaient, prenant en charge différentes phases de vol (Cf. Figure 5).

- Le contrôle d'aérodrome ou de tour (aéroport). Il assure les phases de décollage et d'atterrissage des avions, ainsi que tous les déplacements au sol entre les terminaux de l'aéroport et les pistes de décollage et d'atterrissage.
- Le contrôle d'approche. Il supervise les avions en phase de montée et de descente dans les zones à proximité des aéroports (entre 10 et 30 miles des pistes), comme son nom l'indique. Son objectif est de préparer les arrivées sur le terrain en disposant les uns derrière les autres les avions en arrivée afin de faciliter le travail du contrôle d'aérodrome. Pour les avions au départ, le contrôle d'approche vise à éviter le rapprochement des avions au moment où ces derniers vont s'orienter vers leur route de destination. Dans ce cas, le contrôle vise à assurer la compatibilité des déplacements des avions en incluant la nature des trajectoires et des performances (vitesse de montée) des avions.

- Le contrôle En-Route. Il gère la progression des avions évoluant en dehors des zones proches des aéroports. Dans ces zones, la grande majorité des avions circulent à hautes altitudes et à vitesses élevées, correspondant majoritairement aux phases de croisière des vols.

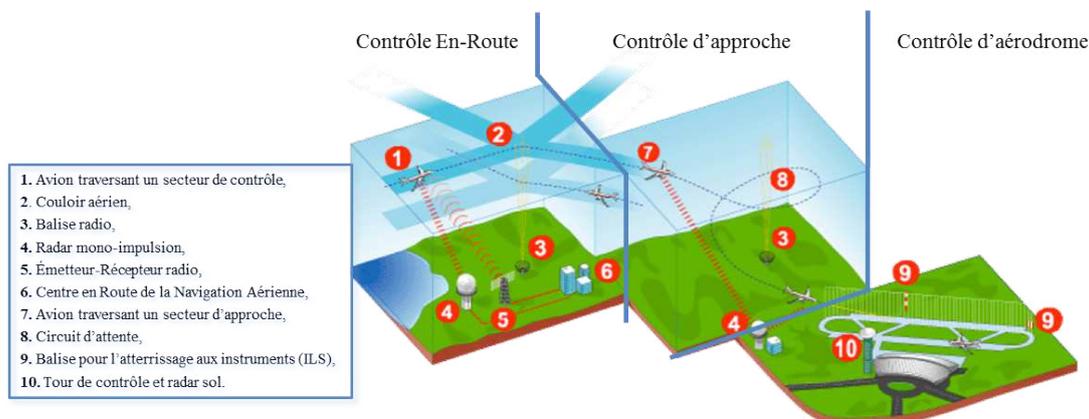


Figure 5. Les trois types de contrôle aérien existants

Le travail de recherche détaillé dans ce manuscrit porte sur le contrôle dit En-Route, c'est pourquoi la suite du texte portera principalement sur le fonctionnement de ce type de contrôle.

1.4. Les missions confiées au contrôle aérien

Le contrôle aérien est avant tout un service rendu aux compagnies aériennes qui le financent sous la forme de redevances. Il vise à garantir le fait que leurs appareils se déplacent en toute sécurité dans l'espace aérien et ce en respectant les horaires de départ et d'arrivée des vols préalablement établis, afin d'optimiser la satisfaction de leurs clients.

Au niveau mondial, trois différentes missions sont confiées au contrôle aérien, étant, par ordre de priorité (Cf. RCA, Réglementation de la Circulation Aérienne, 2008) :

- Une mission de sécurité. Elle consiste à assurer l'espacement entre les différents aéronefs circulant dans l'espace contrôlé, et cela en respectant des normes de séparation. En contrôle En-Route, les avions doivent être séparés les uns par rapport aux autres d'un minimum de 5 NM (Nautical Miles, Miles Nautiques) sur le plan horizontal et de 1000 FT (Feet, Pieds) sur le plan vertical.
- Une mission de respect de l'environnement visant à optimiser les trajectoires des avions, « éviter les détours » en somme, pour limiter au maximum la consommation de kérosène.
- Une mission d'information. Cette dernière mission consiste à informer les pilotes des avions quant à d'éventuels évènements météorologiques qu'ils seraient susceptibles de rencontrer (zone d'orage).

Pour résumer le contrôle aérien va s'assurer du bon suivi des routes empruntées par les avions, les optimiser, les raccourcir quand cela est possible et au contraire les modifier dans certaines situations où leur sécurité est remise en cause. Ce dernier cas de figure définit un risque de conflit. Un conflit est défini lorsqu'à un moment donné

la séparation entre plusieurs avions risque d'être inférieure à la séparation minimale autorisée (Hwang & Tomlin, 2002). On distingue trois types de conflit (Cf. Figure 6) : le rattrapage (deux avions sur la même trajectoire et dans la même direction avec niveau de vol identique dont le deuxième est plus rapide que le premier), le face à face (deux avions sur la même trajectoire et à même niveau de vol avec un sens de déplacement opposé) et le croisement. Le croisement, qui est le type de conflit le plus souvent géré, correspond au cas où les trajectoires respectives de plusieurs avions (au minimum deux) se déplaçant sur le même niveau de vol sont sécantes.

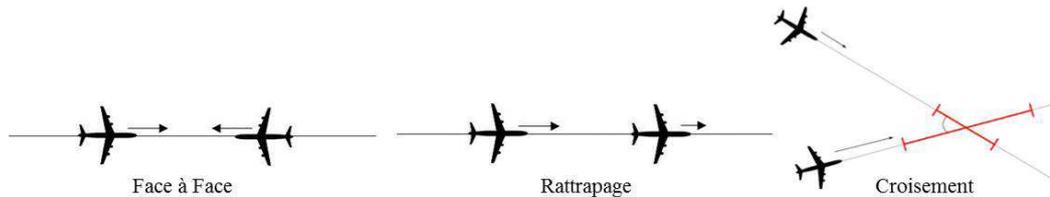


Figure 6. Illustration des différentes catégories de conflit

Pour éviter que ce risque soit important et qu'un conflit ne se produise, la trajectoire d'un ou de plusieurs avions impliqués est ou sont modifiée(s). Cette modification permet d'assurer une séparation suffisante entre les avions en accord avec les normes de la circulation aérienne à respecter. Les modifications de trajectoire(s) peuvent être de trois types et porter sur : le niveau de vol (altitude), le cap suivi (direction) ou encore la vitesse. Ces actions permettant d'optimiser la sécurité et le bon écoulement du trafic aérien sont réalisées par les contrôleurs aériens, les opérateurs de ce système complexe, connus aussi sous le nom d'aiguilleurs du ciel.

1.5. Les contrôleurs aériens En-Route

En France, tous les contrôleurs aériens reçoivent une formation initiale à l'ENAC (Ecole Nationale de l'Aviation Civile) après l'obtention d'un concours à niveau Bac+2 (composé d'un écrit et d'un oral), illustrant la réalisation d'une sélection stricte. Cette formation de trois ans porte aussi bien sur les connaissances scientifiques théoriques, que sur la pratique. En effet, les futurs contrôleurs aériens effectuent au cours de leur formation initiale de nombreuses simulations de contrôle que ce soit à l'ENAC ou sur le terrain (dans les centres de contrôle).

Par le biais d'instructeurs, eux-mêmes contrôleurs aériens « experts », les élèves contrôleurs apprennent les modes opératoires et les « bonnes pratiques » du métier. Cette première partie de la formation permet d'obtenir le diplôme d'ICNA (Ingénieurs du Contrôle de la Navigation Aérienne). La formation est par la suite complétée par une instruction dans le centre d'affectation du contrôleur où il va acquérir les modes opératoires qui y sont spécifiques et appliqués afin de prétendre à la qualification. Ce « diplôme » délivré en interne lui permet de contrôler en situation réelle.

Pour résumer, on peut définir la population des contrôleurs aériens Français comme assez homogène de par la nature très procéduralisée du système de contrôle aérien, des modes opératoires et des techniques employés par les contrôleurs et dispensés aux

générations suivantes. Malgré tout, les contrôleurs gardent une variabilité dépendant de leurs stratégies et surtout de leur niveau d'expertise.

En France, les contrôleurs aériens En-Route sont répartis dans cinq CCR (Centres de Contrôle En-Route). Chacun des centres gère la supervision d'une portion d'espace aérien afin de couvrir l'ensemble de l'espace aérien français (Cf. Figure 7). Chacune des portions des espaces gérés est quant à elle répartie en secteurs de contrôle que l'on appelle UCE (Unités de Contrôle d'Espace).

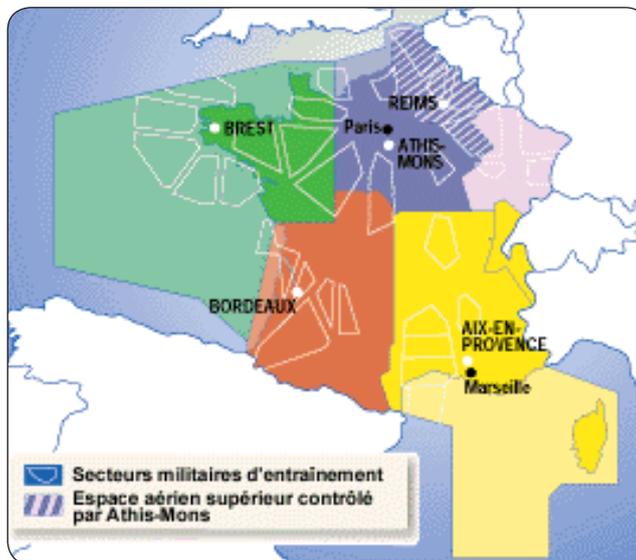


Figure 7. Les Centres de Contrôle En-Route Français et les zones de contrôle associées

En contrôle En-Route, les contrôleurs aériens travaillent en binôme. Chaque binôme gère le trafic aérien s'écoulant sur un secteur de contrôle. Au sein du binôme de contrôleurs aériens En-Route, on distingue :

- Le contrôleur organique, aussi appelé *planner*. Il est le contrôleur qui occupe la position de droite (Cf. Figure 8). Il assure les coordinations (sous forme de communications) avec les binômes de contrôleurs adjacents, étant chargés de superviser les secteurs entourant le secteur dont lui et son binôme ont la charge. Son rôle principal est de préparer la séquence de trafic se situant à $t+1$ pour faciliter le travail de son binôme. Cette facilitation va consister en trois actions principales : la première est de pré-intégrer les vols qui vont arriver dans le secteur dont le binôme a la charge (une dizaine de minutes avant leur arrivée) ; la deuxième est d'analyser le devenir de la situation pour en détecter les risques de conflit susceptibles de se produire en entrée et en sortie du secteur ; la troisième est de résoudre, si possible, ces conflits par la demande d'intervention (modifications de trajectoires d'avion(s)) du binôme de contrôleurs adjacents concernés (gérant le secteur où l'(es) avion(s) en question se trouve(nt) encore). Dans le cas où cela n'est pas possible et en fonction de l'état de la situation à l'instant t (quantité de trafic, complexité du trafic géré, profils des avions en conflit...), l'organique peut être amené à avertir son binôme pour que celui-ci puisse agir sur la situation.
- Le contrôleur radariste, également appelé « tactique », est le contrôleur qui occupe la position de gauche (Cf. Figure 8). Il assure les communications avec les pilotes des

avions qui se trouvent sur le secteur dont le binôme a la charge, et ce en respectant une phraséologie dédiée. Au minimum, le contrôleur a deux échanges vocaux avec chacun des pilotes : le message « bonjour » quand l'avion rentre dans le secteur, le message « au revoir » quand l'avion s'oriente vers un autre secteur.

Le radariste a pour rôle principal de superviser la situation de trafic afin d'y détecter et résoudre les conflits susceptibles de se produire. Pour cela, le radariste se crée une représentation mentale de la situation de trafic qu'il supervise ; il anticipe la position future des avions afin de détecter les conflits susceptibles de se produire. Enfin, pour les conflits dont le risque est avéré, il va définir une solution permettant d'écarter les avions impliqués. Pour rendre effective cette solution, le contrôleur va communiquer aux pilotes concernés la ou les modifications de trajectoire à effectuer, que l'on appelle ordre de pilotage ou encore clairance.



Figure 8. Un binôme de contrôleurs En-Route du CCR d'Aix-En-Provence (CRNA Sud-Est)

1.6. La position de contrôle En-Route

Les binômes de contrôleurs En-Route travaillent sur une position constituant un module de contrôle appelé GEODE.

On distingue trois principaux outils au sein de la position de travail des contrôleurs:

- L'image radar (Cf. Figure 9.1). Pour le contrôle En-Route en France, l'image radar utilisée s'appelle ODS (Operational Display System). Cet outil constitue une représentation graphique de la situation de trafic que les contrôleurs doivent gérer. Le contenu de l'image radar, et donc la position des avions, s'actualise toutes les 8 secondes en fonction des données communiquées par les radars au sol. L'image radar a pour arrière-plan la géographie du secteur (les limites) avec les différentes routes aériennes qui le composent. Les avions qui se déplacent dans le secteur sont représentés sous la forme de plots radar (Cf. Figure 9.2). Pour reconnaître facilement les vols, une étiquette sur laquelle figure notamment l'identifiant du vol est associée aux plots radar. L'image radar est également équipée de certaines fonctions qui permettent aux contrôleurs de calculer des distances (entre avions notamment),

d'ajuster l'affichage en fonction de ses besoins (zoom, déplacement, etc.), de surligner des cas pouvant poser problèmes (warning). De plus, un système de contrôle des séparations, appelé filet de sauvegarde (STCA - Short Term Conflict Alert) est intégré à l'image radar. Ce système de protection permet d'alerter le contrôleur, par le biais d'une alarme (les avions concernés apparaissent en rouge et flashent, Cf. Figure 9.3) lorsque des avions risquent de se rapprocher dangereusement (en dessous des normes de séparation) dans les minutes qui suivent. Le filet de sauvegarde est l'ultime recours sol permettant d'alerter le contrôleur sur la nécessité urgente de prendre une mesure corrective immédiate et radicale (changement du niveau de vol initial de l'avion), en vue de l'occurrence imminente d'un conflit. Ce cas de figure se produit quand une situation conflictuelle échappe à la vigilance des contrôleurs (non-détection ou insuffisance des actions de séparation mises en place pour résoudre le conflit).

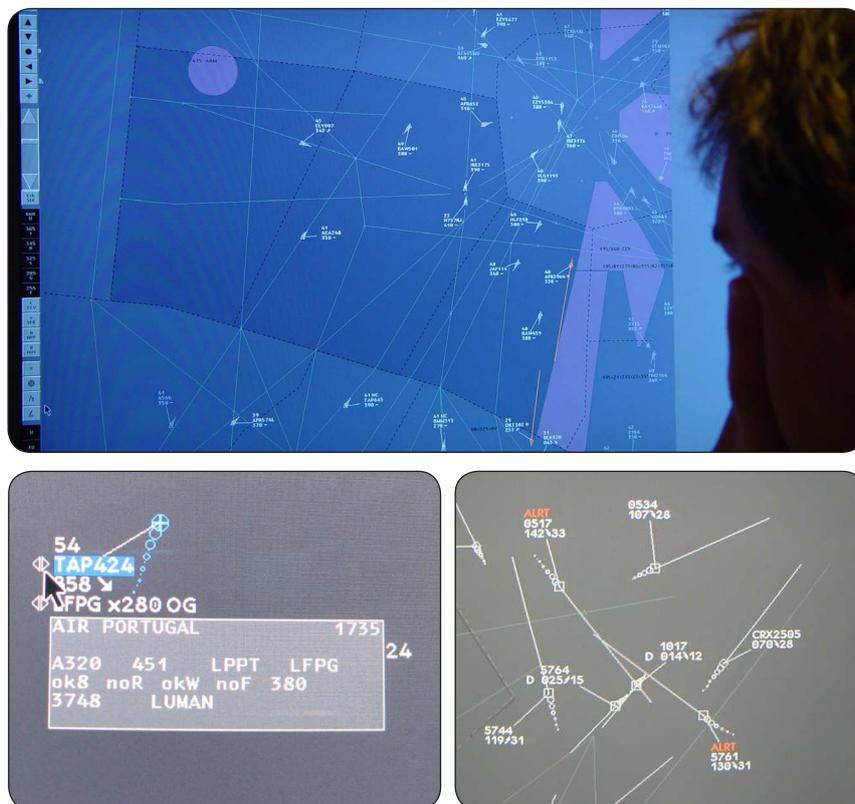


Figure 9.1. L'image radar ODS utilisée en CCR – Figure 9.2. Le plot et l'étiquette radar d'ODS – Figure 9.3. Une alarme STCA

- Le strip papier (Cf. Figure 10). Il constitue, comme son nom l'indique, une bande de papier. Elle est destinée à matérialiser un vol. En contrôle En-Route, un strip papier est imprimé sur la position de contrôle, dix minutes avant l'entrée d'un vol sur le secteur associé. Les strips imprimés relatifs au secteur sont disposés par le contrôleur organique et à destination du contrôleur radariste sur un tableau de strips (Cf. Figure 10). Le contrôleur radariste va répartir les strips en fonction de la nature de la situation supervisée (regroupement les strips des avions en conflit par exemple). Le strip papier regroupe l'ensemble des informations relatives au vol qui sont utiles pour le contrôleur et qui lui permettent de suivre l'évolution de ce dernier. Le strip est composé de trois parties principales, avec de gauche à droite : la case « informations générales » (identification du vol) ; la case « coordination et niveaux » (étapes de vol

dans le secteur) ; la case « route et archive » (itinéraire détaillé du vol). Le strip papier fait office de « pense-bête » pour le contrôleur, car il lui permet de noter les faits marquants des vols (les ordres de pilotage donnés, les changements par rapport au plan de vol initial). Le strip papier joue également un rôle de support de communication entre contrôleurs organique et radariste. L'organique récupère, annote et fait passer les strips au radariste avant que les avions ne rentrent sur le secteur. Ce passage est également susceptible d'être commenté oralement.



Figure 10. Le strip papier et le tableau de strips

- Enfin le dernier outil utilisé par les contrôleurs est le système de communication. Pour le contrôleur organique ce système prend la forme d'un téléphone (Cf. Figure 11.1) lui permettant d'être contacté et de contacter les contrôleurs des secteurs adjacents. Pour le contrôleur radariste, ce système constitue un système de radio appelé « phonie » (Cf. Figure 11.2), et qui par le biais de fréquences (une fréquence radio attribuée à chacun des secteurs) permet d'être contacté par les avions du secteur. A bord des avions, le numéro de fréquence radio est rentré dans le système de radio de bord pour contacter les contrôleurs. Le numéro de fréquence sur laquelle l'avion doit se trouver est communiqué par les contrôleurs (chaque contrôleur annonce lors du message « au revoir », la fréquence à laquelle l'avion doit appeler le secteur suivant).



Figure 11. Les moyens de communication des contrôleurs organique (gauche) et radariste (droite)

1.7. Caractérisation de la tâche de contrôle

La sécurité est indispensable dans le domaine du contrôle aérien. En effet, le moindre dysfonctionnement expose la situation à des risques d'une gravité élevée. De plus l'expertise humaine y est essentielle car l'opérateur est le moyen principal employé pour assurer la sécurité du système.

Ces caractéristiques illustrent la nécessité, pour l'opérateur, de sécuriser la moindre action réalisée et agissant sur la situation de trafic par le biais d'une évaluation des risques. Elle permet d'assurer le maintien d'un niveau de sécurité élevé dans la situation, par le biais de stratégies efficaces. Ici, la place centrale occupée par le « conflit » et la mise en place de moyens de prévention par le contrôleur au sein de la tâche de contrôle est mise en exergue.

Pour synthétiser, la tâche de contrôle est directement liée à une évaluation subjective entourée d'incertitude omniprésente quant à la position des avions, potentiellement différentes de celles prescrites (plans de vol) en fonction des conditions météorologiques (orientation et sens du vent) et des événements se produisant à bord (panne, retard, malaise, prise d'otage par exemple). Pour s'adapter à la dynamique de la situation, le contrôleur actualise la représentation initiale qu'il s'est construit en fonction des événements qu'il s'y produit. Cette caractérisation de la tâche de contrôle est illustrée dans la figure ci-dessous illustrant les grandes étapes de la tâche de contrôle sous la forme d'un cycle :

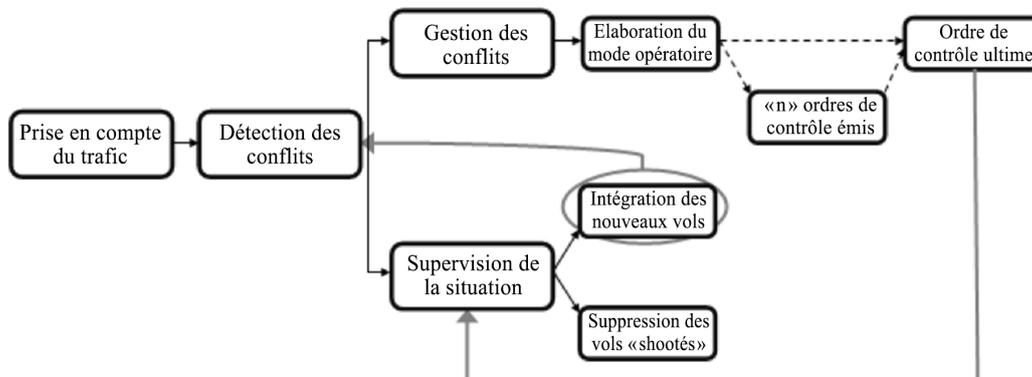


Figure 12. Le cycle de la tâche de contrôle

2. Caractéristiques principales associées à la situation de contrôle aérien

Les présentations du domaine du contrôle aérien et de la tâche effectuée par les contrôleurs aériens permettent de distinguer trois caractéristiques principales associables à la situation de contrôle aérien :

- La première d'entre elles porte sur le processus lui-même. La situation de contrôle aérien, qui est définie comme dynamique, impose des contraintes spécifiques comme l'avaient noté Hollnagel, Mancini et Woods dès 1988. Les informations définissant l'état de la situation, et qui varient au cours du temps, ne dépendent ainsi que partiellement

des actions réalisées par l'opérateur. En effet, le processus continue d'évoluer même sans intervention de la part de l'opérateur. La garantie d'une action adaptée aux évolutions de la situation se traduit par l'intégration de ses états futurs, estimés par l'opérateur à l'aide d'anticipations ou d'attentes (Morineau, Hoc & Denecker, 2003). L'évolution de la situation va produire des changements qui, se combinant à la situation initiale, peuvent fortement modifier son niveau de complexité. Dans ce cas, l'opérateur doit évaluer cette évolution et l'intégrer à son action pour conserver un niveau de performance correct.

- La situation de contrôle aérien est également définie comme complexe. Une importante quantité de données agit sur la situation, ces données présentant de multiples interactions entre elles. L'intégration de l'état de la situation, ainsi qu'une analyse et un tri d'informations sont donc nécessaires pour que l'opérateur puisse gérer la situation, et ce notamment en vue de ses limites de capacité de traitement de l'information et de mémoire de travail (Baddeley, 1998 ; 2000). L'opérateur humain est, bien entendu, un des éléments qui caractérise la situation de contrôle aérien. Tout d'abord, il est essentiel de pointer la place occupée par l'opérateur (le contrôleur aérien) dans ces situations. Il y représente, pour ainsi dire, le dernier « filet de sauvegarde », puisqu'il est capable d'analyser, de s'adapter, et d'agir sur la situation en fonction d'un contexte donné. L'opérateur humain qui vise à assurer la sécurité de la situation de trafic en évitant les rapprochements hors norme entre avions, est généralement le dernier recours du système pouvant agir sur la situation pour éviter l'occurrence d'un accident.

Paradoxalement, l'opérateur est généralement rendu responsable des catastrophes, même si celles-ci résultent d'une situation trop complexe à gérer en raison de l'enchaînement d'évènements imprévus ou/et d'erreurs de conception des systèmes embarqués (Reason, 1990). Cette caractéristique révèle la part d'incertitude associée aux situations de l'aéronautique et à la nécessité d'effectuer une gestion continue des risques. Cette gestion qui est réalisée par les services de gestion et les autorités de contrôle doit être intégrée par le contrôleur au cours de l'exécution de sa tâche quotidienne.

- Les contrôleurs aériens sont également caractérisés par leur niveau d'expertise. Ils ont tous un niveau d'expertise minimal acquis par le biais d'une formation poussée. Elle garantit leurs aptitudes à gérer ce type de situations dans une enveloppe de situations données où leurs compétences sont directement applicables. Cependant, ce niveau d'expertise n'est pas figé et évolue avec l'expérience acquise par les opérateurs, comme le souligne le courant Naturalistic Decision Making (NDM ; Klein, 2008). Cette évolution s'accompagne par l'alimentation d'une « bibliothèque » de représentations en mémoire qui permettent des raisonnements à base de cas. Elles correspondent en fait à des sous-ensembles « configuration de situation/mode opératoire associé » où pour une situation particulière, l'opérateur a été en mesure de définir un plan d'action efficient qu'il estime pouvoir réutiliser en conséquence. Cette bibliothèque est essentielle à l'action menée par l'opérateur car elle lui permet de gérer des situations

de façon économique en termes de ressources cognitives mobilisées (Leplat, 1988). Lorsque la situation n'est pas incluse dans sa bibliothèque, l'opérateur doit construire un plan d'action adapté à la situation rencontrée. Dans ce cas, une phase d'analyse particulièrement coûteuse est nécessaire.

Schématiquement, le niveau d'expertise de l'opérateur dépend de l'étendue de sa « bibliothèque » lui permettant de contrôler économiquement la situation (Bainbridge, 1989 ; Klein, 2008). De plus, le niveau d'expertise agit directement sur la façon dont le contrôleur gère ses ressources (Hoc & Amalberti, 2007). Une autre particularité associée à ces opérateurs porte sur leur adaptabilité. Cette caractéristique peut se décliner sous plusieurs formes. Lorsqu'il exécute sa tâche, le contrôleur va être amené à s'adapter à un niveau d'exigences qui va varier au cours du temps. Il va également devoir réguler, en fonction du niveau d'exigences défini, le niveau de ressources cognitives qu'il va mobiliser. Cela induit une gestion des priorités visant à définir, selon la situation, l'objectif visé pour un temps donné.

- La dernière caractéristique associée à la situation de contrôle aérien porte sur la tâche à réaliser. La situation de contrôle aérien est aussi multifocale. En effet, le nombre important de données définissant la situation peut être constitué de différents ensembles (instruments par exemple). Lorsque ces derniers sont traités indépendamment par l'opérateur, son attention, son analyse voire son action se focalise sur une partie de la situation. Lorsqu'il exécute une tâche donnée, l'opérateur va donc interrompre le contrôle d'une partie de la situation, pour une durée plus ou moins importante. Il est dès lors possible de distinguer au sein de la tâche principale plusieurs sous-tâches potentiellement concurrentielles (en termes de temps alloué et de ressources cognitives requises), mais complémentaires car toutes indispensables à la bonne réalisation de la tâche principale. Pour pallier cela, le contrôleur doit réaliser une gestion en parallèle du temps et des ressources pour réaliser les différentes sous-tâches, qui se traduit par une priorisation des tâches.

Les tâches sont également caractérisées par le niveau de performance à atteindre. La place centrale occupée par la sécurité dans ces situations, implique que le niveau de performance que l'opérateur doit viser ne peut être minimal, sans quoi la situation pourrait rapidement se dégrader de par ses évolutions.

Ainsi, à partir des caractéristiques du processus, de l'opérateur et des tâches, on déduit que l'opérateur de la situation de contrôle aérien, et plus généralement dans une situation dynamique, doit gérer la sollicitation de ses ressources cognitives. Dans le cas inverse, il s'exposerait à des phases de saturation où la compréhension de la situation, la performance de certaines sous-tâches voire la sécurité des opérations seraient remises en cause. Ici, la notion de charge mentale prend toute son importance car elle permet d'opérationnaliser cette gestion des risques et des ressources cognitives.

3. Les transformations d'envergure du système de contrôle du trafic aérien envisagées

Dans un avenir plus ou moins proche, le contrôle aérien va être amené à subir des transformations d'envergure. En plus de présenter les raisons qui poussent à de tels changements, cette partie vise à introduire les projets de recherche qui ont été initiés pour définir le contrôle aérien du futur. Cette présentation illustre également dans quel contexte se situe le travail de recherche qui a été mené et qui sera détaillé dans la deuxième partie du manuscrit.

3.1. Pourquoi changer le système de contrôle actuel ?

L'évolution du système de contrôle aérien Français au cours du vingtième siècle, évoquée précédemment, montre que depuis les années 1960 et l'introduction de l'image radar (Cf. I.1.1.1), le contrôle aérien n'a plus connu de transformation d'ampleur relative aux aides à la décision. Cette observation illustre une certaine vétusté du système, du moins en ce qui concerne son architecture puisqu'au fil des années certaines évolutions technologiques y ont tout de même été apportées (introduction des alarmes dans les années 1980, des écrans LCD en position de contrôle dans le milieu des années 2000 par exemple).

En parallèle, le domaine de l'informatique ayant vu le jour à la fin de la seconde guerre mondiale, a connu un essor considérable depuis les années 1970 et l'invention de l'ordinateur personnel. Dorénavant, les ordinateurs peuvent assurer le traitement automatique d'informations. Cette faculté associable aux machines permet de leur confier la réalisation de tâches de plus en plus variées et complexes, auparavant destinées aux opérateurs humains. Une illustration de cette évolution peut être donnée dans le domaine de l'aéronautique et plus précisément du pilotage d'avion. Avec l'introduction de système de pilotage automatique, les pilotes d'un avion se sont vus changer de rôle durant la phase de croisière, passant d'opérateur (tenir le manche) à superviseur du système pilotant l'avion (consultation de la normalité des données affichées sur les écrans des instruments de bord).

Une telle transformation du travail justifie une nouvelle voie de collaboration au sein d'un système de travail entre l'Homme (l'opérateur humain de la situation) et la Machine (les ordinateurs et les fonctions qui lui sont associées). L'Interaction Homme Machine (IHM) va en effet agir significativement sur la performance atteinte. En effet, si un opérateur ne comprend pas ou mal, l'action réalisée par la machine alors il peut adopter un comportement inadapté, compromettant l'atteinte de l'objectif visé (Parasuraman, 1997). Cette offre de nouveaux moyens techniques montre donc la possibilité d'optimiser les systèmes en confiant à des machines une partie des tâches (de calcul notamment), pour faciliter et optimiser la capacité de gestion de l'opérateur humain.

Enfin, les prévisions de trafic aérien pour les années à venir annoncent une hausse significative du niveau de trafic aérien au niveau mondial, principalement localisée dans la zone Asie (Cf. Figure 13). Les prévisions sont notamment liées à l'explosion

du trafic aérien en Asie. L'évolution de trafic prédite se traduit pour le contrôle aérien par une augmentation de la demande. Si aucun changement n'est apporté au système de contrôle actuel, et ce malgré l'augmentation de trafic, alors le système se verrait confronter à une remise en cause de la sécurité du système dont la capacité de traitement serait dépassée.

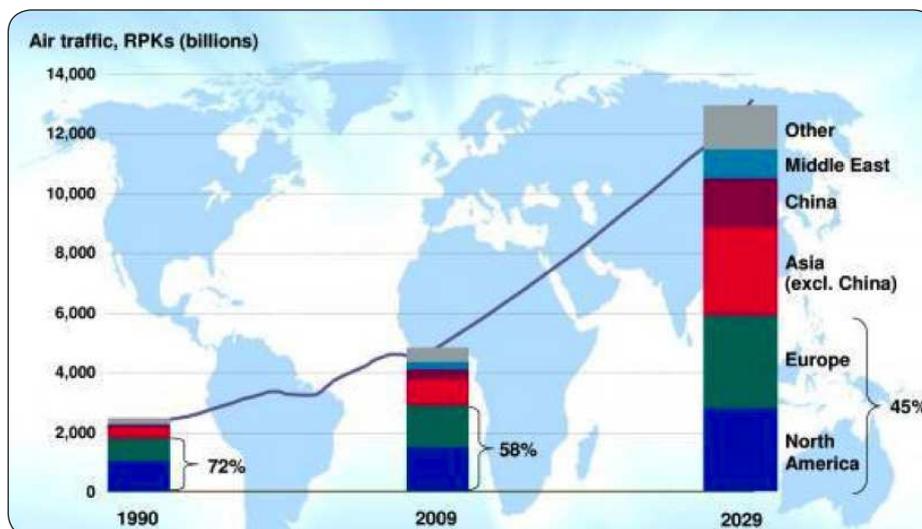


Figure 13. Évolution de la densité du trafic aérien mondial de 1990 à 2029 (Boeing, 2010)

Le besoin d'évolution du système actuel de contrôle aérien est donc justifié par plusieurs faits. Même si c'est l'évolution du contexte, s'illustrant par une prévision d'augmentation du trafic aérien, qui paraît la plus pesante quant au besoin de changement, la corrélation entre vétusté technologique du système actuel et choix des moyens technologiques disponibles présage la mise en place de modifications de grande ampleur.

3.2. Les pistes d'évolutions explorées

Depuis de nombreuses années, la recherche en aéronautique vise à définir ce que seront les nouveaux outils du contrôleur. Globalement, on peut distinguer quatre axes principaux et successifs qui ont été étudiés, en partie par les services de recherche et développement de l'aviation civile française (DGAC/DSNA/DTI/EEI, ex-CENA), pour définir des perspectives d'évolution destinées au contrôle aérien :

- Le premier d'entre eux a consisté à remplacer les strips papier par des strips électroniques. Une telle modification a pour objectif d'introduire de nouvelles technologies, en l'occurrence celle de dalles tactiles, dans la position de contrôle.

L'intérêt principal du strip électronique porte sur la prise en compte de l'état de la situation de trafic par le système informatisé. Le renseignement des strips effectué par l'opérateur est dans ce cas reconnu et analysé par le système, ce qui ouvre de nouvelles possibilités en termes d'intégration d'outils d'aide à la gestion du trafic (aide à la détection, voire à la prise de décision) et de moyens de prévention. L'interface de référence illustrant cet axe d'évolution est l'interface DigiStrips (Mertz et Vinot, 1999). DigiStrips (Cf. Figure 14) est en fait un tableau de strips électroniques pouvant se coupler à toute image radar. Cette interface met en œuvre des concepts innovants

tels que l'interaction directe, la reconnaissance de gestes simples, la reconnaissance d'écriture... De telles technologies visent à optimiser l'interaction entre le contrôleur et l'interface, et à limiter l'impact du remplacement du papier par une surface informatisée.



Figure 14. L'interface DigiStrips

- Le deuxième axe d'évolution a été concentré sur la suppression du strip au profit d'un environnement tout électronique. Cette perspective correspond à la suppression du strip dans son intégralité. L'ensemble des informations initialement regroupées dans le strip est désormais réparti dans l'interface de l'écran radar. Cela implique une modification en termes de renseignement du système. Auparavant le contrôleur renseignait les strips quant au comportement, particularités et ordres dédiés à chaque vol. Avec l'introduction d'un système « tout électronique », le contrôleur doit renseigner le système informatisé par le biais de menus et de boîtes fonction. De plus, les flux des avions, avant représentés par la couleur des porte-strips ou la position des strips sur le tableau de strips, sont dans ce cas représentés par des listes de vols (réparties par secteur adjacent au secteur). En termes de proposition de plateformes, cet axe d'étude est à associer avec le prochain axe d'évolution détaillé dans la suite du texte.
- L'axe suivant porte sur l'implantation de systèmes d'aide à la décision dans la position de contrôle toute électronique, systèmes capables d'analyser le trafic pour notamment en détecter les conflits susceptibles de se produire. La présentation des conflits détectés est faite par le biais d'un agenda, qui constitue un pense-bête pour les contrôleurs. Il vise une aide à l'anticipation et à la planification de leur tâche en fonction de la charge de travail qu'ils vont devoir gérer. Deux concepts de plateformes de contrôle (Cf. Figure 15) peuvent être cités pour illustrer cette perspective d'évolution destinée au contrôle aérien En-Route. La première d'entre est la plateforme ERATO (En Route Air Traffic Organizer), aussi appelée E.E.E (Environnement Electronique ERATO). La philosophie d'ERATO initiée à la fin des années 1980 est de donner au contrôleur des outils capables de l'assister dans sa tâche. Les fonctions assimilées à

ERATO ont été déterminées à partir de modélisations du raisonnement du contrôleur et de sa façon de résoudre les conflits. E.E.E représente en quelque sorte le contrôle aérien de demain car il est actuellement en test dans deux centres de contrôle En-Route Français (Bordeaux et Brest), avec une adoption en opérationnel imminente.

La deuxième plateforme citée correspond en quelque sorte au successeur de E.E.E. En effet, la plateforme 4-Flight intègre les concepts des outils coopératifs définis par ERATO, mais ce dans un environnement technique plus récent. Cet environnement inclut notamment un nouveau système de traitement des plans de vols visant à optimiser les trajectoires de vols, appelé Coflight.



Figure 15. Les images radar d'ERATO (gauche) et de 4-Flight (droite)

- Enfin le dernier axe d'évolution porte sur l'intégration de systèmes informatisés en mesure d'analyser et d'agir sur le trafic aérien. En plus d'étudier le trafic aérien afin d'en détecter les éventuels conflits, le système est dans ce cas en mesure de tester différentes propositions de résolution à destination des conflits détectés. Ces solutions correspondent à de faibles modifications de vitesse à destination d'un ou de plusieurs des avions impliqués dans la situation conflictuelle. L'objectif principal de cet axe d'évolution réside dans la proposition d'une automatisation partielle de la tâche de contrôle. La finalité d'une telle perspective est d'augmenter significativement la capacité de traitement du système de contrôle du trafic aérien. Cette perspective a été notamment étudiée grâce à la plateforme ERASMUS (Cf. Figure 16).



Figure 16. La plateforme ERASMUS

Le concept ERASMUS (Villiers, 2004), a pour philosophie la résolution de conflits via des ajustements dits « subliminaux ». Il n'inclut pas le partage de notifications avec les contrôleurs quant à l'action menée par le système (résolutions en cours, effectuées), puisque cette action est censée être imperceptible (déplacement des avions sur l'image radar) de par la petite grandeur des changements de vitesse effectués par les avions. L'ensemble de ces perspectives, visant à inclure des systèmes informatisés dans un environnement électronique est actuellement à l'étude dans une partie d'un projet Européen d'envergure, le projet SESAR.

3.3. Le projet SESAR, Single European Sky Air traffic management Research

Le projet Européen SESAR, a été initié en 2004. Il a pour principal objectif de fournir à l'Europe les systèmes de gestion du trafic aérien qui permettront de moderniser les systèmes actuels. Ce projet ambitieux dresse quatre finalités relatives au futur système de gestion du trafic aérien, qu'il vise à développer (SESAR, 2012) :

- Augmentation de la capacité de gestion du trafic par 3.
- Amélioration de la sécurité par un facteur de 10.
- Réduction du facteur environnemental par vol de 10%.
- Réduire les coûts de gestion du trafic aérien de 50%.

Depuis 2008, la phase de développement du projet SESAR est menée. Cette phase doit produire la nouvelle génération de systèmes définie dans la phase de définition (menée de 2004 à 2008). Outre Atlantique est mené un projet équivalent à destination des systèmes de gestion du trafic aérien sur le territoire Américain : Le projet NextGen (Next Generation Air Transportation System).

L'ampleur du projet SESAR justifie une répartition du projet en sous-ensembles (Cf. Figure 17). Ces sous-ensembles sont appelés « Work packages ». Chaque Work Package a en charge la détermination et l'évaluation de systèmes relatifs à une partie du système de gestion du trafic aérien, appelé ATM (Air Traffic Management).

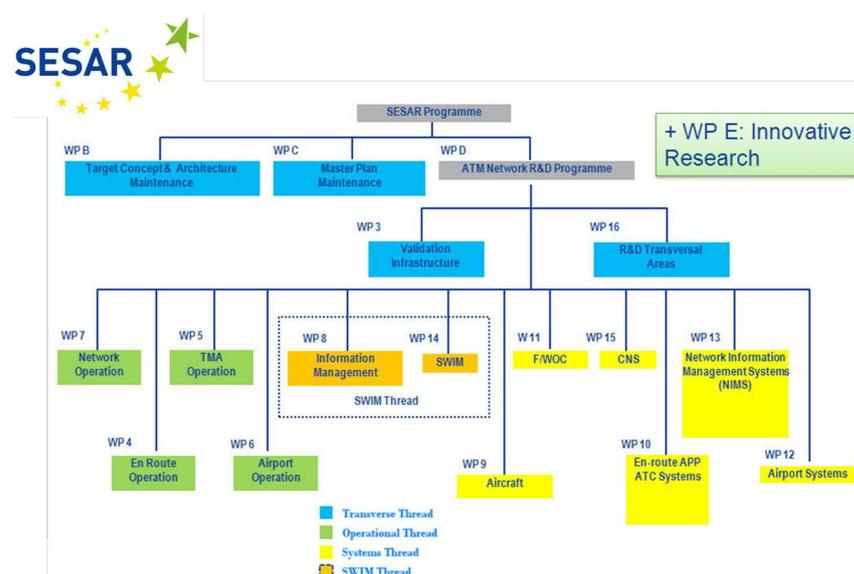


Figure 17. L'architecture du projet SESAR à travers la répartition des work packages

La partie du projet dédiée à la refonte des opérations En-Route est le Work Package 4. Ce projet à part entière, étudie de nombreuses composantes du système En-Route (15 au total), que ce soit à bord (procédures et outils utilisés par les pilotes) ou au sol (procédures et outils dédiés au contrôle aérien). Une des perspectives qui y est étudiée concerne la tâche de séparation des trajectoires en trafic En-Route (projet 4.7.2). Dans cette partie du projet, l'intégration de systèmes intelligents capables de prévoir les trajectoires des avions afin de détecter les conflits susceptibles de se produire et de résoudre une partie d'entre eux automatiquement est étudiée (Cf. Figure 18). Ce service destiné aux contrôleurs aériens est double et comprend :

- Le TC-SA (Trajectory Control by Speed Adjustment) aussi appelé solveur, est un service de « déconflictualisation ». Il reprend le fonctionnement du solveur proposé dans le cadre du projet ERASMUS. Son rôle est d'ajuster la vitesse des avions (+/- 5% de la vitesse initiale) afin d'optimiser leur séparation dans le cas de risque de conflits à moyen-long termes (horizon de 20 à 30 minutes).
- Le CD (Conflict Detection) aid. Ce service assiste le contrôleur lors de l'identification et la gestion des conflits en l'aidant notamment à planifier ses tâches. Le CD aid fournit une détection et un filtre des conflits susceptibles de se produire sur le secteur dont le contrôleur à la charge, c'est pourquoi il est communément appelé « détecteur ».

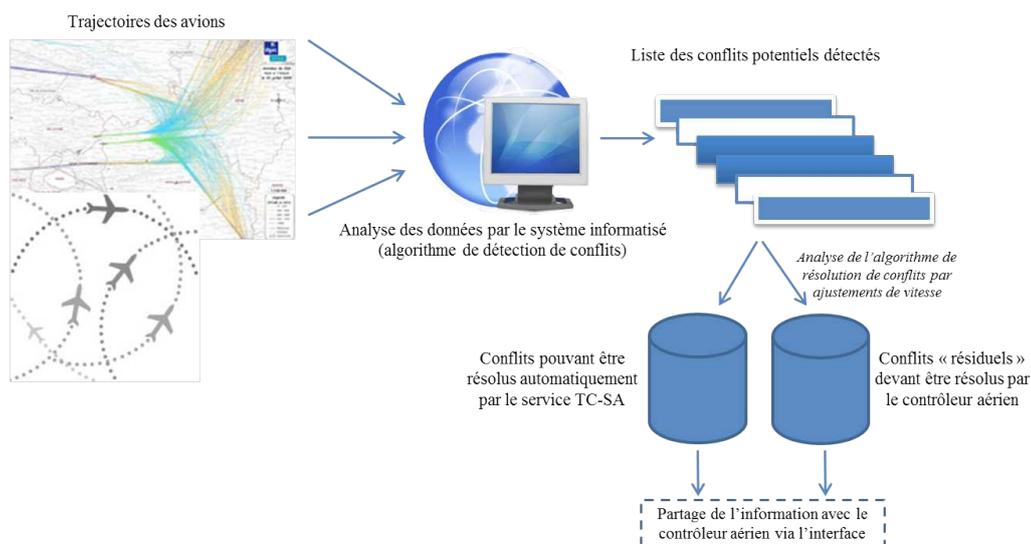


Figure 18. Cycle de fonctionnement du service d'aide à la détection et à la résolution des conflits proposé dans le cadre du projet SESAR, WP.4.7.2

Une telle intégration nécessite des adaptations autant au niveau de l'équipement des avions, que des positions de contrôle aérien. Pour que des interventions relatives au comportement de l'avion soient possibles sans intervention de la part du contrôleur, les systèmes informatisés nécessitent un moyen de communication avec les pilotes des avions. Pour que cela devienne possible, une nouvelle génération d'ordinateur de bord des avions (le FMS, Flight Management System) a été pensée. Cette dernière rend possible au système informatisé de proposer des changements de vitesse à certains des avions impliqués dans d'éventuels de conflits et ce afin de les résoudre avant que le contrôleur ne puissent les détecter. Le pilote est lui en mesure d'accepter ou de refuser la proposition de modification de vitesse proposé par le service.

En complément, des adaptations sont requises au niveau des positions de contrôle. L'évolution de la situation envisagée a pour conséquence de confier à un système informatisé une partie de la gestion du trafic aérien. Dès lors, le contrôleur aérien doit intégrer dans sa façon de gérer le trafic aérien, l'action menée par le solveur et le détecteur, on parle dès lors de coopération entre l'homme et la machine. Pour favoriser cette coopération, l'opérateur doit recevoir des informations sur le comportement de la machine. Cet échange peut notamment se faire par le biais de l'interface utilisée par les opérateurs. Dans le cas de l'introduction des services TC-SA et CD aid, deux adaptations principales ont été pensées quant à l'interface (Cf. Figure 19) :

- La première consiste à « tagger » les avions qui ont accepté une modification de vitesse du TC-SA, par une horloge verte. Quand l'horloge s'affiche, elle indique que le vol en question est en contrainte et régule sa vitesse pour atteindre un point de l'espace (une balise) à une heure précise. Le message implicite pour le contrôleur, est de ne pas modifier la trajectoire de l'avion auquel cas la résolution entreprise par le système informatisé serait annulée. Cependant, le contrôleur reste maître de la situation et s'il juge nécessaire d'agir sur un avion sous contrainte TC-SA alors son action prédomine celle du système.
- La deuxième adaptation concerne les conflits détectés par le CD aid. Pour montrer aux contrôleurs l'ensemble des conflits dits « en entrée » (relatifs aux trajectoires initiales des avions) susceptibles de se produire dans le secteur dont il a la charge, et qu'il va devoir résoudre, un « agenda » est implanté sur le côté de l'image radar. L'agenda constitue un axe temporel dynamique sur lequel les conflits, représentés sous forme d'étiquette, viennent se disposer en fonction de l'heure à laquelle ils sont susceptibles de se produire.

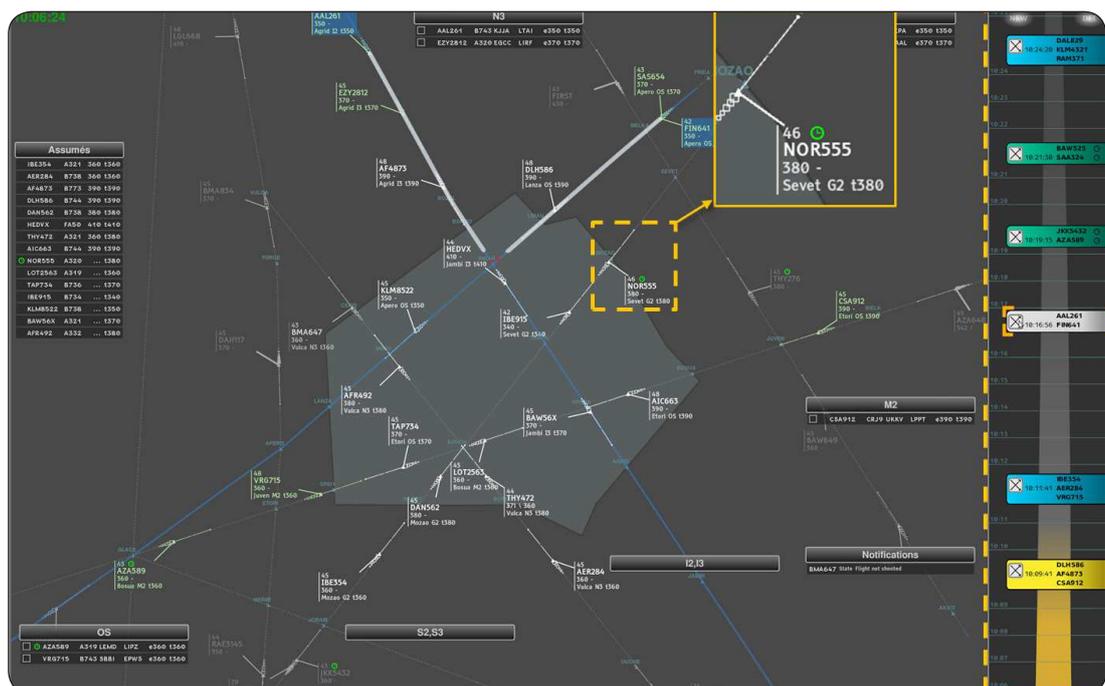


Figure 19. L'action du solveur et du détecteur illustrée par l'interface

4. Les besoins d'évaluation en résultant

La présentation du domaine de contrôle aérien, ainsi que des perspectives d'évolution qui ont été et sont actuellement étudiées montre que ce domaine s'apprête à subir des transformations d'envergure. Deux phases de transformation semblent se dessiner : le système de contrôle de demain illustré par ERATO et le passage à un système tout électronique, et le système « d'après-demain » actuellement étudié dans le cadre du projet SESAR et qui vise le passage à une automatisation partielle de la tâche de contrôle focalisée sur la détection et la résolution des conflits.

L'ensemble des modifications envisagées va avoir plusieurs incidences sur la tâche réalisée par le contrôleur aérien En-Route :

- La première d'entre elles concerne le changement d'outils utilisés par le contrôleur pour réaliser sa tâche. Cette modification va nécessiter une longue phase de familiarisation à l'utilisation de ces nouveaux outils, avant de posséder les automates d'actions qu'ils ont avec les outils du système actuel.
- La suppression du strip papier au profit d'un système informatisé va nécessiter une modification de la méthode de travail des contrôleurs. Les informations relatives à chaque vol qui étaient renseignées sur les strips papiers, devront avec l'utilisation d'une interface tout électronique, être renseignées au système informatisé par le biais de l'interface (menus, boîtes fonction). Cette modification a également pour conséquence le changement de mode de construction de la représentation mentale de la situation de trafic à superviser par le contrôleur. Dans le système actuel, le contrôleur illustre sa représentation mentale de la situation par le biais de la gestion du tableau de strips. Avec l'utilisation d'un système électronique, seules des listes de vols (listant les avions en entrée du secteur, classés par secteur de provenance) permettent d'alimenter ce mécanisme cognitif.
- Enfin, l'introduction de systèmes en mesure de détecter et de résoudre sur une partie des conflits détectés va également engendrer des modifications quant à la façon dont les contrôleurs vont réaliser leur tâche. Avec de tels systèmes, la phase de détection des conflits « en entrée » actuellement réalisée par les contrôleurs est supprimée. Le rôle du contrôleur est plus centré sur la résolution avec une liste de cas à résoudre proposée par le système informatisé. La phase de résolution est elle aussi modifiée avec un partage des résolutions entre le contrôleur et le système. Ce partage va donc nécessiter une collaboration entre agent humain (le contrôleur) et agent artificiel (le solveur). Même si le contrôleur garde le pouvoir de décision et d'action, il va devoir intégrer l'action du solveur en évitant de perturber les résolutions qu'il a entrepris. L'action du solveur a pour principal avantage de réduire le niveau de sollicitations mentales du contrôleur. Cette prise en compte va quant à elle constituer un nouveau type d'informations à traiter, à mémoriser et à inclure au plan d'action du contrôleur.

Les modifications destinées au système de contrôle aérien ont pour objectif principal l'augmentation de la capacité de gestion. Ici, nous avons vu quels pourraient être les

futurs outils du contrôleur En-Route et les impacts que ces derniers généreraient sur la tâche de contrôle.

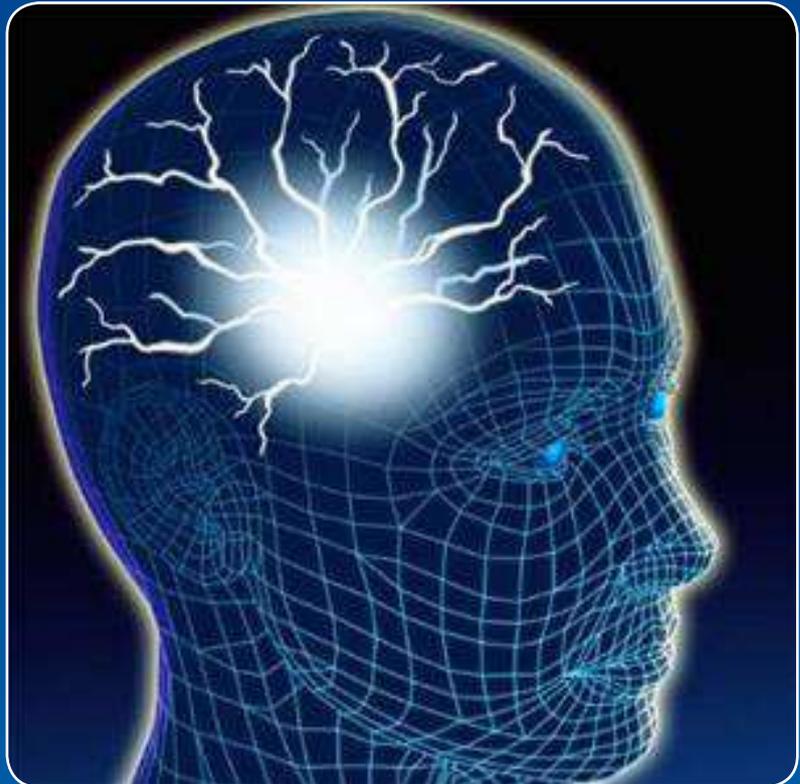
Dans le domaine du contrôle aérien, où la sécurité est essentielle, l'intégration de nouveaux dispositifs en opérationnel ne peut se faire sans l'assurance d'une plus-value apportée par les changements envisagés. Avant d'envisager le processus d'intégration en opérationnel, une phase d'évaluation prenant la forme d'expérimentations est requise. Il y a plusieurs moyens d'évaluer l'ampleur des effets générés par les modifications sur le système de contrôle aérien : analyse de la performance (consommation de kérosène, respect des heures de plans de vols), analyse de la coopération entre l'opérateur et le système (nombre de renseignements donnés par l'opérateur), l'évaluation de la qualité de l'Interaction Homme Machine (nombre d'erreurs, durée de renseignement, retour d'expérience de l'opérateur)...

La présentation du domaine du contrôle aérien a permis de mettre en avant le rôle essentiel joué par l'opérateur humain, le contrôleur aérien, dans ce système dynamique et complexe. Cette observation justifie le fait que l'impact généré par le changement sur le contrôleur doit être inclus à part entière dans la phase d'évaluation des modifications effectuées. Dans cette présentation, il a également été pointé la place occupée par la gestion des ressources cognitives effectuée par les contrôleurs aériens et notamment du niveau de charge mentale qu'ils ressentent. Un moyen adapté pour évaluer l'impact des changements sur le contrôleur consisterait dès lors à étudier les conséquences du changement sur le niveau de charge mentale qu'il ressent lors de l'utilisation de nouveaux outils.

Dans grand nombre d'études portant sur le contrôle aérien, la charge mentale des contrôleurs est évaluée afin d'obtenir un retour d'expérience quant à la sollicitation, à l'investissement cognitif requis par la tâche expérimentale effectuée (Loft et al., 2007). Cependant, les approches proposées dans ces études pour évaluer la charge mentale des contrôleurs aériens sont diverses et parfois même très différentes les unes des autres. De plus, les définitions mentionnées par les auteurs sont elles aussi distinctes, ce qui parfois pourrait laisser penser que l'objet des évaluations n'est pas le même.

Deux interrogations méritent donc d'être examinées à partir des connaissances théoriques. La première d'entre elles porte sur la notion de la charge mentale et plus particulièrement sur la définition et la modélisation de ce concept ; la deuxième est quant à elle centrée sur la façon dont la charge mentale peut être évaluée et donc sur les méthodes d'évaluation qui peuvent être mises en place dans le cadre de l'étude de la charge mentale d'opérateurs. Le prochain chapitre de ce manuscrit constitue une synthèse des réponses que l'on peut apporter à ces interrogations.

La gestion de la charge mentale : définition, modélisation et méthodes d'évaluation



Ce chapitre, dédié à la notion de charge mentale, vise à présenter une synthèse relative à l'étude et à la définition de la charge mentale. L'intérêt de cette présentation théorique est d'étudier l'objet principal du travail présenté dans ce manuscrit. A partir d'un historique de l'usage de la notion, des observations que l'on peut y associer, mais aussi de résultats issus de travaux antérieurs portant sur la gestion de la charge mentale, une vue d'ensemble du concept sera proposée. Cette dernière a pour objectif de distinguer les éléments centraux qui agissent sur la gestion de la charge mentale. Enfin, les méthodes permettant d'évaluer la charge mentale seront présentées, afin d'en déduire l'approche la plus adaptée pour ce travail de doctorat.

1. La charge mentale : Approches lui ayant été dédiées et observations relatives à son étude

1.1. L'étude de la charge mentale : Démodée, inappropriée ou essentielle et toujours d'actualité ?

En France, l'usage de la notion de charge mentale a pour origine les années 1970 et a parallèlement concerné des domaines, tel que celui de la Psychologie Expérimentale (Cf. Leplat, 2005) ou encore celui de l'Ergonomie (Laville, Teiger & Duraffourg, 1972). Cette diversité d'usage montre que la charge mentale a été abordée de manière différente, ayant pour conséquence une perception multiple de la notion.

Une des différences à l'origine de cette perception concerne les populations cibles des études menées dans ces domaines respectifs : l'Homme dans le cas de la Psychologie Expérimentale, l'Homme au travail appelé Opérateur dans le cas de l'Ergonomie. Il est donc schématiquement possible de distinguer deux approches principales quant à l'étude de la charge mentale. En effet, alors que dans le domaine de la Psychologie Expérimentale la notion de charge mentale fait appel aux notions de limites de traitement, et de capacité de mémoire (approche interne), elle est en Ergonomie plus reliée à la quantité de sollicitations dont l'opérateur doit répondre et sur la façon dont il va y répondre (approche plus macro incluant les spécificités de la tâche et l'expertise de l'opérateur).

Le travail présenté dans ce manuscrit porte sur l'analyse de la charge mentale des contrôleurs aériens, des opérateurs donc. Le concept de charge faisant l'objet de ce chapitre, est dès lors relatif aux sollicitations cognitives générées par l'activité de travail, et peut être dénommée comme « la charge mentale de travail » (Robert, 2013). Cette caractéristique justifie que dans la suite du texte, la notion d'opérateurs sera principalement utilisée pour désigner l'Homme au travail. Le terme d'activité de travail quant à lui induira la réalisation de la tâche par l'opérateur.

La notion de charge mentale renvoie également au domaine de la macro-cognition, qui fait référence à des fonctions cognitives mises en œuvre dans des situations de prise de décision naturelles et dynamiques et dans des systèmes complexes (Hoc & Amalberti, 1999). Ces situations impliquant de nombreuses notions pour les définir, conduisent à une complexité associée à la notion de charge mentale, d'où cette sensation d'imprécision à son égard (Leplat, 2005).

L'histoire de l'utilisation de la notion de charge mentale en Ergonomie présentée par Theureau (2001) montre que cette notion, tout d'abord encensée (Leplat & Pailhous, 1969), puis prise pour « scientifiquement morte » (De Montmollin, 1986, 1994, 1995), s'est retrouvée dans de nombreuses études de terrain (Theureau, 1997). Ce constat vient illustrer les observations de Gopher et Donchin (1986), notifiant que ce sont les sollicitations de terrain qui ont fortement orienté les travaux sur la charge mentale. C'est également le constat de Colle et Reid (1999) exprimant l'utilité importante de l'étude de la charge mentale dans l'industrie. La persistance de l'intérêt porté à la

notion de charge mentale montre également qu'accéder au niveau de charge mentale d'opérateurs présente un enjeu majeur en ergonomie cognitive (Tort, 1976 ; Chanquoy, Tricot & Sweller, 2007). En effet, elle permet d'obtenir des informations capitales sur le mode opératoire employé par l'opérateur pour réaliser une tâche spécifique. Elle représente également un moyen d'évaluer la qualité des interactions qui s'opèrent entre l'opérateur et les outils qu'il utilise au cours de l'exécution de la tâche (Loft, Sanderson, Neal & Mooij, 2007).

La rétrospective relative à la charge mentale mentionnée préalablement pointe le nombre important de travaux consacrés jusqu'à présent à l'étude et à l'évaluation de la charge mentale en France. Cet ensemble de travaux se voit élargi de façon significative si l'on se situe au niveau mondial. Un tel élargissement permet également d'inclure l'approche centrée facteurs humains (*Human Factors*), caractéristique des pays anglophones. Par conséquent de nombreuses références issues de domaines divers sont disponibles pour définir ou plus généralement décrire la charge mentale. Dresser une revue de l'ensemble de ces travaux est très difficilement envisageable et certainement inappropriée pour venir clarifier le discours relatif à la charge mentale, qui, si l'on en croit la littérature, peut être perçue comme une notion floue (Jourdan & Theureau, 2002). L'approche alternative, certainement plus propice à l'éclaircissement, consiste dans un premier temps à analyser un grand nombre de ces contributions pour en déduire les caractéristiques communes et à travers elles, les paramètres centraux associés à la notion de charge mentale.

Ici, le résultat obtenu par le biais d'une telle analyse est détaillé. Plus précisément, au travers de la description de cinq contributions différentes, les principales caractéristiques associées à la notion de la charge mentale sont mises en exergue.

1.2. Description d'une sélection de définitions de la charge mentale et caractéristiques associées

Cinq contributions sont détaillées dans cette partie afin de distinguer les principales caractéristiques de la notion de charge mentale. En plus d'avoir été de très nombreuses fois citées, ces définitions issues de domaines scientifiques différents (Ergonomie, « *Human Factors* », Psychologie, Ingénierie industrielle), ont pour principal intérêt de refléter des courants de pensées différents, mais toutefois complémentaires dans une étude sur la notion de charge mentale se voulant la plus exhaustive possible.

- La première définition citée est celle proposée par Leplat (1977). Il définit la charge mentale comme les ressources cognitives mobilisées par l'opérateur lui permettant de répondre aux exigences de la tâche qu'il réalise. Elle représente en quelque sorte le degré de mobilisation du sujet, la fraction de sa capacité de travail qu'il investit dans sa tâche (Leplat & Pailhous, 1969).

Ici, la charge mentale est désignée comme une conséquence de l'interaction entre l'homme et la tâche qu'il réalise. Elle démontre également la non-passivité de l'opérateur face à la charge mentale qu'il ressent (Spérando, 1977).

- Si l'on se réfère à l'approche proposée par Meshkati (1988), alors on peut considérer que la charge mentale est une construction multidimensionnelle. Elle est définie comme « reflétant l'interaction d'éléments tels que les demandes des tâches et du système, les capacités de traitement et d'effort de l'opérateur, les critères de performance subjectifs, le comportement de traitement de l'information, les stratégies de l'opérateur et, la formation ainsi que l'expérience antérieure des opérateurs » (p.309).

Dans ce cas, c'est la multitude de facteurs agissant sur la charge mentale qui est mis en exergue. Cette caractéristique multifactorielle du concept explique en partie la difficulté constatée pour quantifier le niveau de charge mentale (Hancock & Meshkati, 1988).

- Les différents facteurs interagissant sur la gestion de la charge mentale constituent dès lors un point de départ pour aborder cette notion. Ainsi, Wickens (2000) la définit fondamentalement en termes de relation entre l'offre (ressources disponibles) et la demande (exigences). Cette approche met l'accent sur les variations de charge mentale ressentie par l'opérateur au cours de l'exécution de la tâche. En fonction du niveau d'exigences de la tâche auquel il doit répondre, l'opérateur va venir réguler son activité à travers l'objectif qu'il se fixe. Ce mécanisme adaptatif est assimilable à une théorie provenant de l'économie : la théorie de l'équilibre partiel (Marshall, 1890). Cette théorie détermine, pour un marché considéré, le vecteur de prix comme l'égalisateur entre l'offre (les ressources disponibles) et la demande (l'objectif visé). Par conséquent, la charge mentale correspondrait au vecteur de prix, et la tâche, au marché.

Dans cette contribution, les aspects de « rendement » sont associés à la gestion des ressources cognitives de l'opérateur, supposant la notion de rapport qualité/prix entre le niveau de performance atteint et le niveau de ressources cognitives mobilisées.

- Hart et Staveland (1988) illustrent de façon éloquente la difficulté observée pour définir le concept de charge mentale (voir aussi Jourdan & Theureau, 2002). Ils le désignent ainsi comme l'un de ces concepts qui se comprend bien en général, mais qui est difficile à définir de façon particulière.

D'après eux, la charge mentale peut être désignée comme un construit hypothétique représentant le coût pour un humain d'accomplir une tâche avec un certain niveau de performance. Cette représentation illustre la place centrale occupée par la performance visée dans la détermination du niveau de charge mentale. Cette définition pointe également une certaine variabilité de la charge mentale, qui serait notamment expliquée par les différences intra-individuelles de la gestion des ressources cognitives. En effet, au cours de l'exécution de la tâche, l'état dans lequel se trouve l'opérateur varie selon le niveau « d'aptitude » cognitive dans lequel il estime se trouver (De Jong, 2001 ; Lautrey, 2003). Ce niveau dépend principalement de la motivation de l'opérateur et est susceptible de varier selon les émotions ressenties par l'opérateur (énervement, joie, fatigue, de confiance, etc.).

- La dernière approche pour définir la charge mentale est plus récente. La charge mentale y est présentée comme le niveau d'effort mental (la quantité de ressources mobilisées) requis pour la réalisation d'une tâche et pour un individu donné (Tricot & Chanquoy, 1996).

Deux caractéristiques relatives à la charge mentale sont ici mises en exergue. Tout d'abord, l'impact de la variabilité interindividuelle sur le niveau de charge mentale ressentie est désigné. Cela induit le fait que pour un niveau d'exigences de la tâche équivalent, plusieurs opérateurs risquent de ressentir un niveau de charge mentale différent, s'illustrant notamment par l'adoption de modes opératoires distincts et des habiletés cognitives différentes. L'autre caractéristique soulignée porte sur l'incidence de la nature de la tâche et du niveau d'expertise de l'opérateur sur le niveau de charge mentale ressentie qui est incluse à l'évaluation qu'il réalise.

1.3. Les notions associées au concept de charge mentale

Les caractéristiques de la charge mentale, mises en évidence par le biais des contributions citées et détaillées précédemment, montrent qu'un ensemble de facteurs vient conditionner le niveau de charge mentale, ce dernier apparaissant comme une résultante. Notamment, trois notions apparaissent comme centrales dans cette détermination : la capacité, les ressources et la performance.

1.3.1. La capacité de l'opérateur

La notion de capacité cognitive renvoie aux limites mentales de l'opérateur. Elle correspond à la borne maximale de traitement de l'information (Wickens, 1992), ou encore à la quantité maximale de ressources que peut mobiliser un individu (Barouillet, 1996). Au cours de la réalisation d'une tâche, la capacité représente une contrainte principale pour l'opérateur. Le concept de capacité peut être présenté sous une métaphore mécanique, et correspondant au régime maximal du « moteur cognitif » au cours de l'exécution d'une tâche.

1.3.2. Les ressources mobilisables par l'opérateur

La notion de ressources caractérise plutôt l'attention de l'opérateur (Norman & Bobrow, 1975) et désigne la composante énergétique ou intensive de l'activité (Leplat, 2003). Pour Wickens (1992), les ressources représentent l'énergie déployée au cours de l'exécution de la tâche pour améliorer l'efficacité.

En ce sens, le concept de ressources est souvent présenté sous forme d'une métaphore mécanique. Les ressources y constituent une quantité de carburant utilisée par le « moteur cognitif » (mentionné précédemment) pour l'exécution d'une tâche ou partagée entre les différentes tâches à réaliser. Pour Gopher (1986), il faut distinguer dans la notion de ressources, la composante structurelle et la composante fonctionnelle, la première présentant les ressources comme la somme de différents modules, alors que la seconde y voit au contraire l'existence d'un « tout ». Le mode de gestion du niveau de ressources implique la sollicitation d'une proportion plus ou moins importante d'unités rassemblées au sein d'un ensemble.

Le recours aux ressources cognitives nécessite donc une modulation de l'énergie déployée par l'opérateur traduisant la présence d'un effort mental. La mobilisation de ressources génère un coût, appelé coût cognitif, qui correspond à la part nécessaire d'investissement à mobiliser pour réaliser une tâche. Il représente, en somme, la façon dont l'opérateur va percevoir le niveau d'exigences de la tâche et dont il envisage d'y répondre (Sweller, Chandler, Tierney & Cooper, 1990).

1.3.3. La performance visée et atteinte

La performance permet de qualifier le résultat obtenu suite à l'exécution de la tâche (Famose et al, 1993). Plus précisément, elle permet de définir la qualité du travail effectué en se référant aux objectifs associés à une tâche spécifique (Delignières, 2004). La performance peut être évaluée par le biais d'indicateurs de performance correspondant aux critères de réussite de la tâche réalisée par l'opérateur (Bayssié & Chaudron, 2002). Il est essentiel de noter que les indicateurs de performance sont propres à chaque tâche. Dans le cas du contrôle aérien, la performance va notamment être définie par le nombre de situations résolues, la présence de situations hors-normes (détériorant significativement le niveau de performance car illustrant une baisse de la sécurité), le type et l'effectif changements de trajectoires pour résoudre les conflits (plus les changements sont précis et faibles en effectif, plus la performance est élevée), le raccourcissement de trajectoires (donner une directe à un avion pour lui permettre de traverser le secteur le plus rapidement possible).

Lors de l'exécution d'une tâche il faut distinguer deux types de performance : la première d'entre elles est la performance visée, l'objectif que se fixe l'opérateur auquel est associé un résultat attendu ; la seconde est la performance, le résultat obtenu suite à l'exécution de la tâche. Cette distinction est importante car elle peut jouer un rôle important dans le comportement et les choix de stratégies mis en place par l'opérateur.

1.3.4. Synthèse des observations relatives à la définition de la charge mentale

Le travail de synthèse relatif à la notion de la charge mentale détaillé dans les paragraphes précédents a permis de souligner les différents critères qu'une définition de la notion de charge mentale devrait satisfaire.

Le résultat de cette analyse permet de présenter la charge mentale comme suit :

« La charge mentale est définie comme la résultante de l'ajustement entre ressources cognitives et exigences de la tâche pour un objectif fixé. Cet ajustement est déterminé par une double évaluation subjective portant sur l'ampleur des objectifs de la tâche, ainsi que sur le niveau de ressources cognitives à investir, sachant que le seuil capacitaire des ressources mobilisables reste une limite infranchissable. C'est en articulant l'objectif, les ressources mobilisées et la performance visée que l'opérateur régule son activité. Il s'agit là encore d'une évaluation subjective, qui non seulement se porte sur la qualité du résultat obtenu mais aussi sur les moyens mis en œuvre pour y parvenir ».

Cette définition de la notion de charge mentale permet de souligner la complexité du mécanisme cognitif requis pour réguler le niveau de charge mentale. Le rôle essentiel de l'opérateur dans la détermination et la régulation du niveau de charge mentale qu'il ressent a également été mis en exergue.

Cependant parler de régulation, notamment dans le cas des situations dynamiques et complexes, suggère la présence d'un système évolutif au cours du temps. Étudier la régulation de la charge mentale d'opérateurs de situations dynamiques et complexes nécessite en conséquence d'étudier plus finement les travaux sur la gestion dynamique de la charge mentale.

2. La gestion dynamique de la charge mentale à travers les modèles de gestion de la charge mentale

Mentionner et étudier la gestion de la charge mentale implique d'accepter - au moins pour partie - de faire référence à une métaphore économique (la gestion) commune en Psychologie (Navon & Gopher, 1979 ; Wickens, 1992). En Psychologie Ergonomique, les métaphores gestionnaires sont d'ailleurs fréquentes et généralement employées pour mettre l'accent sur l'existence de plusieurs alternatives dans une situation donnée (Cellier, 1996). Une multitude de modèles théoriques propose d'illustrer le mécanisme de gestion de la charge mentale. L'énumération de l'ensemble de ces propositions sans l'intégration d'une analyse complémentaire ne représente qu'un intérêt modéré, dans la mesure où elle ne permet pas une avancée dans l'explication synthétisée du mécanisme de gestion de la charge mentale. Au contraire, un rassemblement des modèles, en fonction des facteurs qui la composent et la façon dont ils sont reliés les uns par rapport aux autres, semble bénéfique et plus adapté au besoin de compréhension. Cette approche vise à proposer une vue d'ensemble des « engrenages » composant le mécanisme relatif à la gestion de la charge mentale.

La réalisation d'une telle étude a permis d'identifier trois principes essentiels relatifs au mécanisme de gestion de la charge mentale : la présence de zones de confort, le rôle essentiel joué par la dimension temporelle de la situation et le parallélisme des tâches effectuées par l'opérateur. Basée sur des contributions antérieures, en termes de modélisation de la gestion de la charge mentale, la suite du texte détaille et illustre ces paramètres.

2.1. La présence de zones de confort

Au cours de l'exécution d'une tâche, l'opérateur n'est pas passif face aux sollicitations qui s'exercent sur son activité (Spérandio, 1971). Plus précisément, la gestion de la charge mentale ressentie vise à maintenir son niveau dans des valeurs dites « acceptables ». Les valeurs acceptables sont celles situées entre deux bornes extrêmes :

- Le niveau de surcharge défini comme le seuil capacitaire des ressources mobilisables par l'opérateur pour répondre aux exigences d'une tâche. Ce niveau est susceptible de varier sous l'effet de la motivation de l'opérateur, permettant de dégager des

ressources habituellement indisponibles (Siegel & Wolff, 1969 ; Liao & Moray, 1993). La surcharge peut être relevée chez l'opérateur qui présente une sensation de perte de contrôle de la situation. En effet, dans ce cas l'opérateur n'est plus en mesure de garantir une action adaptée car il n'a pas intégré l'ensemble des informations qui caractérisent la situation à superviser.

- L'autre seuil relatif au niveau de charge mentale ressentie est le niveau de sous-charge (Spérandio, 1980 ; Wiener & Curry, 1984). Dans ce cas, le niveau d'exigences de la tâche est faible, à tel point que le faible coût engendré ne permet pas de rentabiliser le travail cognitif. L'opérateur y est en phase « d'endormissement cognitif » et risque de ne pas être en mesure de répondre favorablement aux exigences soumises par manque d'investissement. Cette borne a tout autant d'importance que le seuil de surcharge cognitive car elle peut entraîner des conséquences néfastes aussi bien sur l'action de l'opérateur, que sur la performance obtenue (Young & Stanton, 2002).

Entre ces bornes, il existe une zone intermédiaire, que l'on peut appeler « zone de confort ». Cette dernière correspond à une gamme de niveaux de charge mentale satisfaisants pour lesquels l'opérateur dispose d'actions disponibles, d'une distance à l'objectif suffisante selon le temps disponible (Hancock & Williams, 1993). La représentation d'une zone plutôt que d'un niveau de confort, permet d'intégrer les différences chez les opérateurs (inter et intra-individuelles).

Le réglage du niveau de charge mentale de l'opérateur à une valeur « confortable » se fait par un système de contrôle, appelé contrôle cognitif (Hoc & Amalberti, 2003). Ce système vise à garantir un niveau de performance suffisant répondant aux exigences de la tâche ainsi qu'aux événements imprévus susceptibles de se présenter (Koechlin, Ody & Kouneiher, 2003) et un coût cognitif acceptable en fonction du seuil capacitaire de l'opérateur. Le contrôle cognitif permet à l'opérateur de mettre en jeu dans le bon ordre et avec une intensité adaptée, les mécanismes ou les représentations cognitives répondant favorablement à la situation. L'opérateur préserve ainsi une capacité d'action en cas d'imprévu, ce qui garantit un travail efficace dans la durée. Cette caractéristique de la gestion du contrôle cognitif est appelée compromis cognitif (Amalberti, 1996).

Les mécanismes de gestion employés par l'opérateur définissent un compromis entre la performance visée et l'engagement cognitif à employer (Bainbridge, 1977). Cela permet d'illustrer l'existence d'une performance satisfaisante au détriment d'une optimisation de la performance (Hancock & Meshkati, 1988). L'atteinte d'une situation confortable en termes de charge mentale ressentie consisterait donc pour l'opérateur à régler de façon optimale le rendement entre ressources cognitives engagées et performance atteinte, ce qui renvoie à une notion d'efficience (Hollnagel, 2009).

Par ailleurs, les opérateurs peuvent, en complément du compromis cognitif, s'adapter à la nature de la situation à gérer pour en conserver le contrôle. En effet, en employant le minimum de ressources cognitives ils peuvent atteindre leur objectif, et cela, en se basant principalement sur leurs expériences passées et les automatismes qu'ils ont à leur actif (bibliothèques de situations gérées mentionnées dans le chapitre 1).

Quand cela n'est pas suffisant, la régulation de l'activité peut consister à modifier le mode opératoire employé. Spérandio (1971) illustre ce cas de figure par le changement de stratégie opéré par les contrôleurs aériens pour faire face à une augmentation de la charge mentale. Cette modification de l'objectif peut s'illustrer par différents recours :

- L'optimisation des tâches : L'opérateur modifie les objectifs relatifs à une tâche spécifique. Cette observation est illustrée par la gestion des communications verbales des contrôleurs aériens, qui vont réguler le nombre et le contenu des communications selon le niveau de charge de trafic (Kuk, Arnold & Ritter, 1999).
- La suppression des tâches : L'opérateur définit une priorité sur une tâche. Il peut ainsi privilégier une tâche en augmentant le niveau de performance à atteindre, tout en supprimant certaines tâches. Pour les pilotes d'hélicoptères cette priorisation consiste à maintenir un niveau de performance optimal sur les tâches essentielles, tout en lésant les tâches définies comme secondaires pour lesquelles le niveau de performance diminue en conséquence (Segal & Wickens, 1990). Pour les pilotes en condition de stress psychologique, l'ignorance de tâches dans l'ordre inverse de leur criticité leur permettrait de réduire leur niveau de charge mentale (Raby & Wickens, 1990).
- Le report de tâches : L'opérateur segmente son action selon un ordre de priorité donné aux différentes tâches. Cela consiste à reporter dans le temps le traitement des tâches définies comme secondaires. Fischer, Orasanu et Montvalo (1993) ont montré que les équipages d'avions les plus efficaces décidaient régulièrement de reporter des tâches secondaires.

La présence d'une zone de confort dans la gestion de la charge mentale réalisée par l'opérateur est notamment percevable dans le modèle CCM, *Compensatory Control Model* (Cf. figure 20) proposé par Hockey (Hockey, 1993, 1997). Ce modèle centre sa représentation de la charge mentale sur l'interaction qui se produit entre la tâche et l'opérateur. Il met en avant l'adaptabilité de l'opérateur quant à l'effort cognitif qu'il va générer pour répondre au niveau d'exigence de la tâche qu'il a préalablement estimé. Dès lors, lorsque le niveau d'exigences va augmenter, l'opérateur va amplifier son effort cognitif en mobilisant plus de ressources cognitives. De plus, le modèle montre le caractère protecteur de l'opérateur quant au niveau de performance attendu, via les objectifs qu'il fixe en fonction de ses propres limites. Ses limites dépendent à la fois de son état physique et mental (influencé par la fatigue, le stress, les émotions...), et l'ensemble des contraintes qui s'exercent sur lui, comme les facteurs environnementaux (le bruit par exemple).

Toutefois, une limite principale peut être associée au modèle CCM. Dans cette proposition, l'opérateur est présenté comme réactif à un seul niveau d'exigences de la tâche. Les capacités d'adaptation et de créativité permettant à l'opérateur d'adapter son action selon les conditions qui s'imposent à lui ne sont donc pas incluses. Cette limite traduit notamment la non prise en compte de la dimension temporelle dans la gestion de la charge mentale réalisée par l'opérateur.

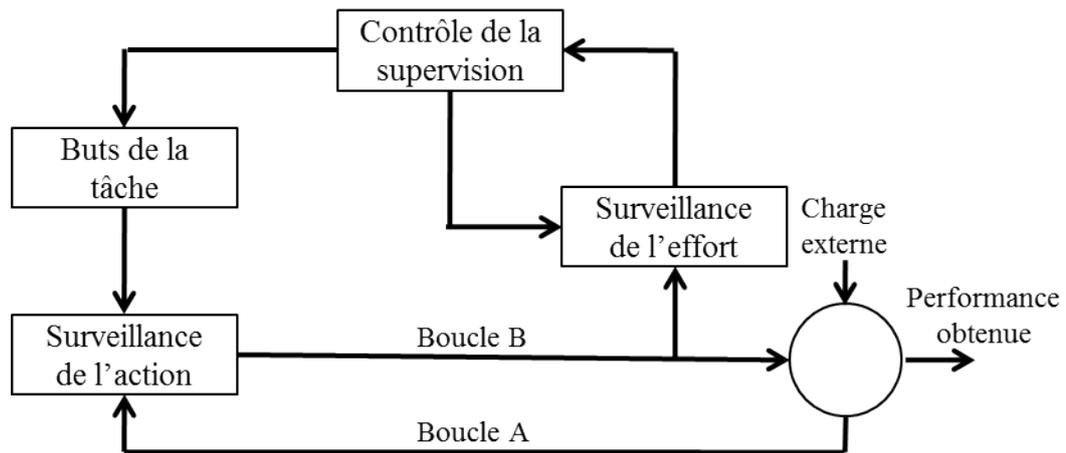


Figure 20. Traduction du Compensatory Control Model (Hockey, 1993, 1997)

2.2. La dimension temporelle

Comme dans toute situation dynamique, les contrôleurs aériens doivent faire face à une évolution continue du processus supervisé, évolution non nécessairement provoquée par l'action des opérateurs (Hoc & Amalberti, 1999). L'opérateur doit donc intégrer à la planification de ses actions, une gestion du temps à part entière qui peut se penser sous la forme d'une gestion des risques (Valot, 1996). En effet, la maîtrise du risque est associée au délai de décision ou de réaction, à des échéances et à des délais (Smith & Hancock, 1995). La gestion du temps consiste notamment en la recherche d'une structure temporelle garantissant la sécurisation des actions de l'opérateur (Mc Elhatton & Batelle, 1993).

De nombreux opérateurs des situations dynamiques collaborent avec un ensemble de systèmes automatisés pour contrôler le processus dont ils ont en charge la supervision afin d'y prévenir l'occurrence de problèmes (Bainbridge, 1987 ; Valot, 1996). Ils doivent donc conserver un niveau suffisant de conscience de la situation (*situation awareness*, Endsley, 1995) pour favoriser une compréhension satisfaisante de la situation. Cette transcription va lui permettre de recourir ensuite à une action adaptée.

La représentation de la situation que se construit l'opérateur inclut donc des données sur l'évolution de la situation (Van Daele & Carpinelli, 1996). L'évolution de la représentation portant sur les états futurs de la situation souligne le recours à un processus anticipatif (Allen, 1983). La prévision permet à l'opérateur de simuler mentalement l'évolution du processus ainsi que l'effet de ses potentielles actions sur le système (Spérandio, 1988 ; Leplat, 1985). Cependant, l'opérateur peut disposer d'attentes quant aux événements qui vont se produire (Denecker, 1999). Ainsi, par son expertise, l'opérateur peut mener une anticipation sub-symbolique qui lui évite de recourir à un niveau symbolique (la prévision) plus coûteux en ressources cognitives. Ce processus permet notamment au contrôleur aérien de se trouver « toujours devant le trafic » (Hoc & Amalberti, 1994). Par ailleurs, l'empan temporel de l'anticipation est déterminé par la planification des actions (Hoc, 1987). Le résultat de la planification

est la définition d'un plan d'action composé d'un ensemble d'actions à mettre en place à différentes échéances temporelles déterminées. Le plan d'action est défini par deux éléments (Van Daele & Carpinelli, 1996) : le « quoi faire » qui définit la nature de l'action, et le « quand faire » déterminant le moment d'occurrence de l'action. Or, l'empan temporel d'anticipation est limité pour garantir l'efficacité de l'action (Crawford & Wiers, 2001). Ainsi, lorsque l'opérateur juge que le niveau d'incertitude relatif à son action est trop élevé, il peut décider de repousser sa mise en place jusqu'à un moment qu'il va définir comme plus opportun. Cet empan temporel correspond au *Maturing-time* (Averty, Athènes, Collet & Dittmar, 2002) aussi appelé « laisser-faire », ou encore au Time to collision défini par Chalandon (2003) en référence à l'accident qui doit être anticipé.

Pour résumer, le temps peut être défini comme essentiel dans l'exécution de la tâche des opérateurs de situations dynamiques car il intervient dans la construction de la représentation de la situation sur laquelle les opérateurs basent leurs choix d'actions. Cela induit une mobilisation de ressources spécifiquement dédiées au temps, d'où une contribution significative du temps, à l'ajustement du niveau de charge mentale ressentie par l'opérateur.

L'intégration des aspects temporels dans la gestion de la charge mentale peut notamment être illustrée par le modèle de la charge mentale dynamique proposée par Hancock et Chignell en 1988 (Cf. figure 21). Cette conceptualisation de la dynamique de la charge mentale est composée de trois dimensions (Hancock & Meshkati, 1988) : le temps disponible pour agir, la distance perçue vers le niveau d'objectif visé (l'éloignement au but) et le niveau d'effort que va requérir l'atteinte du but désiré. Ici, le niveau de charge mentale est présumé comme augmentant en fonction de l'élévation de l'état de l'objectif visé et des contraintes de temps. Quand le temps disponible se réduit, traduisant une pression temporelle plus élevée, le niveau de charge mentale augmente. L'intégration du niveau d'objectif visé par l'opérateur permet également au modèle d'illustrer le comportement adaptatif de ce dernier, et dès lors la recherche de niveaux de confort.

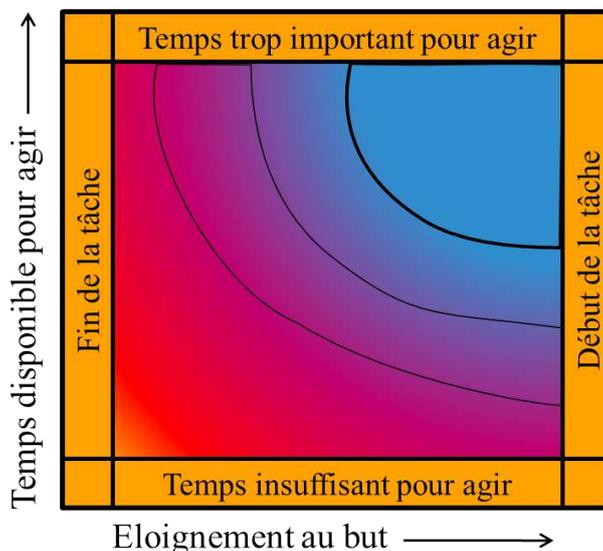


Figure 21. Traduction du modèle de gestion de la charge mentale proposé par Hancock & Chignell (1988)

2.3. Le parallélisme de tâches

La réalisation d'une tâche donnée est souvent associée à une certaine autonomie temporelle et procédurale dans la réalisation des sous-tâches (Rudolph, Schönfelder & Hacker, 1987). Cependant, ces sous-tâches restent indissociables dans l'atteinte de l'objectif de la tâche principale et nécessitent un traitement conjoint.

Pour un opérateur, la décomposition de la tâche permet également de simplifier sa réalisation. Ainsi, les opérateurs peuvent exercer un contrôle cognitif différent en présence de plusieurs tâches parallèles. Plus précisément, trois niveaux de contrôle cognitif ont été définis dans le modèle GSD, *Gestion des Situations Dynamiques* (Hoc & Amalberti, 1994), ainsi que dans le modèle SRK ou *Skill, Rule, Knowledge-based behaviour* (Rasmussen, 1986). Dans ces modèles, les niveaux de contrôle les plus automatiques ont des empan temporels plus courts mais surtout une charge mentale moins importante, alors que les niveaux les plus élevés ont des empan plus longs et une charge mentale plus importante. Le parallélisme entre les niveaux est donc un moyen de réaliser la tâche.

Par ailleurs, le parallélisme implique également une gestion en parallèle de plusieurs objectifs intermédiaires qui nécessitent des transitions entre tâches, correspondant à un switch attentionnel. Cette gestion parallèle doit être associée à celle du temps permettant à l'opérateur de planifier son action. Cette planification vise en partie à répartir pour chacune des sous-tâches, le temps qui lui sera alloué et les moments auxquels ce sera le cas. L'opérateur va, pour les sous-tâches réalisées, définir des échéances temporelles qui vont agir comme des bornes établissant la répartition de l'attention. Elles vont en effet déterminer les périodes de transitions à suivre entre les différentes sous-tâches définies. Le traitement en parallèle de la tâche effectué par l'opérateur est basé sur sa capacité à partager son attention et la charge mentale associée, relevant du système de partage attentionnel.

Le rôle joué par le partage attentionnel dans la gestion de la charge mentale a notamment été intégré au modèle du « processeur central » (Cf. figure 22) fondé sur le concept d'effort mental (Kahneman, 1973). Il décrit le système cognitif gérant l'allocation des ressources attentionnelles pour une tâche spécifique. Kahneman (op. cit.) propose l'existence d'un processeur central chargé de l'allocation des ressources attentionnelles. Ce dernier procéderait à une évaluation des demandes émises par chaque tâche et ajusterait l'attention en fonction de cette analyse. Dans cette représentation, la capacité de l'opérateur à réaliser plusieurs sous-tâches simultanément est mise en exergue, ce qui illustre un traitement en parallèle.

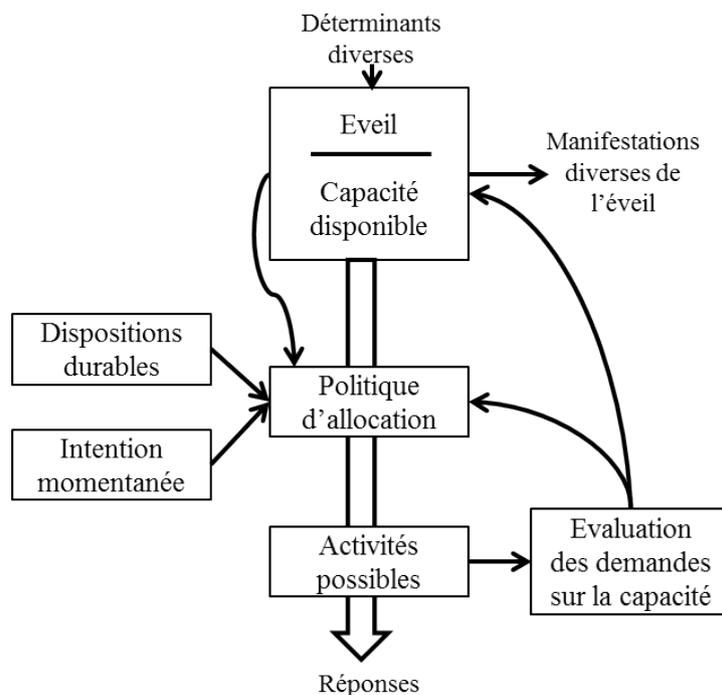


Figure 22. Traduction du modèle du processeur central (Kahneman, 1973)

2.4. Résumé relatif à la gestion dynamique de la charge mentale

L'étude de la gestion dynamique de la charge mentale des opérateurs, effectuée à travers les propositions de modélisations du concept de charge mentale, nous a permis de déterminer les caractéristiques essentielles agissant sur ce mécanisme ; à savoir une gestion économique guidée par des zones de confort du niveau de charge mentale, l'intégration d'une gestion à part entière du temps dans le mode de déploiement des ressources cognitives, et enfin une gestion en parallèle des différentes sous-tâches distinguées dans l'atteinte de l'objectif de la tâche principale effectuée par l'opérateur.

Le niveau de charge mentale ressentie par l'opérateur au cours de l'exécution d'une tâche peut dès lors être défini comme la résultante d'un système d'optimisation complexe de la gestion des ressources cognitives en lien avec des paramètres individuels (motivation, capacité), l'évolution du système au cours du temps (situation dynamique) et la répartition effectuée entre les différentes parties de la tâche (parallélisme de tâches).

Dans le cadre de l'étude de la gestion de la charge mentale, la place du domaine d'étude semble être essentielle. Ainsi, Colle et Reid (1999, p.35) indiquent que « le concept de charge mentale est un construit à visée applicative [...] qui ne présente pas une relation exacte avec les concepts de capacités attentionnelles ou de ressources dans les théories du traitement de l'information ». Dans le même sens, Parasuraman et Hancock (2001) soulignent que la charge mentale de travail doit être considérée comme une variable explicative. Ces observations montrent l'importance d'inclure les caractéristiques du domaine d'application en plus des notions théoriques englobant le concept, et notamment de la tâche effectuée par l'opérateur, dans le cadre de l'évaluation de la charge mentale effectuée et de l'explication qui peut lui être donnée.

Le travail de recherche présenté dans ce manuscrit a pour domaine d'application le contrôle aérien. Afin de définir la façon dont les caractéristiques de cette situation de travail complexe peuvent être incluses à l'étude de la gestion de la charge mentale des opérateurs, une revue des principales propositions de modélisation de la charge mentale des contrôleurs aériens est proposée dans la suite du texte.

3. Les modèles de gestion dédiés à la charge mentale des contrôleurs aériens

La place centrale occupée par les contrôleurs aériens dans le système de gestion du trafic aérien justifie l'intérêt porté à la façon dont « fonctionne » et se comporte cet élément essentiel au bon écoulement du trafic aérien. Comprendre le mode de fonctionnement du contrôleur aérien au cours de son activité consiste notamment à déterminer la façon dont il gère ses ressources cognitives dans le but d'atteindre un niveau de performance élevé, essentiel pour assurer la sécurité quant aux déplacements des avions dans l'espace aérien. Cette gestion relative au niveau de charge mentale qu'il ressent a déjà fait l'objet de nombreuses contributions scientifiques dans lesquelles sont détaillées des propositions de modèles de gestion de la charge mentale des contrôleurs aériens.

Loft, Sanderson, Neal et Mooij (2007) ont proposé de rassembler les contributions principales relatives à la modélisation de la charge mentale de contrôleurs aériens En-Route dans une revue de littérature. De cette contribution, on en retire trois points principaux quant à la modélisation de la charge mentale des contrôleurs aériens, qui sont développés dans les paragraphes suivants.

3.1. Les deux principales architectures de modèles dédiés à la charge mentale de contrôleurs aériens

La charge mentale des contrôleurs aériens a été principalement modélisée à travers deux types d'architecture de modèle :

- Le modèle à boucle ouverte (Cf. figure 23). Dans ce type de modèle, les exigences de la tâche caractérisées par des propriétés de la situation de trafic aérien à gérer par le contrôleur aérien, sont définies comme posant des problèmes à différents niveaux de difficulté. En fonction du niveau de compétences, d'expérience et de la stratégie adoptée par le contrôleur aérien pour gérer la situation, différents niveaux subjectifs de charge mentale de travail vont être ressentis.

Dans ces propositions, la stratégie de l'opérateur est définie comme influençant le niveau de charge mentale de travail ressentie. Ce type de modèle est dès lors plus centré sur le niveau d'exigences de la tâche.

Les modèles proposés par Hilburn et Jorna (2001) et par Mogford, Guttman, Morrow et Kopardekar (1995) viennent illustrer ce type de modèles de la charge mentale de contrôleurs aériens.

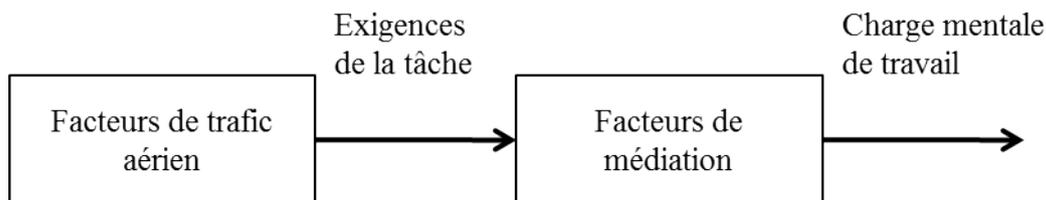


Figure 23. L'architecture de modèles centrés sur les exigences de la tâche de contrôle

Le modèle à boucles fermées ou boucles de rétroaction (Cf. figure 24). Dans ce type de modèles de la charge mentale des contrôleurs aériens, la stratégie de l'opérateur est déterminée comme une variable entre les exigences de la tâche et le travail effectué. A la différence de l'architecture précédente (boucle fermée), ce type de modèles intègre deux boucles fermées, correspondant à des boucles de rétroaction relatives aux exigences de la tâche et au choix de la méthode de travail (stratégie) du contrôleur aérien. Les boucles de rétroaction ont pour objectif d'illustrer le caractère adaptatif du contrôleur aérien en fonction du niveau d'exigences de la tâche qui s'impose à lui, mais aussi en fonction des résultats obtenus par le biais de la stratégie initialement choisie et le niveau de charge mentale de travail lui étant associée. Elle induit notamment le fait que la stratégie opératoire du contrôleur peut être modulée en fonction de son évaluation de la situation. Dans ce type d'architecture de modèles de la charge mentale de contrôleurs, c'est le niveau de charge mentale de travail qui agit sur le changement de stratégie opératoire. La stratégie n'est dans ce cas pas seulement guidée par le niveau d'exigences de la tâche, mais également par le jugement du contrôleur relatif aux priorités de travail correspondant à une hiérarchie de normes à préserver.

L'exemple typique d'un modèle à boucles fermées relatif à la charge mentale de contrôleurs aériens est celui de Spérandio (1971). De nombreuses propositions se sont inspirées du modèle de Spérandio, on peut notamment citer celles de Rouse, Edwards et Hammer (1993) et de Loft, Sanderson, Neal et Mooij (2007).

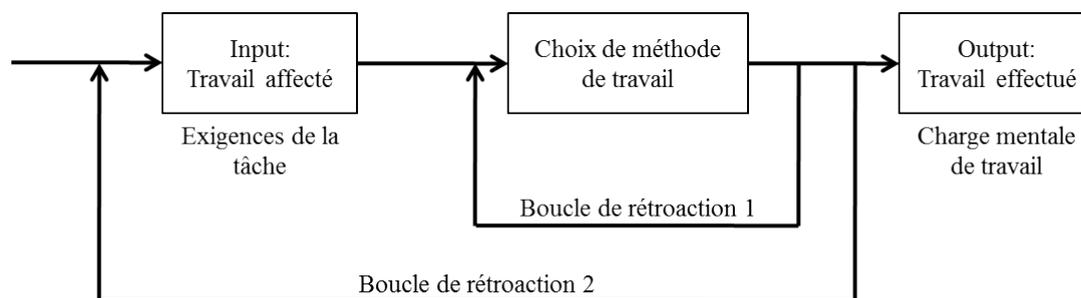


Figure 24. L'architecture de modèles centrés sur la stratégie opératoire des contrôleurs aériens en fonction du niveau d'exigences de la tâche de contrôle

Pour résumer, la charge mentale de contrôleurs aériens a été modélisée à travers deux approches principales : dans la première, la charge mentale y est définie comme une conséquence du niveau d'exigences de la tâche ; dans la seconde, la charge mentale du contrôleur aérien est déterminée comme fonction des exigences de la tâche mais aussi de la stratégie opératoire mise en place pour gérer le trafic.

La seconde approche est basée sur la relation continue qu'entretient le contrôleur aérien avec le système dynamique dont il a en charge la supervision, et dans lequel il représente un élément adaptatif.

3.2. La place occupée par les facteurs de trafic aérien dans le cadre de l'étude de la charge mentale des contrôleurs aériens

L'évaluation de la charge mentale de contrôleurs aériens a été dans de nombreuses études réalisée par le biais de l'analyse des exigences de la tâche de contrôle. Ce type d'approche reflète la modélisation de la charge mentale à travers un modèle à boucle ouverte, où il est fait l'hypothèse que l'exigence des tâches guide la charge mentale des contrôleurs aériens. Il paraît également essentiel de noter qu'actuellement, ce type d'évaluations constitue l'approche centrale pour étudier la charge mentale des contrôleurs aériens.

L'estimation de la charge mentale des contrôleurs aériens à travers les exigences de la tâche peut être effectuée à travers trois types d'approches, se différenciant par les paramètres inclus dans le calcul des exigences de la tâche :

- L'analyse des facteurs de trafic, axée principalement sur le calcul des indicateurs de densité (Chatterji & Sridhar, 2001) et de complexité (Boag et al., 2006). Les facteurs de densité correspondent notamment au nombre d'avions, aux distances horizontale et verticale séparant les différents avions et à la façon dont les séparations évoluent au cours du temps. Les indicateurs de complexité peuvent quant à eux être dissociés en deux catégories : les données relatives au changement d'état des avions dans les trois axes de l'espace (changement d'altitude, de cap ou de vitesse) et celles portant sur les conflits potentiels (vols pour lesquels les trajectoires convergent).
- L'analyse des caractéristiques de l'espace aérien et des contraintes opérationnelles (Histon & Hansman, 2002). Ces données portent sur les propriétés structurelles du secteur (taille, géographie, routes, croisement de routes...) dont le contrôleur a en charge la supervision, et la variation temporelle du trafic en termes de densité.
- La mesure dynamique de la densité (Kopardekar & Magyarits, 2003). Cette approche consiste en l'élaboration d'algorithmes, appelés communément métriques de densité dynamique, élaborés à partir de modèles de régression identifiant l'ensemble des paramètres qui permet de prédire la charge mentale. Le calcul de la charge mentale prédictive dans ce cas consiste à associer à chacun des paramètres définis comme pertinents, une proportion de la charge mentale totale en fonction de son importance prévisionnelle préalablement déterminée.

Les propositions de métriques se dissocient principalement par l'effectif et la nature des indicateurs de complexité intégrés au calcul, et à la proportion leur étant associée dans le calcul global de la charge mentale prédictive. Par exemple, Gianazza et Guittet (2006) proposent une métrique centrée sur l'évaluation de vingt-sept indicateurs de complexité (nombre d'avions, nombre d'avions en montée, nombre d'avions en descente, proximité verticale des avions, proximité horizontale des avions).

3.3. Vers une approche centrée sur l'activité de travail des contrôleurs aériens...

Une approche alternative portant sur l'analyse de la charge mentale des contrôleurs aériens a été récemment introduite (Loft, et al., 2007). Il s'agit d'une approche centrée sur la charge mentale plutôt que sur les exigences de la tâche. Elle a pour particularité principale d'intégrer, en plus des exigences de la tâche, l'activité de l'opérateur.

Ainsi, le modèle du TLI (*Task Load Index*) ou Indice de Sollicitation propose une évaluation de la charge mentale des contrôleurs aériens centrée sur leur activité (Averty et al., 2002 ; Averty, Collet, Dittmar, Athènes, & Vernet-Maury, 2004). Le TLI est une métrique qui définit les actions de l'opérateur comme le moyen de réguler son propre niveau de charge mentale. Il a pour principal objectif d'évaluer l'effet des différentes stratégies mises en place par les contrôleurs aériens sur leur niveau de charge mentale, en modélisant la temporalité de leurs interventions sur le trafic. L'élaboration de ce modèle a notamment été possible grâce à l'utilisation de données empiriques.

Le TLI est composé de deux parties principales :

- La première consiste à évaluer les exigences de la tâche. Pour un secteur donné, le niveau d'exigences de la tâche est calculé en attribuant à chacun des avions composant le trafic géré, une valeur de charge mentale associée (allant de 1 pour les moins coûteux à 3,5 pour les plus coûteux). Les avions les moins coûteux (valeur de charge : 1) sont ceux qui requièrent un simple monitoring de la part du contrôleur et dont les échanges vont se résumer aux messages « bonjour » et « au revoir » à la fréquence. Les avions plus coûteux (associés à une valeur de charge de 2) vont quant à eux demander au contrôleur de réaliser des actions simples pour assurer leur sécurité ou tout simplement leur bon déplacement dans l'espace aérien. A noter que les avions en conflit pour lesquels le contrôleur va devoir modifier les trajectoires initiales constituent les avions les plus coûteux (valeur de charge de 3,5).
- La seconde partie du TLI évalue l'effet de l'activité de contrôleur aérien sur la gestion des conflits (Cf. figure 25). Il décompose cette gestion en phases successives délimitées par six bornes temporelles (H0 à H5) :
 - H0, correspondant à l'heure de début de prise en compte d'un avion par le contrôleur,
 - H1, étant distingué comme l'heure de début de surpondération ; c'est-à-dire l'heure à partir de laquelle le contrôleur a pris conscience de la situation conflictuelle,
 - H2, définit l'heure de résolution du conflit, correspondant à l'heure où l'ordre ou l'ensemble d'ordre de contrôle résolvant le conflit est émis (communiqués aux pilotes des avions concernés via la fréquence radio),
 - H3, l'heure de fin de conflit, autrement dit l'heure à partir de laquelle les deux avions se séparent à nouveau positivement,

- H4, l'heure où les avions auraient atteint le CPA (*Closest Point of Approach*) si aucune action de résolution n'avait été mise en place par le contrôleur. Le CPA correspond au point de séparation pour lequel les deux avions impliqués dans un conflit sont les plus proches les uns des autres,
- H5, l'heure de fin de prise en compte du conflit par le contrôleur, car défini comme résolu et comme n'existant plus.

Le TLI met en avant la prise en compte et la gestion du temps effectuées par le contrôleur, et notamment le temps s'écoulant entre la détection d'un conflit et le moment où l'action de résolution est mise en place, désigné sous le terme de *Maturing Time*.

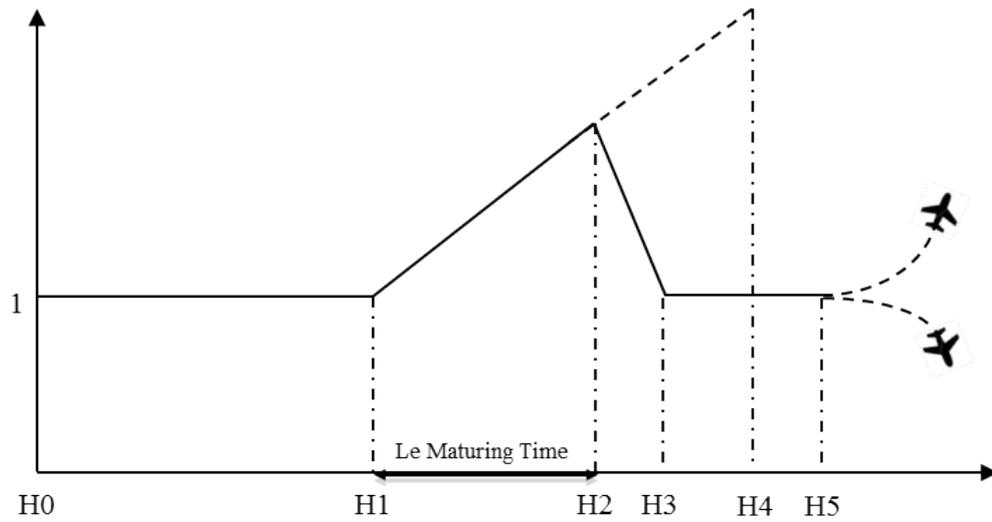


Figure 25. La deuxième partie du TLI (*Task Load Index*) relative à la détection et à la gestion des conflits

La revue relative à l'étude et à la modélisation de la charge mentale de contrôleurs aériens permet de mettre en exergue trois paramètres essentiels dans la gestion de la charge mentale effectuée par les contrôleurs aériens : le premier est relatif aux exigences de la tâche et notamment à la présence de conflits et à la façon dont perçoit le contrôleur aérien le niveau d'exigences en fonction de ses capacités ; le deuxième illustre la représentation subjective du contrôleur aérien, à savoir la stratégie opératoire mise en place qui peut se distinguer par sa nature (les actions réalisées) et sa temporalité (moment d'occurrence des actions) ; enfin le troisième correspond au résultat du travail réalisé et au niveau de performance atteint pouvant lui être associé.

L'approche centrée sur l'activité de travail dans le cadre de l'étude de la charge mentale de contrôleurs aériens, notamment à travers l'exemple du TLI, illustre la façon dont les études empiriques peuvent venir alimenter la théorie, et soulignent ainsi leur importance. La réalisation d'expérimentations visant à évaluer la charge mentale de contrôleurs aériens nécessite également de s'attarder sur les méthodes d'évaluation disponibles, et sur la façon dont elles doivent être implémentées à la situation expérimentale. Une telle vue d'ensemble permet de distinguer les points forts et les limites associables à chacune des approches, pour ainsi déterminer celles qui sont les plus adaptées à l'étude réalisée.

4. Les méthodes d'évaluation proposées dans le cadre de l'étude de la charge mentale

L'évaluation de la charge mentale peut être envisagée au travers de deux attentes principales : la détermination du seuil limite de gestion de l'opérateur traduisant une approche capacitaire ; la seconde approche centrée sur l'activité se veut plus fonctionnelle car elle vise à définir ce qui dans la situation étudiée est à l'origine des variations du niveau de charge mentale observées, enregistrées.

Trois techniques d'évaluation principales peuvent être distinguées pour évaluer la charge mentale (Wickens, 2000 ; Amalberti, 2005). La première vise à analyser la performance. Ce type d'évaluation est généralement associé à une approche capacitaire. Les deux autres techniques sont associées à l'approche fonctionnelle et sont communément appelées approches objectives et subjectives. Elles sont notamment distinguées par leur focus, l'une centrée sur le retour conscient de l'opérateur (externe) et l'autre sur les conséquences engendrées sur son organisme (interne), mais aussi par leur moment et leur durée d'intervention par rapport à la tâche effectuée. L'approche subjective consiste dans une grande majorité des cas à une intervention « offline » car elle intervient dans la plupart des cas après la réalisation de la tâche, alors que l'approche objective est plus associée à une intervention « online » car est communément réalisée au cours de la réalisation de la tâche. Malgré tout, il est tout à fait envisageable de réaliser une évaluation subjective au cours de la réalisation d'une tâche et une évaluation objective au terme de l'exécution d'une tâche. Chacune des techniques d'évaluation distinguées peut être associée à un ensemble d'avantages et de limites illustrés par les données auxquelles elle permet d'accéder. La présentation des différentes techniques constituant la suite du texte, vise à détailler les caractéristiques associables à chacune d'entre elles. Une telle description met en exergue les indicateurs guidant le choix de la technique à solliciter pour évaluer la charge mentale de contrôleurs aériens, problématique de recherche de ce manuscrit.

4.1. Évaluer la charge mentale par l'analyse de la performance

L'analyse de la performance illustre une approche capacitaire de l'étude de la charge mentale. Ce type d'évaluation de la charge mentale est défini comme un moyen indirect. En effet, cette approche constitue une évaluation de la charge centrée sur les effets qu'elle génère, en l'occurrence le niveau de performance atteint.

L'analyse de la performance est principalement analysée par un système de doubles tâches, encore connu sous le nom de tâche primaire/secondaire ou de tâche ajoutée (Leplat & Spérandio, 1967 ; Baddeley & Della Sala, 1996 ; Ettliger & Kalsbeck, 1962). Cette approche qui est principalement utilisée en laboratoire a pour principe de saturer la capacité totale de travail d'un opérateur par la réalisation de deux tâches. Dans le cadre de l'évaluation de la performance, la présence d'erreurs est un des critères qui va permettre de quantifier le niveau de performance atteint (Brangier & Barcenilla, 2003).

L'analyse de la performance est également évaluée par l'étude de critères de performance, traduisant une approche centrée sur la qualité de l'action réalisée par l'opérateur. Ce type d'approche est caractéristique du milieu opérationnel et notamment des domaines où l'expertise des opérateurs est essentielle. Ceci est notamment le cas pour les tâches de supervision de systèmes complexes, comme le contrôle aérien. L'évaluation de la performance par le biais de critères a pour principe général d'évaluer la qualité des actions réalisées par l'opérateur.

La détermination des critères de performance est propre à chaque système et à chaque tâche effectuée par les opérateurs. Dans le cas du contrôle aérien, la performance de la tâche de contrôle est principalement portée sur la résolution des conflits et l'optimisation des trajectoires des avions. Les missions des contrôleurs (sécurité, environnement, information) permettent de définir pour critères de performance à la tâche de contrôle :

- La distance de séparation entre les avions circulant sur le secteur dont le contrôleur est en charge de la supervision (si les avions se croisent en dessous des normes de séparation, la performance est significativement amoindrie),
- Le nombre moyen d'ordres de pilotage donnés pour résoudre un conflit,
- Le nombre moyen de communications radio par avion,
- Le temps s'écoulant entre l'appel d'un avion et la réponse du contrôleur,
- La différence entre trajectoire prescrite (plan de vol) et la trajectoire réelle suivie par l'avion,
- La consommation de kérosène des avions.

L'avantage principal de cette approche réside dans le fait qu'elle est quantitative et qu'elle permet d'estimer la part des ressources cognitives sollicitées par l'opérateur au cours de la réalisation de la tâche en termes de degré d'occupation (en fonction du seuil capacitaire déterminé). Ce type de résultat est visé dans l'industrie afin d'anticiper les périodes où l'opérateur ne serait plus en mesure d'agir seul. En revanche, cette approche d'évaluation a pour principale limite, le fait de ne pas prendre en compte les variations du niveau de charge mentale ressentie par l'opérateur et les stratégies opératoires lui étant associées. En effet dans ce type d'approche l'état de l'opérateur est défini par défaut constant, alors qu'en réalité en fonction de l'expertise, de la motivation, des émotions de l'opérateur, mais aussi des événements (un avion non intégré par exemple) pouvant se dérouler dans l'activité de travail, ce niveau est susceptible de varier significativement. La limite de l'évaluation de la charge mentale par le biais de l'évaluation de la performance a notamment été pointée par Cegarra et Chevalier (2008).

4.2. Évaluer la charge mentale par l'approche « subjective »

Le principe général de l'approche subjective consiste à recueillir le retour d'expérience de l'opérateur quant au niveau de charge mentale ressentie au cours de la réalisation de la tâche expérimentale.

Il est schématiquement possible de distinguer trois types de techniques relatives à l'approche subjective. Pour chacune des techniques présentées dans la suite du texte, il est proposé d'introduire des exemples relatifs au domaine du contrôle aérien, pour les cas de figure où des « standards » existent.

- Les entretiens : l'entretien dans le cadre de l'étude de la charge mentale d'opérateurs a pour objectif d'obtenir des descriptions de la part de l'opérateur relatives aux choix faits de gestion de ses ressources cognitives. Une telle approche vise à déterminer le type de marges de manœuvre ou les stratégies opératoires qui peuvent être sollicitées, déterminées par l'opérateur pour palier au niveau d'exigences qui s'impose à lui.
- Les questionnaires : les questionnaires d'évaluation de la charge mentale peuvent être constitués à la fin de questions ouvertes et fermées. Comme l'entretien, ils constituent majoritairement une approche qualitative d'évaluation de la charge mentale.
- Les échelles d'évaluation : cette technique a pour objectif de quantifier le niveau de charge mentale moyen ressentie au cours de l'exécution de la tâche expérimentale. Dans ce cas, l'opérateur est prié de positionner son ressenti sous la forme d'une valeur, quant à différents facteurs en vue d'en déduire le niveau de charge mentale moyen ressentie. Différentes échelles d'évaluation de la charge mentale ont été proposées jusqu'à présents. Ces dernières sont principalement dissociables par la nature des paramètres d'évaluation la composant, mais aussi par l'étendue de l'échelle utilisée (de 0 à 5 ; de 0 à 100...). L'échelle d'évaluation la plus connue et utilisée est le NASA-TLX, *Task Load Index* (Hart & Staveland, 1988). L'autre proposition de référence, qui a été significativement utilisée dans le cadre de l'évaluation de la charge mentale (Rubio, Diaz, Martin & Puente, 2004), est l'échelle SWAT, *Subjective Workload Assessment Technique* (Reid & Nygren, 1988).

Dans le cas d'une approche subjective, un des choix à réaliser porte sur le moment auquel l'évaluation doit être effectuée. Deux alternatives principales peuvent être distinguées :

- Une évaluation post-tâche, réalisée à l'issue de la tâche expérimentale. Cette alternative, définie comme « offline » est celle la plus utilisée dans le cadre de l'évaluation subjective de la charge mentale. Cette évaluation unique peut être orientée par des épiphénomènes auxquels un niveau particulier de charge mentale est associé. Elle ne semble donc pas être le plus approprié pour une tâche de longue durée avec une variation importante du niveau d'exigences de la tâche.
- Une évaluation au cours de la réalisation de la tâche. L'intérêt principal de cette option porte sur le caractère multiple de l'évaluation, permettant d'inclure à l'évaluation la variation de la charge mentale au cours du temps et en fonction de la variation du niveau d'exigences de la tâche. Toutefois, une telle approche peut être potentiellement intrusive car elle risque de venir perturber l'opérateur, en l'interrompant dans son action ou en le poussant à adopter une stratégie particulière.

Un exemple d'une telle technique est ISA, *Instantaneous Self-Assessment of workload* (Brennen, 1992, Jordan, 1992). Cette technique a été développée pour obtenir une évaluation instantanée du niveau de la charge mentale ressentie. ISA est une échelle d'évaluation divisée en cinq niveaux : 1, étant le niveau le plus faible (sous-sollicité) et 5, le plus élevé (excessive). L'échelle est souvent associée à un code couleur allant du vert (pour le niveau 1) au rouge (pour le niveau 5). Au cours de l'expérimentation, l'opérateur doit sélectionner le niveau reflétant le plus, le niveau de charge mentale ressentie. Une dalle tactile peut être utilisée et intégrée à la position expérimentale pour rendre plus facile la réponse pour l'opérateur.

Pour résumer, l'approche subjective permet de recueillir la perception de l'opérateur quant au niveau de charge mentale ressentie au cours de l'exécution de la tâche expérimentale. Le point faible central pouvant être associé à l'approche subjective porte sur sa dépendance à la représentation de l'opérateur. Elle se confronte notamment aux différences intra et inter-individuelles des opérateurs quant à l'évaluation de la charge mentale qu'ils ressentent. En fonction de l'état d'esprit (motivation, perception de l'application des données...) dans lequel se trouve l'opérateur, il peut avoir tendance à sur ou sous-évaluer le niveau de charge mentale. De même, le niveau de charge mentale subjectivement déterminé va inclure les effets de la sensibilité de notation qui est susceptible de varier entre individus. Un même niveau (valeur) de charge mentale peut dès lors induire deux perceptions différentes. A l'inverse pour une perception similaire de la charge mentale ressentie, deux opérateurs peuvent lui attribuer deux valeurs (échelles d'évaluation) différentes.

4.3. Évaluer la charge mentale par l'approche « objective »

L'appellation de cette approche est liée à l'origine des données qui sont analysées, et dont l'opérateur n'a pas la pleine maîtrise, comme c'est le cas pour l'approche subjective. L'approche dite « objective » désigne principalement l'évaluation de la charge mentale par le biais de paramètres psychophysologiques. Les paramètres psychophysologiques sont définis comme des facteurs reflétant l'activité d'un système physiologique, illustrant des mécanismes et structures cérébrales permettant à leur tour d'approcher une explication des processus mentaux décrits par la psychologie et la psychanalyse, dont le processus de gestion de la charge mentale. Les paramètres psychophysologiques ont pour objectif d'illustrer l'activité d'un système physiologique, lui-même reflétant l'activité du système nerveux autonome, sur lequel l'individu n'a pas de contrôle et traduisant donc des comportements involontaires. Cette observation montre que dans le cas de l'évaluation de la charge mentale par le biais de données psychophysologiques c'est l'étude des conséquences de la charge mentale ressentie par l'opérateur qui est au cœur de l'étude.

Le principe de l'approche centrée sur les indicateurs psychophysologiques consiste à enregistrer les paramètres en question pendant que l'opérateur exécute la tâche expérimentale, pour ensuite les analyser à posteriori. Ce type de techniques d'évaluation nécessite d'appareiller l'opérateur ou/et la position expérimentale avec des dispositifs

d'enregistrement des données physiologiques faisant l'objet de l'analyse. En fonction des paramètres analysés et des conditions d'étude, les dispositifs techniques requis peuvent être plus ou moins imposants et contraignants pour l'opérateur.

Dans le cadre d'une évaluation de la charge mentale avec une approche objective, les données psychophysiologiques analysées comme des indicateurs de charge sont variées. L'hypothèse principale à la base de ces études est relative au lien existant entre le niveau de charge mentale ressentie par l'opérateur et le niveau d'activité du système physiologique analysé. Généralement, plus l'activité relative au système physiologique est élevée, plus le niveau de la charge mentale ressentie par l'opérateur est élevé.

Les études réalisées en laboratoire et sur le terrain permettent de distinguer cinq principaux systèmes physiologiques étudiés, chacun d'entre eux, analysé par le biais de différents indicateurs :

- L'activité du système respiratoire (Gamberale, 1972 ; Seip, Snaed, Pierce, Stein & Weltman, 1991).
- L'activité du système cardiaque, qui est analysée par une technique d'électrocardiographie (Michaut & Pin, 1965 ; Kalseek & Ettema, 1965 ; Dinand & Defayolle, 1969 ; Delignières, Legros & Famose, 1991).
- L'activité du système électrodermal, activité électrique relevée à la surface de la peau et reflétant l'activité des glandes de sudation (Clarion, 2009).
- L'activité du système cérébral ou activité électro corticale représentée sous la forme d'électro-encéphalogramme, EEG (Wilson & O'Donnell, 1988 ; Gevins, Smith, Leong, McEvoy, Whitfield & Du, 1998 ; Raabe, Rutschmann, Schrauf & Greenlee, 2005).
- L'activité du système oculaire. Cette analyse requière l'intégration dans la position expérimentale d'un oculométrie ou *eye-tracking* permettant d'enregistrer en temps réel les mouvements et les indicateurs oculaires (Beatty, 1982 ; Janisse, 1977 ; Di Stasi et al., 2010 ; De Waard, 1996 ; Golberg & Kotval, 1998).

L'approche centrée sur l'évaluation d'indicateurs psychophysiologiques, dite « objective », permet d'obtenir une évaluation de la charge mentale ressentie par l'opérateur au cours de l'exécution de la tâche expérimentale. Cette caractéristique représente le principal avantage de cette approche, en plus du fait de pouvoir proposer une quantification du niveau de charge mentale. Cependant, cette approche, en fonction des moyens techniques utilisés est également associée à certaines limites. La plus importante porte sur l'intrusivité du dispositif d'évaluation quant au comportement et au confort de l'opérateur.

Les approches et les techniques d'évaluation de la charge mentale sont hétérogènes en vue des données faisant l'objet de l'analyse et de la façon dont la charge mentale est au final évaluée et décrite. De plus, si chacune des approches et techniques d'évaluation présente des avantages indéniables, des limites peuvent également être associées à chacune d'entre elles. Les limites des techniques d'évaluation existantes illustrent qu'actuellement aucune technique ne semble indiscutable quant à la portée de l'évaluation de la charge mentale effectuée. Certains auteurs voient pour alternative aux limites définies, le recours à une approche multifactorielle, consistant à corrélérer plusieurs approches pour en déduire le niveau de charge mentale ressentie par l'opérateur (Miyake, Yamada, Shoji, Takae, Kuge & Yamamura, 2009 ; Cegarra & Chevalier, 2008).

4.4. Contributions de l'approche multidimensionnelle dans le cadre de l'étude de la charge mentale

Le recours à une approche multidimensionnelle a pour avantage principal de déterminer le niveau de charge mentale en couplant différents niveaux de perception de la charge : un niveau symbolique par le biais du retour subjectif de l'opérateur, un niveau sub-symbolique relatif aux conséquences du niveau de charge mentale ressentie sur l'organisme de l'opérateur, et un niveau complémentaire portant sur le résultat obtenu et au niveau de performance pouvant lui être associé. L'approche multidimensionnelle permet ainsi de pouvoir donner du sens à certaines observations de variations du niveau de la charge mentale évaluée par le biais de données physiologiques, en les comparant aux retours d'expérience subjectifs de l'opérateur (verbalisations, échelles d'évaluation). Cette possibilité de comparaison explique pourquoi la majorité des méthodes multifactorielles mises en place dans certaines études antérieures (Hilburn, 2004) portant sur l'évaluation de la charge mentale consiste à coupler approches objectives (mesures physiologiques) et subjectives (entretien et/ou questionnaires).

Pour résumer, l'approche multidimensionnelle peut être définie comme une technique porteuse dans l'étude de la gestion de la charge mentale d'opérateurs de situations dynamiques. Elle représente notamment un moyen d'accéder à une évaluation plus représentative car incluant une évaluation de différents composants actant (le comportement de l'opérateur) ou dépendant (les systèmes psychophysiologiques, le niveau de performance atteint) sur le niveau de la charge mentale ressentie par l'opérateur. Par exemple, lorsque la complexité de la situation augmente, on peut étudier dans quelle mesure cela agit sur l'opérateur (mesures physiologiques), comment il le ressent de façon consciente (ressentis partagés à ce moment-là) et quelle répercussion cela génère sur le résultat de l'activité (niveau de performance atteint).

La présentation de l'ensemble des approches et des techniques permettant l'évaluation du niveau de charge mentale illustre la diversité et la quantité des choix disponibles. La mise en place d'une étude dédiée à l'évaluation de la charge mentale ressentie

par des opérateurs nécessite dès lors une réflexion non négligeable quant au choix de l'approche, mais aussi de la technique employée pour enfin définir les paramètres sur lesquels porteront l'analyse et la façon dont ces derniers seront analysés. En plus des avantages et des limites associés à chacune des approches et des techniques d'évaluation, ce choix peut être guidé par les spécificités de l'étude et notamment celles relatives à la nature de la tâche expérimentale devant être réalisée par l'opérateur et à la position expérimentale associée.

Le prochain chapitre vise à détailler la réflexion englobant les choix effectués relatifs à l'approche et aux techniques d'évaluation sollicitées dans le cadre de l'analyse de la charge mentale de contrôleurs aériens effectuée dans ce travail de recherche. Ce chapitre détaille également les caractéristiques associés à la méthode d'évaluation mise en place lors des expérimentations, de l'enregistrement à l'analyse des données.

Problématique de la thèse

**Le couplage entre « besoins opérationnels »
et « questions de recherche »**

Ce travail de doctorat s'intègre dans le contexte du contrôle aérien. Celui-ci est notamment marqué par une phase de transition nécessitant la mise en place d'agencements, de transformations, de la situation de contrôle aérien pour répondre favorablement aux demandes croissantes relatives à la gestion du trafic (SESAR, 2012). Les perspectives d'évolution permettant de satisfaire cette contrainte sont actuellement à l'étude par le biais de projets de recherche. Au niveau Européen, le projet de référence qui envisage et évalue les évolutions permettant la construction d'un système de contrôle aérien de nouvelle génération est le projet SESAR, dont l'équivalent américain est NextGen (Next Generation Air Transportation System).

Dans le cadre de ce projet de recherche, seules les perspectives envisagées sur la position de contrôle En-Route seront incluses. Plus précisément, ces axes d'évolution sont ceux faisant l'objet du work-package 4.7.2 du projet SESAR (Cf. Chapitre I, 1.3.3). Intégrer les perspectives du projet SESAR comme fondations à ce projet de recherche est justifié par le besoin d'évaluation des modifications envisagées. En effet, évaluer la pertinence de ces pistes d'évolution, nécessite d'étudier l'effet qu'elles engendreraient sur les contrôleurs aériens, élément central du système de contrôle du trafic aérien.

Les modifications de grande ampleur de la position de contrôle aérien En-Route, envisagées par le biais du projet SESAR et intégrées à cette recherche, sont dissociables en deux niveaux d'évolution de la position de contrôle En-Route :

- Le passage à une position de contrôle entièrement électronique. La suppression du strip et de son renseignement par l'utilisation et le renseignement d'une interface dotée d'un système informatisé en mesure de suivre et d'intégrer l'évolution du trafic aérien, constitue le premier axe de modification de la position de contrôle En-Route.
- L'automatisation partielle de la tâche de contrôle du trafic aérien. L'intégration de systèmes intelligents d'aide à la décision, en mesure d'analyser et d'agir sur le trafic aérien géré par le contrôleur aérien, va en effet modifier significativement la nature de la tâche de contrôle. La tâche de contrôle initialement dépendante exclusivement du contrôleur aérien deviendra partiellement collaborative et gérée à la fois par les contrôleurs aériens et des automatismes.

La phase de transformation à laquelle le contrôle aérien se prépare à faire face va donc agir et modifier la nature de la tâche de contrôle elle-même. Dès lors, le rôle joué par le contrôleur aérien dans le système de contrôle du trafic aérien va se trouver sensiblement modifié. Alors que la gestion du trafic aérien ne repose

actuellement que sur la seule expertise du contrôleur, elle risque demain d'être modifiée en devenant le fruit d'un travail collaboratif entre système humain et système artificiel.

Le questionnement provenant du milieu opérationnel, et porté au cœur de ce projet de recherche, considère l'ampleur de l'effet généré par les transformations de la situation de contrôle sur les contrôleurs aériens. Il tend donc à étudier la validation des perspectives d'évolution du système de contrôle du trafic aérien, en se positionnant dans une approche d'évaluation centrée sur l'opérateur. Les interrogations peuvent ainsi être formulées de la façon suivante :

- Les pistes d'évolution proposées dans le cadre du projet SESAR permettent-elles aux contrôleurs aériens de gérer une séquence de trafic de façon plus économique (mentalement) ?
- Quelles variations de coût associé à la gestion d'une séquence de trafic aérien dans un environnement SESAR, peuvent être observées par rapport à une situation de référence reflétant la situation de contrôle actuelle ?
- Finalement, les pistes d'évolution du projet SESAR proposées pour la position de contrôle aérien En-Route, sont-elles favorables, et donc souhaitables ?

Des pistes de réponses à ces questions peuvent être obtenues par le biais d'une évaluation des sollicitations soumises aux contrôleurs pour gérer une séquence de trafic aérien. Les sollicitations des contrôleurs sont essentiellement « mentales », et s'illustrent par le traitement d'un ensemble vaste d'informations, de calculs et de prises de décisions. Dès lors, évaluer le niveau de sollicitations des contrôleurs aériens porte sur le niveau d'activité cognitive requis par les contrôleurs aériens pour répondre favorablement aux sollicitations relatives à la tâche de contrôle, c'est-à-dire au niveau de charge mentale de travail ressentie.

Ainsi, être en mesure d'évaluer le niveau de charge mentale, et la façon dont la gestion de la charge mentale des contrôleurs aériens s'effectue au cours d'une tâche de contrôle, permet d'estimer le niveau de sollicitations et en quelque sorte le « coût » d'une tâche de contrôle pour les contrôleurs aériens.

Pour résumer, l'objectif de cette recherche est d'étudier la façon dont la gestion de la charge mentale de contrôleurs aériens varie en fonction du contexte environnemental dans lequel se déroule la tâche de contrôle du trafic aérien. Cette variation porte notamment sur la position de contrôle utilisée par les contrôleurs aériens, et les outils d'aide y étant intégrés (visant à illustrer les évolutions envisagées pour déterminer un système de contrôle aérien de nouvelle génération). L'approche proposée pour répondre aux objectifs de cette recherche consiste à évaluer la charge mentale de contrôleurs aériens au cours de la réalisation d'une tâche de contrôle du trafic aérien. Plus précisément, un ensemble d'évaluations de charge mentale dans de telles conditions a été requise pour intégrer les variations de la situation de contrôle (situation nominale vs. situation SESAR notamment). La réalisation d'évaluations multiples permet a posteriori de comparer les évaluations les unes

par rapport aux autres, et de déduire de cette comparaison, les variations de charge constatées pouvant être associées au(x) changement(s) de la situation de contrôle.

Les pistes d'interrogation, provenant du domaine du contrôle aérien et mises en exergue préalablement, peuvent être traduites et résumées sous formes de questions de recherche, auxquelles les études réalisées dans le cadre de cette recherche, ont tenté de statuer. Au total, trois axes d'interrogation ont été déduits :

- La première question de recherche porte sur la gestion de la charge mentale effectuée par les contrôleurs aériens au cours d'une tâche de contrôle se déroulant dans une situation de contrôle nominale, si l'on se réfère à la façon dont le contrôle aérien s'effectue actuellement en opérationnel. Ce premier axe de questionnement porte notamment sur l'identification de modes de gestion de la charge mentale effectuée par les contrôleurs aériens, mais aussi d'indicateurs de charge provenant de la situation de trafic aérien. Ainsi, est-ce que la présence de conflits représente un bon indicateur du niveau de charge mentale des contrôleurs aériens ? Dans quelle mesure cette partie du trafic est coûteuse pour les contrôleurs ?
- La deuxième, centrée sur la situation de contrôle partiellement automatisée « SESAR », postule que l'utilisation d'outils d'aide à la détection et à la résolution des conflits permet une gestion plus économique du trafic par les contrôleurs aériens. Cela induit une baisse du niveau de charge mentale ressentie par les contrôleurs aériens dans une situation de contrôle partiellement automatisée par rapport à une situation de référence.
- Le dernier axe d'interrogation de cette recherche s'attarde sur l'intégration d'un système tout électronique dans la position de contrôle, comme stipulée dans la situation SESAR (n'incluant les agents intelligents associés au service d'aide à la détection et à la gestion des conflits). L'interrogation porte notamment sur l'effet du niveau d'apprentissage destiné à l'utilisation de ce nouveau type de plateforme de contrôle aérien sur le niveau de charge mentale de contrôleurs aériens. Ainsi l'hypothèse émise est que plus le niveau de formation, dédié à l'utilisation d'une plateforme toute électronique est élevé, plus le niveau de charge mentale des contrôleurs aériens ressentie au cours de l'exécution d'une tâche de contrôle, est faible.

Les questions de recherche déduites des interrogations provenant du domaine du contrôle aérien ont notamment permis de guider le recueil des données effectuées dans le cadre de ce projet de recherche. Ainsi, l'étude de l'ensemble de ces questions de recherche a nécessité la mise en place de trois expérimentations distinctes, reflétant chacune un des environnements de contrôle induits dans les interrogations : l'environnement de contrôle nominal, l'environnement de contrôle « SESAR », l'environnement tout électronique. Avant la réalisation des expérimentations, il a été nécessaire de déterminer parmi le large choix d'approches à disposition, la méthodologie d'évaluation de charge mentale qui serait la plus appropriée au cas d'étude des contrôleurs aériens. Il est également apparu comme favorable de

déterminer les prérequis relatifs à la méthode expérimentale qu'il serait nécessaire d'inclure à une évaluation de la charge mentale de contrôleurs aériens visant la détermination de pistes de réponses relatives à des questions provenant du domaine.

Les chapitres suivants de ce manuscrit présentent la façon dont les protocoles expérimentaux et la méthode d'évaluation de la charge mentale de contrôleurs aériens de cette recherche a été dans un premier temps mis au point (Cf. Chapitre 3), puis mis en application dans le cadre des études empiriques de cette recherche (Cf. Chapitre 4 à 6) visant à se positionner sur les hypothèses de recherche préalablement mentionnées.

La détermination et la mise en place d'une méthode d'évaluation adaptée à l'étude de la charge mentale de contrôleurs aériens



Les deux premiers chapitres de ce manuscrit ont introduit le domaine d'application, le contrôle aérien En-Route, et la notion théorique faisant l'objet de cette recherche, la charge mentale. Cette troisième partie, qui fait suite à l'énoncé de la problématique de ce travail, s'attarde sur la méthode d'évaluation mise en place dans la partie empirique.

Dans ce chapitre, les choix méthodologiques réalisés sont détaillés et justifiés. Ces choix étant communs aux différentes études empiriques, l'ensemble de la méthode proposée, est détaillée par la suite. Les choix effectués peuvent être distingués en deux sous-ensembles : les choix relatifs au protocole expérimental mis en place pour évaluer la charge mentale, et ceux concernant la méthode d'évaluation et les dispositifs techniques lui étant associés. Figure dans la suite du chapitre, la description de la méthode d'évaluation de la charge mentale employée dans la partie empirique de ce travail.

1. Les choix méthodologiques effectués dans le cadre de l'étude de la gestion de la charge mentale de contrôleurs aériens

1.1. Prérequis à intégrer aux protocoles expérimentaux des études réalisées

Ce travail de recherche, appliqué au domaine du contrôle aérien, a pour objet l'évaluation de la charge mentale de contrôleurs aériens. Pour que cette évaluation soit porteuse de sens pour le domaine d'application, il paraît essentiel qu'elle soit en mesure de refléter la gestion de la charge mentale effectuée par les contrôleurs aériens en situation réelle de contrôle. Cette observation a d'ores et déjà été pointée dans d'autres domaines par Rasmussen et Lind (1981), Reason (1990) ou encore Hollnagel (1993). Une telle évaluation ne paraît pas envisageable en situation réelle de contrôle. Le rôle occupé par la sécurité dans le contrôle aérien justifie principalement cette impossibilité. En situation réelle, il paraît dès lors impossible d'évaluer la gestion de la charge mentale effectuée par des contrôleurs aériens lors de la supervision d'une situation de trafic identique, sans prendre le risque de les perturber. Une évaluation de la charge mentale de contrôleurs aériens ne peut dès lors s'effectuer que par le biais d'études expérimentales.

En plus de s'assurer de l'emploi de méthodes d'évaluation de la charge mentale « compatibles » avec le domaine d'application (Cf. le paragraphe suivant), il a dès lors été nécessaire de déterminer les différents prérequis qui assureraient une évaluation appropriée et « réaliste » de la charge mentale de contrôleurs aériens, et dont l'intégration aux protocoles expérimentaux des études réalisées serait dès lors à garantir.

Au total, trois prérequis ont été associés à la mise en place d'études visant l'évaluation du niveau de charge mentale de contrôleurs aériens. Ces derniers portent respectivement sur la tâche expérimentale, la population et la position de l'expérimentation.

1.1.1. Une tâche expérimentale écologiquement valide

La description du concept de charge mentale et de théories relatives à sa gestion qui ont détaillés dans le chapitre précédent, soulignent le rôle joué par le niveau d'exigences de la tâche dans le niveau de charge mentale ressentie par l'opérateur au cours de l'exécution d'une tâche. Dès lors, il peut en être déduit que le niveau de la charge mentale des contrôleurs aériens dépend de la situation de trafic qu'ils doivent superviser. Cette observation pointe la nécessité de mettre en place une tâche expérimentale s'apparentant à une tâche de contrôle dans le cadre d'une évaluation de la charge mentale de contrôleurs aériens et qui pourrait donc être définie comme écologiquement valide.

La mise place d'une tâche écologiquement valide a pour principal objectif le fait de

permettre aux opérateurs d'employer leur méthode de travail quotidienne au cours de l'étude. Dans le cas de l'étude de la charge mentale d'opérateurs, elle garantit une évaluation conforme à la situation de référence étudiée.

Si l'on se réfère à la description de la tâche de contrôle aérien proposée dans le premier chapitre de ce manuscrit, on en déduit qu'une tâche de contrôle écologiquement valide doit permettre le respect des règles et l'application des procédures de la circulation aérienne suivie en situation de contrôle.

Pour répondre à ce critère de validité, les tâches expérimentales construites dans les études de cette recherche peuvent être associées à trois caractéristiques principales :

- La première caractéristique porte sur les séquences de trafic aérien composant la tâche expérimentale. Les séquences de trafic aérien sollicitées pour ces études ont été construites à partir d'enregistrements de trafic réel. Le recours à ces enregistrements a assuré « la cohérence » du trafic utilisé lors des études en référence avec le trafic quotidiennement géré en position réelle. Cette cohérence porte notamment sur les plans de vol des avions composant la séquence, mais aussi sur le type de compagnies aériennes et d'appareils composant le trafic aérien à superviser.
- Les tâches expérimentales construites peuvent également être caractérisées par leurs durées fixées aux alentours d'une heure (de 45 à 55 minutes). Ce choix est justifié par le fait qu'en position de contrôle, la durée de contrôle (avant permutation entre contrôleur organique et contrôleur radariste) se situe aux alentours d'une heure. De plus, cette recherche portant sur la gestion de la charge mentale effectuée par les contrôleurs aériens nécessite d'inclure les aspects temporels relatifs à l'activité de contrôle. Une tâche de courte durée (quelques minutes) ne permettrait pas d'atteindre cet objectif, du moins dans une situation de contrôle du trafic aérien reflétant le cas nominal.
- La dernière caractéristique des tâches expérimentales élaborées porte sur la consigne leur étant associée. La mise en place d'une situation de contrôle écologiquement valide a notamment consisté à déterminer pour toute consigne donnée aux participants des études réalisées : « Gérez cette séquence de trafic aérien comme vous le feriez en situation réelle ». Cette consigne très concise est pourtant associée à de nombreuses contraintes pour les participants, à savoir le respect des règles et des procédures associées à la gestion du trafic aérien dans le secteur de contrôle utilisé lors de l'étude (Cf. Chapitre 1, paragraphe 1.4).

1.1.2. Une population nécessairement experte

Pour que les études réalisées dans le cadre de cette recherche soient valides et aient du sens d'un point de vue opérationnel, il s'est avéré indispensable que les participants des expérimentations soient des contrôleurs aériens En-Route qualifiés. Plus précisément, la possession de deux niveaux de compétences a été défini comme un critère de sélection des participants des études : le premier est le titre d'ICNA (Ingénieurs du Contrôle de la Navigation Aérienne) attestant d'un niveau de compétences initial quant à la gestion du trafic aérien (connaissances générales de gestion du trafic) ; le second niveau de compétences est la qualification à gérer le trafic

aérien sur l'espace de trafic En-Route utilisé (connaissances spécifiques à la zone de trafic supervisée).

Un tel prérequis permet d'assurer une certaine homogénéité de la population concernant les connaissances et les compétences nécessaires, mais aussi sur les modes opératoires sollicités, pour réaliser une tâche de contrôle du trafic aérien. Malgré cette homogénéité relative de la population, il a été bien évidemment anticipé une certaine variabilité des différents contrôleurs aériens participant aux études en fonction de leurs niveaux d'expertise respectifs. Le niveau d'expertise des contrôleurs aériens dépend notamment de leur expérience en tant qu'ICNA, mais aussi sur la durée de leur qualification à gérer le trafic sur la zone de trafic aérien (secteur) utilisée lors des études. En effet, le niveau d'expertise des contrôleurs agit sur les stratégies opératoires à leur disposition pour gérer de façon plus économique la situation de trafic.

1.1.3. Une position expérimentale reflétant la position de contrôle

La réalisation d'une tâche de contrôle écologiquement valide par des participants experts du contrôle aérien, nécessite enfin la mise en place d'une position expérimentale reflétant la position de travail utilisée quotidiennement par les contrôleurs aériens. Cette nécessité a été considérée dans les études réalisées par la mise en place d'un simulateur de contrôle aérien En-Route en tant que position expérimentale. Un simulateur de contrôle aérien En-Route est composé des outils de contrôle composant le GEODE, position de travail des contrôleurs aériens (Cf. Chapitre 1, 1.1.6). Il est dès lors généralement composé d'un écran radar sur lequel est représentée la situation de trafic à superviser, un système de radio air/sol permettant de communiquer avec les pilotes des avions composant la séquence de trafic aérien et enfin un tableau de strips associé aux strips des avions de la séquence de trafic aérien.

Cependant, dans le cas d'une étude prospective associée à la proposition de nouveaux outils de contrôle, la composition du simulateur de contrôle utilisé comme position expérimentale peut se voir quelque peu modifiée. Par exemple, un système tout électronique composé de deux écrans (l'écran radar et un écran d'interaction) peut remplacer le système écran radar – tableau de strips « classique ».

1.2. Les choix méthodologiques portant sur la méthode d'évaluation de la charge mentale

Le choix de la méthode d'évaluation de la charge mentale de contrôleurs aériens mise en place pour les études de cette recherche a été déterminé à partir de la confrontation de deux sources d'informations : les caractéristiques associables à la situation d'évaluation, le contrôle aérien, et les particularités des différentes techniques d'évaluation de la charge mentale existantes et détaillées précédemment dans le texte.

1.2.1. Les caractéristiques de la situation de contrôle aérien intégrées aux choix méthodologiques

La première caractéristique associable à la situation de contrôle aérien qui a été

intégrée aux choix méthodologiques de cette recherche porte sur la temporalité de la tâche de contrôle et sur le fait qu'elle constitue une situation dynamique (Cf. Chapitre 2, paragraphe 2.2). Cette évolution spontanée de l'état du système dont l'opérateur a en charge la supervision et le maintien de la sécurité induit une variation du niveau d'exigences de la tâche au cours du temps. Il est dès lors essentiel que l'évaluation de la gestion de la charge mentale de contrôleurs aériens constitue une évaluation temporelle, où la variation du niveau d'exigences de la tâche de contrôle est prise en compte.

Puisque la situation de contrôle aérien constitue une situation dynamique, cela implique également le fait que l'évaluation de la charge mentale de contrôleurs aériens effectuée, ne peut venir interrompre l'exécution de la tâche de contrôle. En effet, cela pourrait perturber les contrôleurs aériens et donc agir sur le niveau de charge mentale ressentie. Dès lors, le mode d'évaluation de la charge mentale, ainsi que les dispositifs techniques employés dans cette recherche doivent garantir une non-intrusivité absolue pour les participants.

La seconde caractéristique de la situation de contrôle aérien prise en compte dans les choix méthodologiques porte sur la nature de l'activité de contrôle du trafic aérien, et notamment sur les aspects visuels. En effet, la représentation mentale du trafic aérien supervisé que se crée le contrôleur aérien au cours de son activité de travail se construit à partir de données visuelles, notamment celles obtenues par le biais de l'image radar. La répartition du regard du contrôleur aérien sur l'image radar paraît donc comme une source d'informations importante quant à la façon dont il analyse et gère la situation de trafic dont il a en charge la supervision.

Enfin, la place centrale occupée par le contrôleur aérien dans la situation de gestion du trafic aérien justifie le fait que l'évaluation de la charge mentale effectuée soit centrée, du moins en partie, sur l'opérateur. Centrer l'évaluation de la charge mentale sur l'opérateur consiste notamment à y intégrer son retour d'expérience quant au niveau de charge mentale ressentie.

1.2.2. Confrontation des exigences associées à l'évaluation de la charge mentale et des caractéristiques des approches d'évaluation disponibles

Les caractéristiques associées à la situation de contrôle du trafic aérien, mises en exergue préalablement, ont permis de guider les choix méthodologiques associés à la détermination d'une méthode d'évaluation de la charge mentale de contrôleurs aériens, au cours de l'exécution d'une tâche de contrôle. Il a notamment été déterminé trois axes d'exigences qu'une telle méthode d'évaluation devrait satisfaire. Il apparaît dès lors qu'une méthode d'évaluation de la charge mentale de contrôleurs aériens au cours de l'exécution d'une tâche de contrôle réaliste devrait fournir une analyse temporelle et non-intrusive du niveau de charge mentale de contrôleurs aériens. Cette analyse devrait être centrée sur l'effet généré par le niveau d'exigences de la tâche sur le niveau de charge mentale ressentie par les contrôleurs aériens.

Pour déterminer la méthode d'évaluation la plus appropriée aux exigences définies quant à l'évaluation de la charge mentale de contrôleurs aériens, une confrontation

de celles-ci avec les caractéristiques des approches d'évaluation de la charge mentale disponibles et d'ores et déjà employées dans de nombreuses études préalables (Cf. Chapitre 2, section 4) a été réalisée.

De cette confrontation, il en ressort quatre observations principales :

- Évaluer la gestion de la charge mentale de contrôleurs aériens constitue une approche compréhensive de l'étude de la charge mentale. Dès lors, une évaluation centrée sur l'analyse de la performance traduisant une approche capacitaire de l'étude de la charge mentale ne semble pas appropriée à ce cas d'étude.
- L'évaluation de la charge mentale à partir d'une approche dite « objective », car centrée sur l'analyse d'indicateurs psychophysiologiques, paraît appropriée à l'étude de la charge mentale visée dans cette recherche puisqu'elle permet l'atteinte d'une des exigences définies, à savoir la réalisation d'une évaluation temporelle du niveau de charge mentale ressentie. Comme mentionné précédemment (Cf. Chapitre 2, 4.3), l'analyse de paramètres psychophysiologiques dans le cadre de l'évaluation de la charge mentale peut être diverse. L'analyse des indicateurs oculaires semble particulièrement intéressante pour l'étude de la charge mentale dans une situation de contrôle du trafic aérien puisque la prise d'informations visuelles est centrale au cours de l'activité de travail du contrôleur aérien. En plus de permettre une évaluation temporelle de la charge mentale, l'analyse des données oculaires permet dans ce cas de relier l'évaluation de la charge mentale des contrôleurs aériens à des informations permettant de caractériser leur activité de travail, et ce en se référant à l'évolution de la situation de trafic aérien supervisée. Cette mise en relation est obtenue par la corrélation de données oculaires et de données de trafic aérien enregistrées sur une période de temps identique. L'état du trafic supervisé par le contrôleur et défini à partir des données de trafic aérien (disposition des avions les uns par rapport aux autres) permet de déterminer la variation du niveau d'exigences de la tâche au cours du temps. La relation entre données oculaires (évaluation de la charge mentale) et données de trafic aérien (évaluation du niveau d'exigences de la tâche) permet dès lors d'évaluer la gestion de la charge mentale de contrôleurs aériens, et notamment l'effet que génère les variations du niveau d'exigences sur la gestion de la charge mentale effectuée par les contrôleurs aériens au cours d'une activité de contrôle. Ainsi, le deuxième niveau d'exigences relatif à l'évaluation de la charge mentale de contrôleurs aériens, et portant sur la mise en relation entre niveau d'exigences et évaluation du niveau de charge mentale, est en mesure d'être atteint.
- Dans le cadre de l'évaluation de la charge mentale, il a été pointé précédemment les avantages que l'approche multidimensionnelle représente. Mettre en place une approche multidimensionnelle consiste principalement à coupler des données objectives issues d'une évaluation basée sur l'analyse de paramètres psychophysiologiques, à des données subjectives obtenues à partir du retour d'expérience de l'opérateur. Associer le retour d'expérience (évaluation subjective) de contrôleurs aériens aux paramètres psychophysiologiques (évaluation objective) contextualisés, car mis en relation avec l'évolution du niveau d'exigences au cours de la tâche, a pour principal intérêt de

recueillir les impressions des contrôleurs quant à la difficulté de la tâche, du niveau de charge mentale qu'ils ont ressenti (une moyenne sur l'ensemble de la tâche), mais aussi sur le mode opératoire mis en place au cours de l'exécution de la tâche et sur les stratégies opératoires sollicitées.

- Le dernier niveau d'exigence relatif à l'évaluation de la charge mentale de contrôleurs aériens qui a été défini porte sur la non-intrusivité qui doit être associée à la méthode et aux dispositifs employés au cours de l'évaluation (Allison, Eizenman & Cheung, 1996). Le respect de ces contraintes, visant une « opérationnalisation » des résultats dans le domaine du contrôle aérien, a été assuré par deux éléments (détaillés dans la suite du texte) relatifs au choix de dispositif technique associé à la méthode d'eye-tracking employée dans le cadre de l'évaluation objective (Cf. paragraphe 2.2.1) et à la façon de réaliser l'évaluation subjective (Cf. paragraphe 2.4).

2. L'approche mise en place : Une évaluation de la charge mentale centrée sur l'analyse de la relation entre exigences de la tâche de contrôle et répercussions sur le contrôleur aérien

L'évaluation multifactorielle de la charge mentale mise en place dans ce travail de recherche couple trois types de données : une évaluation du niveau d'exigences de la tâche de contrôle, des données « objectives » enregistrées au cours de l'exécution de la tâche de contrôle, et des données « subjectives » principalement recueillies au terme de l'exécution de la tâche de contrôle. Les trois paragraphes suivants décrivent chaque catégorie de données analysées au cours des évaluations.

2.1. L'évaluation du niveau d'exigences de la tâche de contrôle

2.1.1. La place occupée par la présence de conflits dans la détermination du niveau d'exigences de la tâche de contrôle

La description de la tâche de contrôle a permis de mettre en exergue la place occupée par le risque de rapprochements hors norme d'avions du trafic supervisé par les contrôleurs (les conflits) dans la détermination du niveau d'exigences associé à la tâche de contrôle. Les recherches passées ont notamment permis de montrer que le nombre d'avions impliqués dans un conflit potentiel est plus représentatif du niveau d'exigences de la tâche de contrôle que, par exemple, le nombre d'avions composant la séquence de trafic gérée par les contrôleurs aériens (Mogford, Guttman, Morrow, et Kopardekar, 1995).

2.1.2. La catégorisation envisageable des séquences de trafic aérien

Le modèle du Task Load Index (Averty et al., 2002) montre notamment la relation existante entre le type d'avions composant le trafic aérien supervisé et le niveau de « charge » requis pour le gérer. Ainsi, les avions en conflit sont définis comme étant les plus coûteux, alors que les avions sous simple surveillance sont définis comme les moins coûteux.

Cette association entre le statut des avions et la difficulté de gestion engendrant des niveaux de charge mentale différents, permet notamment de distinguer deux types d'avions dans la séquence de trafic supervisée par les contrôleurs aériens : les avions du secteur qui ne sont pas conflictuels, et les avions du secteur qui sont impliqués dans un (ou plusieurs) conflit(s).

Si l'on se réfère au contenu de l'image radar présenté aux contrôleurs aériens, et plus précisément aux avions qui y sont représentés, on en déduit qu'une catégorie supplémentaire doit être ajoutée pour caractériser l'ensemble du trafic aérien illustré : les avions présents sur l'image radar mais qui ne vont pas traverser le secteur dont les contrôleurs ont la charge. Ces avions « périphériques » n'entrant pas dans la constitution de la séquence de trafic aérien supervisée par les contrôleurs aériens, peuvent être désignés sous l'appellation d'avions hors secteur.

La deuxième partie du TLI propose de décliner le traitement des situations définies comme potentiellement conflictuelles (nommées communément « conflits ») en différentes phases séparées par des bornes temporelles (Cf. Chapitre 2, paragraphe 3.3). Ces bornes temporelles peuvent, en fonction de leur enchaînement au cours du temps (durée du maturing-time évoqué précédemment), être distinguées comme des indices relatifs au mode de gestion des situations conflictuelles des contrôleurs aériens.

2.1.3. L'enregistrement et l'analyse des données relatives aux séquences de trafic aérien utilisées

Le détail des séquences de trafic aérien des études et les caractéristiques décrivant l'activité de contrôle réalisée par les contrôleurs au cours des tâches expérimentales, a été obtenu par l'enregistrement du contenu de l'image radar (position des avions au cours du temps notamment) dans deux cas de figures : le cas « non-contrôlé » correspondant à la situation de trafic initiale présentée aux contrôleurs, et le cas « contrôlé » enregistré durant chaque passation et qui inclut les modifications de trajectoires initiales des avions engendrées par l'activité du contrôleur.

L'outil utilisé pour rejouer les séquences de trafic aérien avant, durant et après les expérimentations, et qui permet d'enregistrer les données de séquences de trafic aérien, est un éditeur de trafic développé par le centre de Recherche et Développement de la Direction Générale de l'Aviation Civile, appelé « Rejeu ».

L'enregistrement des séquences de trafic non-contrôlées, correspondant au cas où les situations conflictuelles ont réellement lieu (puisque non résolues), permet en les rejouant de catégoriser l'ensemble des avions composant les séquences de trafic aérien en fonction des trois catégories d'avions précédemment définies (avions sur secteur en conflit, avions sur secteur non-conflictuel, avions hors secteur). Cette répartition « manuelle » a permis de générer pour chaque séquence de trafic un fichier composé de la liste des identifiants des avions (appelés callsigns) répartis selon les trois catégories d'avions.

Rejouer les séquences de trafic non-contrôlées a également permis de relever des temps marquants permettant de décrire l'évolution des conflits à gérer par les contrôleurs. Ces derniers correspondent aux bornes temporelles composant le modèle du TLI (Averty et al., 2002). Il a été ainsi déterminé les heures de début de prise en compte des avions (H0) par le biais des heures d'impression des strips (ou d'apparition dans les listes de vols dans le cas d'une position de contrôle toute électronique) et les heures de proximité maximale des avions en conflit (le CPA ou Closest Point of Approach).

L'analyse des enregistrements des séquences de trafic contrôlées par les participants des études a, quant à elle, permis de déterminer certains temps marquants, permettant de caractériser l'activité de contrôle réalisée par les participants. Ainsi, l'heure de résolution du conflit (H2) a été déterminée à partir de l'heure d'émission de l'ordre de contrôle permettant d'éloigner les avions en fonction des normes de séparation à respecter. L'heure de fin de conflit (H3), correspondant à l'heure où l'espacement entre les avions d'un conflit augmente de nouveau, a pu être déterminée en rejouant les séquences de trafic et en analysant une à une les situations conflictuelles gérées par chaque participant. Enfin, l'heure de fin de prise en compte du conflit par le contrôleur (H5) a été déterminée à partir de la sortie du secteur des avions impliqués dans un conflit. La fin de prise en compte d'un conflit a été ici assimilée à l'heure de la première sortie du secteur d'un des avions du conflit en question.

2.2. L'évaluation « objective » du niveau de charge mentale ressentie par l'analyse de données oculaires

2.2.1. L'intégration d'une technique d'eye-tracking ou oculométrie aux études réalisées

L'évaluation « objective » de la charge mentale proposée dans cette étude est orientée sur l'analyse de paramètres psychophysiologiques et notamment des indicateurs oculaires, considérés comme sensibles aux fines variations du niveau de charge mentale ressentie (Van Orden et al., 2001). Le recours aux données oculaires dans la recherche date de plus d'une centaine d'années et a été dans un premier temps principalement utilisé dans la recherche sur la lecture (Rayner & Pollatsek, 1989).

L'ensemble des techniques, qui permettent d'enregistrer les mouvements oculaires d'une personne lorsque cette dernière réalise une tâche (pouvant être de nature très hétérogène), est désigné sous le terme d'oculométrie ou eye-tracking (Baccino, 2002).

L'évolution technologique des dispositifs utilisés en oculométrie ou eye-tracking a permis de d'étendre l'utilisation de cette méthode d'évaluation à des domaines de recherche et d'application plus diverses. Son utilisation a notamment été définie comme utile dans le domaine de l'interaction homme-machine et de l'utilisabilité, mais aussi dans celui de l'ergonomie cognitive (Poole & Ball, 2005 ; Jacob & Karn, 2003). Certaines études menées dans ces domaines ont été appliquées au contrôle aérien (Brookings, Wilson & Swain, 1996 ; Di Nocera, Terenzi & Camilli, 2006).

La majorité des oculomètres ou eye-trackers actuellement distribués dans le commerce sont associés à un logiciel de traitement de l'image et enregistrent la position du regard

par le biais de la méthode du reflet cornéen (Cf. Figure 26). Ce type d'appareil est constitué de caméra(s) infrarouge(s) permettant l'émission d'une lumière infrarouge en direction des yeux de la personne faisant l'objet de l'étude. La lumière entre alors dans l'œil (ou les yeux) et une partie de la lumière est reflétée en retour par l'œil (ou les yeux), d'où le nom de la méthode. Le logiciel de traitement de l'image qui définit dans un premier temps le centre de la pupille et la localisation du reflet cornéen à partir d'une phase de calibration (Goldberg & Wichansky, 2003), mesure par la suite le vecteur reliant ces deux indicateurs. Les coordonnées de la position du regard sont enfin calculées par le biais d'algorithmes spécifiques.

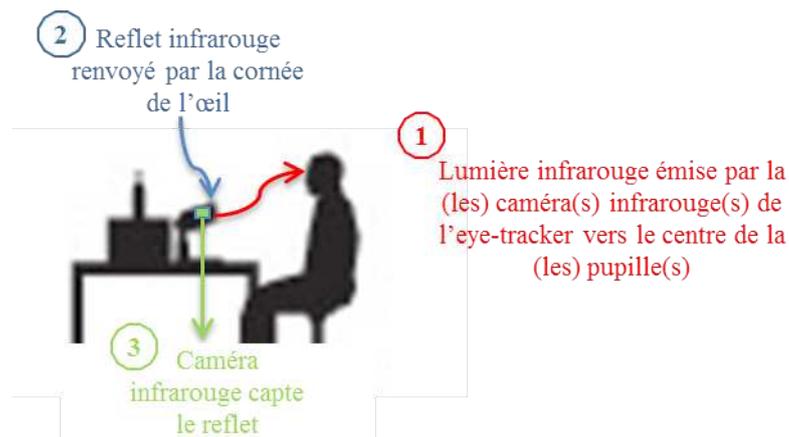
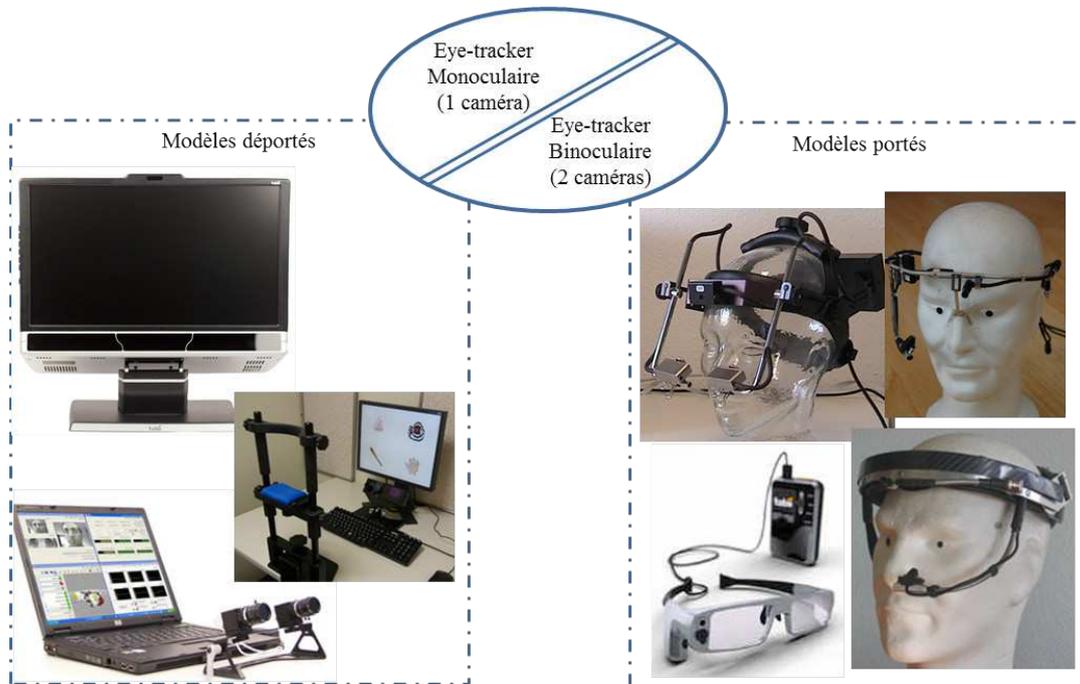


Figure 26. Illustration de la méthode du reflet cornéen utilisé par les oculomètres ou eye-trackers de dernière génération

Les modèles d'eye-trackers ou oculomètre actuellement disponibles sont principalement distinguables par (Cf. Figure 27) :

- Le niveau d'appareillage induit. Deux types d'eye-trackers sont ainsi différenciés : les modèles sous forme de casque nécessitant le port de l'eye-tracker sur la tête du participant, et ceux désignés comme déportés car inclus à la position expérimentale et ne nécessitant donc aucun appareillage du participant.
- Le nombre de caméras infrarouges composant l'eye-tracker ou oculomètre. Les modèles disponibles sont dès lors désignés comme monoculaires (composés d'une caméra infrarouge permettant l'enregistrement des données d'un œil) ou binoculaire (permettant l'enregistrement des données des deux yeux grâce à deux caméras infrarouges). L'intérêt présenté par les modèles binoculaires est qu'ils permettent d'étudier la vergence des yeux et de cibler plus précisément le point sur lequel se porte le regard.
- Le dernier critère de distinction des eye-trackers ou oculomètres porte sur la fréquence d'enregistrement des données oculaires qu'ils permettent d'atteindre. La valeur de la fréquence d'enregistrement associée aux eye-trackers ou oculomètres est située entre 30Hz et 300Hz, correspondant à une période d'enregistrement de 33 millisecondes à 3,3 millisecondes. La valeur de la fréquence d'enregistrement la plus communément employée dans les études (hors laboratoire) est celle de 60 Hz (un enregistrement effectué toutes les 16,67 millisecondes).



Le modèle d'eye-tracker ou oculomètre utilisé, dans le cadre de cette recherche appliquée au contrôle, est le Tobii X-120 (Cf. figure 28). Ce dispositif, permettant l'atteinte d'une précision de $0,3^\circ$ et d'une dérive de $0,5^\circ$, est binoculaire, déporté et associé à une fréquence d'enregistrement réglable à 60Hz ou 120Hz (Cf. Annexe I). La modulation de la fréquence d'enregistrement du Tobii X-120 est associée à une variation du niveau de liberté de mouvements de tête. Alors que cette dernière est de $30 \times 22 \times 30$ centimètres à 120Hz, elle est élargie à $44 \times 22 \times 30$ centimètres pour un réglage à 60Hz. Pour un enregistrement optimal des paramètres oculaires, le Tobii X-120 doit être situé à 70 centimètres de la tête de la personne sur laquelle porte l'analyse.

Le principal intérêt présenté par le modèle Tobii X-120 dans le cadre d'une étude appliquée au contrôle aérien est qu'il permet, par son intégration aisée à la position expérimentale (un simulateur de contrôle), un enregistrement des données oculaires non-intrusif pour l'opérateur contrairement à certains modèles sous forme de casque (Marshall, 2002). De plus, réglé sur 60Hz, le Tobii X-120 permet d'optimiser l'enregistrement des données oculaires, malgré des mouvements latéraux de tête de faible amplitude effectués par les contrôleurs. Cette possibilité permet d'éviter ou du moins de limiter les contraintes associées à la position de la tête des participants, par le biais par exemple d'une mentonnière.

Le Tobii X-120 est associé à un logiciel de traitement des données brutes enregistrées par le dispositif permettant d'avoir pour données de sortie (faisant l'objet de l'analyse de données) la position du regard du participant (sous forme de coordonnées) et la valeur du diamètre pupillaire au cours du temps.



Figure 28. L'eye-tracker Tobii X-120 utilisé lors des études empiriques de la recherche

2.2.2. Les indicateurs enregistrés par le biais d'une méthode d'eye-tracking ou oculométrie

Il est principalement associé à la méthode de l'eye-tracking ou oculométrie, l'enregistrement et l'analyse de quatre paramètres oculaires (Duchowski, 2007) : les fixations oculaires, les saccades oculaires, les clignements des yeux aussi communément appelés blinks et le diamètre pupillaire.

L'analyse des fixations oculaires est souvent utilisée dans le cadre de l'évaluation de l'attention (Golberg & Kotval, 1998 ; Recartes & Nunes, 2003). Caractériser la répartition de l'attention à partir de l'analyse des fixations oculaires est notamment accessible par le biais de deux paramètres : le nombre de fixations associées à un objet (Poole, Ball & Phillips, 2004) qui permettrait d'évaluer l'importance associée à l'objet en question, et la durée des fixations (Just & Carpenter, 1976) qui refléterait la difficulté d'extraire les informations requises, ou le niveau « d'engagement » requis par un objet. De plus, il est essentiel de noter que des fixations oculaires qui ont une durée moyenne de 200-250 millisecondes, peuvent être définies comme significatives lorsque leur durée est supérieure à 150 millisecondes (Serenio & Rayner, 2003).

Les saccades oculaires sont des mouvements rapides liant les positions du regard durant les fixations oculaires, mais elles ne donnent que peu d'indices sur la complexité ou la saillance associée à un objet de l'interface car aucun encodage n'est effectué durant ces périodes (Poole & Ball, 2005). L'analyse des saccades dites régressives est proposée pour évaluer la difficulté de traitement durant l'encodage et est principalement utilisée dans des études portant sur la lecture (Rayner & Pollatsek, 1989).

L'évaluation de la charge mentale à partir de données oculaires est principalement centrée sur l'analyse des clignements d'œil aussi appelés blinks dont la durée peut s'étendre de 100 à 400 millisecondes (Bruneau, Sasse, & McCarthy, 2002; Brookings, Wilson, & Swain, 1996) et du diamètre pupillaire (Marshall, 2000 ; Pomplun & Sunkara, 2003). Alors que les clignements d'œil sont analysés par leur fréquence, l'analyse du diamètre pupillaire est plus complexe et souvent malaisée.

2.2.3. L'analyse du diamètre pupillaire dans le cadre de l'évaluation de la charge mentale

La pupille, cet orifice situé au milieu de l'iris, a un diamètre moyen de 3-4 millimètres selon les individus. La principale fonction de la pupille est de réguler l'intensité de lumière entrant dans l'œil, par le biais de mouvements appelés réflexes pupillaires. Le réflexe pupillaire induit une variation de la taille de la pupille qui est contrôlé par deux types de muscles de l'iris, un dilatateur et un constricteur (Ebenholtz, 2001). Ainsi le diamètre pupillaire peut atteindre des valeurs comprises entre 1 et 8 millimètres. Contrairement au système pilotant l'attribution de la position du regard qui est un système guidé par la volonté, les variations du diamètre pupillaire seraient donc plus associables à une activité réflexe (Ebenholtz, 2001).

La taille de la pupille ainsi que la façon dont son diamètre varie sont propres à chaque individu. En effet, en fonction des caractéristiques physiologiques et surtout de l'âge de la personne, la taille de la pupille au repos, ainsi que l'amplitude du réflexe pupillaire varient.

La pupille est sensible à de nombreux paramètres. Elle est principalement sensible à la lumière, et donc aux conditions de luminosité ambiante (Steinhauer, Condray & Holcomb, 2000). En effet, l'adaptation à la luminosité module le réflexe pupillaire (Lowenstein & Lowenfeld, 1959). De plus, de nombreux états émotionnels associés à une stimulation sensorielle provoquant la libération de molécules biochimiques, influencent la taille de la pupille. Cette relation entre état de l'individu et variations de la pupille peut être justifiée par la nature physiologique du système pilotant la dilatation de la pupille. L'acétylcholine, un neurotransmetteur associé à la branche parasympathique du système nerveux autonome est généralement assimilée à la contraction de la pupille, alors que l'adrénaline qui est un transmetteur sympathique facilite la dilatation (Ebenholtz, 2001).

L'analyse des variations du diamètre pupillaire, appelée pupillométrie, est désignée comme prometteuse pour l'analyse de la charge mentale puisqu'elle permettrait de dévoiler l'activité cognitive qui accompagne l'effort mental (Beatty et Brennis, 2000 ; Heitz, Shrock, Payne & Engle, 2008). La dilatation est en effet désignée comme variant en fonction du niveau de charge mentale ressentie (Goldwater, 1972). Ainsi, plus le niveau de charge mentale ressentie est élevé en fonction d'un certain niveau d'exigences associé à la tâche réalisée, plus la dilatation pupillaire est censée être élevée (Matthews, Middleton, Gilmartin & Bullimore, 1991).

Cette approche a été principalement utilisée dans le cadre d'expérimentations de laboratoires auxquelles sont associées la réalisation d'une tâche simple, comme une tâche de calcul, avec différents niveaux de difficultés (Hess & Polt, 1964 ; Beatty & Kahneman, 1966). Une telle évaluation permet de comparer le réflexe pupillaire en fonction du niveau de difficulté de la tâche (Matthews, Middleton, Gilmartin & Bullimore, 1991). Beatty (1982) a défini la réponse pupillaire au niveau de charge mentale ressentie en réponse au niveau d'exigences de la tâche sous l'acronyme de « TEPR » (Task Evoked Pupillary Response). La réponse de la tâche évoquée par la

pupille (Cf. Figure 29) correspond à un pic du niveau de diamètre pupillaire. En se référant aux études réalisées (Beatty, 1982 ; Klingner, 2010), l'amplitude du TEPR est déduite. Cette dernière est comprise entre 0.2 et 0.5 millimètres, et a pour valeur centrale 0.3 millimètres. L'évaluation temporelle employée dans ce cas (analyse de l'ensemble des données de la pupille enregistrées au cours de l'exécution de la tâche) permet d'associer au maximum de la dilatation pupillaire un statut d'indicateur du niveau de charge mentale ressentie. L'évaluation de la charge mentale par le biais de l'analyse de la dilatation de la pupille a été également étudiée par le biais de l'analyse de la dilatation moyenne (Tommola, Jorma & Niemi, 1986).

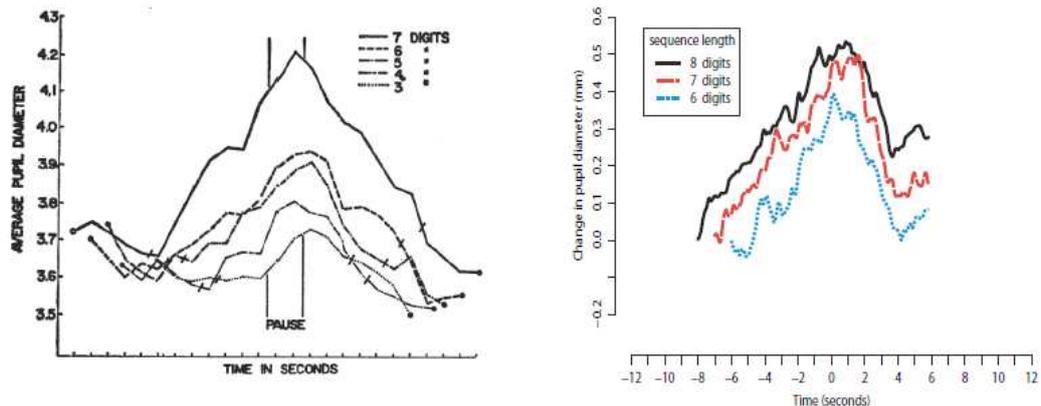


Figure 29. Le TEPR, Task Evoked Pupillary Response (à gauche, les résultats de Beatty, 1982 ; à droite ceux de Klingner, Kumar & Hanrahan, 2008)

2.2.4. Les prérequis à la réalisation d'expérimentations utilisant une technique d'eye-tracking

Pour contrôler la qualité des données oculaires enregistrées, et notamment celles relatives aux variations du diamètre pupillaire, un ensemble de prérequis a été intégré à la mise en place des expérimentations réalisées dans le cadre de cette recherche. De telles dispositions visent principalement à garantir le fait que les variations du diamètre pupillaire analysées dans le cadre de l'évaluation de la charge mentale ne soient pas causées par des éléments provenant des conditions environnementales.

Ainsi, la position de la tête du participant a été maintenue à environ 70 centimètres de l'eye-tracker grâce au blocage des roues des fauteuils (de salle de contrôle) utilisés lors des expérimentations. L'eye-tracker a également été configuré en fonction des dimensions de la zone d'enregistrement des données oculaires (correspondant aux dimensions de l'écran radar) et de sa position par rapport à cette zone (hauteur entre l'eye-tracker et l'écran radar, inclinaison de l'eye-tracker).

De plus, pour éviter des variations du diamètre pupillaire dues à des changements de luminosité ambiante, la luminosité de la salle dans laquelle les études se sont déroulées a été maintenue constante. Des relevés de luminance ont également été effectués pour évaluer la grandeur de variation de la luminosité de l'écran radar au cours du déroulement d'une séquence de trafic. Au vu des relevés effectués qui démontrent une luminance stable à plus ou moins 2 Lux, il apparaît que les variations de luminance de l'écran radar ne sont pas suffisantes pour agir sur les variations

notables de la pupille. Enfin, pour assurer la prise en compte par l'eye-tracker de la variabilité inter-individuelle relative aux caractéristiques physiologiques de l'œil au cours de la phase d'enregistrement, une phase de calibration a été réalisée avant le début de chaque passation d'expérimentation effectuée.

2.3. Relier les données de trafic et les données oculaires pour « contextualiser » l'évaluation de la charge mentale

L'influence de la nature de la tâche effectuée sur les mouvements oculaires réalisés a été mise en exergue par Yarbus (1967). Intégrer l'évolution de la situation de trafic aérien gérée par le contrôleur à l'analyse des mouvements oculaires effectués au cours d'une tâche de contrôle serait un moyen d'observer dans quelle mesure la nature de la tâche de contrôle influence les mouvements et indicateurs oculaires du contrôleur aérien. Relier la position du regard avec les zones d'intérêt pouvant faire l'objet de fixations permet de donner du sens à la façon dont les ressources attentionnelles et cognitives de l'opérateur sont réparties. Ainsi, le comportement de l'opérateur peut être plus aisément expliqué à partir de caractéristiques permettant de qualifier son activité de travail (le type d'avion faisant l'objet de l'attention et de l'analyse du contrôleur dans ce cas).

L'évolution de la situation de trafic supervisée par le contrôleur peut notamment être déterminée à partir du contenu de l'image radar et notamment de l'évolution de la position des avions au cours du temps. Comparer les mouvements et indicateurs oculaires de contrôleurs au contenu de l'image radar nécessite de déterminer au préalable les zones d'intérêt (ou AOI, Areas Of Interest) susceptibles d'être consultées par le contrôleur au cours de l'exécution de la tâche de contrôle. Les principales zones d'intérêt ou AOI dissociables sur une image radar sont les avions qui composent le trafic aérien qui s'écoule au cours du temps. Dès lors, au cours du temps la position des avions évolue, ce qui en fait des zones d'intérêt dynamiques.

Associer des données oculaires à des zones d'intérêt dynamiques nécessite une phase d'analyse consistant à comparer les coordonnées de la position du regard enregistrées au cours du temps, aux différentes positions occupées par les avions sur l'image radar au cours de la tâche. À l'issue de cette analyse, il est possible d'associer à la position du regard, la zone d'intérêt qui en fait l'objet. Dans les études réalisées, le rassemblement de ces données a été possible grâce à l'utilisation d'une application permettant l'enregistrement simultané des données oculaires et de trafic aérien avec une échelle temporelle commune (mise en relation entre heure de simulation de la séquence de trafic et l'heure réelle de la passation), et aboutissant à la création d'un seul fichier de données par passation, appelé fichier « log ».

La mise en relation des deux catégories de données (oculaires et de trafic) a été par la suite réalisée par le biais d'algorithmes permettant la comparaison des coordonnées d'unités de mesure différentes (pixels pour les données de trafic et en centimètres pour la position du regard), puis la mise en relation entre position du regard et zones d'intérêt présentes sur l'image radar.

2.4. Une approche multifactorielle intégrant une évaluation subjective de la charge mentale ressentie

L'intégration d'une évaluation subjective dans la méthode d'évaluation multifactorielle de la charge mentale mise en place dans les évaluations de cette recherche a été principalement assurée par la réalisation de débriefings post-tâche. La réalisation de débriefings à l'issue de la tâche expérimentale a eu pour principal intérêt d'éviter la perturbation ou l'interruption de la réalisation de la tâche pour questionner le participant. Le choix de réaliser un débriefing à l'issue de la tâche expérimentale pour recueillir le retour d'expérience du participant se justifie également par la façon dont les simulations sont effectuées en centre de contrôle. En effet, lors des simulations effectuées sur simulateur dans le centre de contrôle il est de coutume de clôturer ces « phases d'entraînement » par des débriefings. Ces entretiens permettent notamment aux contrôleurs de commenter la situation de trafic gérée (difficulté associée, événements marquants) et d'expliquer les stratégies opératoires mises en place.

L'évaluation subjective centrée sur un débriefing post-tâche assure donc la non-incidence de l'évaluation réalisée sur le niveau de charge mentale ressentie par les contrôleurs aériens et s'assimile à des pratiques issues du domaine d'application. Le débriefing peut s'associer à un entretien semi-directif, qui même s'il est guidé par des questions ouvertes se concentre sur le retour d'expérience du contrôleur participant à l'étude, et sur les faits marquants qu'il juge nécessaire de détailler. Cette discussion a principalement visé l'obtention de ses impressions quant à l'environnement expérimental, la séquence de trafic constituant la tâche expérimentale et la performance qu'il associerait à sa prestation.

Cet entretien a également permis d'obtenir une évaluation du niveau de charge mentale moyen ressentie au cours de l'exécution de la tâche. Cette dernière a notamment été obtenue par l'utilisation d'échelles d'évaluation au terme de l'entretien.

3. Pré-analyse des données enregistrées grâce à la méthode multifactorielle d'évaluation de la charge mentale mise en place

Ce dernier paragraphe du chapitre, consacré à la méthode d'évaluation de la charge mentale de contrôleurs aériens mise en place lors des études empiriques de cette recherche, vise à décrire la phase précédant les analyses effectuées et détaillées dans les chapitres empiriques de ce manuscrit. Cette étape préalable a principalement consisté à coupler l'ensemble des données enregistrées au cours des passations dans des fichiers communs, facilement exploitables lors de l'analyse des données. Elle inclut également un filtrage des données oculaires visant à supprimer les données « aberrantes ».

3.1. La génération des fichiers de données à partir du logiciel OCTAVE

La description de la méthode multifactorielle d'évaluation de la charge mentale de contrôleurs aériens, employée pour la partie empirique de la recherche, a illustré la diversité et la quantité de données enregistrées et incluses à l'analyse des données.

Pour faciliter le traitement de cette importante quantité de données « brutes » récoltée lors de chaque passation, il est apparu nécessaire de faciliter leur regroupement en l'automatisant. Ce regroupement porte notamment sur les différentes catégories de données du trafic aérien (les positions des avions, les bornes temporelles relatives à l'évolution des situations conflictuelles) et les données du regard (position du regard, diamètre de la pupille).

Pour répondre à ce besoin, le développement d'un logiciel a été initié. Le logiciel OCTAVE a été ainsi développé et utilisé comme outil de pré-traitement des données (Cf. Annexe II). L'objectif majeur d'OCTAVE (Cf. Figure 30) est de fournir une visualisation des données et une sortie sous forme de fichiers à partir desquels l'analyse des données peut être effectuée. Son fonctionnement consiste à regrouper l'ensemble des données brutes pour les relier les unes aux autres avec une base de temps commune.

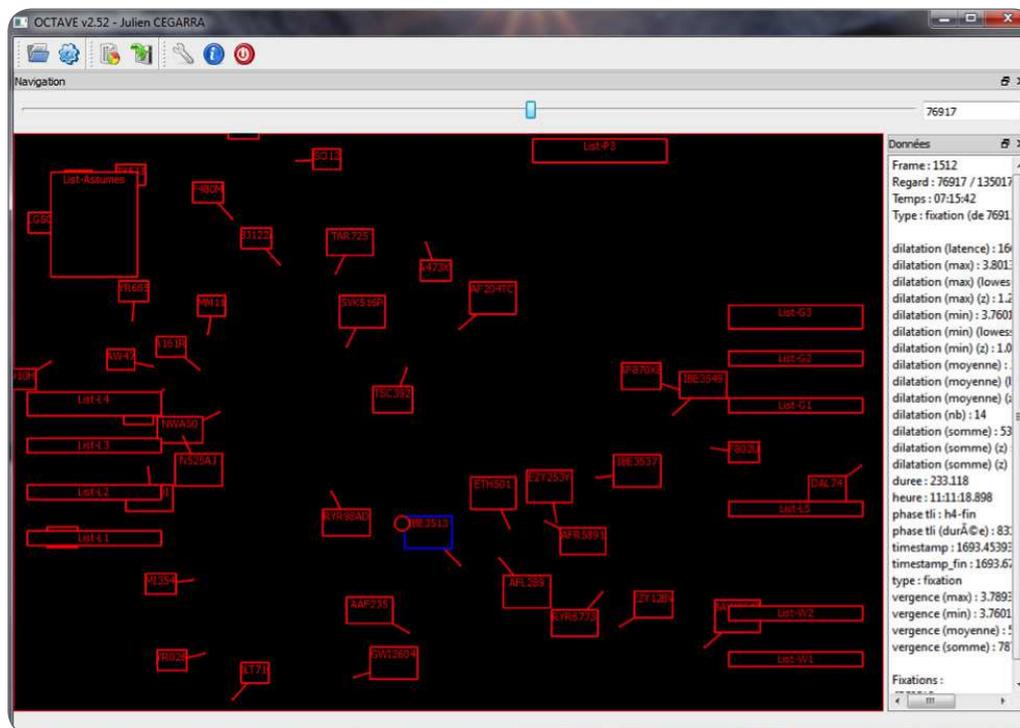


Figure 30. L'interface du logiciel d'analyse de données oculaires, OCTAVE

L'association entre les différentes catégories de données proposée par le logiciel d'OCTAVE permet notamment de :

- Distinguer les fixations oculaires des phases de mouvements (les saccades oculaires),
- Détecter les blinks,
- Associer à chaque fixation oculaire, une zone d'intérêt (l'avion regardé)
- Adjoindre par fixation les caractéristiques relatives au diamètre pupillaire (moyenne, maximum...)

A l'issue de l'analyse réalisée par OCTAVE, deux fichiers de données sont générés. Le premier fichier est basé sur la répartition des données oculaires par avion, le second est quant à lui, centré sur la répartition des données oculaires au cours du temps.

3.2. Le filtrage des données oculaires effectué

L'analyse des données oculaires a été systématiquement précédée par une phase de prétraitement des données par le logiciel OCTAVE.

- Le premier filtrage effectué porte sur les fixations oculaires et vise à conserver les fixations « significatives » dont la durée est supérieure à 150 millisecondes (Sereno & Rayner, 2003).
- Le deuxième filtrage des données oculaires porte sur les données du diamètre pupillaire. Les différentes étapes de ce filtrage ont été déterminées suite à une analyse du signal du diamètre pupillaire, qui a principalement mis en exergue une variation « bruitée » du diamètre pupillaire ne pouvant pas être associée à une fréquence, comme cela est le cas avec d'autres indicateurs physiologiques (par exemple le rythme cardiaque).

Le filtrage des données du diamètre pupillaire qui a été mis en place, consiste dans un premier temps à supprimer les données du diamètre pupillaire excédant les valeurs conformes, c'est-à-dire inférieures à 3 millimètres et supérieures à 5 millimètres (Cf. paragraphe 2.2.3). De plus, pour supprimer la prise en compte des différences inter-individuelles entre les différents participants des expérimentations dans les analyses, les données du diamètre pupillaire ont été normalisées (données centrées réduites) en fonction des caractéristiques de chaque participant (valeur moyenne du diamètre pupillaire de chaque participant). Les analyses relatives aux valeurs de diamètre pupillaire effectuées ont dès lors porté sur les variations de dilatation pupillaire (avec un niveau de référence de 0).

Pour limiter le bruit associé à l'enregistrement des données de diamètre, une méthode de lissage du signal du diamètre pupillaire a été intégrée au filtrage des données par le moyen de fenêtres glissantes.

Les figures ci-dessous (Cf. figure 31) illustrent les changements induits par le traitement du signal du diamètre pupillaire à la suite de la phase de filtrage initial (suppression des données de diamètre pupillaire incorrectes et des valeurs enregistrées hors phases de fixations significatives).

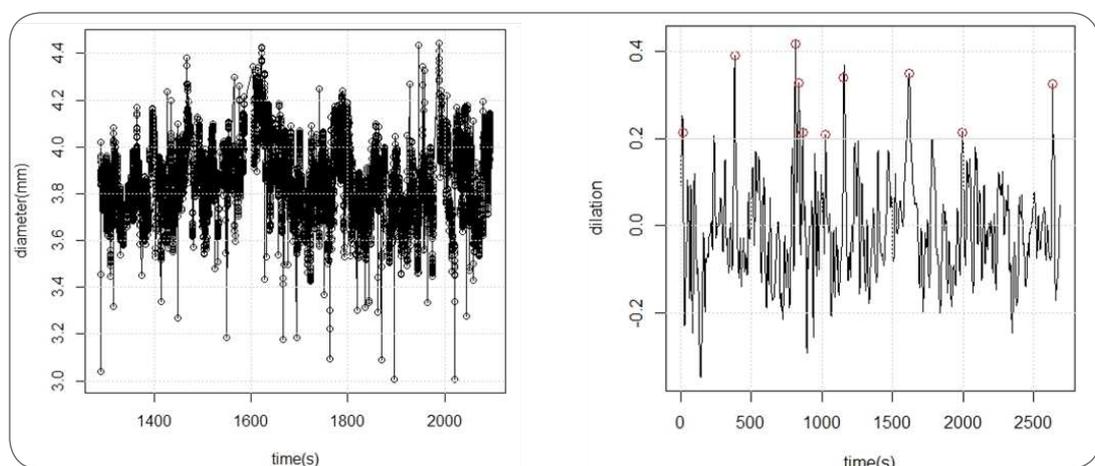


Figure 31. Un signal de diamètre pupillaire avant (figure de gauche) et après (figure de droite) la phase de traitement des données

3.3. Les résultats visés par l'analyse des données oculaires et de trafic aérien

Les analyses des données effectuées ont visé l'atteinte de deux types de résultats différents :

- Le premier objectif est la mise en relation entre le type de trafic (statut de l'avion défini à partir de sa catégorie d'appartenance) et les données oculaires.
- Le second objectif vise une approche plus temporelle, grâce à l'analyse des variations du diamètre pupillaire au cours du temps et des variations de l'état du trafic aérien géré.

Enfin, l'analyse des données oculaires reliées aux données de trafic a été complétée par les évaluations de charge mentale effectuées par les contrôleurs aériens participant aux études réalisées dans le cadre de l'approche subjective. Cette complémentarité entre analyses objectives et évaluations subjectives a permis de mettre en relation la charge mentale ressentie et évaluée.

Les trois prochains chapitres du manuscrit présentent la façon dont la méthode d'évaluation de la charge mentale de contrôleurs aériens qui a été décrite dans ce chapitre, a été mise en place dans les expérimentations composant la partie empirique de cette recherche.

Régulations de la charge mentale des contrôleurs aériens en situation nominale



Le premier chapitre empirique du manuscrit introduit la première étude réalisée dans le cadre de ce travail de recherche. Après un rappel des théories centrales portant sur la régulation de la charge mentale de contrôleurs aériens et de résultats empiriques sur la charge mentale de contrôleurs aériens obtenus à partir d'une technique d'eye-tracking, l'étude réalisée et plus précisément l'expérimentation mise en place, ainsi que les résultats auxquels elle a permis d'aboutir, sont détaillés.

1. Théories et résultats empiriques relatifs à la gestion de la charge mentale effectuée par les contrôleurs aériens

1.1. La régulation caractérisant la gestion de la charge mentale effectuée par les contrôleurs aériens

Dans son modèle de gestion de la charge mentale de contrôleurs aériens, Spérandio (1971) met en avant la non-passivité des contrôleurs aériens quant au niveau de charge mentale qu'ils ressentent. Au contraire, il montre l'existence d'un système adaptatif permettant le changement de stratégies opératoires du contrôleur aérien en fonction des exigences de la tâche, afin de réguler l'effet engendré sur la charge mentale. Des recherches plus récentes ont permis de mettre en exergue certaines caractéristiques de la gestion de la charge mentale effectuée par les contrôleurs aériens.

Une des observations qui a été faite porte sur la corrélation existante entre le niveau de charge mentale ressentie et le niveau d'exigences de la tâche (Callantine, Lee, Mercer, Prevot & Palmer, 2005). De plus, la gestion de la charge mentale des contrôleurs aériens a été associée à un mécanisme de priorisation des tâches effectuées (Seamster, Redding, Cannon, Ryder & Purcell, 1993 ; Rantanen & Levinthal, 2005). Ce dernier se basant sur la représentation de la situation de trafic aérien à superviser que se construit le contrôleur aérien au cours de son activité de travail (Nunes & Mogford, 2003).

La place occupée par les phases de détection et de résolution de conflits a également été définie comme centrale dans le niveau de charge mentale ressentie par les contrôleurs aériens au cours de leur activité de contrôle (Xu & Rantanen, 2003 ; Eyferth, Niessen & Spaeth, 2003). En complément Averty et collaborateurs (2002, 2004), ont pointé l'évolution du niveau de charge mentale des contrôleurs aériens au sein de la phase de gestion des conflits.

Le modèle TLI (Task Load Index) pointe notamment une augmentation du niveau de charge mentale entre les phases de détection et de résolution du conflit. Cette phase qui correspond à la phase d'analyse de la situation conflictuelle par le contrôleur aérien, et dont la durée est appelée « maturing-time », peut être différenciée en catégories de contrôleurs aériens. Cette observation permet de suspecter l'existence de profils de contrôleurs aériens quant au temps s'écoulant la détection et la résolution de situations conflictuelles. En effet, alors que certains contrôleurs vont avoir tendance à laisser pourrir la situation afin de déterminer une action de contrôle « fine » (faible modification de la trajectoire initiale des avions), d'autres vont préférer agir plus en amont, même si cela peut engendrer la mise en place d'une action de contrôle plus radicale (modification importante de la trajectoire initiale), voire de plusieurs actions de résolution.

Une telle distinction des contrôleurs aériens revient à la distinction de profils d'opérateurs comme Cegarra et Hoc (2006) l'ont proposé pour distinguer des opérateurs en fonction de leur niveau d'expertise.

1.2. L'évaluation de charge mentale de contrôleurs aériens basée sur une technique d'eye-tracking

L'illustration, et plus précisément la recherche de quantification, du niveau de charge mentale de contrôleurs aériens a été l'objet d'études empiriques proposant une évaluation de la charge mentale centrée sur l'analyse de données psychophysiologiques (Stein, 1992). Certaines d'entre elles ont notamment proposé l'analyse de données oculaires dans le cadre de l'évaluation de la charge mentale de contrôleurs aériens (Stein, 1989 ; Van Orden et al., 2001).

Les études empiriques portant sur l'évaluation de la charge mentale d'opérateurs à partir de l'analyse de paramètres oculaires peuvent être définies comme hétérogènes. En effet, de nombreux indicateurs oculaires, analysés par le biais d'approches plus ou moins identiques peuvent être distingués sur l'ensemble des études empiriques antérieures portant sur l'analyse de données oculaires dans le cadre de l'évaluation de la charge mentale d'opérateurs (Di Nocera, Terenzi & Camili, 2006).

Ainsi, la fréquence et la durée de blinks (ou clignements des yeux) ont été définies comme inversement corrélées à la charge mentale d'opérateurs (Brooking, Wilson & Swain, 1996 ; Hankins & Wilson, 1998).

De plus, des études ont montré que la charge mentale affecterait la durée des fixations oculaires (Bunecke, 1987 ; Ephrath, Tole, Stephens & Young, 1980), alors que d'autres ont relevé des fixations plus courtes mais plus fréquentes pour des opérateurs experts (Bellenkes, Wickens & Kramer, 1997).

Le diamètre pupillaire a lui aussi été déterminé comme sensible au niveau de charge mentale ressentie par l'opérateur (Recarte & Nunes, 2000 ; 2003). Ahern et Beatty (1979) ont ainsi montré l'existence d'une corrélation entre augmentation du niveau d'exigences de la tâche et de la dilatation pupillaire du pilote durant une tâche de calcul. Contrairement à cela, une étude réalisée par Stein (1992) n'a montré aucune corrélation entre la taille de la pupille de contrôleurs aériens et le niveau d'exigences de la tâche effectuée, ainsi qu'avec l'évaluation subjective de la charge réalisée par les contrôleurs.

Le constat qui peut être tiré, à partir de l'ensemble des résultats empiriques cités précédemment, est que le choix des indicateurs oculaires permettant d'évaluer au mieux la charge mentale d'opérateurs au cours d'une activité n'est pas clairement déterminé. En effet, les résultats plus ou moins cohérents selon les indicateurs étudiés peuvent pousser à s'interroger sur l'analyse qui doit être réalisée dans le cadre d'une évaluation de la charge mentale de contrôleurs aériens. Malgré tout, l'utilité d'une évaluation de la charge mentale de contrôleurs aériens centrée des mesures psychophysiologiques dans ce domaine est clairement pointée (McKenzie, Buckley & Sarlanis, 1966).

Une remarque complémentaire peut être apportée concernant les études empiriques préalablement citées (Brookings, Wilson & Swain, 1996). Dans une majorité d'entre elles, il apparaît que le nombre de participants de l'expérimentation est assez faible (situé entre 4 et 10 participants) et que la nature de la tâche ne reflète pas toujours

la tâche quotidienne des opérateurs (par exemple la tâche de calcul pour des pilotes utilisée par Beatty et Ahern). Ces deux observations renforcent donc l'interrogation décrite précédemment sur l'analyse des données oculaires qu'il faut réaliser dans le cadre d'une évaluation de la charge mentale de contrôleurs aériens.

1.3. Les analyses complémentaires utilisées dans le cadre d'une évaluation multifactorielle de la charge appliquée au contrôle aérien

Lorsque l'on se réfère aux études empiriques appliquées au domaine du contrôle du trafic aérien, on observe que différentes analyses portant notamment sur certaines caractéristiques de la tâche ou de l'activité réalisée par les participants sont analysées comme des indicateurs du niveau de charge mentale ressentie. Plus précisément, trois types d'analyses complémentaires peuvent être distingués :

- L'analyse subjective de la charge mentale (Lamoureux, 1999 ; Collet, Averty, Delhomme, Dittmar & Vernet-Maury, 2003). La majorité des analyses subjectives proposées dans les études consistent à compléter une échelle d'évaluation, et notamment par le biais du NASA-TLX (Hart & Staveland, 1988). Cette approche vise à quantifier le niveau de charge mentale moyen ressentie par les participants au cours de l'exécution de la tâche expérimentale.
- Une deuxième analyse permettant de caractériser l'activité réalisée par les participants, consiste à évaluer le niveau de sécurité pouvant être associé à la situation de trafic aérien supervisée (Brookings, Wilson & Swain, 1996 ; Endsley & Rodgers, 1998). Cette approche, qui a pour principal objectif l'illustration du niveau de performance atteint par les participants, consiste notamment à déduire le niveau de sécurité associé à la situation de trafic aérien, à partir des rapprochements hors-normes des avions en vue des règles de séparation à respecter.
- La dernière catégorie d'analyses complémentaires porte sur les communications effectuées entre les contrôleurs aériens (les participants des études) et les pilotes de la séquence de trafic supervisée (Manning, Mills, Fox, Pfeiderer & Mogidka, 2002 ; Chatterji & Sridhar, 2001). Les analyses de communications entre contrôleurs aériens et pilotes réalisées dans des études antérieures ont notamment permis de montrer la corrélation entre le nombre et la fréquence de communications et la difficulté du trafic à gérer. Ainsi, plus le niveau de difficulté associé au trafic à superviser est élevé, plus la densité des communications serait faible. Cette corrélation entre augmentation de la difficulté de la tâche et baisse de la densité de communications illustre une des stratégies opératoires pouvant être mise en place par les contrôleurs aériens, dont l'objectif consiste à réorganiser leurs priorités en anticipant une charge importante de communications liée à l'augmentation du niveau de charge de trafic (Rantanen & Levinthal, 2005). Cependant, Manning, Mills, Fox, Pfeiderer & Mogilka (2002) ont observé que les communications (en les analysant par numéro et type) ne permettent pas de prédire significativement le niveau de charge mentale de contrôleurs aériens.

2. Problématique de l'étude et hypothèses de recherche déduites

Comme il l'a été pointé auparavant dans le texte, la nature de la tâche de contrôle du trafic aérien est centrée sur l'opérateur humain. En effet, les décisions qu'il prend ainsi que les actions qu'il effectue sont centrales au maintien de la sécurité de la situation du trafic aérien (Cf. Chapitre 1, 1.1.7 et 1.2). Pour atteindre son objectif, à savoir assurer le bon écoulement du trafic (en termes de rapidité et de sécurité), le contrôleur aérien doit gérer ses ressources mentales. Certaines des études antérieures, menées principalement à partir d'observations ou de retours d'expériences d'experts du domaine du contrôle aérien ont mis en exergue la sollicitation de mécanismes de régulation quant à la mobilisation de ressources cognitives par les contrôleurs aériens. Ces travaux ont permis de décrire le comportement du contrôleur aérien au cours de son activité de travail, mais aussi de déterminer certaines caractéristiques de la situation de contrôle pouvant être définies comme des indicateurs de charge mentale. Cela a notamment été le cas des situations conflictuelles que le contrôleur doit détecter et résoudre pour éviter qu'elles ne se produisent réellement.

Des études empiriques, ont quant à elles visé à quantifier le niveau de charge mentale de contrôleurs aériens à partir d'évaluations de la charge mentale basées sur l'analyse de paramètres oculaires. Ces études, qui pour la plupart ont été basées sur des évaluations de courtes durées et/ou sur une population restreinte de participants ou encore dans un contexte reflétant plus ou moins les caractéristiques de la situation de contrôle (position expérimentale, tâche effectuée), ont été basées sur des approches d'analyses assez hétérogènes, tant au niveau du choix de paramètre(s) oculaire(s) faisant l'objet de l'évaluation, que sur l'approche mise en place pour les analyser.

On peut dès lors s'interroger sur la possibilité de mettre en exergue les mécanismes de régulation de la charge mentale que les contrôleurs aériens mettent en place au cours de leur activité de travail quotidienne, et ce à partir d'une évaluation temporelle et multifactorielle du niveau de la charge mentale centrée sur l'analyse de paramètres oculaires. Cette interrogation constitue le sujet de l'étude présentée dans cet article et qui s'est concrétisée par la réalisation d'une expérimentation détaillée dans la suite du texte.

Pour statuer sur la problématique de l'étude, quatre hypothèses de recherche ont été formulées quant aux modes de gestion de la charge mentale de contrôleurs aériens :

- La variation du niveau d'exigences de la tâche de contrôle, et plus précisément la présence de situations conflictuelles impacte le niveau de charge mentale ressentie par les contrôleurs.
- En fonction du type d'avions composant la séquence de trafic aérien (Hors-Secteur, Sur Secteur Non-Conflictuel, Sur Secteur Conflictuel), une quantité croissante de charge mentale allouée par les contrôleurs aériens est affectée.
- Le niveau de charge mentale du contrôleur aérien ressentie durant les phases de gestion de situations conflictuelles n'est pas stable et connaît une augmentation entre les phases de détection et de résolution du conflit.

- Différents profils de contrôleurs aériens peuvent être distingués concernant le mode de gestion des situations conflictuelles employé, s'illustrant notamment par la durée s'écoulant entre la détection et la mise en place de la solution visant la résolution du conflit (durée du maturing time).

Des hypothèses ont également été déterminées quant à l'analyse et surtout aux résultats pouvant être obtenus par le biais de l'analyse des différents paramètres oculaires, dans le cadre de l'évaluation de la charge mentale de contrôleurs aériens :

- Les paramètres oculaires ne fournissent pas une évaluation « homogène » de la charge mentale de contrôleurs aériens.
- L'analyse de la dilatation pupillaire est plus adaptée à l'évaluation de la charge mentale de contrôleurs aériens par le biais de la dilatation pupillaire maximale au détriment de la dilatation pupillaire moyenne.

3. L'étude réalisée : L'évaluation de la charge mentale de contrôleurs aériens dans une situation de contrôle nominale

Cette étude porte sur une situation de contrôle du trafic aérien nominal et tend à déterminer par le biais d'une analyse centrée sur les paramètres oculaires, certaines caractéristiques de la régulation de la charge mentale effectuée par les contrôleurs aériens au cours de leur activité de travail quotidienne.

3.1. Principe de l'expérimentation

L'expérimentation menée dans le cadre de cette étude a été réalisée dans un centre de contrôle En-Route français chargé de gérer une partie du trafic aérien se situant en dehors des zones proches des aéroports (contrôle aérien En-Route) : le CRNA S/O (le Centre Régional de la Navigation Aérienne Sud-Ouest). Plus précisément, les passations de l'expérimentation se sont déroulées au sein de la salle de contrôle non loin des positions de contrôle « opérationnelles ».

Le principe de l'expérimentation a été de demander à des contrôleurs aériens experts de réaliser une tâche s'apparentant en tout point à leur tâche quotidienne. Concrètement, l'expérimentation a consisté à gérer une séquence de trafic aérien de 45 minutes dans un environnement reflétant la position de contrôle opérationnelle. Cette durée pouvant être définie comme longue pour une tâche expérimentale de contrôle, a été choisie afin de donner la possibilité aux participants de mettre en place les stratégies et les mécanismes opératoires qu'ils utilisent au quotidien en position de contrôle, et qui font l'objet de cette étude.

3.2. La tâche expérimentale

La tâche expérimentale est une tâche de contrôle du trafic aérien, où le participant joue le rôle de contrôleur radariste. L'objectif de la tâche consiste à superviser le trafic s'écoulant sur un secteur de contrôle et à assurer la sécurité relative à la situation de trafic, en respectant l'ensemble des règles et procédures opérationnelles.

Concrètement, la réalisation de la tâche en tant que contrôleur radariste, consiste à communiquer avec l'ensemble des pilotes des avions de la séquence de trafic, de suivre les évolutions des avions sur la portion d'espace contrôlée pour détecter les risques de situations conflictuelles potentielles. Dans le cas de détection de situations conflictuelles, le participant doit définir et mettre en application la ou les solutions (correspondant à un ou plusieurs ordres de contrôle) permettant de séparer les avions suffisamment en vue des normes de séparation à respecter.

Le choix de la réalisation d'une expérimentation en solo où le participant joue le rôle de contrôleur radariste (plutôt qu'en binôme comme en opérationnel) a visé à assurer la corrélation entre la nature du trafic aérien supervisé et le niveau de charge mentale évalué. Cela n'aurait pas été le cas pour une évaluation centrée sur l'activité de contrôle réalisée par un binôme de contrôleurs, dont l'activité coopérative aurait agi sur le niveau de charge mentale ressentie, représentant une stratégie opératoire de régulation du niveau de charge mentale de travail.

3.3. Participants

Quarante contrôleurs aériens volontaires et bénévoles, âgés entre 26 et 56 ans, ont participé à l'expérimentation (30 hommes et 10 femmes ; âge moyen : 39 ans). L'ensemble des participants ont le titre d'ICNA (Ingénieurs du Contrôle de la Navigation Aérienne) justifiant le suivi d'une formation initiale identique à l'ENAC (Ecole Nationale de l'Aviation Civile). De plus, tous possèdent la qualification PC (Premier Contrôleur) pour le centre de contrôle En-Route Sud-Ouest (CRNA Sud-Ouest), attestant leur habilitation à contrôler le trafic s'écoulant sur les secteurs de trafic rattachés à ce centre de contrôle En-Route français.

Ces particularités relatives à la formation des contrôleurs aériens ayant participé à l'expérimentation permet de relever une certaine homogénéité de la population, concernant notamment les connaissances à leur disposition et relatives à la gestion du trafic aérien.

Les participants de l'expérimentation sont cependant distinguables sur un point principal : leur expérience. Cette caractéristique peut être évaluée par le biais de leur ancienneté en salle de contrôle. Pour la population de l'expérimentation, cette dernière varie entre 0,5 et 26 années et a pour valeur moyenne la durée de 11 années. La différence d'expérience des participants agit principalement sur l'étendue des stratégies opératoires à leur disposition pour gérer le trafic le plus économiquement possible, correspondant à la bibliothèque mentionnée dans le Chapitre 1 (Cf. Chapitre 1, 1.2).

3.4. Matériel et méthode

Les moyens techniques ainsi que la méthode déployés pour l'expérimentation ont visé l'optimisation du réalisme de la situation expérimentale, en référence à la situation de contrôle actuellement existante en salle de contrôle. Ces précautions font suite aux prérequis déterminés et détaillés précédemment (Cf. Chapitre 3, 1.1). Elles visent la

mise en place d'une situation expérimentale écologiquement valide, ont notamment été concentrées sur trois composantes de la situation expérimentale : la position expérimentale, la séquence de trafic aérien, et la consigne de l'expérimentation.

3.4.1. La position expérimentale

La position expérimentale mise en place pour l'expérimentation constitue un simulateur de contrôle. Le simulateur de contrôle en question est composé de quatre parties (Cf. Figure 32), chacune étant censée refléter une partie de la position de contrôle de centre de contrôle En-Route (Bisseret, 1995 ; cf. Chapitre 1, 1.1.6).



Figure 32. La position de contrôle expérimentale

- La première partie de la position est l'écran radar sur laquelle la situation de trafic aérien à superviser a été projetée. Cet écran LCD de 30 pouces avait pour arrière-plan le secteur sur lequel la séquence de trafic se déroulait (délimitations du secteur et routes de trafic le traversant). L'interface de l'écran radar de la position expérimentale respecte l'ensemble des couleurs graphiques de l'image radar introduite dans les centres de contrôle En-Route (gris, blanc et noir). Les avions de la séquence de trafic aérien étaient représentés sous forme de plots radars associés à six formes géométriques illustrant les dernières positions géographiques des avions.
- Durant l'expérimentation, les participants ont utilisé une souris comme moyen d'interaction sur l'image radar (ajustements des réglages de l'image radar et affichage de fonctions comme les vecteurs vitesse notamment).
- Le simulateur de contrôle utilisé lors de l'expérimentation a intégré également un système d'impression des strips papiers. Ainsi, cinq minutes (au lieu de dix minutes en opérationnel) avant l'entrée d'un avion sur le secteur supervisé par le participant, le strip associé a été imprimé. Pour permettre de répartir l'ensemble des strips papier en fonction de l'évolution de la séquence de trafic supervisée, un tableau de strips

identique à celui utilisé en position a été intégré à la position expérimentale. Une fois qu'un avion quittait le secteur contrôlé, le strip associé a été jeté dans une « poubelle à strips » située sur le côté du tableau de strips.

- Pour permettre les communications entre le participant et les pilotes des avions de la séquence de trafic un système de fréquence radio, ainsi qu'une position de pseudo-pilote ont été associés au simulateur de contrôle (Cf. Figure 33). La position de pseudo-pilote utilisée est un outil développé par la DGAC, pôle PII appelé IIPP (IHM Innovante pour Pseudo Pilote), permettant à une seule personne, experte du pilotage, de réaliser l'ensemble des communications (en respectant les règles de la phraséologie) pour les avions de la séquence de trafic supervisée par le participant. Pour optimiser le réalisme de la situation, un système de déformation vocale permettant l'allocation d'une voix (transformation de la fréquence vocale de la personne jouant le rôle de pilote) à chacun des avions de la séquence de trafic a été intégré à la plateforme.
- Enfin pour optimiser le réalisme associé à la situation expérimentale de contrôle, la plateforme expérimentale a été complétée par un pseudo-contrôleur organique chargé de faire passer au contrôleur radariste les strips papier après leur impression et de les annoter (soulignage de certaines données du strip) comme cela se fait en opérationnel. A la différence de la situation réelle, le pseudo-contrôleur organique n'a effectué aucune tâche de détection de conflits (en entrée et en sortie du secteur) afin de laisser la gestion complète (de la détection à la résolution) des situations conflictuelles de la séquence de trafic de l'expérimentation au participant jouant le rôle de contrôleur radariste.

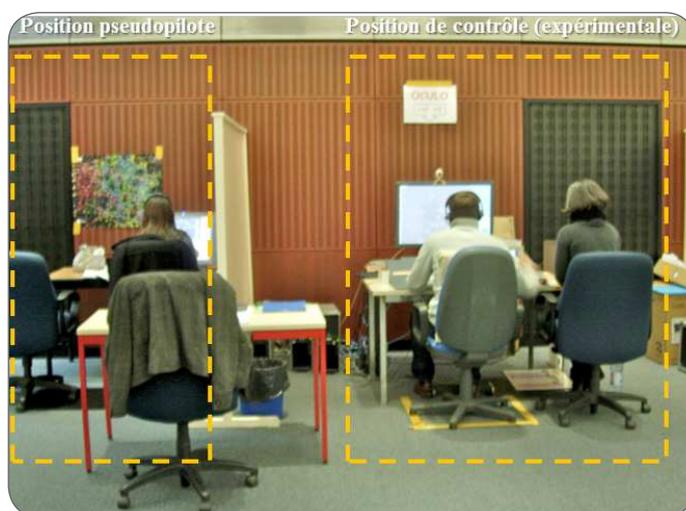


Figure 33. Les différentes parties de la plateforme expérimentale

3.4.2. La séquence de trafic aérien

La séquence de trafic aérien utilisée pour l'expérimentation a été réalisée à partir d'enregistrements de trafic réel. Le trafic en question s'écoule sur le secteur nommé « T » (Cf. Figure 34), portion de l'espace aérien supervisé par le CCR Sud-Ouest, et prend place entre 6h50 et 7h35. En opérationnel, ce créneau horaire est associé à une charge de trafic plutôt élevée. Au total 53 avions composent la séquence de trafic aérien.

3.4.3. La consigne communiquée aux participants

La consigne donnée aux participants avant qu'ils n'exécutent la tâche de contrôle expérimentale était la plus simple possible (Cf. Chapitre 3, 1.1.1). En effet, avant que la séquence de trafic ne soit lancée, il a été demandé aux participants de gérer la séquence de trafic, s'écoulant sur le secteur T, de la même façon qu'ils le feraient en situation réelle de contrôle.

3.5. Appareillage de la position expérimentale

Pour permettre l'enregistrement des données permettant d'évaluer le niveau de charge mentale, la position expérimentale a dû être appareillée de trois enregistreurs : un eye-tracker, un système d'enregistrement des communications et un système d'enregistrement des données de trafic.

- L'eye-tracker Tobii X-120 a été placé sous l'écran radar de la position de contrôle expérimentale en respectant les prérequis méthodologiques préalablement détaillés (Cf. Chapitre 3, 2.2.1).
- L'enregistrement des données relatives aux communications s'est fait par le biais de l'enregistrement de la position de l'alternat pied de la position expérimentale au cours de l'exécution de la tâche. L'alternat pouvait être sur deux positions : Position 0. Fréquence radio non occupée ; Position 1. Fréquence radio occupée.
- Les données de trafic ont été enregistrées par le biais de l'éditeur de trafic Rejeu (Cf. Chapitre 3, 2.1.3).

3.6. Procédure de l'expérimentation

Les passations ont été réalisées individuellement dans la salle de contrôle du CCR Sud-Ouest où la luminosité a été maintenue constante. L'ensemble des passations a été encadré par le même expérimentateur. Après une brève présentation de l'objectif du travail effectué, les données personnelles du participant (âge, sexe, expérience notamment) ont été collectées par le biais d'un questionnaire. La plateforme de contrôle expérimentale et le principe de l'expérimentation ont été par la suite présentés à chaque participant. Enfin le participant a été prié de prendre place sur le fauteuil de la plateforme de contrôle et de s'installer « confortablement » en vue des contraintes données au fauteuil (blocage des roues évoqué dans le Chapitre 3, 2.2.4).

Avant que l'expérimentation ne débute, la phase de calibration de l'eye-tracker Tobii X-120 a été réalisée. La tâche expérimentale de 45 minutes a été par la suite réalisée. Au terme de la simulation de contrôle, un débriefing a été réalisé avec le participant, phase durant laquelle le participant a pu détailler les événements marquants l'activité de contrôle réalisée, mais aussi compléter un questionnaire composé notamment d'une échelle d'évaluation du niveau de charge mentale ressentie.

4. Analyse des données effectuée

L'analyse des données de l'étude a été principalement orientée sur les données oculaires et sur leur relation avec les données de trafic. Cette analyse fait suite à

la phase de prétraitement et de filtrage des données oculaires mentionnée dans le Chapitre 3 (Cf. paragraphe 3.2).

Néanmoins, des données complémentaires ont fait l'objet de l'analyse des données en vue de confronter les résultats obtenus, aux observations tirées la première partie de l'analyse.

4.1. Analyse des données oculaires "contextualisées"

Au total trois types de données oculaires ont fait l'objet de cette analyse : les fixations oculaires, les blinks ou clignements de l'œil et le diamètre pupillaire. Les données relatives aux saccades oculaires n'ont quant à elles pas été enregistrées lors des passations et n'ont donc pas été intégrées à l'analyse des données (Cf. Chapitre 3, 2.2.2).

Les clignements d'œil, aussi appelés blinks ont été analysés en fonction de leur nombre. Ainsi les blinks détectés au cours des fixations oculaires ont été répartis en fonction de la zone d'intérêt (du type d'avions notamment) faisant l'objet de la fixation oculaire en cours. Pour ne pas être influencée par la durée des fixations oculaires significatives relevées, le nombre de blinks a été analysé par le biais du nombre de blinks relevé par seconde ($\text{Blinks par seconde} = \text{Nombre de blinks par fixation} / \text{Durée de la fixation oculaire en milliseconde} * 1000$).

Les fixations oculaires significatives, dont la durée est supérieure à 150 millisecondes, ont, elle aussi, été catégorisées en fonction des avions composant la séquence de trafic et du statut leur étant associé (Hors Secteur, sur secteur et non-conflictuel, sur secteur et conflictuel). Les fixations oculaires significatives réparties par catégorie d'avions faisant l'objet du regard ont été analysées en fonction de deux paramètres : leur nombre et leur durée.

La dilatation du diamètre pupillaire a été analysée par le biais de deux approches distinctes, et ce à la suite d'une phase de pré-traitement des données de diamètre pupillaire (Cf. Chapitre 3, 3.2) : la première est centrée sur la dilatation moyenne (moyenne des valeurs de la dilatation pupillaire relevées au cours de chaque fixation) et la dilatation maximale (valeur maximum de la dilatation pupillaire enregistrée pour chacune des fixations oculaires). Ainsi, pour chacune des fixations oculaires significatives relevées et associées à une zone d'intérêt (les catégories d'avions notamment), la moyenne ou encore la valeur maximale de la dilatation pupillaire a été déterminée. Enfin, l'ensemble des valeurs ont été moyennées afin d'obtenir une valeur de dilatation pupillaire pour chacune des catégories d'avions.

4.2. Analyse subjective du niveau de charge mentale ressentie

Les données subjectives faisant l'objet de cette partie de l'analyse sont issues d'une échelle d'évaluation que les participants ont été priés de compléter au cours de l'entretien réalisé au terme de l'expérimentation. Cette échelle (Cf. Figure 36) est composée de cinq niveaux (chiffré de 1, pour le niveau de charge mentale le plus faible

à 5 pour le niveau de charge mentale le plus élevée). Elle vise à quantifier le niveau moyen de charge mentale ressentie au cours de l'exécution de la tâche de contrôle expérimentale.

D'après-vous à combien pouvez-vous estimer le niveau de charge mentale moyen ressentie au cours de la simulation ?

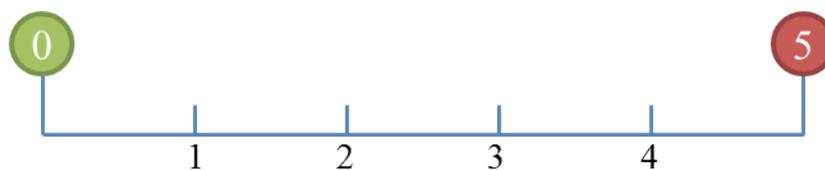


Figure 36. L'échelle d'évaluation complétée par les participants à l'issue de la passation

L'analyse subjective proposée correspond donc à la valeur moyenne des évaluations réalisées par les participants quant au niveau de ressources mentales sollicitées pour répondre aux exigences de la tâche expérimentale de contrôle ou niveau moyen de charge mentale ressentie au cours de l'expérimentation.

4.3. Analyse complémentaire centrée sur des indicateurs caractérisant l'activité de contrôle

Deux analyses portant sur l'activité de contrôle réalisée par les participants ont été effectuées en complément de l'analyse des données oculaires corrélées aux données de trafic : la première porte sur les communications effectuées entre contrôleurs (les participants) et pilotes, la seconde analyse complémentaire vise à évaluer le niveau de performance atteint en rapport avec la sécurité de l'écoulement du trafic aérien supervisé, tandis que la dernière analyse complémentaire porte sur les modes de stratégies opératoires employés par les participants et évalués par le biais du Maturing-Time.

4.3.1. Analyse des communications contrôleurs-pilotes

Les communications enregistrées entre les participants jouant le rôle de contrôleurs radariste et le pseudo-pilote jouant le rôle de l'ensemble des pilotes des avions, ont été étudiées en fonction de leur nombre. Les données relatives aux communications des participants ont été réparties en fonction de deux niveaux de difficulté associée à la séquence de trafic supervisée par les contrôleurs : une difficulté élevée associée à un nombre d'avions présents sur le secteur potentiellement impliqués dans un conflit supérieur à 13, une difficulté plus faible pour lequel cet effectif est strictement inférieur à 13 (Cf. Figure 34).

4.3.2. Analyse de la performance relative à la sécurité d'écoulement du trafic aérien supervisé

La sécurité associée à la situation de trafic aérien supervisée a été analysée par le résultat des résolutions de situations conflictuelles présentées aux participants. Plus précisément, le nombre de situations conflictuelles traitées aboutissant à un niveau de séparation hors norme, en vue des normes de séparation de contrôle En-Route (5

Nautiques sur le plan horizontal, 1000 pieds sur le plan vertical), a été relevé.

Les situations hors normes identifiées ont été par la suite classées en fonction du score de gravité déterminé par la Commission Locale de Sécurité (CLS) des centres de contrôle En-Route (commission étant chargée de traiter ces situations). Le score de gravité utilisé par la CLS est composé de trois échelles :

- HN, correspondant aux séparations comprises entre la norme et 70% de la norme (entre 5 et 3,5 nautiques sur le plan horizontal)
- HN 70, s'appliquant pour les cas compris entre 70% et 50% de la norme (entre 3,5 et 2,5 nautiques sur le plan horizontal)
- HN 50, concordant aux cas de séparation inférieure à 50% de la norme (moins de 2,5 nautiques sur le plan horizontal).

Dans le cadre de l'analyse de la performance, les situations hors normes ont été pondérées en fonction de leur niveau de gravité. Ainsi, les cas HN ont été associés à une gravité de valeur 0,5, les situations HN 70 ont été cotées 1,5, alors que les événements HN 50 ont été estimés à la valeur 3. Pour le calcul de la performance, ces valeurs ont été multipliées par 10 afin de représenter un pourcentage de « perte de sécurité ».

Le calcul de la performance moyenne de l'ensemble des passations a consisté à déduire de la performance maximale (100% des situations potentiellement conflictuelles respectant les normes de séparation), les cas hors normes en fonction du niveau de gravité leur étant associé. Les scores de gravité déduits du niveau de performance ont été de 5% pour chaque cas HN, 15% pour un HN 70 et 30% pour un HN 50 (Cf. Figure 37).

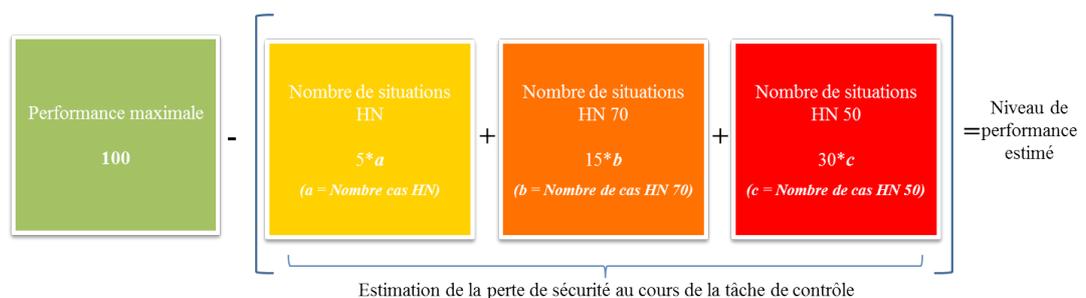


Figure 37. Détails du calcul de la performance moyenne de la tâche par participant

4.4. Analyse complémentaire centrée sur la gestion des conflits

Une dernière analyse complémentaire a été réalisée afin d'étudier les caractéristiques relatives à la régulation de la charge mentale de contrôleurs aériens effectuée durant les phases de gestion de conflits.

4.4.1. Analyse de la variation de la charge mentale au cours des phases de gestion de situations conflictuelles

La variation de la charge mentale ressentie au cours des phases de gestion de conflits a été analysée par l'évolution de la dilatation pupillaire maximale selon les

différentes phases déterminées par Averty et collaborateurs (2004) dans le modèle TLI. Cette analyse a dès lors consisté à comparer la valeur de la dilatation pupillaire des participants en fonction des étapes du TLI.

Le choix de centrer cette analyse sur la dilatation pupillaire maximale est justifié dans la partie résultats dédiée à l'analyse des données oculaires (Cf. paragraphe suivant).

4.4.2. Analyse de la durée du Maturing-Time

La durée de maturing-time pour l'ensemble des participants et pour chacune des situations conflictuelles supervisées a été obtenue par soustraction du temps H1 (entrée des avions sur le secteur) sur le temps H2 (heure de mise en place d'actions de résolution).

Afin de déterminer si des profils de contrôleurs aériens peuvent être distingués, l'ensemble des durées de maturing-time a été déterminé par participant. Les valeurs moyennées, ainsi que la dispersion des valeurs du maturing-time par participant ont été par la suite comparées.

5. Résultats

Les résultats obtenus grâce à cette étude sont décrits et discutés en fonction des analyses de données réalisées. Ainsi, les résultats issus de l'analyse des données oculaires sont dans un premier temps détaillés, avant d'être complétés par les résultats déduits de l'évaluation subjective de la charge mentale et de certaines caractéristiques de l'activité de contrôle des participants. Enfin, sont décrits les résultats obtenus à partir de l'analyse des données caractérisant les phases de gestion des conflits réalisées par les participants au cours de la tâche de contrôle expérimentale.

5.1. Résultats de l'analyse des données oculaires « contextualisées »

L'analyse des données oculaires a permis de mettre en exergue cinq résultats principaux :

- La répartition du nombre moyen de blinks par seconde au cours des fixations oculaires significatives répartis par catégorie d'avions composant la séquence de trafic supervisée par les participants (Cf. Figure 38) montre un effectif plus élevé pour les avions sur secteur par rapport aux avions Hors Secteur et plus précisément des avions impliqués dans une situation conflictuelle. L'analyse statistique (ANOVA à mesures répétées), qui a été réalisée suite à l'évaluation satisfaisante des conditions de normalité, d'homogénéité des variances et de sphéricité, montre un effet significatif de la zone d'intérêt sur la répartition du nombre de blinks ($F(1 ; 56) = 17.339, p < .001$). Ce résultat semble venir en contradiction avec les conclusions d'études antérieures portant sur l'étude des blinks dans le cadre de l'étude de la charge mentale, qui montrent que le nombre de blinks relevés évoluerait plutôt en opposition du niveau de charge mentale.

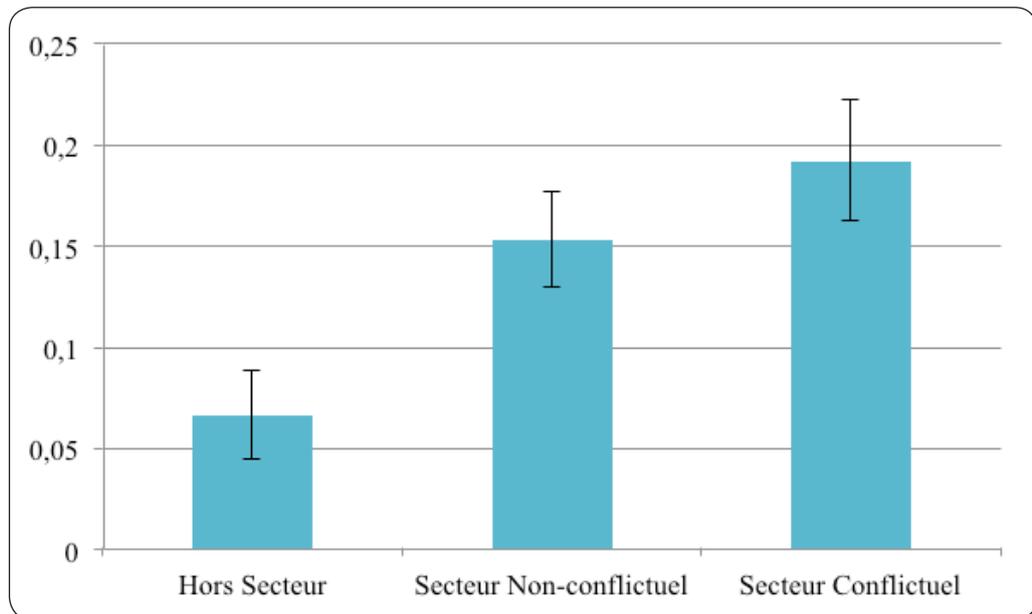


Figure 38. Répartition du nombre moyen de blinks réalisés par seconde en fonction des catégories d'avions composant la séquence de trafic supervisée par les participants

- L'analyse de la répartition des fixations oculaires en fonction des différentes zones d'intérêt présentes sur l'image radar (notamment les catégories d'avions distinguées) révèle l'existence d'une hiérarchie marquée entre les différentes catégories d'avions (Cf. Figure 39). L'analyse statistique réalisée au moyen d'une ANOVA à mesures répétées, suite à l'évaluation satisfaisante des conditions de normalité, d'homogénéité et de sphéricité des variances, montre une différence significative entre les zones d'intérêt, avec un effet sur le nombre de fixations ($F(2 ; 50) = 195.42, p < .001$). L'effet relevé est de 0.834 (η^2 partiel), ce qui indique que près de 84% des variations de nombre de fixations s'expliquent par la nature des zones d'intérêt. Les comparaisons par paires (utilisant un contraste répété) indiquent une différence significative entre les avions Hors Secteur et les avions Sur Secteur Non-Conflictuel ($p < .001$), ainsi qu'entre les avions Sur Secteur Non-Conflictuel et les avions Sur Secteur Conflictuel ($p < .001$).

Pour résumer, la présence de l'avion sur le secteur, ainsi que son implication dans une situation conflictuelle impacterait significativement la part d'attention allouée par le contrôleur aérien à un avion. Les avions Hors Secteur apparaissent dès lors comme nécessitant moins d'attention de la part du contrôleur aérien que les avions Sur Secteur. De plus, les avions Sur Secteur impliqués dans une situation conflictuelle apparaissent comme les plus coûteux, alors que les avions Sur Secteur qui ne sont pas « conflictuels » sont associés à un niveau d'attention intermédiaire, significativement supérieur à celui porté aux avions Hors Secteur, mais significativement inférieur à celui des avions conflictuels.

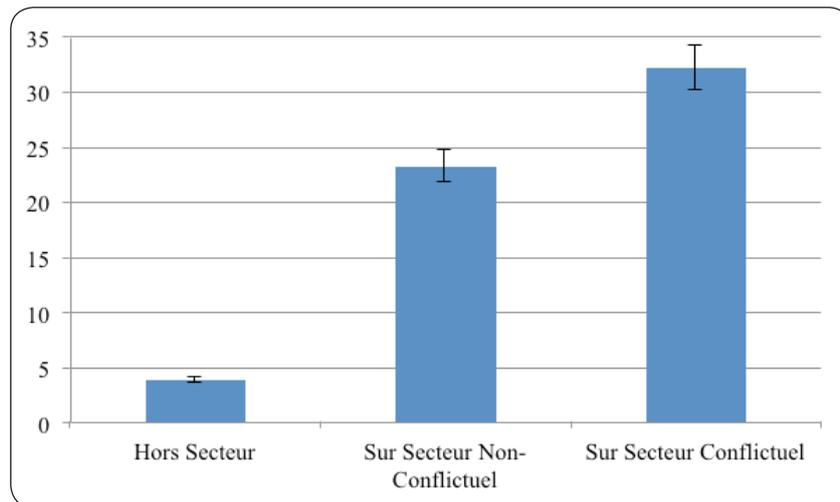


Figure 39. Répartition du nombre moyen de fixations oculaires réparties entre les différentes catégories d'avions

• L'analyse des durées de fixations en fonction de la catégorie d'avions faisant l'objet de la fixation oculaire met en exergue une hiérarchie équivalente à celle préalablement pointée par l'étude des durées de fixations oculaires, à la seule différence que seule la présence sur secteur semble avoir un impact significatif sur la durée des fixations oculaires allouées aux avions composant la séquence de trafic supervisée (Cf. Figure 40). En effet, l'analyse statistique (ANOVA pour plans à mesures répétées) met en exergue une différence significative entre les zones d'intérêt, avec un effet sur la durée de fixations ($F(1 ; 52) = 29.434, p < .001$). Globalement, l'effet est de 0.430 (η^2 partiel), près de 43% des variations de durée de fixations oculaires seraient donc liés à la nature des zones d'intérêt. Les comparaisons par paires (utilisant un contraste répété) indiquent une différence significative entre les avions Hors Secteur et les avions Sur Secteur Non-Conflictuel ($p < .001$), mais pas entre les avions Sur Secteur Non-Conflictuel et les avions Sur Secteur Conflictuel ($p > .05$). La présence de l'avion sur le secteur supervisé par le contrôleur impacterait donc la part d'attention allouée à un avion, mais pas son implication dans une situation conflictuelle (Cf. Figure 39).

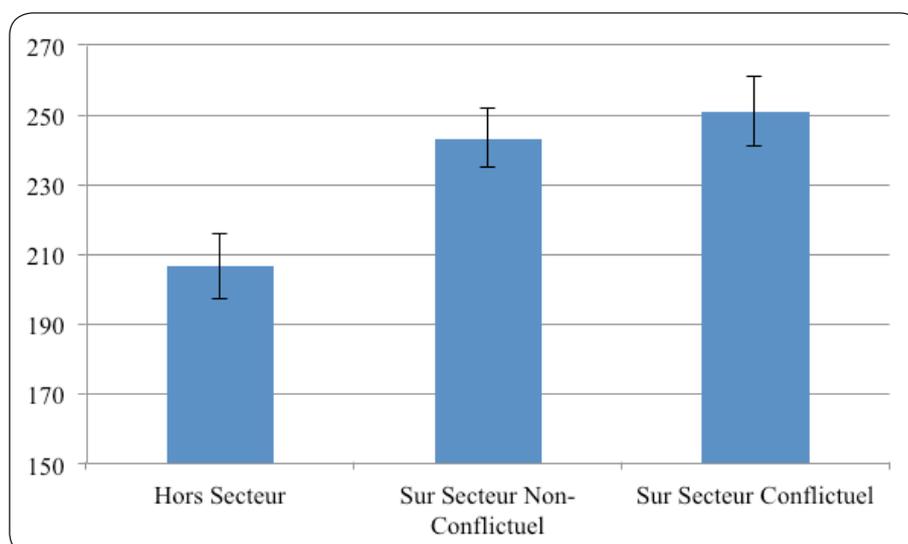


Figure 40. Durée moyenne des fixations oculaires en fonction de la catégorie d'avions faisant l'objet des fixations oculaires (millisecondes)

- La dilatation pupillaire utilisée comme indicateur de charge mentale met en exergue deux résultats divergents en fonction de l'approche employée pour l'analyser. Les deux approches confrontées sont celles consistant à centrer l'analyse de la dilatation pupillaire sur la dilatation moyenne (Cf. Figure 41) ou sur la dilatation maximale (Cf. Figure 43) atteinte durant les fixations oculaires significatives réalisées en direction des avions composant la situation de trafic aérien supervisé par les participants :

- Ainsi, la dilatation moyenne met en exergue un niveau de dilatation le plus élevé pour les avions Hors Secteur, un niveau intermédiaire pour les avions sur secteur et conflictuels, et un niveau le plus faible (et négatif) pour les avions sur secteur et non-conflictuels (Cf. Figure 40). Ces observations ont été déterminées comme étant significatives d'un point de vue statistique, à partir d'une ANOVA à mesures répétées ($F(1; 50) = 19.221, p < .001$) pour laquelle les conditions de normalité, d'homogénéité des variances et sphéricité ont été définies préalablement comme satisfaisantes. Un tel résultat, associant notamment les avions Hors Secteur comme les plus coûteux en terme de niveau de charge mentale requis pour les superviser, apparaît comme surprenant et incompatible d'un point de vue de contrôle.

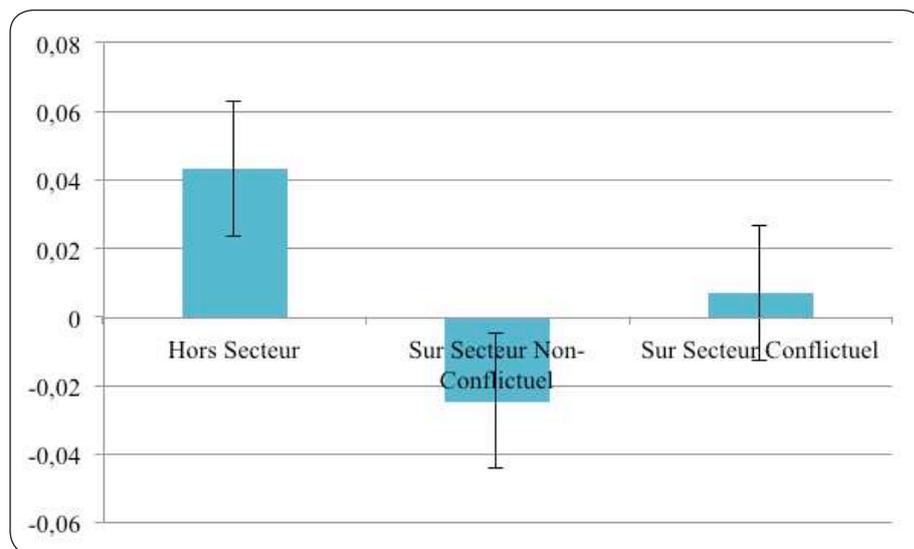


Figure 41. Valeur moyenne de la dilatation pupillaire en fonction de la catégorie d'avions regardée (score z)

- L'analyse de la dilatation pupillaire par le biais d'une approche centrée sur la dilatation maximale atteinte au cours des fixations oculaires significatives révèle un tout autre résultat concernant la répartition des catégories d'avions en fonction du niveau de dilatation pupillaire maximal leur étant associé (Cf. Figure 42). En effet, dans ce cas une hiérarchie des avions équivalente à celle pointée par le biais de l'analyse des fixations oculaires est observée. Cette dernière, associant un niveau de dilatation pupillaire le plus faible pour les avions Hors-Secteur, un niveau intermédiaire pour les avions Sur Secteur Non-Conflictuel et un niveau le plus élevé pour les avions Sur Secteur Conflictuel a été déterminée comme statistiquement significative par le biais d'une ANOVA à mesures répétées ($F(1 ; 58) = 117, p < .001$). L'analyse statistique révèle notamment un effet de 0.750 (η^2 partiel), indiquant que près de 75% des variations de la dilatation pupillaire maximale s'expliquent par la

nature des zones d'intérêt. Les comparaisons par paires (utilisant un contraste répété) indiquent une différence significative entre les avions Hors-Secteur et les avions Sur Secteur Non-Conflictuel ($p < .001$), ainsi qu'entre les avions Sur Secteur Non-Conflictuel et les avions Sur Secteur Conflictuel ($p < .001$). La présence de l'avion sur le secteur impacterait donc le niveau de charge mentale allouée à un avion, ainsi que son implication dans une situation conflictuelle. Ce résultat semble faire plus de sens d'un point de vue opérationnel si l'on se réfère à la catégorisation d'avions proposée par Averty et collaborateurs (2004), associant un niveau de coût cognitif d'un avion proportionnel aux actions que sa supervision requière pour les contrôleurs aériens. Il apparaît dès lors comme évident que les avions Hors-Secteur soient les moins coûteux puisque ne requièrent aucune action de la part des contrôleurs aériens, mais aussi que les avions Sur Secteur Conflictuels soient les plus sollicitant d'un point de vue cognitif car leur supervision nécessite des mécanismes de détection et de résolution de problèmes les plus coûteux.

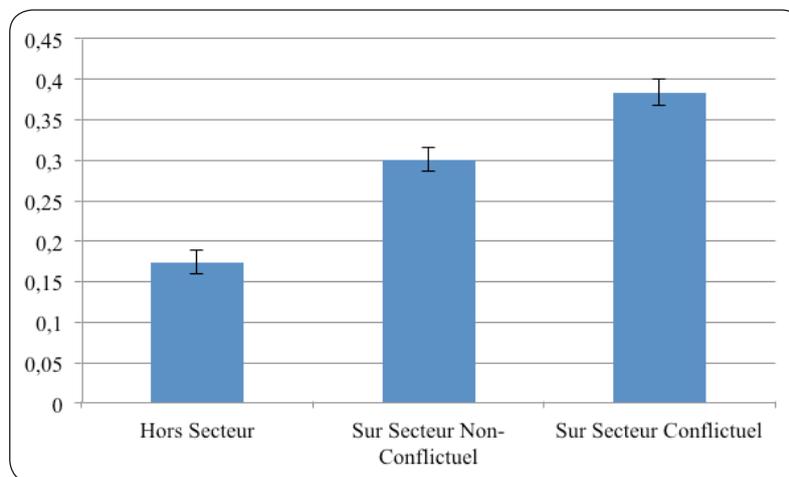


Figure 42. Maximum de la dilatation pupillaire moyenne en fonction de la catégorie d'avions visée par les fixations oculaires (score z)

Synthèse des résultats obtenus par le biais de l'analyse des données oculaires :

- L'analyse des fixations oculaires et de la dilatation pupillaire maximale au cours des fixations oculaires montrent l'existence d'une hiérarchie des avions composant la séquence de trafic aérien qui vient illustrer les observations faites à partir de l'analyse de l'activité de contrôle.
- L'analyse des blinks n'a pas permis de vérifier les résultats issus d'études antérieures.
- L'analyse de la dilatation pupillaire moyenne met en exergue des résultats contradictoires par rapport à la nature de l'activité de contrôle. L'analyse des pics de dilatation apparaît plus pertinente que l'analyse des dilatations moyennes.
- La place occupée par la présence des avions sur le secteur, principalement conflictuels, met en exergue et illustre l'impact de la présence de conflits entre avions sur le niveau de charge mentale ressentie par les contrôleurs aériens.

5.2. Résultats issus de l'analyse subjective

Le niveau moyen de ressources cognitives que les participants ont déterminé avoir sollicité pour répondre aux exigences de la tâche expérimentale de contrôle est de 3.25/5, soit 65% des ressources cognitives disponibles (écart type de 1,64%). L'analyse subjective relative au niveau moyen de charge mentale ressentie au cours de l'exécution de la tâche de contrôle expérimentale traduit dès lors un niveau moyen de charge mentale ressentie par l'ensemble des participants de l'expérimentation (Cf. Figure 43).

Le débriefing effectué à la suite de l'exécution de la tâche expérimentale a également permis de récolter le retour d'expérience des participants. Ce retour a facilité l'explication d'un niveau de charge mentale ressentie caractérisé comme « moyen » de la part des contrôleurs. Ces derniers ont notamment exprimé que la tâche de contrôle n'était pas particulièrement compliquée car correspondant à celle contrôlée au quotidien (nature des situations conflictuelles intégrées à la séquence de trafic de l'expérimentation). Cette ressemblance leur a notamment permis de mettre en place les solutions qu'ils utilisent quotidiennement (actions de contrôle à mettre en place à un temps donné). Une majorité des participants a également pointé pour principale difficulté le fait que la situation de trafic était particulièrement dense (nombre d'avions simultanément présents sur l'image radar) et qu'elle constituait « un bon entraînement ».

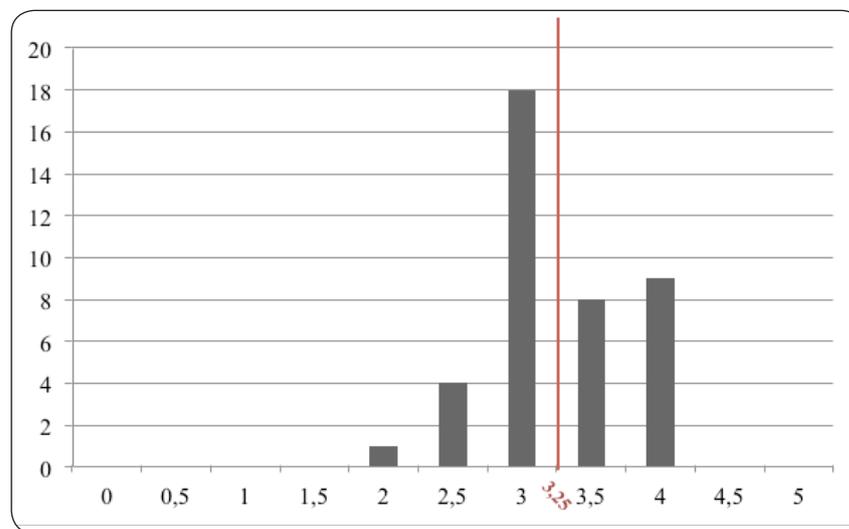


Figure 43. Effectif de participants par valeur de l'échelle d'évaluation subjective du niveau de ressources cognitives mobilisées au cours de l'exécution de la tâche de contrôle expérimentale

5.3. Résultats issus des analyses d'indicateurs caractérisant l'activité de contrôle

5.3.1. Les communications entre contrôleurs et pilotes

L'analyse des communications entre le contrôleur (rôle joué par les participants) et les pilotes des avions (position pseudo-pilote) montre un effectif des communications plus important lorsque la difficulté associée à la séquence de trafic est déterminée comme « plus faible », que lorsque la difficulté est définie comme plus élevée (Cf. Figure 44).

Ce résultat vient confirmer ceux obtenus par le biais d'études antérieures (mentionnés au début du chapitre, cf. paragraphe 1.3) qui ont montré que pour une difficulté élevée de la tâche de contrôle, la densité des communications passées entre contrôleurs et pilotes aurait tendance à diminuer.

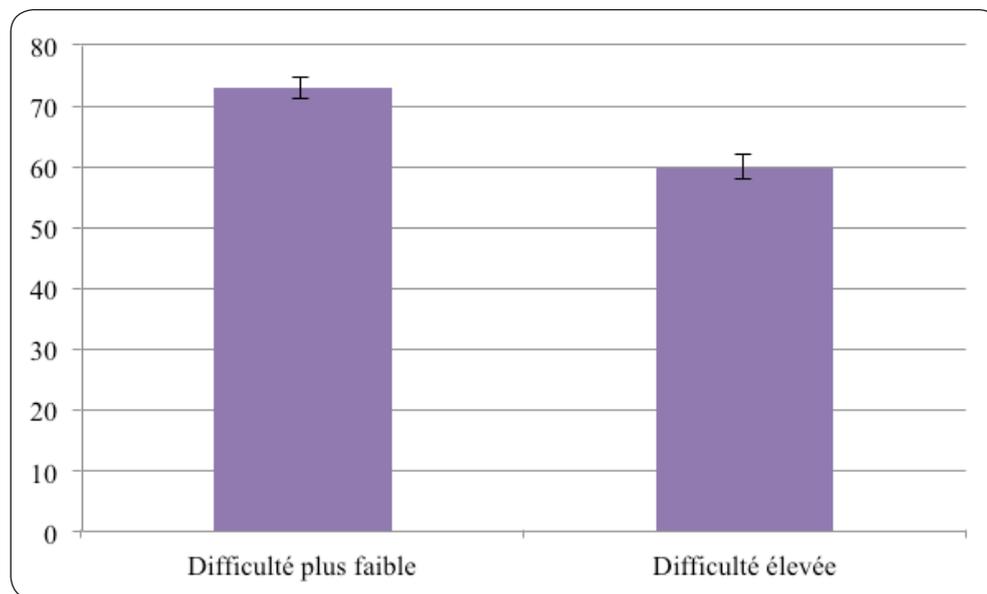


Figure 44. Nombre moyen de communications passées par minute en fonction du niveau de difficulté associé à la tâche de contrôle expérimentale

5.3.2. La performance relative à la sécurité d'écoulement du trafic aérien supervisé

L'évaluation de la performance moyenne des participants révèle un niveau assez élevé de sécurité associée à la tâche de contrôle, avec un niveau moyen de performance atteinte de 92% (Cf. Figure 46 pour le détail des scores obtenus). Ce niveau est toutefois assez faible par rapport à la performance visée et atteinte en opérationnel.

Cette différence peut notamment s'expliquer par le fait qu'en simulation (comme en formation) les contrôleurs aériens ont tendance à prendre « plus de risque » sur la façon dont ils gèrent le trafic et notamment les situations conflictuelles (majorité des situations HN avec une valeur de CPA très proche de 5 NM, la valeur de la norme à respecter, cf. Figure 45). De plus, dans cette expérimentation les participants jouant le rôle de contrôleur radariste ont été amenés à gérer la séquence de trafic aérien seul, alors qu'ils opèrent en binôme en situation réelle de travail.

Cette caractéristique implique une absence de supervision de la part d'un contrôleur organique, qui aurait certainement permis de détecter des situations anormales. Le pseudo-contrôleur organique de l'expérimentation avait pour consigne de ne pas communiquer avec le participant pour assurer une analyse complète de la situation de trafic et notamment des conflits (de la détection à la résolution) par ce dernier. Au total, seules sept situations de conflits (correspondant à des cas HN 50) ont été avérées sur 640 (soit 1%) situations potentiellement conflictuelles intégrées aux séquences de trafic supervisées par l'ensemble des participants de l'expérimentation.

Identifiant du participant	Avions impliqués dans le conflit	Heure d'atteinte du CPA (Closest Point of Approach)	Valeur du CPA (séparation horizontale)	Valeur du CPA sans action du contrôleur
161049	KLM83K/ACA890	07:31:16	4.93	0.45
171032	AAF235/ETH501	07:09:48	0.20	0.99
171454	AAF235/ETH501	07:09:38	1.48	0.99
171559	EZY12BV/IBE3513	07:12:03	4.87	5.73
171559	KLM83K/ACA890	07:31:32	2.40	0.45
181427	AAF235/ETH501	07:09:37	4.62	0.99
181427	AF204TC/IBE3549	07:23:10	2.60	0.28
181427	KLM83K/ACA890	07:31:48	1.25	0.45
191113	KLM83K/ACA890	07:32:20	4.87	0.45
230857	EZY72JD/ANE8819	07:31:01	2.27	5.43
231007	TAR725/NWA50	07:22:00	4.95	3.57
231506	TAR725/NWA50	07:28:57	2.55	3.57
240904	KLM83K/ACA890	07:30:41	4.83	0.45
241012	EZY12BV/IBE3513	07:10:50	4.40	5.73
241012	AAF235/ETH501	07:09:53	4.72	0.99
241408	IBE3513/DAL74	07:07:31	0.79	7.07
241510	KLM83K/ACA890	07:31:48	3.50	0.45
251325	DAL74/BAW2542	07:01:48	4.37	1.38
251325	AAF235/ETH501	07:08:51	4.22	0.99
251325	TAR725/NWA50	07:22:01	4.79	3.57
251325	KLM83K/ACA890	07:31:00	4.43	0.45
251521	EZY72JD/ANE8819	07:30:13	2.94	5.43
251624	KLM83K/ACA890	07:31:56	2.13	0.45

Figure 45. Liste des situations conflictuelles relevées pour l'ensemble des participants

5.4. Résultats déduits de l'analyse complémentaire centrée sur la gestion des conflits

5.4.1. Les phases caractérisant la gestion des conflits

L'analyse de la dilatation pupillaire maximale relevée au cours des fixations oculaires réalisées durant les phases de gestion de conflits et pour l'ensemble des participants vient illustrer deux caractéristiques du modèle TLI (Cf. Figure 46). La première d'entre elles montre une augmentation de dilatation pupillaire entre la phase de détection du conflit (H0-H1) et la phase de résolution du conflit (H1-H2). La seconde pointe une baisse importante du niveau de dilatation pupillaire à la suite de la phase de résolution des conflits (entre H1-H2 et H2-H3), niveau qui reste relativement stable jusqu'à la fin de supervision possible des conflits et la sortie de secteur des avions impliqués (de H2-H3 à H4-H5).

L'analyse statistique réalisée par le biais d'une ANOVA à mesures répétées, à la suite de la confirmation de conditions satisfaisantes de normalité, d'homogénéité des variances et de sphéricité, montre un effet significatif de la phase du TLI ($F(2 ; 71) = 4.099, p < .05$). L'analyse des différentes phases réalisées grâce à un contraste répété

montre notamment une différence significative du niveau de dilatation pupillaire maximale entre les phases H0-H1 et H2-H3 et les phases H0-H1 et H4-H5 ($p < .01$).

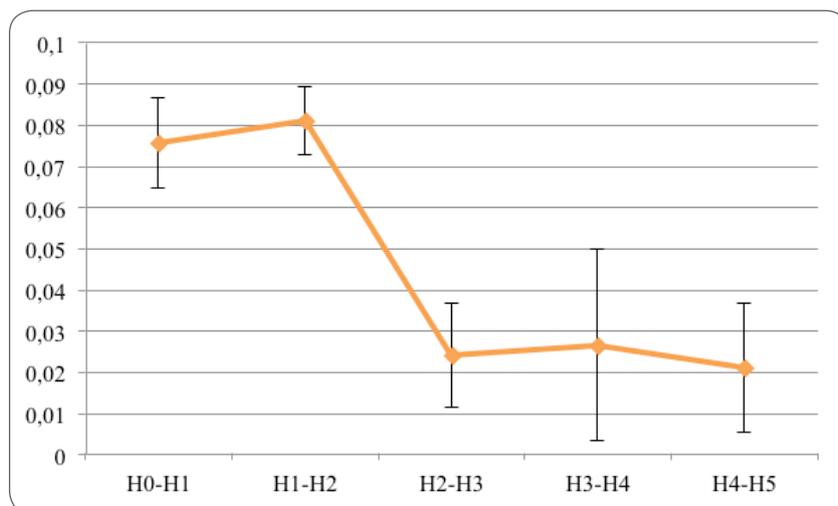


Figure 46. Valeurs moyennes de la dilatation pupillaire maximale relevée pour les différentes phases du modèle TLI (score z)

5.4.2. La durée du Maturing-Time

L'étude du Maturing-Time moyen des participants montre une dispersion importante de la valeur du Maturing-Time en fonction des participants, pouvant passer du simple (300000 ms) au double (600000 ms). L'analyse descriptive de la répartition du Maturing-Time moyen en fonction des participants a notamment permis de montrer l'existence de trois groupes distincts de contrôleurs aériens (cf. Figure 47) : les contrôleurs agissant au plus et pour lesquels le Maturing-Time moyen est strictement inférieur à 380000 ms ; les contrôleurs avec un Maturing-Time moyen intermédiaire situé entre 390000 et 450000 ms ; et les contrôleurs aériens qui font le plus « pourrir » la situation et pour lesquels le Maturing-Time moyen est strictement supérieur à 450000 ms et peut attendre jusqu'à 570000 ms.

Cette observation vient souligner l'existence de différents profils de contrôleurs aériens quant à la stratégie opératoire qu'ils ont tendance (d'où l'étude du Maturing-Time moyen) à mettre en place pour résoudre des conflits potentiels dans la situation de trafic dont ils ont en charge la supervision.

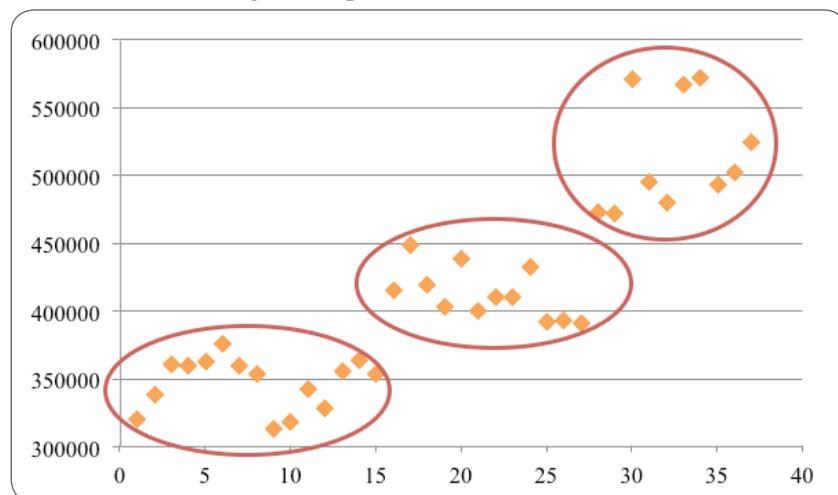


Figure 47. La valeur moyenne de Maturing-Time des participants (millisecondes) répartie selon les groupes de participants distingués

6. Conclusions de l'étude portant sur la gestion de la charge mentale effectuée par les contrôleurs aériens en situation nominale

Les résultats de cette étude ont permis la mise en exergue de différentes caractéristiques relatives à la gestion de la charge mentale de contrôleurs aériens effectuée au cours de leur activité de travail quotidienne, à partir desquelles il est possible de statuer sur les hypothèses de recherche initialement déterminées (Cf. paragraphe 2).

L'évaluation de la charge mentale effectuée a notamment montré la corrélation existant entre les variations du niveau d'exigences de la tâche de contrôle, principalement orientée par la présence de situations conflictuelles à détecter puis résoudre, et le niveau d'attention et de charge mentale évalué à partir de paramètres psychophysiologiques. L'analyse des données oculaires centrée sur l'analyse des fixations oculaires et de la dilatation pupillaire (maximale) a notamment permis de déterminer une hiérarchie des différents avions composant la séquence de trafic en fonction de leur « statut » (Hors-Secteur, Sur Secteur Non-Conflictuel, Sur Secteur Conflictuel), et donc du niveau d'actions qu'ils requièrent aux contrôleurs au cours de leur activité, en termes d'attention leur étant portée et de niveau de charge mentale leur étant dédié au cours d'une activité de contrôle « nominale » d'une difficulté subjectivement déterminée comme moyenne.

L'étude de l'activité de contrôle orientée sur les phases de gestion des situations conflictuelles a également permis de montrer l'existence d'une variation du niveau de charge mentale ressentie par les contrôleurs aériens. Plus précisément, la place occupée par la détection et la résolution des conflits dans le niveau de charge mentale ressentie a été illustrée par une augmentation du niveau de charge mentale durant ces phases de l'activité de contrôle.

Enfin, une différence relative aux stratégies opératoires mises en place par les contrôleurs aériens pour résoudre les situations de conflits a également été observée au travers de la différence du temps s'écoulant entre la détection d'une situation conflictuelle et le moment où cette dernière est résolue. Cette distinction permet de souligner l'existence de profils de contrôleurs quant à leur façon de gérer et de résoudre les situations conflictuelles susceptibles de remettre en cause la sécurité de l'écoulement du trafic aérien sur le secteur dont ils ont en charge la supervision.

Les résultats permettant de statuer sur les hypothèses de recherche posées sur la méthode d'analyse des données oculaires sont quant à eux détaillés dans le paragraphe suivant, qui définit les perspectives de méthodologie d'analyse à inclure aux études ultérieures d'évaluation de la charge mentale de contrôleurs aériens centrée sur une étude de paramètres oculaires.

7. Discussion quant aux aspects méthodologiques, et perspectives déduites pour les analyses de données des études suivantes

Les résultats obtenus grâce à l'expérimentation réalisée dans le cadre de cette étude ont permis, en plus des observations relatives à la nature de la gestion de la charge mentale effectuée par les contrôleurs aériens dans une situation de contrôle nominale, de pointer les indicateurs (parmi ceux évalués dans l'étude) semblant être les plus prometteurs pour analyser la charge mentale de contrôleurs aériens au cours d'une activité de contrôle réaliste.

Ces retours d'expérience ont donc permis de déterminer les ajustements, voire les modifications, d'analyses à intégrer aux études suivantes de ce travail de recherche. Au terme de cette étude, deux ajustements principaux ont été déduits quant à l'analyse des indicateurs étudiés dans le cadre de l'évaluation de la charge mentale de contrôleurs aériens : le premier porte sur l'analyse des données oculaires, le second sur les évaluations complémentaires.

- Les analyses des données oculaires ont tout d'abord révélé que l'étude des blinks ne permet pas de vérifier les résultats obtenus lors d'études antérieures. Cependant, les blinks sont peu nombreux et nécessiteraient des études complémentaires pour en apprécier la pertinence. Cette observation justifie pourquoi les blinks n'ont pas été analysées lors des études ultérieures de ce travail de recherche.
- L'étude de la dilatation pupillaire montre également que l'approche par maximum (pics) semble plus prometteuse que l'analyse de la dilatation moyenne atteinte lors des fixations oculaires significatives. Ce résultat, qui pointe l'importance de l'approche choisie pour analyser la dilatation pupillaire dans le cadre de l'étude de la charge mentale de contrôleurs aériens, indique pourquoi l'analyse de la dilatation pupillaire maximale a été privilégiée pour les études suivantes au détriment de l'analyse de la moyenne.

Les retours d'expérience de cette étude relatifs aux analyses complémentaires, portent notamment sur l'évaluation subjective de la charge mentale et sur l'analyse des communications des participants.

- L'évaluation subjective effectuée dans le cadre de cette expérimentation sous forme de débriefing n'a pas permis d'illustrer les variations significatives de niveau de charge mentale ressenties par les participants. Cette observation illustre le besoin d'adapter l'approche d'évaluation subjective de la charge mentale de contrôleurs aériens pour les études suivantes de ce travail de recherche. Plus précisément, une évaluation temporelle du niveau de charge mentale subjectif au cours de l'exécution d'une tâche de contrôle paraît être le moyen le plus opportun pour intégrer les variations ressenties par les participants.
- Les résultats obtenus par l'étude des communications effectuées par les contrôleurs durant l'exécution d'une tâche de contrôle dans une situation nominale ne semblent pas

porteurs lorsqu'ils sont issus d'une comparaison entre niveaux de difficulté associés à la situation de trafic aérien supervisée. Ces derniers ne permettent pas de déterminer dans quelle mesure les communications sont gérées en fonction de l'évolution de la situation. Cependant, dans le cadre d'une étude comparative confrontant différentes situations de contrôle, l'analyse des effectifs de communications paraît plus prometteuse. En effet, elle permettrait d'obtenir des indices sur les variations comportementales des contrôleurs aériens en fonction de la situation (position de travail utilisée, outils d'aide à disposition) dans laquelle ils effectuent une tâche de contrôle.

- L'analyse des communications effectuée dans le cadre de cette étude a également montré une limite quant à l'approche centrée sur les effectifs des communications. Si l'on se réfère aux études antérieures portant sur l'analyse des communications de contrôleurs aériens, il apparaît que la durée des communications est également importante. Dès lors, l'étude des communications la plus appropriée dans le cadre d'une étude comparative centrée sur la position de contrôle utilisée par les contrôleurs aériens au cours de l'exécution d'une tâche réaliste de contrôle, semble être celle couplant effectif et durée des communications effectuées au cours de l'activité de contrôle. Une telle étude peut consister à analyser le taux d'occupation de la fréquence radio en fonction des conditions dans lesquelles la tâche de contrôle a été réalisée.

Cette première étude a pour principale contribution la réalisation d'une expérimentation de grande envergure alliant le déploiement d'importants moyens techniques dans le cadre de la mise en place d'une situation de contrôle écologiquement valide, mais aussi celui de grands moyens humains se reflétant notamment par l'important nombre de participants à l'expérimentation (en comparaison avec celui des études menées communément dans le domaine du contrôle aérien) qui a permis l'obtention de résultats relatifs à la gestion de la charge mentale de contrôleurs aériens ayant du sens tant en termes de robustesse statistique, que d'un point de vue opérationnel.

La suite de ce travail de recherche, qui est abordée dans les prochains chapitres du manuscrit, vise à analyser dans quelle mesure la gestion de la charge mentale de contrôleurs aériens peut être impactée (en référence avec les modes de gestion déterminés dans une condition nominale) par des variations apportées à leur environnement de travail. Ainsi, un cas de figure a été principalement abordé, celui de l'introduction d'un environnement de contrôle tout électronique, dans lequel des systèmes d'aide à la gestion des conflits ont été implémentés.

Chapitre 5

Automatisation partielle de la tâche de contrôle du trafic aérien : Quels impacts sur la gestion de la charge mentale effectuée par les contrôleurs aériens ?



Le deuxième chapitre empirique du manuscrit introduit la deuxième étude réalisée dans le cadre de ce travail de recherche. Cette étude qui a principalement consisté à mettre en place une expérimentation, a été réalisée dans le cadre du projet SESAR (Work-package 4.7.2, cf. Chapitre 1, 3). Après une description du contexte théorique englobant cette étude, le chapitre décrit l'expérimentation mise en place et enfin les résultats qu'elle a permis de mettre en exergue.

1. Evolutions apportées à l'environnement de travail d'opérateurs et conséquences sur la gestion de leur charge mentale

Dans l'environnement de travail de situations dynamiques et complexes, le rôle joué par l'opérateur humain est essentiel pour atteindre les objectifs visés. L'apport de modifications sur l'environnement dans lequel s'effectue l'activité de travail peut avoir des conséquences importantes sur les opérateurs (Bobillier Chaumon, Bessière & Brangier, 2002). Cela est notamment le cas des évolutions technologiques apportées à la position de travail et aux outils mis à disposition des opérateurs pour réaliser leur tâche (Brangier, Lancry & Louche, 2004).

1.1. Les évolutions de la position de contrôle aérien En-Route envisagées dans le cadre du projet SESAR

L'étude de la gestion de la charge mentale de contrôleurs aériens au cours de leur activité de travail dans un environnement de travail reflétant la situation de supervision du trafic aérien actuellement mis en place dans les centres de contrôle a montré que la présence de conflits entre avions est particulièrement coûteuse pour les contrôleurs aériens en termes de niveau de charge mentale évalué, notamment au cours des phases de détection et de résolution (Cf. Chapitre 4, 6).

Dans le cadre du projet SESAR et d'un contexte de trafic densifié (130% du niveau de trafic aérien actuel), les perspectives d'évolution permettant l'augmentation du seuil capacitaire de gestion du système de management de l'écoulement du trafic aérien En-Route qui sont actuellement explorées, sont concentrées sur l'introduction de services d'aide à la gestion des conflits (Cf. Chapitre 1, 3).

L'hypothèse qui est ici émise consiste à évaluer la simplification supposée de la tâche de contrôle modifiée par l'introduction de services d'aide à la gestion des conflits et qui devraient diminuer le niveau de ressources cognitives mobilisées par les contrôleurs aériens au cours de la tâche de contrôle. Cette part de ressources « libérées » pourrait, dès lors, être allouée au traitement d'autres éléments de la situation ou à celui d'autres parties de la tâche de contrôle (supervision).

1.2. Les modifications de la tâche de contrôle résultant de telles évolutions

Dans le cadre du projet SESAR, la plateforme de contrôle de nouvelle génération peut être associée à deux caractéristiques principales :

- L'introduction d'un système tout électronique ;
- L'intégration de systèmes intelligents en mesure de prendre en compte les caractéristiques du trafic aérien, de les analyser et d'agir sur une partie du trafic aérien (certaines des situations conflictuelles pouvant être résolues par de faibles ajustements de vitesse).

Ces modifications de la position de contrôle En-Route induisent des transformations qui vont notamment agir sur l'activité réalisée par les contrôleurs mais aussi et surtout sur la nature de la tâche de contrôle elle-même.

Le remplacement de la plateforme de contrôle actuelle (image radar et strips papier) par un système tout électronique va transformer l'activité du contrôleur. Il s'agit notamment du renseignement d'un système informatisé, remplaçant la gestion et le renseignement des strips papier actuel. Dans ce cas, la place occupée par l'image radar (à partir de laquelle le système est renseigné) dans la construction de la représentation mentale du trafic des contrôleurs aériens, se trouve modifiée. Avec l'utilisation d'un système tout électronique, l'image radar est placée au centre de l'activité du contrôleur aérien puisqu'elle regroupe l'ensemble des informations relatives au trafic. Dans la situation de contrôle actuelle, elle ne représente qu'un des deux éléments essentiels à cette analyse (avec les strips papier). Dès lors, les actions « routinières » réalisées par les contrôleurs au cours de la gestion du trafic aérien vont se voir modifier par l'évolution de la position de contrôle du trafic aérien. On peut citer pour exemple le cas de la prise en compte des vols (assumer les vols). Actuellement, cette phase de la tâche de contrôle consiste à intégrer le vol à partir du premier message du pilote de l'avion concerné en plaçant le strip du vol sur le tableau de strip, tout en soulignant (ou entourant) un des champs du strip (le callsign du vol ou le FL, Flight Level). Dans le cas d'une plateforme de contrôle tout électronique, le contrôleur devra au même moment (premier appel du pilote) ouvrir un menu affichable à partir de l'image radar du vol et activer la fonction « assume ».

L'introduction de systèmes d'aide à la gestion des conflits peut être définie comme une proposition d'automatisation partielle de la tâche de contrôle. Dans le cas du projet SESAR, Work-package 4.7.2 (Cf. Chapitre 1, 3), un des services propose d'automatiser la phase de détection des conflits (le CD aid) alors que l'autre est en mesure d'automatiser partiellement la phase de résolution des conflits (le TC-SA). Dans ce cas, l'activité des contrôleurs devient en partie basée sur l'analyse réalisée par le système informatisé, alors qu'actuellement elle est exclusivement fondée sur la représentation mentale que se construit que le contrôleur aérien. L'intégration de tels systèmes dans une plateforme de contrôle de nouvelle génération induit dès lors la nécessité d'une collaboration entre le système artificiel et le système humain (le contrôleur aérien) dans l'atteinte des objectifs visés et d'un niveau de performance satisfaisant.

Pour résumer, les évolutions actuellement envisagées pour définir ce que pourrait être la position de contrôle En-Route de demain entraînent une transformation de la tâche effectuée par les contrôleurs aériens. Cette transformation, qui engendre une évolution de la relation entretenue au cours de leur activité de travail entre l'opérateur et l'interface composant la plateforme de contrôle, devient dès lors primordiale dans la détermination du niveau de performance atteint (Hoc, 2001 ; Debernard & Hoc, 2003).

1.3. L'automatisation d'une tâche complexe : Entre facilitation de la tâche visée et paradoxes encourus

Le principe général de l'automatisation consiste à utiliser des systèmes de contrôle et des technologies d'information pour réduire le besoin d'intervention humaine dans la production de produits et de services (Chialastri, 2012). Pour l'aéronautique, cette définition peut être adaptée en distinguant l'automatisation comme la technique de contrôle d'un appareil, d'un processus ou d'un système par le biais de moyens électroniques et/ou de dispositifs mécaniques, qui remplacent l'humain dans la perception, la prise de décision et délibèrent des « outputs » (Webster, 1981). Le recours à l'automatisation est principalement justifié par deux raisons : la recherche de suppression d'erreurs humaines et des aspects économiques.

Dans le domaine de l'aéronautique, de nombreuses tentatives d'automatisation ont été étudiées, et une part importante d'entre elles a été adoptée (Amalberti, 1998). La majorité de ces évolutions concernent la partie « bord » du domaine, c'est-à-dire le pilotage d'avions. Ces dernières portent donc sur les cockpits d'avions, dont l'automatisation a été définie comme un moyen d'améliorer la sécurité et l'efficacité du système (Wise, Abbott, Tilden, Dyck & Guide, 1994). Les propositions d'automatisation du contrôle du trafic aérien (outils en mesure d'agir sur le trafic aérien) ne sont pas récentes, mais leur intégration en opérationnel n'a pas pour autant été effectuée (Billings, 1997 ; Poirot-Delpech, 2009).

Généralement, l'automatisation est perçue comme une avancée (technologique notamment) et comme un moyen d'optimiser l'efficacité des systèmes existants. Cependant, certaines limites peuvent également lui être associées, comme cela est pointé par les ironies de l'automatisation mis en exergue par Bainbridge (1978, 1987). Un des problèmes centraux porte sur la perte de compétences de l'opérateur lorsque le système exécute de façon routinière, certaines des tâches nécessitant les compétences en question (Henrion & Cooley, 1987). Afin de limiter ces risques associés à l'automatisation de la tâche, la conduite d'une approche centrée sur l'humain apparaît essentielle.

1.4. Evaluer l'effet généré par l'automatisation partielle de la tâche de contrôle sur les opérateurs

De nombreuses études ont d'ores et déjà été réalisées pour évaluer l'impact de l'introduction d'automates (détecteur des conflits) dans la situation de contrôle sur les contrôleurs aériens. Cependant, les résultats rapportés par ces diverses évaluations ne sont pas homogènes. En effet, alors qu'une part non négligeable d'entre elles pointe une augmentation du niveau de charge mentale des contrôleurs aériens (subjectivement évalué dans la majorité des cas) au cours de simulation de contrôle reflétant plus ou moins une situation réaliste de contrôle (Castaño & Parasuraman, 1999 ; Corker, Fleming, & Lane, 1999 ; Endsley, Mogford, Allendoerfer, Snyder, & Stein, 1997; Endsley & Rogers, 1998 ; Galster, Duley, Masalonis, & Parasuraman, 2001; Metzger & Parasuraman, 2001 ; Willems & Truitt, 1999) ; d'autres n'ont observé

aucun effet néfaste sur la charge mentale de contrôleurs aériens ressentie lors de l'utilisation de tels dispositifs (Hilburn & Parasuraman, 1997 ; Remington, Johnston, Ruthruff, Gold & Romera, 2000).

Des études antérieures ont également montré le potentiel de l'analyse des données oculaires (notamment des fixations oculaires) dans le cadre de l'évaluation de nouveaux outils de contrôle aérien (Descalle, et al., 2006). L'analyse du diamètre pupillaire dans de tels contextes a également été proposée pour évaluer les impacts générés sur les contrôleurs aériens (Paubel, 2011).

2. Problématique de l'étude et hypothèses de recherche lui étant associées

Les prévisions d'évolution du niveau de trafic aérien, couplées à « l'état » du système actuel de gestion du trafic aérien, pointent un risque de saturation du système susceptible de mettre en péril la sécurité indispensable à l'écoulement du trafic aérien. La mise en place d'un nouveau système de gestion du trafic aérien, comprenant des technologies de nouvelle génération, paraît dès lors nécessaire. Les perspectives d'évolution actuellement à l'étude induisent l'introduction de systèmes informatisés en mesure d'agir sur le trafic aérien, et donc de venir partiellement automatiser la tâche de contrôle. Dans un tel scénario, les contrôleurs aériens se verraient collaborer avec des agents artificiels dans un environnement tout électronique pour superviser une charge de trafic densifiée.

L'objectif de cette étude porte sur l'évaluation de la validation de telles perspectives dans le cadre de la définition du prochain système de contrôle du trafic aérien, évaluation proposant une approche centrée sur l'opérateur. Plus précisément, cette étude vise à étudier dans quelle mesure l'introduction d'une nouvelle génération de système de contrôle du trafic aérien intégrant des systèmes d'aide à la gestion des conflits agit sur la gestion de ressources mentales de contrôleurs aériens par rapport à celle effectuée dans une situation nominale, mais aussi dans quelle mesure la gestion de la charge mentale est impactée en fonction du niveau d'équipement de la plateforme de contrôle.

Trois hypothèses de recherche principales sont proposées :

- L'automatisation partielle de la tâche de contrôle par le biais de services d'aide à la gestion des situations conflictuelles ne modifie pas la répartition des ressources attentionnelles et cognitives entre les différentes catégories d'avions composant la séquence de trafic supervisée.
- En fonction des systèmes d'aide introduits dans la plateforme de contrôle, la part d'attention allouée par les contrôleurs aériens à la consultation de l'interface est modifiée.
- L'introduction de systèmes d'aide à la gestion de conflits permet une baisse du niveau de charge mentale de contrôleurs aériens par rapport à une situation de référence (dans laquelle aucun système d'aide n'est inclus).

3. L'étude réalisée : L'évaluation de la charge mentale de contrôleurs aériens dans une situation de contrôle « futuriste »

3.1. Principe de l'expérimentation

L'expérimentation réalisée dans le cadre de cette étude a pris place au sein de la salle d'expérimentation du service Recherche & Développement de la DGAC basé à Toulouse. Cette salle reconstitue l'environnement d'une salle de contrôle avec des positions de contrôle équivalentes à celles utilisées en opérationnelle, les « géodes » (Cf. Chapitre 1, 1.6). Pour les besoins de l'expérimentation, l'équipement des positions de contrôle a été quelque peu modifié (Cf. 3.5.1 ; La position expérimentale).

Le principe de l'expérimentation a été de demander à des contrôleurs aériens Européens experts de réaliser une tâche de contrôle répondant aux objectifs du projet SESAR (130 % du trafic actuellement géré en opérationnel), dans un environnement de contrôle « futuriste » équipé de services d'aide à la gestion de conflits (service TC-SA et CD Aid, cf. Chapitre 1, 3.3). Plus précisément, quatre scénarios, chacun reflétant un niveau d'équipement de la position de contrôle en termes de services d'Aide, ont été évalués dans le cadre de cette étude.

L'objectif de l'étude est donc d'évaluer l'impact engendré par l'introduction d'une automatisation partielle de la tâche de contrôle, représentée par le niveau d'équipement en outils d'aide de la position de contrôle, sur le niveau de la charge mentale de contrôleurs aériens. Plus précisément, l'évaluation de l'effet généré sur le niveau de la charge mentale alloué aux avions impliqués dans les situations conflictuelles a été visée.

3.2. La tâche expérimentale

La tâche expérimentale constitue une tâche de contrôle du trafic aérien réalisée en binôme, dont les évaluations de charge mentale réalisées ont porté sur la position de contrôleur radariste (comme cela fut le cas pour la première étude, cf. Chapitre 4, 3.2). L'objectif de la tâche de contrôle de l'expérimentation est de superviser le trafic aérien s'écoulant sur un secteur de contrôle générique et d'en assurer la sécurité, notamment en détectant et résolvant les situations conflictuelles susceptibles de s'y produire.

Un secteur de contrôle générique est un secteur qui s'inspire d'un secteur réel, mais dont la disposition des routes et des balises le composant peut être modifiée. Dans le cadre d'une étude visant à répondre aux objectifs du projet Européen SESAR, l'emploi d'un secteur générique offre principalement la possibilité d'intégrer les « futures » règles et procédures d'écoulement du trafic (par exemple, les « business trajectories » aussi appelées trajectoire 4D, SESAR, 2010).

Chaque passation de l'expérimentation durait deux heures et a été effectuée par binôme. Ainsi, un des participants jouait initialement le rôle de contrôleur organique

et l'autre celui de contrôleur radariste. Après exactement une heure de passation, les participants échangeaient leur rôle, le contrôleur organique devenant radariste, et le radariste organique.

3.3. Participants

Douze contrôleurs aériens volontaires et bénévoles ont participé à l'expérimentation réalisée. Ces derniers proviennent de centres de contrôle du trafic aérien En-Route Européens (France, Pays-Bas et Suisse). Six des contrôleurs étaient des hommes, six des femmes. L'âge moyen des participants est de 35 ans (écart-type : 8.5 ans) et avait une expérience moyenne, en tant que contrôleur aérien En-Route, de 8 années et demi (écart-type : 6 années).

3.4. La réalisation d'une phase préliminaire de formation

Pour éviter que des effets d'apprentissage n'agissent sur l'évaluation de la charge mentale effectuée au cours de l'expérimentation, une phase préliminaire de formation a été mise en place (Cf. Figure 48). Le manque de formation pourrait en effet conduire à l'évaluation de la charge mentale ressentie par les contrôleurs aériens liée à la familiarisation au nouvel outil, et non seulement à la tâche de contrôle réalisée.

Étape	Contenu	Principe
1	Concept du projet SESAR, W.P.4.7.2	- Description des objectifs principaux du projet SESAR, W.P. 4.7.2 - Présentation du principe de l'étude réalisée, et des caractéristiques de l'expérimentation mise en place
2	Sectorisation	- Présentation du secteur générique RU (géographie, routes et balises le composant) - Règles et procédures à appliquer
3	IHM	- Présentation théorique de l'interface (les différentes composantes, le fonctionnement) - Familiarisation à l'utilisation d'un stylet et à l'indirection (tâches de pointage) - Présentation « appliquée » sur la position de contrôle
4	Simulation décontextualisée	- Manipulation de la plateforme et renseignement du système informatisé sur une séquence de trafic sans communications radio
5	Méthode de travail	- Présentation des « bons » principes d'utilisation de la plateforme et des modifications à inclure sur la méthode de travail existante par un contrôleur aérien expérimenté
6	Simulation de contrôle	- Réalisation de simulations de contrôle avec communications radio - Deux simulations réalisées par condition expérimentale (soit huit simulations au total)

Figure 48. Descriptif de la phase de formation qui a précédé l'expérimentation

La formation a été répartie en deux phases : la première, d'une durée de trois jours, constitue la formation initiale centrée sur la présentation du concept du projet réalisé,

la description du secteur de trafic aérien supervisé (caractéristiques géographiques, règles et procédures à appliquer et respecter) et principalement sur la position de contrôle utilisée et l'interface à renseigner durant les passations. Durant cette première phase d'entraînement, les participants ont eu la possibilité de réaliser plusieurs simulations de contrôle pour se familiariser aux conditions expérimentales (plusieurs heures au total). La seconde phase de la formation a été réalisée la journée précédant les deux jours de passations. Cette journée a constitué un entraînement de rappels durant laquelle les participants ont pu réaliser plusieurs heures de simulations dans différentes configurations de la position expérimentale pour se préparer aux différentes conditions expérimentales.

3.5. Les conditions expérimentales

Comme mentionnées précédemment quatre configurations de position de contrôle, chacune illustrant un niveau d'équipement de la position et d'automatisation de la tâche de contrôle, ont été évaluées dans le cadre de cette étude. Dès lors, quatre conditions expérimentales ont été déterminées et mises en place dans l'expérimentation (Cf. Figure 49).

La première d'entre elles constitue la condition de référence, où seule la plateforme toute électronique compose la position de contrôle. Les conditions 2 et 3 correspondent à une situation de contrôle équipée d'un service d'aide. Ainsi, la condition 2 a été associée à l'intégration du service TC-SA seul (résolution automatique de certaines des situations conflictuelles par ajustements de vitesse des avions concernés) alors que la condition 3 représente l'emploi seul du service CD Aid (détection automatique des situations conflictuelles). La dernière condition expérimentale reflète la situation la plus équipée, car elle associe l'action du service TC-SA à celui du service CD Aid (détection des conflits et résolution automatique d'une partie d'entre eux).

	Condition 1	Condition 2	Condition 3	Condition 4
Service(s) d'Aide intégré(s) à la position toute électronique	Aucun <i>Condition Référence</i>	Le service TC-SA seul	Le service CD Aid seul	Le couplage des services TC-SA et CD Aid
Actions des services		Résolution automatique d'une partie de situations potentiellement conflictuelles par le biais de faibles ajustements de vitesse.	Détection automatique des conflits éventuels susceptibles de se produire.	Détection automatique des conflits et résolution automatique d'une partie d'entre eux.
Illustration des actions sur l'image radar		Notification des avions sous contrainte de vitesse par l'intégration d'une alarme verte sur l'étiquette de l'avion concerné et sur la ligne de la liste de vols associée.	Présentation des conflits dans un « agenda », bandeau vertical situé sur la droite de l'image radar.	Illustration des conflits détectés et résolus automatiquement (distingués par un code couleurs) dans l'agenda. Les avions sous contrainte de vitesse (TC-SA) sont « tagués » par une horloge verte.

Figure 49. Description des quatre scénarios de situations de contrôle composant l'expérimentation

3.6. Matériel et méthode

3.6.1. La position expérimentale

La position de contrôle mise en place pour l'expérimentation consiste en un simulateur de contrôle « futuriste ». Cette caractéristique est principalement illustrée par le choix de position de contrôle expérimentale qui est tout électronique (Cf. figure 50), en plus d'être équipée de services d'aide à la gestion des conflits (Cf. Chapitre 1, 3.3).



Figure 50. La position de contrôle « futuriste » de l'expérimentation

La position de contrôle « futuriste » utilisée dans cette étude se distingue de la position de contrôle actuellement mise en place dans les centre de contrôle En-Route (Cf. Figure 51), et ce, à travers trois évolutions :

- Le système de notification des actions de contrôle devient informatisé. Actuellement, les contrôleurs aériens indiquent l'ensemble des informations relatives à leurs actions et aux déplacements des avions sur d'étroites bandes de papier appelées « strips papier ». Avec l'utilisation de la plateforme futuriste, ce renseignement change et prend la forme d'un renseignement du système informatisé intégré à l'image radar (via des menus et des boîtes fonction).
- La répartition des données de trafic associée est modifiée. Dans la plateforme futuriste, l'ensemble des données du trafic aérien est regroupé sur l'image radar (partie haute de la position), ces dernières étant réparties entre l'image radar (partie haute) et les strips papier (partie basse) dans la position de contrôle actuelle.
- Changement du moyen d'interaction. Cette proposition de plateforme de contrôle « futuriste » inclut la substitution de l'utilisation de la souris (position de contrôle actuelle) par celle d'un stylet.



Figure 51. La position de contrôle actuellement mise en place en centre de contrôle En-Route (gauche) et la position de contrôle utilisée lors de l'expérimentation (droite)

Deux principales parties composent la position de contrôle utilisée lors de l'expérimentation :

- La partie haute de la position correspond à l'écran radar (Cf. Figure 52). Cet écran LCD de 30 pouces permet de projeter l'image radar et les séquences de trafic aérien supervisées durant les passations de l'expérimentation. La représentation graphique du trafic offerte par l'image radar de la plateforme peut être divisée en quatre différentes parties : l'horloge, les listes de vols, les avions représentés sous la forme de plots radar associés chacun à une étiquette, et enfin les menus et les boîtes fonction affichés à la demande du contrôleur aérien, permettant de renseigner l'image radar (ordre de contrôle, statut de l'avion en vue de la fréquence radio).

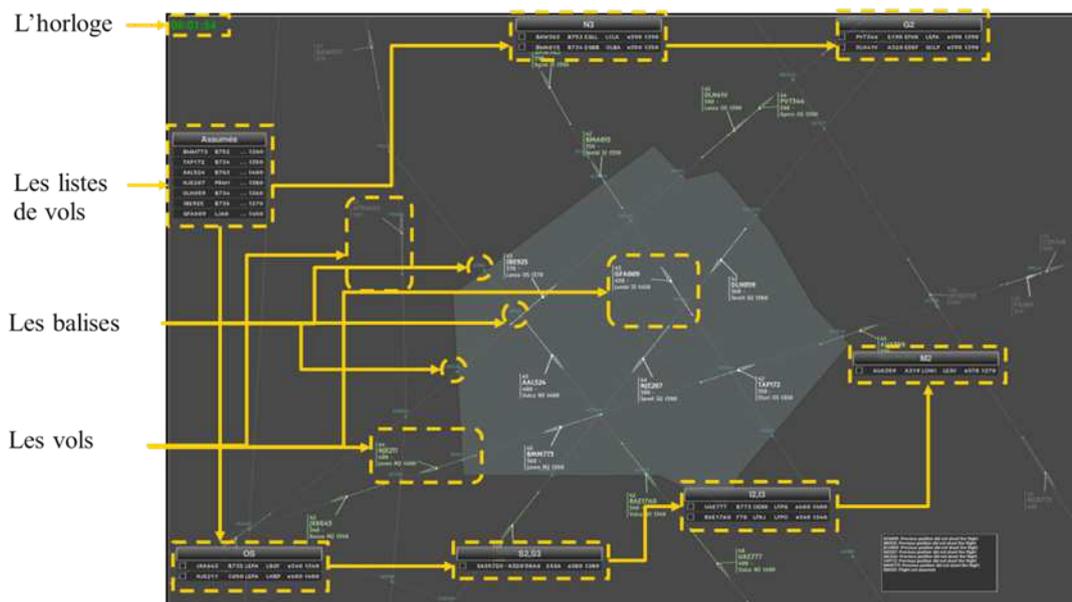


Figure 52. La partie haute de la plateforme de contrôle utilisée lors de l'expérimentation

- La partie basse, une tablette graphique Wacom de 21 pouces associée à un stylet électronique, constitue l'interface d'interaction et de réglages de la position (Cf. Figure 53). Cette interface est constituée de deux principales zones : la zone d'interaction permettant de déplacer le curseur sur l'image radar ainsi que réaliser des entrées de données, et la zone de réglage de l'image radar (zoom, réglage des vecteurs vitesse, affichage de certaines fonctions comme les routes et les balises du secteur).

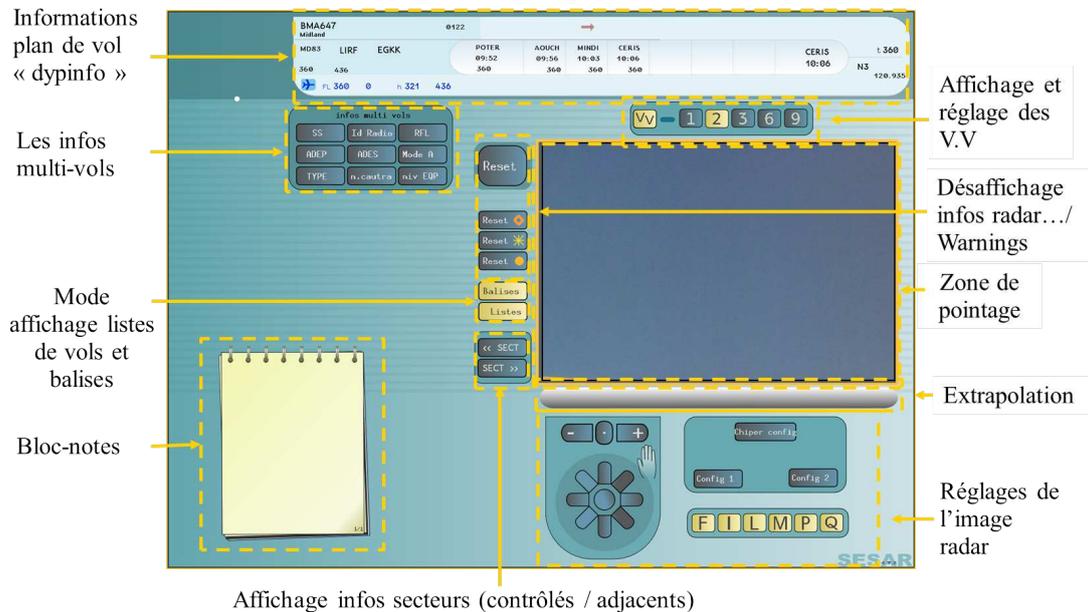


Figure 53. La partie basse de la plateforme de contrôle utilisée lors de l'expérimentation

Selon la condition expérimentale, la position de contrôle était également plus ou moins équipée de services d'Aide à la gestion des conflits (les services TC-SA et CD Aid), dont l'illustration des actions figurait sur l'image radar (Cf. Chapitre 1, 3.3).

Pour les avions sous contrainte de vitesse, conséquence de l'action du service TC-SA, une horloge verte apparaissait sur l'étiquette des avions en question (Cf. Figure 54).

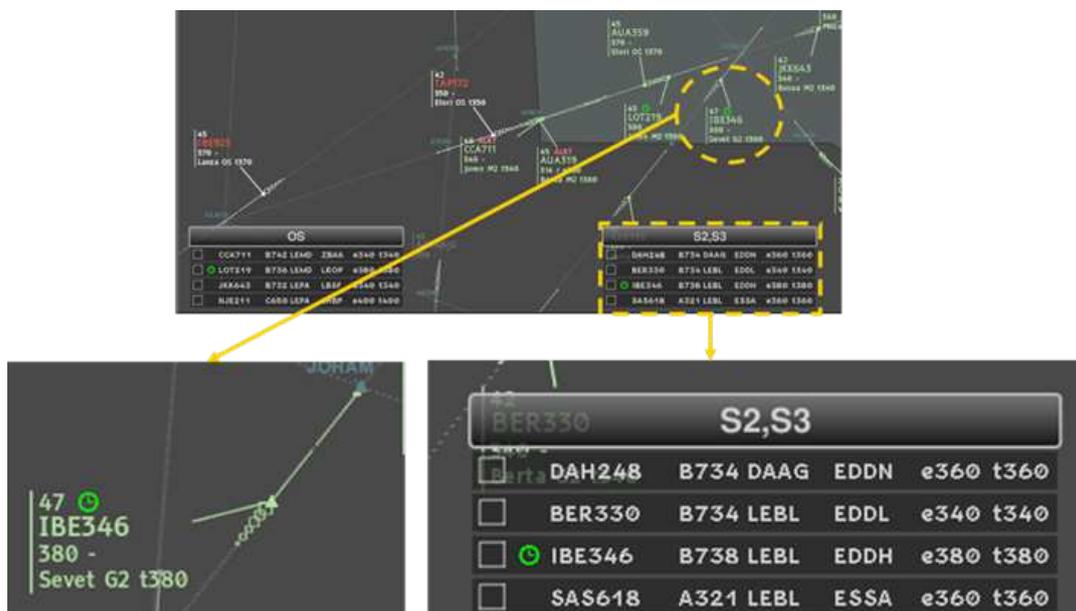


Figure 54. Un avion sous contrainte de vitesse (TC-SA)

Les conflits détectés par le service CD Aid, appelés « clusters » (groupe d'avions potentiellement en conflit) étaient quant à eux regroupés dans un agenda (Cf. Figure 55) constituant un axe de temps « dynamique » sur lesquels les étiquettes de conflits apparaissaient et disparaissaient en fonction de l'évolution de la situation de trafic aérien (et des actions des contrôleurs). Plusieurs types de clusters sont distingués (Cf. Figure 55). Dans les conditions expérimentales où le service TC-SA est activé, la catégorie des clusters résiduels est distinguée. Ces clusters correspondent aux conflits détectés, mais pour lesquels le TC-SA n'a pas été en mesure de mettre en place une action de correction automatique.

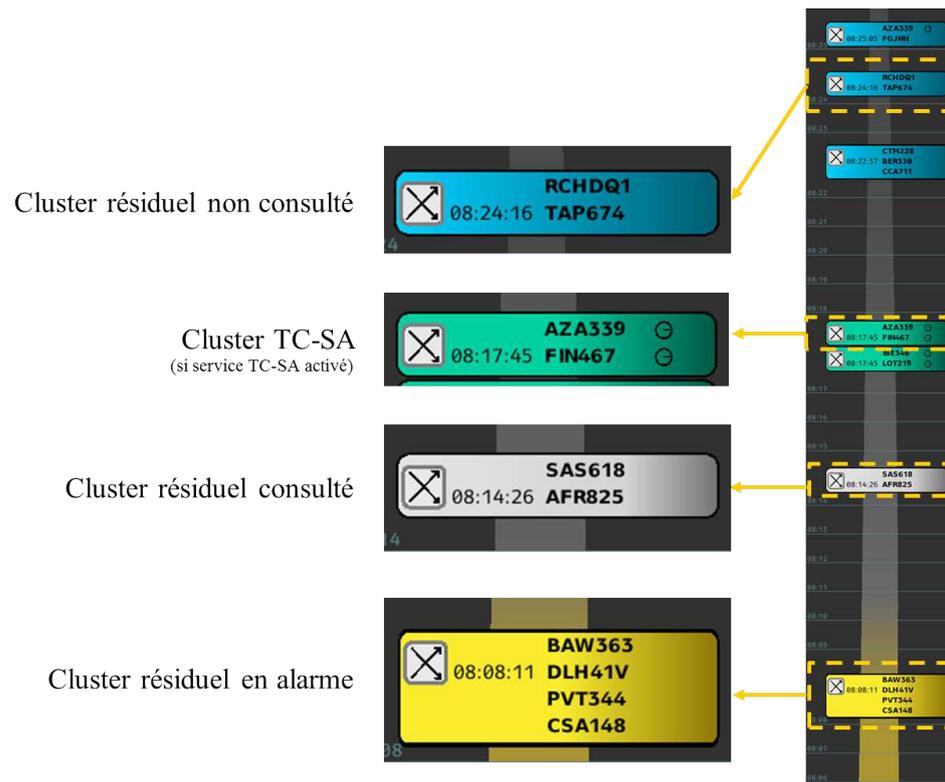


Figure 55. L'agenda intégré sur la droite de l'image radar pour illustrer les conflits détectés par le service CD Aid

Pour permettre les communications entre le contrôleur radariste et les pilotes des avions composant la séquence de trafic aérien supervisée, mais aussi entre le contrôleur organique et les contrôleurs aériens des secteurs adjacents au secteur contrôlé par le binôme de participants, deux positions ont été intégrées à la plateforme expérimentale (Cf. Figure 56) :

- La première d'entre elle est une position de pseudo-pilote utilisant l'outil IIPP, comme cela a été le cas lors de la première étude de cette recherche (Cf. Chapitre 4, 3.4.1).
- La seconde position implémentée à la plateforme expérimentale est une position de pseudo-contrôleur adjacent, composée d'une image radar spécifique (représentation du trafic s'écoulant sur les secteurs adjacents et appareillée de l'environnement de simulation radio Audiolan permettant les communications entre contrôleur organique et contrôleur adjacent.

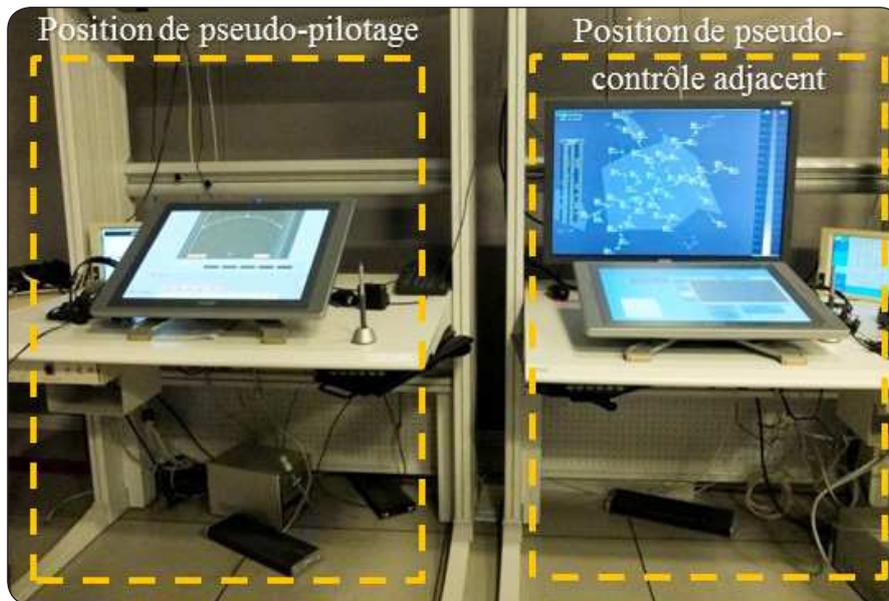


Figure 56. Les positions de pseudo-pilotage et de pseudo-contrôle adjacent de la plateforme expérimentale

3.6.2. Les séquences de trafic aérien

Quatre séquences de trafic de deux heures (nommées A, B, C et D), se déroulant sur le secteur générique RU (Cf. Figure 57) et incluant un niveau de trafic de 130 % (par rapport au niveau de trafic actuel), ont été réalisées par un expert du management du trafic aérien pour l'expérimentation. Ce prérequis a permis le respect des différentes contraintes expérimentales (répondant aux critères du projet SESAR). De plus, les séquences de trafic ont été construites de telle sorte qu'elles soient équivalentes en termes de difficulté (nombre d'avions, nombre de conflits potentiels et configurations de difficulté équivalente).

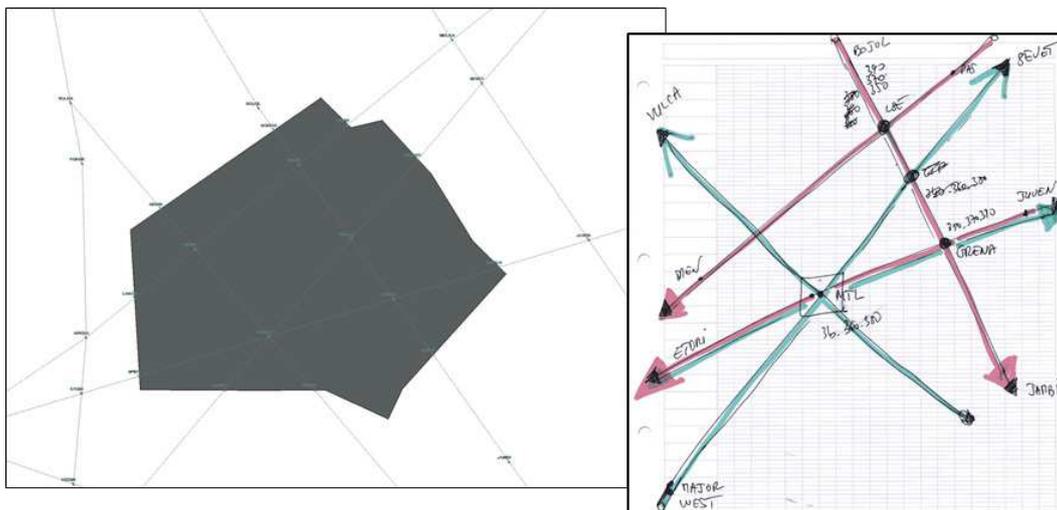


Figure 57. Le secteur générique RU choisi pour l'expérimentation (figure de gauche) et illustration des routes le traversant (figure de droite)

Pour éviter un effet de l'ordre de passations entre les conditions expérimentales et de l'enchaînement des séquences de trafic, la distribution des passations (condition expérimentale et séquence de trafic associée) a été croisée entre les binômes de

participants (Cf. Figure 58).

		Première passa- tion	Deuxième pas- sation	Troisième pas- sation	Quatrième pas- sation
Binôme 1	Condition expérimentale	Référence	TC-SA	TC-SA + CD Aid	CD Aid
	Scénario de trafic	A	C	B	D
Binôme 2	Condition expérimentale	TC-SA	Référence	CD Aid	TC-SA/CD Aid
	Scénario de trafic	B	D	A	C
Binôme 3	Condition expérimentale	CD Aid	TC-SA/CD Aid	TC-SA	Référence
	Scénario de trafic	C	A	D	B
Binôme 4	Condition expérimentale	TC-SA + CD Aid	CD Aid	Référence	TC-SA
	Scénario de trafic	D	B	C	A
Binôme 5	Condition expérimentale	TC-SA	Référence	CD Aid	TC-SA + CD Aid
	Scénario de trafic	C	A	D	B
Binôme 6	Condition expérimentale	TC-SA + CD Aid	CD Aid	TC-SA	Référence
	Scénario de trafic	C	A	B	D

Figure 58. Le planning des passations de l'expérimentation illustrant le croisement entre scénarios et services d'Aide

3.6.3. La consigne communiquée aux participants

La consigne de l'expérimentation est équivalente à celle de l'expérimentation précédente (Cf. Chapitre 4, 3.4.3). Avant que la séquence de trafic à superviser ne soit lancée, il a été demandé aux contrôleurs participant à l'expérimentation de contrôler le trafic, en respectant des règles et procédures de l'espace contrôlé apprises lors de la formation suivie. Il leur a également été rappelé qu'au bout d'une heure de simulation les rôles entre radariste et organique seraient échangés sans modification des places occupées (position gauche-position droite).

3.7. Appareillage de la position expérimentale

L'évaluation de la charge mentale du contrôleur radariste du binôme a nécessité l'appareillage de la position de contrôle expérimentale par le biais de quatre éléments particuliers :

- Deux eye-trackers Tobii X-120 ont été placés sous les écrans radar de la position de contrôle expérimentale en appliquant les bonnes pratiques d'intégration définies préalablement (Cf. Chapitre 3. 2.2.1).
- L'enregistrement des données relatives aux communications effectuées a été réalisé par le biais des positions de l'alternat pied (position 0 et position 1), comme cela fut le cas pour la première étude de cette recherche (Cf. Chapitre 4, 3.5).
- Les données de trafic au cours du temps (positions de l'ensemble des zones d'intérêt

présentes sur l'image radar) ont été enregistrées par le biais de l'éditeur de trafic Rejeu (Cf. Chapitre 3. 2.1.3).

- Un écran tactile de 10 pouces a également été intégré à chacune des positions de contrôle de la plateforme expérimentale. Cet écran a été utile à l'évaluation subjective du niveau de charge mentale des participants puisqu'il a permis d'afficher une échelle d'évaluation à intervalles de temps réguliers.

3.8. Procédure de l'expérimentation

Les passations ont été réalisées par binôme dans une salle de simulation de contrôle, où la luminosité ambiante a été maintenue constante. L'ensemble des expérimentations a été supervisé par quatre expérimentateurs différents respectant le même protocole expérimental. Avant la première passation, les données personnelles des participants (âge, sexe, expérience) ont été collectées au moyen d'un questionnaire.

Pour chaque passation, cinq étapes ont été respectées :

- Après un bref rappel de la condition expérimentale de la passation réalisée et des conséquences induites sur l'activité en fonction des services d'Aide à disposition, mais aussi du changement de rôle au bout d'une heure de passation, les participants ont été priés de prendre place sur la position expérimentale en fonction du rôle joué durant la première heure (le radariste sur la position gauche et l'organique sur la position droite).
- L'installation des participants respectant les contraintes liées à la présence des eye-trackers (distance entre la tête du contrôleur et l'eye-tracker de 70 centimètres, limitation des déplacements du fauteuil par le blocage des roues, Cf. Chapitre 3, 2.2.1) a été suivie par la phase de calibration de l'eye-tracker Tobii X-120 pour les deux participants.
- La tâche expérimentale a par la suite commencé par le lancement de la séquence de trafic aérien.
- Toutes les cinq minutes, les participants ont été invités à compléter une échelle d'évaluation du niveau de charge mentale ressentie. Cette dernière s'affichait sur un écran tactile de 10 pouces intégré au plan de travail de la position de contrôle.
- Cinq minutes avant l'atteinte de l'heure de passation, il a été rappelé aux participants le changement de rôle. Ce rappel a initié la phase de transition durant laquelle les deux participants ont pu échanger des informations sur l'état de la situation. A l'heure de passation, le changement de rôle était effectif.
- Au terme de la simulation de contrôle, une phase de débriefing a été réalisée. Cette dernière a été divisée en deux étapes : la réponse à un questionnaire, un entretien durant lequel les participants ont pu détailler leurs ressentis quant aux services d'Aide utilisés et aux événements qui ont marqué l'activité de contrôle durant les deux heures de simulation.

4. Analyse des données effectuée

L'analyse des données présentée dans cette étude porte seulement sur les données enregistrées lorsque les participants jouaient le rôle de radariste.

Comme pour la première expérimentation, deux types de données ont fait l'objet de la phase d'analyse de cette étude. La première d'entre elles est centrée sur les données oculaires, la seconde sur des données dites « complémentaires ».

4.1. Analyse des données oculaires "contextualisées"

L'analyse des données oculaires effectuée est centrée sur trois paramètres : la répartition du nombre et la durée des fixations oculaires et la dilatation pupillaire maximale. Ce choix fait suite aux résultats obtenus lors de la première étude qui ont mis en avant la validité de ces paramètres dans le cadre de l'évaluation de la charge mentale de contrôleurs aériens au cours de l'exécution d'une tâche de contrôle du trafic aérien.

Les données ont été comparées selon deux variables : les conditions expérimentales et les zones d'intérêt. Les quatre conditions expérimentales ont été dénommées en fonction de leur niveau d'équipement (services d'aide à la gestion des conflits) : Référence, TC-SA, CD Aid, TC-SA+CD Aid.

Quatre types de zones d'intérêt ont été distinguées au sein du contenu de l'image radar : les avions hors secteur, sur secteur non-conflictuel, sur secteur conflictuel et les parties de l'interface (l'horloge, les listes de vols, les menus et les boîtes fonction, l'agenda dans les conditions où il figurait sur l'image radar).

Les comparaisons de paramètres oculaires entre les différentes conditions expérimentales ont notamment été centrées sur les avions Sur Secteur Conflictuels. Cette attention particulière est justifiée par la nature des hypothèses testées dans le cadre de cette étude, et notamment celle relatives au coût associé à la gestion des situations conflictuelles.

4.2. Analyses complémentaires

Le choix des analyses complémentaires réalisées dans le cadre de cette étude a été principalement orienté par les retours d'expérience obtenus par le biais de la première étude de cette recherche (Cf. Chapitre 4, 8). Les deux principaux changements d'analyses effectués entre cette étude et la précédente portent sur l'évaluation subjective de la charge mentale effectuée, ainsi que sur l'analyse des communications. La dernière analyse complémentaire effectuée portant sur la performance atteinte a quant à elle été conforme à l'approche proposée dans l'étude précédente.

4.2.1. Analyse subjective

L'évaluation subjective du niveau de charge mentale utilisée dans cette étude est une évaluation temporelle (évaluation toutes les 5 minutes) par le biais de l'échelle ISA (Instantaneous Self-Assessment) composée de quatre niveaux, du niveau 1 représenté en vert pour la valeur la plus faible, au niveau 4 pour la valeur la plus élevée illustrée en rouge (Cf. Figure 59).



Figure 59. L'échelle d'évaluation ISA complétée toutes les cinq minutes par les participants au cours de l'expérimentation

L'analyse subjective proposée porte donc sur la valeur moyenne du niveau de charge mentale ressentie par les participants jouant le rôle de contrôleur radariste pour chaque condition expérimentale.

4.2.2. Analyse des communications

L'analyse des communications entre le contrôleur radariste et les pilotes des avions a consisté à analyser l'occupation de la fréquence radio des participants jouant le rôle de contrôleur radariste. Cette approche est justifiée par les retours d'expérience issus de l'étude précédente qui ont notamment mis en exergue une évaluation des communications incomplète lorsqu'elle est ciblée sur le seul nombre de communications effectuées par le contrôleur au cours de l'activité de contrôle (Cf. Chapitre 4, 8). Le taux d'occupation de la fréquence radio représente en effet un moyen de coupler le nombre et les durées des communications.

La valeur moyenne d'occupation de la fréquence radio pour l'ensemble des participants a été évaluée pour chacune des conditions expérimentales avant d'être comparées les unes aux autres.

4.2.3. Analyse de la performance

Le niveau de performance associé à la tâche exécutée par les participants devait initialement être évalué de la même façon que lors de l'étude précédente (Cf. Chapitre 4, 4.2.3). Il devait en effet être calculé par l'évaluation du niveau de sécurité associée à la séquence de trafic aérien ayant été supervisée par les participants. À cause de problèmes d'enregistrement de données, il n'a pas été possible d'obtenir la distance séparant les avions impliqués dans les situations Hors-Normes (le CPA).

Toutefois, il a été possible de relever l'effectif de situations Hors-Normes et de les répartir par condition expérimentale (Référence, TC-SA, CD Aid et TC-SA+CD Aid). La variation du nombre de situations Hors-Normes en fonction de la condition expérimentale permet d'obtenir un indice quant à l'impact de l'équipement de la position de contrôle en termes de services d'aide à la gestion des conflits sur le niveau de sécurité associé à la tâche de contrôle réalisée.

5. Résultats

La présentation des résultats obtenus respecte l'ordre des analyses préalablement détaillées. Suite à la description des résultats recueillis à partir des analyses des données oculaires mises en relation avec le contenu des séquences de trafic aérien, les résultats issus des analyses dites « complémentaires » sont exposés. A la description de chaque résultat est associée une discussion des observations induites, afin d'en déduire leur impact, ou encore d'expliquer leur limitation.

5.1. Résultats de l'analyse des données oculaires "contextualisées"

L'analyse des fixations oculaires significatives permet la mise en exergue de deux observations principales quant à la dispersion des fixations oculaires en fonction des catégories d'avions (AOI) distinguées et des conditions expérimentales (Cf. Figure 60) :

- La répartition des fixations oculaires observée illustre la hiérarchie entre catégories d'avions qui a été déterminée lors de l'étude précédente. Ainsi, les avions Hors-Secteur sont associés au nombre de fixations oculaires le plus faible, les avions Sur Secteur Conflictuels à l'effectif le plus élevé, alors que les avions Sur Secteur Non-Conflictuels à une valeur de fixations oculaires intermédiaire. Cette hiérarchie est observable pour chaque condition expérimentale (Référence ; TC-SA ; CD Aid ; TC-SA + CD Aid).

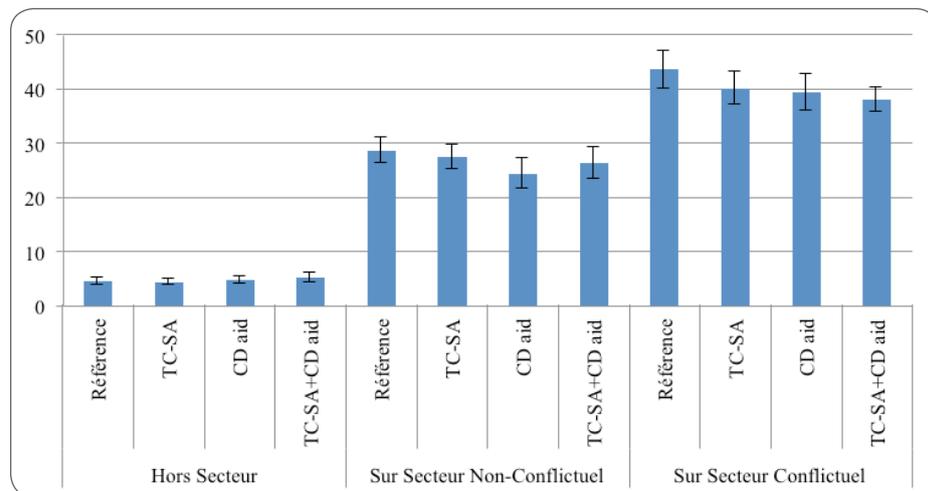


Figure 60. Nombre moyen de fixations oculaires entre les différentes catégories d'avions en fonction des conditions expérimentales

- Les variations d'effectif de fixations oculaires portées sur chaque catégorie d'avions en fonction des conditions expérimentales ne montrent pas de différences notables pour les avions Hors-Secteur. On peut observer une baisse du nombre de fixations oculaires portées sur les avions Sur Secteur Non-Conflictuel dans les conditions CD Aid et TC-SA+CD Aid par rapport aux conditions Référence et TC-SA. Pour les avions Sur Secteur Conflictuels (Cf. Figure 61), il peut être observé une légère baisse de l'effectif des fixations oculaires pour les conditions « équipées » de services d'aide (TC-SA, CD Aid et TC-SA+CD Aid) par rapport à la condition Référence. Alors que l'effectif « réduit » des conditions équipées de service d'aide est quasi-équivalent pour les conditions TC-SA et CD Aid, une baisse plus importante pour la condition TC-SA+CD Aid est observée.

L'analyse statistique des données d'effectif de fixations oculaires, qui a été réalisée par le biais d'une ANOVA à mesures répétées, révèle deux effets significatifs : un effet de la zone d'intérêt ($F(2 ; 26) = 8.403, p < .005, \eta^2 = .667$) et un effet de la condition expérimentale ($F(1 ; 13) = 22.039, p < .001, \eta^2 = .521$).

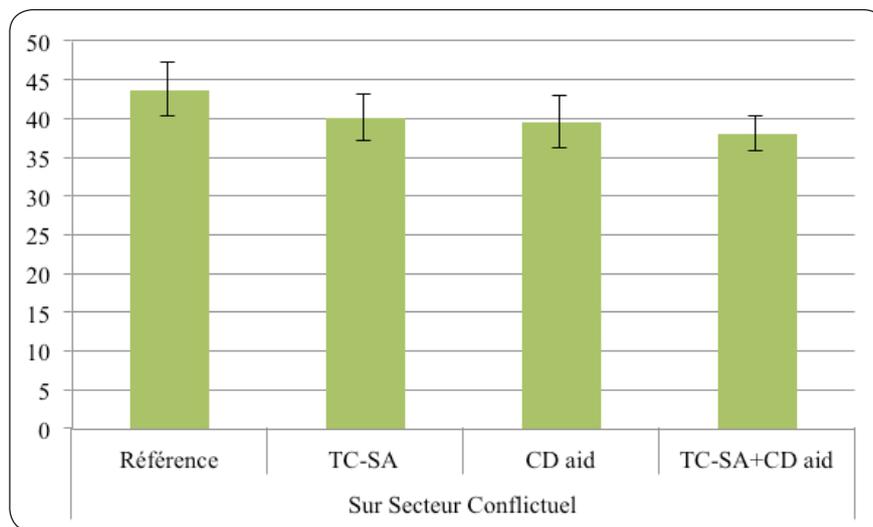


Figure 61. Nombre moyen de fixations oculaires sur les avions sur secteur conflictuels en fonction de la condition expérimentale

Par ailleurs, il semblerait que pour l'ensemble des conditions expérimentales, la répartition de l'attention des contrôleurs aériens entre les différentes catégories d'avions puisse être hiérarchisée comme suit : Avions Hors-Secteur, Sur Secteur Non-Conflictuel, Sur Secteur Conflictuel. Le niveau d'attention le plus élevé étant celui associé aux avions impliqués dans les situations conflictuelles. On peut déduire de ce résultat que l'introduction d'outils d'aide à la gestion des conflits dans un environnement tout électronique ne change pas le mode opératoire des contrôleurs aériens concernant la façon dont ils répartissent leur attention entre les différentes composantes du trafic aérien supervisé.

Les résultats obtenus à partir de l'analyse de la répartition des fixations oculaires permettent également d'évaluer les variations de niveau d'attention portée à l'interface intégrée à la plateforme de contrôle en fonction du niveau d'équipement en termes de services d'aide à la gestion des conflits (Cf. Figure 62). Cette évaluation montre que l'introduction du service TC-SA dans la plateforme de contrôle permet de baisser le niveau attentionnel dédié à l'interface par rapport à celui relevé dans la condition Référence. De plus, l'utilisation du service de détection de conflit, que ce soit en condition CD Aid ou TC-SA+CD Aid provoque une augmentation notable du niveau de fixations oculaires significatives réalisées sur les différents composants de l'interface. Un effet des services d'aide sur la répartition des fixations oculaires a été ainsi observé lors de l'analyse statistique ($F(2;24) = 15.82, p < .001, \eta^2 = .59$).

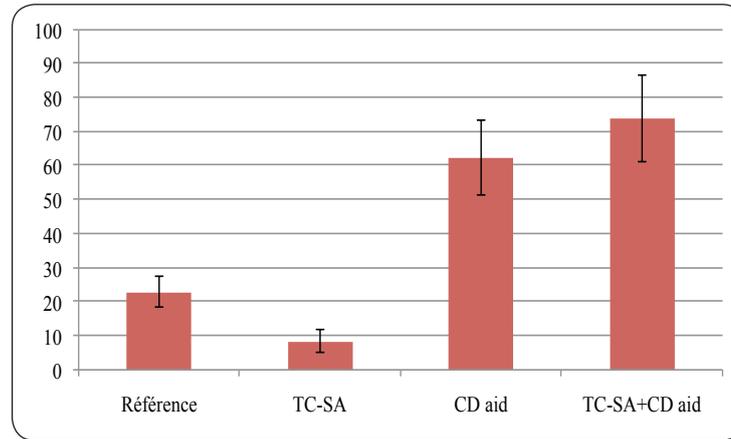


Figure 62. Nombre moyen de fixations oculaires sur l'interface en fonction de la condition expérimentale

L'analyse de la durée des fixations oculaires dédiées aux différentes catégories d'avions dans les différentes conditions expérimentales (Cf. Figure 63), permet la mise en exergue de deux résultats principaux :

- Le premier distingue les avions Hors-Secteur, des avions Sur Secteur (qu'ils soient impliqués dans un conflit ou non), ces derniers étant associés à une plus longue durée de fixations oculaires. Cette caractéristique est compatible avec les observations relevées en situation nominale de contrôle. L'analyse statistique réalisée au moyen d'une ANOVA à mesures répétées confirme cette observation en révélant un effet de la catégorie d'avions sur la durée des fixations oculaires significatives ($F(1 ; 11) = 0.015, p < .005, \eta^2 = .407$).
- Le second distingue les différentes conditions expérimentales quant aux variations de durées de fixations oculaires relevées. De manière générale, on peut relever une très faible variation de la durée des fixations oculaires dédiées aux différentes catégories d'avions, entre les conditions expérimentales. On peut toutefois noter une baisse de la durée des fixations oculaires portées sur les avions Sur Secteur Non-Conflictuels dans les conditions où le service d'aide à la détection des conflits est intégré à la plateforme de contrôle (CD Aid et TC-SA+CD Aid). Néanmoins, l'analyse statistique révèle un effet significatif de la condition expérimentale sur la durée des fixations oculaires significatives ($F(3 ; 33) = 6.352, p < .005, \eta^2 = .609$).

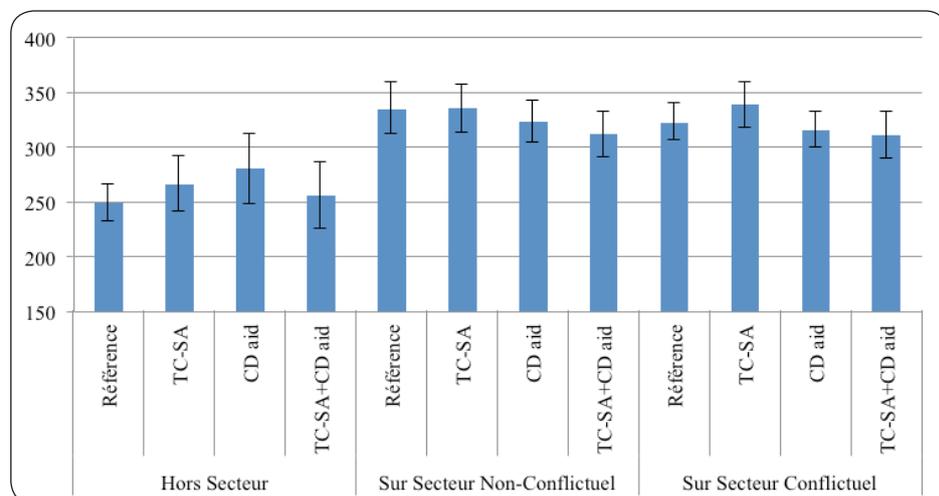


Figure 63. Durée des fixations oculaires entre les différentes catégories d'avions en fonction de la condition expérimentale

L'analyse de la durée moyenne des fixations oculaires réalisées sur l'interface de la plateforme de contrôle montre une augmentation de la durée dans les conditions expérimentales équipées de services d'aide (TC-SA, CD Aid et TC-SA+CD Aid) par rapport à celle relevée dans la condition Référence (Cf. Figure 64). Les comparaisons par paires réalisées dans le cadre de l'analyse statistique au moyen d'un contraste répété ne permettent cependant pas de vérifier statistiquement cette observation ($F(2 ; 27) = .806, p > .05, \eta^2 = .051$).

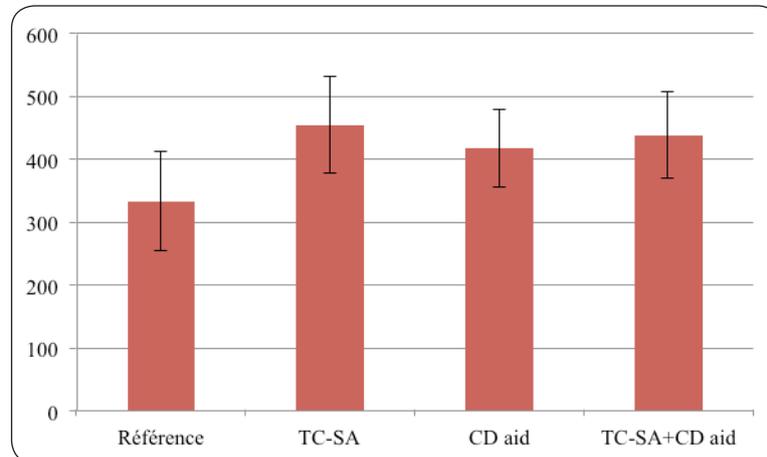


Figure 64. Durée des fixations oculaires portées sur l'interface en fonction de la condition expérimentale

Pour résumer, les résultats issus de l'analyse des fixations oculaires montrent que la charge attentionnelle des contrôleurs aériens dans le cas de l'utilisation de services d'aide à la gestion des conflits ne semble pas être perturbée. En effet, la répartition attentionnelle relative à la gestion du trafic aérien supervisé est inchangée par rapport à celle évaluée dans une situation nominale de contrôle (hiérarchie des catégories d'avions en termes de fixations oculaires réalisées). Cependant, en fonction des services d'aide intégrés dans la position de contrôle, on peut relever une variation de la part d'attention portée par les contrôleurs aériens sur les parties de l'interface et notamment dans le cas où l'agenda (CD Aid) est implémenté sur l'écran radar (augmentation du nombre de fixations oculaires). Ce résultat montre que l'agenda jouerait un rôle important dans l'analyse des situations conflictuelles restant à gérer par le contrôleur aérien. Enfin, les services d'aide à la gestion de conflits constituent des moyens permettant d'économiser les ressources attentionnelles dédiées à la gestion des conflits (baisse du nombre de fixations oculaires sur les avions impliqués dans les conflits par rapport à une situation de référence).

L'évaluation du niveau moyen de charge mentale dédié aux différentes catégories d'avions par le biais de l'analyse de la dilatation pupillaire maximale relevée au cours des différentes conditions expérimentales (Cf. Figure 65) ne permet pas d'illustrer la hiérarchie mise en exergue dans une situation nominale de contrôle. Cette observation est retrouvée par l'analyse statistique réalisée par le biais d'une ANOVA à mesures répétées. en effet, celle-ci ne permet pas de mettre en évidence un effet significatif de la catégorie d'avions sur les variations de la dilatation pupillaire ($F(2 ; 24) = .911, p > .05, \eta^2 = .077$).

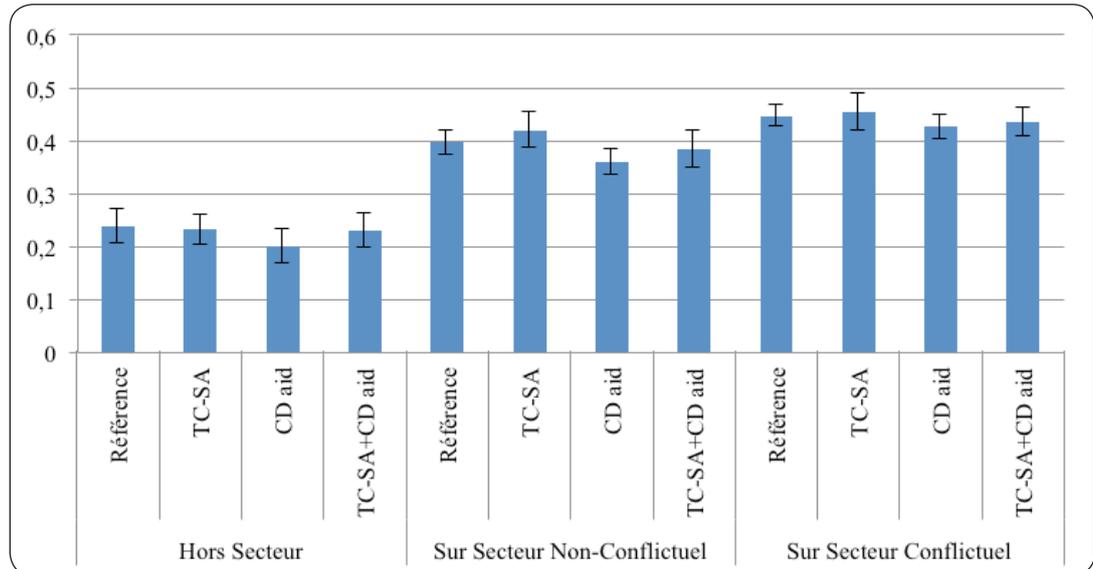


Figure 65. Dilatation pupillaire maximale pour les fixations oculaires significatives réparties entre les zones d'intérêt en fonction des conditions expérimentales

L'analyse de la dilatation pupillaire maximale relevée au cours des fixations oculaires significatives réalisées sur les avions Sur Secteur Conflictuels a été évaluée plus en détails (Cf. Figure 66), car attendue comme plus faible lors des conditions équipées de services d'aide à la gestion des conflits (Cf. hypothèses de recherche décrites dans le paragraphe 2 du chapitre). Cette analyse montre une stabilité relative du niveau de dilatation pupillaire maximal relevé lors des fixations oculaires réalisées sur les avions impliqués dans un conflit. L'analyse statistique confirme cette observation en ne distinguant aucun effet significatif de la condition expérimentale sur les variations de dilatation pupillaire maximale lors de ces fixations oculaires ($F(1 ; 11) = .85, p > .05, \eta^2 = .057$).

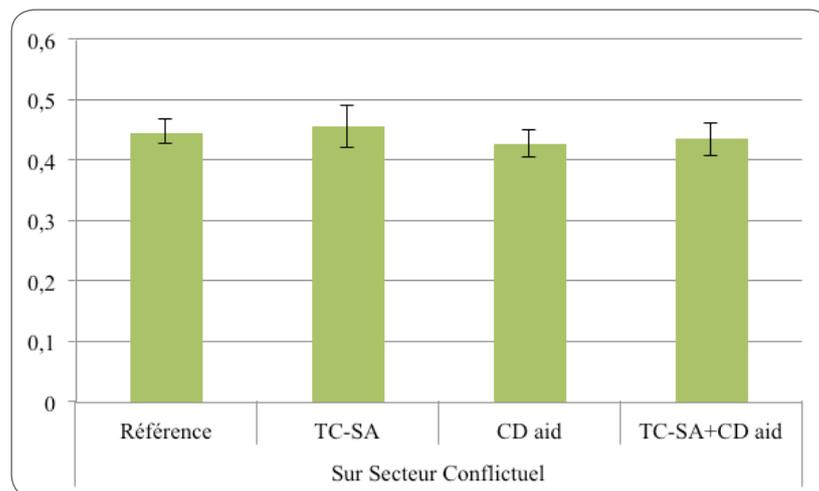


Figure 66. Dilatation pupillaire maximale pour les fixations oculaires significatives réalisées sur les avions conflictuels en fonction des conditions expérimentales

L'analyse de la dilatation pupillaire maximale relevée au cours des fixations oculaires significatives réalisées sur l'interface (Cf. Figure 67) de la plateforme de contrôle montre une augmentation du niveau pour les conditions équipées de services d'aide (TC-SA, CD Aid, TC-SA+CD Aid). Toutefois, cette observation descriptive n'est pas déterminée comme significative d'après l'analyse statistique ($F(2 ; 18) = .597, p > .05, \eta^2 = .051$).

La tendance à l'augmentation du niveau de charge mentale lors des conditions expérimentales impliquant l'utilisation de services d'aide à la gestion des conflits peut trouver deux explications principales :

- La première suppose un transfert partiel de l'analyse des situations conflictuelles vers les parties de l'interface concernées par le diagnostic des agents artificiels (conflits en cours de résolution ou/et conflits détectés), et ce notamment sur l'agenda (les niveaux les plus élevés étant relevés dans les conditions CD Aid et TC-SA+CD Aid).
- La seconde explication porte sur la difficulté associée à l'utilisation des outils d'aide à la gestion des conflits. Cette explication va dans le sens des ironies de l'automatisation définies par Bainbridge (1978; voir aussi Hoc, 2001) qui induisent notamment une hausse de la charge mentale ressentie par l'opérateur au début de la collaboration avec un agent artificiel.

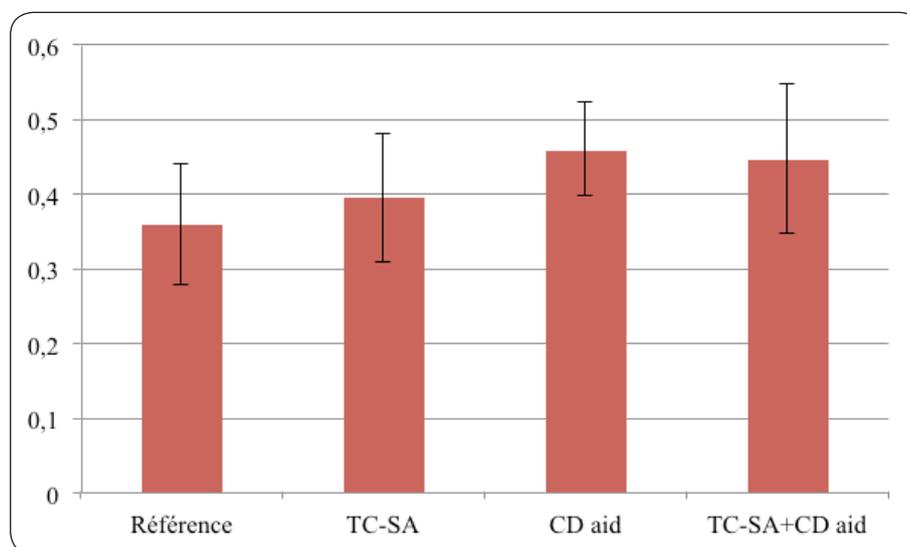


Figure 67. Dilatation pupillaire maximale lors des fixations oculaires significatives réalisées sur l'interface en fonction de la condition expérimentale

L'évaluation de la variation de la charge mentale par le biais de la dilatation pupillaire maximale a permis de mettre en exergue les effets que pourrait provoquer l'utilisation de services d'aide à la gestion de conflits sur le niveau de charge mentale ressentie par les contrôleurs aériens. Deux effets principaux ont été distingués :

- Le premier d'entre eux indique que le mode opératoire des contrôleurs aériens, quant à la répartition de leurs ressources cognitives entre les différentes catégories d'avions composant le trafic supervisé, ne serait pas modifié dans un environnement électronique et partiellement automatisé par rapport à une situation nominale de contrôle (différence entre les avions Hors-Secteur et les avions Sur Secteur).
- Le second effet rapporté porte sur la part de ressources cognitives allouée à la gestion des conflits (avions Sur Secteur Conflictuels et Interface). Alors que le niveau de charge mentale dédié aux avions impliqués dans les situations conflictuelles semble ne pas varier de façon notable, celui alloué à l'interface de la plateforme de contrôle est quant à lui supposé augmenter avec l'introduction de systèmes d'aide à la gestion des conflits.

5.2. Résultats issus des analyses complémentaires

5.2.1. Résultats de l'évaluation subjective

Le niveau moyen de charge mentale obtenu par une évaluation temporelle (à raison d'une évaluation toutes les 5 minutes de passation) au cours de l'ensemble des conditions expérimentales traduit un niveau de charge mentale subjectivement ressentie comme moyen voire plutôt faible (niveau strictement inférieur à 2.5). De plus, des différences de niveaux entre les différentes conditions expérimentales peuvent être observées (Cf. Figure 68). Les conditions Référence et CD Aid sont ainsi déterminées par les contrôleurs comme les conditions les plus coûteuses d'un point de vue des ressources cognitives déployées par les contrôleurs aériens au cours de la tâche de contrôle. Les conditions TC-SA et TC-SA+CD Aid sont quant à elles distinguées comme les conditions les plus « économiques ». Cet effet du niveau d'équipement de la position de contrôle, en termes de services d'aide à la gestion des conflits sur le niveau de charge mentale subjectivement évalué, a été déterminé comme significatif par le biais d'une ANOVA à mesures répétées ($F(2 ; 11) = 4.360, p < .05$).

Il semblerait donc que l'introduction du service TC-SA (résolution automatique d'une part des conflits), seul ou couplé au service CD Aid, permettrait une baisse notable de la charge mentale ressentie par les contrôleurs aériens.

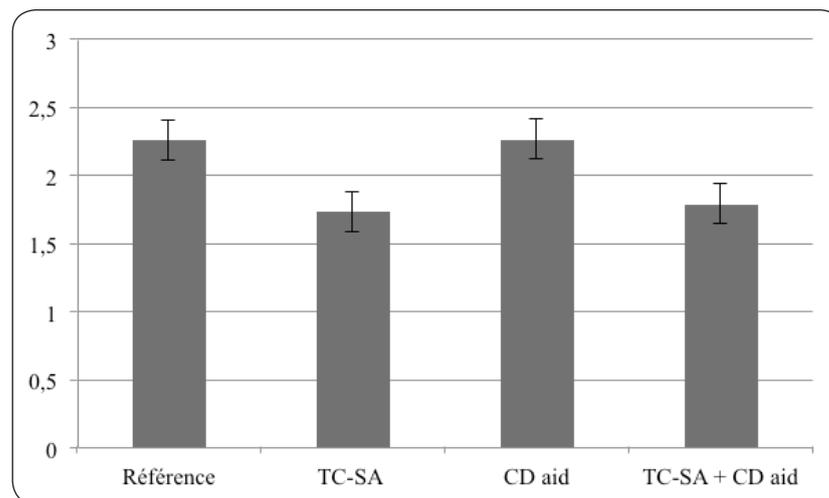


Figure 68. Les scores moyens ISA déterminés par les participants au cours de l'exécution de la tâche de contrôle en fonction des conditions expérimentales

5.2.2. Résultats issus de l'analyse des communications

Le taux d'occupation des communications en fonction de la condition expérimentale (Cf. Figure 69) semble équivalent pour les conditions Référence et CD Aid, mais notablement plus faible pour les conditions intégrant le service TC-SA (TC-SA et TC-SA+CD Aid). L'analyse statistique réalisée par le biais d'une ANOVA à mesures répétées ne montre pas d'effet significatif de la condition expérimentale ($F(2 ; 8) = 4.236, p > .05$). Cependant, la comparaison par paires, réalisée par le biais d'un contraste répété, conforte les observations précédemment détaillées. En effet, cette dernière montre une différence significative des niveaux de charge mentale subjectivement évalués entre les conditions Référence et TC-SA ($p < .05$), mais aussi

entre les conditions Référence et TC-SA+CD Aid ($p < .05$).

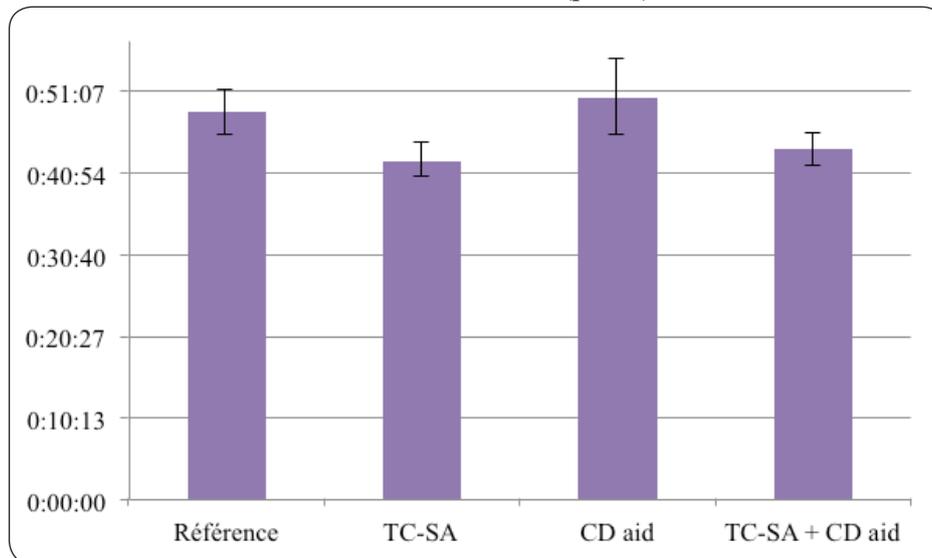


Figure 69. La durée d'occupation moyenne de la fréquence radio en fonction des conditions expérimentales (HH:MM:SS)

5.2.3. L'évaluation de la performance relative à la sécurité d'écoulement du trafic aérien supervisé

L'évaluation de la variation de la performance par l'effectif des situations Hors-Normes relevées au cours de l'ensemble des passations en fonction des conditions expérimentales met en exergue trois observations principales (Cf. Figure 70).

La première montre une valeur de situations Hors-Normes pour la situation TC-SA plus élevée que celle de la condition Référence. De plus, la condition CD Aid est celle pour laquelle le nombre de situations Hors-Normes relevées est le plus faible, alors que la situation où le CD Aid est associé au TC-SA l'effectif des situations hors-normes est moyen et plus faible que celui de la condition Référence. Cependant, si l'on compare l'ampleur de la variation de la performance évaluée par le biais du nombre de situations Hors-Normes, on peut considérer comme faible les variations de performance relevées entre les différentes conditions expérimentales.

L'analyse de la performance par le biais du nombre de situations Hors-Normes montre principalement que l'introduction de systèmes d'aide à la gestion des conflits n'impacte pas réellement la performance associée à la tâche réalisée par les contrôleurs aériens.

Condition expérimentale	Référence	TC-SA	CD Aid	TC-SA+CD Aid
Nombre de situations Hors-Normes	5	6	2	4

Figure 70. Le nombre de situations Hors-Normes relevées en fonction des conditions expérimentales

6. Discussion des effets générés par l'automatisation partielle de la tâche de contrôle sur la charge mentale de contrôleurs aériens

L'évaluation de la charge mentale de contrôleurs dans un environnement de contrôle « futuriste » associant une plateforme toute électronique à des systèmes artificiels en mesure d'automatiser partiellement la tâche de contrôle a tout d'abord montré que la façon dont les contrôleurs aériens gèrent leurs ressources attentionnelles et cognitives entre les différentes parties du trafic aérien supervisé (les différentes catégories d'avions), ne se trouve pas réorganisée par rapport à celle effectuée dans une situation nominale de contrôle (mise en exergue lors de l'étude précédente). En effet, la hiérarchie « Hors-Secteur ; Sur Secteur Non-Conflictuel ; Sur Secteur Conflictuel » mise en exergue lors de l'étude précédente est ici aussi observée.

L'introduction des services d'aide à la gestion des conflits (TC-SA et CD Aid) induit cependant certaines variations du niveau attentionnel dédié aux avions impliqués dans les situations conflictuelles du trafic aérien supervisé par les contrôleurs aériens. L'attention portée à ces avions « les plus coûteux » pour les contrôleurs aériens a tendance à diminuer dès lors que la plateforme de contrôle tout électronique est équipée d'outils d'aide à la gestion des conflits (TC-SA et/ou CD Aid). Cet impact n'est pas retrouvé quant au niveau de charge mentale moyen dédié à ces avions. En effet, un niveau stable de charge mentale évalué par le biais de la dilatation pupillaire maximale a été observé pour l'ensemble des configurations de plateforme de contrôle évaluées.

Équiper la plateforme de contrôle de services d'aide à la gestion de conflits provoque des variations notables quant à la part de ressources attentionnelles et cognitives allouées à l'interface associée à l'image radar. Ainsi, il a été observé une augmentation du niveau moyen des ressources attentionnelles et cognitives dédiées à l'interface dès lors que la plateforme de contrôle était équipée de service d'aide à la gestion de conflits. On peut voir en ce résultat une illustration de l'intégration de l'analyse et l'action proposées par les services d'aide à la gestion des conflits, dans celles effectuées par les contrôleurs aériens au cours de l'exécution de la tâche de contrôle.

Cette observation peut être confirmée par l'évaluation subjective de la charge mentale effectuée au cours la tâche de contrôle qui montre un niveau plus faible de charge mentale principalement pour deux configurations d'équipement de la plateforme de contrôle en termes d'outils d'aide (TC-SA et TC-SA+CD Aid).

Le « gain » apporté par le système de résolution de conflits (TC-SA et TC-SA+CD Aid) est également illustré par une baisse du niveau d'occupation de la fréquence radio au cours de l'activité des contrôleurs radariste par rapport à une situation de référence ou situation incluant seulement l'outil de détection de conflits.

Enfin, il est important de noter que dans un tel environnement de contrôle les contrôleurs aériens semblent être en mesure de superviser un trafic densifié (130 % du trafic actuel) avec un niveau de performance associé stable.

En se référant à l'ensemble des résultats issus de cette étude, il semble que l'automatisation partielle de la tâche de contrôle proposée par l'introduction de services de détection et de résolution de conflits ne soit pas néfaste en termes de niveau de charge mentale ressentie par les contrôleurs aériens, comme l'ont montré certaines études précédentes (Cf. paragraphe 1.3).

Au contraire, l'introduction d'un « déconflicteur » dans la position de contrôle, associé ou non à un « détecteur » de conflits résiduels paraît être un moyen de réduire les sollicitations du contrôleur aérien radariste au cours de son activité, et donc du niveau de charge mentale qu'il ressent.

7. Conclusion et perspectives

L'étude réalisée a notamment montré une augmentation du niveau de ressources attentionnelles et cognitives associées à la consultation de l'interface de l'image radar lorsque les informations résultant de l'analyse et de l'action d'outils d'aide dédiés aux contrôleurs aériens sont implémentées dans le système informatisé en question.

L'explication d'une telle variation peut être envisagée de deux façons distinctes : la première expliquerait cette augmentation par un transfert de l'analyse des situations conflictuelles, déterminée précédemment comme particulièrement coûteuse en termes de ressources cognitives à mobiliser. Ce dernier s'effectuerait vers les parties de l'interface partageant les informations relatives à l'analyse et l'action des systèmes artificiels intégrés à la plateforme de contrôle. La seconde envisage quant à elle un effet lié à l'adaptation du changement de l'activité des contrôleurs aériens, induisant la mise en place d'une collaboration avec des systèmes artificiels. Cette seconde explication mettrait donc en cause la phase d'adaptation nécessaire aux contrôleurs aériens pour définir de nouvelles stratégies opératoire, ou du moins d'adapter leurs stratégies existantes, au changement de leur environnement de travail.

Cette phase d'adaptation fait l'objet de la dernière étude présentée dans le chapitre suivant.

Chapitre 6

Approche développementale de la charge mentale : L'influence de la formation sur la gestion de la charge mentale des contrôleurs aériens dans une situation de contrôle toute électronique



Le dernier chapitre empirique de ce manuscrit introduit la troisième étude réalisée dans le cadre de la recherche dédiée à l'évaluation de la gestion de la charge mentale des contrôleurs aériens. L'expérimentation mise en place pour l'étude a visé la détermination de pistes de réponses relatives au questionnement sur l'adaptation et la formation des opérateurs aux systèmes de contrôle de nouvelle génération. Le chapitre décrit, dans un premier temps, certains des postulats portant sur le lien existant entre niveau de formation et charge mentale d'opérateurs. La suite du chapitre est dédiée à la méthode mise en place pour évaluer l'effet de la formation relative à la familiarisation d'une nouvelle génération de plateforme de contrôle du trafic aérien, sur la gestion de la charge mentale effectuée par les contrôleurs aériens lors de son utilisation.

1. L'évolution de la situation de contrôle et l'impact à anticiper sur la gestion de la charge mentale des contrôleurs en fonction du niveau de formation suivi

Le changement d'environnement de travail envisagé pour la situation de contrôle implique l'introduction de systèmes informatisés nécessitant la présence d'un système tout électronique permettant d'intégrer leur analyse de la situation de trafic. Toutefois, dans une telle perspective, la supervision globale de la situation de trafic resterait à la charge des contrôleurs aériens.

L'introduction d'une plateforme de contrôle tout électronique constitue donc la première étape du changement visé par l'élaboration de la plateforme de contrôle de nouvelle génération, proposée par le projet SESAR.

Comme cela a été mentionné dans le chapitre précédent (Cf. Chapitre 5, 1.2), le remplacement du système de contrôle du trafic aérien actuel, par un système tout électronique va modifier la nature de l'activité de travail réalisée par les contrôleurs aériens. La modification majeure provoquée sur l'activité des contrôleurs aériens porte sur le remplacement du renseignement des strips papier, par le renseignement du système informatisé associé à l'image radar de la situation tout électronique. Cette transition est d'ampleur pour les contrôleurs aériens qui doivent adapter leurs automatismes d'action au cours de la tâche de contrôle.

Un tel changement de la situation de contrôle montre la nécessité d'intégrer une phase de transition pour permettre aux contrôleurs aériens de se familiariser avec le nouveau système proposé.

1.1. Entre évolution de la plateforme de contrôle et appropriation nécessaire des nouveaux outils par les contrôleurs aériens

L'intégration de nouvelles technologies dans une situation complexe et dynamique, comme celle du contrôle du trafic aérien, interroge sur la présence d'éventuels problèmes d'appropriation et de maîtrise des outils lors de leur introduction dans une situation existante (Parise, 1997). La présence de tels problèmes serait aussi susceptible de provoquer des conséquences sur l'opérateur, et notamment sur les modes de gestion de leurs ressources attentionnelles et mentales qu'ils mettent en place au cours de l'exécution d'une tâche de contrôle.

L'atteinte d'un niveau de maîtrise suffisant relatif à l'utilisation de nouveaux outils par les opérateurs cibles est donc nécessaire avant d'envisager l'intégration des technologies en question dans la situation de travail opérationnelle (Bach, Brangier & Scapin, 2005).

L'appropriation de nouveaux outils par des opérateurs est principalement traitée par le suivi d'une formation, d'un entraînement portant sur l'utilisation des outils et leur

« intégration » dans la méthode de travail relative à l'activité de travail existante (Benjamin, 2003). Cette phase préalable semble donc représenter un élément central dans l'appropriation et l'acceptation de l'outil par l'opérateur.

Pour résumer, la nature de l'appropriation d'un nouvel outil proposée à l'opérateur (formation suivie) semble agir sur l'utilisation qu'il en fera, mais aussi sur le « coût » que cette utilisation lui demanderait.

1.2. L'impact de l'apprentissage sur le niveau de charge mentale lors de l'appropriation à un nouveau système de travail

La relation existante entre la formation (l'apprentissage) et le niveau de charge mentale a été principalement étudiée dans le domaine de la Psychologie de l'éducation, alors même que cela est riche d'enjeux en Ergonomie. Les travaux de John Sweller, réalisés depuis près de trente ans, et étant consacrés à la charge cognitive et à ses effets sur l'apprentissage, apparaissent comme une référence sur la question (Tricot, 1998 ; Sweller, & Chandler, 1994). Les résultats principaux obtenus par John Sweller et ses collaborateurs montrent que certaines caractéristiques relatives au mode d'apprentissage (stratégie de résolution des problèmes, techniques didactiques incluant un traitement des sources d'information multiples, configurations d'information redondante) auxquelles une forte charge cognitive peut être associée, peuvent venir perturber l'apprentissage.

Le contrôle aérien désigne une situation dynamique et complexe, sensiblement différente de celle de l'apprentissage scolaire. Dans le cas de la situation de contrôle du trafic aérien, Ayaz, Shewokis, Bunce, Izzetoglu, Willems et Onaral (2012) ont montré que le niveau de charge mentale évalué permet d'ajuster le contenu de la formation dispensée aux contrôleurs aériens, et ce, afin d'optimiser son efficacité. Cette étude a donc permis d'observer l'existence d'un lien notable entre le niveau de charge mentale de contrôleurs aériens et la formation qu'ils ont suivie.

En parallèle, des travaux récents portant sur l'effet provoqué par la formation sur l'opérateur ont notamment permis de montrer l'existence d'un lien entre le programme de formation suivi par l'opérateur et sa capacité à évaluer rapidement une situation complexe (Chauvin, Clostermann & Hoc, 2009). Ce résultat met en évidence l'importance de la formation des opérateurs de situations dynamiques et complexes sur leurs capacités d'actions. La transposition de ces résultats dans la situation de contrôle aérien permet d'envisager un effet positif du niveau de formation, dédiée à l'utilisation d'une nouvelle plateforme de contrôle tout électronique, sur la capacité d'analyse des contrôleurs aériens quant à la situation de trafic aérien supervisée avec la nouvelle plateforme en question.

2. Problématique de l'étude et hypothèses de recherche émises

Il a été préalablement montré qu'une évolution des systèmes de contrôle aériens risque d'impacter, du moins en partie, la nature de l'activité de travail des opérateurs. Cela explique pourquoi la prise en compte des effets générés par de tels changements sur l'opérateur, et notamment sur l'impact généré sur la façon dont il gère ses ressources cognitives, est essentielle dans un contexte d'évolution de la situation de travail (Jorna, 1997).

En parallèle, des études antérieures ont permis de montrer l'existence d'un lien entre le niveau de formation continue suivie par l'opérateur de situations dynamiques et complexes, et celui de la charge mentale qu'il ressent au cours de l'exécution de sa tâche.

On peut dès lors s'interroger sur l'impact de la familiarisation à un nouvel outil de gestion du trafic aérien, sur le niveau de charge mentale ressentie par le contrôleur aérien lors de ses premières utilisations en conditions « réalistes de travail » (premières simulations de trafic). L'interrogation peut également être généralisée à l'impact du niveau de formation proposé et suivi avant l'utilisation de l'outil par le contrôleur aérien, sur le niveau de charge mentale ressentie par les contrôleurs aériens lors de leurs premières simulations de trafic aérien.

Ainsi, le thème traité par cette étude porte sur l'effet généré par la formation à de nouvelles technologies destinées à la situation de contrôle, sur le contrôleur aérien. La problématique de recherche qui a été distinguée propose d'évaluer l'impact du niveau de formation dédiée à l'utilisation d'une plateforme de contrôle toute électronique, sur le niveau de charge mentale ressentie par les contrôleurs aériens lorsqu'ils effectuent une tâche de contrôle en utilisant la plateforme en question.

Pour statuer sur la problématique de l'étude qui a été préalablement détaillée, trois hypothèses ont été formulées :

- La part des ressources attentionnelles mobilisées, lors de l'utilisation du nouvel outil de contrôle proposé, fluctue significativement en fonction du niveau de formation que le contrôleur a reçu sur l'utilisation de l'outil de contrôle.
- La fluctuation du niveau de charge mentale dédiée à la gestion du trafic aérien, ne varie pas selon le type de formation que le contrôleur a reçu sur l'utilisation de la plateforme.
- Le niveau de ressources dédiées à l'utilisation du nouvel outil de contrôle décroît en fonction du niveau de formation reçue.

3. L'étude réalisée : L'évaluation de la charge mentale de contrôleurs aériens lors de l'utilisation d'une nouvelle plateforme de contrôle avec un niveau de formation particulier différent

3.1. Objectifs de l'étude et principe de l'expérimentation

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer l'impact du niveau de formation dédiée à l'utilisation d'une nouvelle position de contrôle, sur le niveau de charge mentale ressentie par des contrôleurs aériens au cours de l'exécution d'une tâche de contrôle.

Cette étude vise l'évaluation du niveau de charge mentale de contrôleurs aériens au cours de l'exécution d'une tâche de contrôle réaliste, incluant l'utilisation d'une plateforme de contrôle toute électronique (identique à celle utilisée lors de la deuxième expérimentation de ce travail de recherche), et ce, à la suite d'une formation très succincte. Pour cela, une expérimentation a été réalisée au sein de la salle de contrôle du CRNA Sud-Ouest.

En parallèle, la condition référence de l'expérimentation réalisée dans le cadre de l'étude précédente permet l'obtention d'une évaluation équivalente après le suivi d'une formation de durée significative, principalement dédiée à l'utilisation d'une plateforme de contrôle tout électronique.

L'analyse de données réalisée dans le cadre de cette étude consiste à comparer le niveau de charge mentale évaluée pour ces deux conditions expérimentales. Une telle comparaison permet d'évaluer dans quelle mesure le niveau de formation dédiée à l'utilisation d'une nouvelle interface agit sur le niveau de charge mentale de contrôleurs aériens, lorsque ces derniers sont amenés à l'utiliser dans un environnement « réaliste » (si l'on se réfère à la définition de la situation de contrôle aérien proposé par le projet SESAR).

Les caractéristiques de l'étude, qui sont détaillées dans la suite du texte, sont centrées sur la description de l'expérimentation réalisée dans la salle de contrôle du CRNA (Centre Régional de la Navigation Aérienne) Sud-Ouest.

3.2. La tâche expérimentale

La tâche expérimentale correspond à une simulation de contrôle En-Route. Ainsi, les participants ont été priés de gérer une séquence de trafic aérien de 45 minutes, en respectant les normes et les règles opérationnelles d'écoulement du trafic aérien (normes de séparation entre les avions notamment). Le rôle joué par les participants est celui de contrôleur radariste.

La principale distinction de la tâche expérimentale avec le milieu opérationnel porte sur l'outil de contrôle utilisé par les participants. En effet, au cours de l'expérimentation les participants ont été amenés à contrôler une séquence de trafic avec une nouvelle interface de contrôle, et cela suite à une brève phase de formation

dédiée à l'utilisation de l'outil en question. Cette position de contrôle de nouvelle génération, qui est identique à celle utilisée dans l'étude précédente, se distingue significativement de celle employée actuellement en salle de contrôle et a pour objectif d'illustrer ce que pourrait être l'outil de contrôle de demain.

Cette caractéristique de la tâche expérimentale permet de l'associer à un système de double tâche, où la tâche principale serait la gestion du trafic aérien, et la tâche secondaire serait l'utilisation de l'interface et le renseignement du système informatisé associé.

3.3. Participants

L'expérimentation menée dans le cadre de cette étude a été réalisée auprès de 13 participants volontaires (10 hommes et 3 femmes ; âge moyen : 38 ans).

L'ensemble des participants de l'expérimentation sont des contrôleurs aériens qualifiés du CRNA Sud-Ouest ayant reçu une formation initiale équivalente, mais dont l'expérience varie en fonction de leur ancienneté en salle de contrôle En-Route (ancienneté moyenne : 12 années ; écart-type : 6.05).

3.4. La phase préliminaire de formation

Une phase de formation, d'une durée s'étendant entre 30 et 45 minutes, a précédé la réalisation de la tâche expérimentale. Le contenu de la formation est centré sur l'utilisation de la plateforme de contrôle et peut être dissocié en trois phases successives.

- La première d'entre elles porte sur la présentation de l'interface et des différentes composantes et fonctionnalités qu'elle contient.
- La deuxième partie de la formation est une phase de familiarisation à l'utilisation du stylet (tâche de pointage) et à l'indirection (manipulation des menus et fonctions de l'interface).
- Enfin, la dernière phase de la formation est une simulation de la tâche expérimentale d'une quinzaine de minutes (sans les communications avec les pilotes). Cela a notamment permis aux contrôleurs de déterminer l'ensemble des actions à inclure dans le cadre du renseignement du système informatisé au cours d'une tâche de contrôle, et de définir une organisation entre tâche de contrôle et renseignement du système à mettre en application au cours de la tâche expérimentale.

3.5. Matériel et méthode

Les moyens techniques mis en place dans le cadre de cette expérimentation ont visé la représentation d'une situation de contrôle réaliste d'un point de vue métier (nature du trafic géré, règles et procédures respectées) intégrant un système informatisé à renseigner par le contrôleur aérien au cours de son activité de contrôle.

Une telle caractéristique illustre les pistes d'évolutions proposées notamment dans le cadre du projet 4-Flight (Cf. Chapitre 1, 1.3.2).

3.5.1. La position expérimentale

La plateforme utilisée lors de cette expérimentation (Cf. figure 71), identique à la plateforme de référence de l'étude précédente, est composée de deux parties principales:

- La partie haute est un écran de 30 pouces où s'affiche l'image radar. Dans cette représentation graphique de la situation de trafic, quatre informations principales sont présentées : l'horloge, des listes de vols, les avions du trafic représentés par un plot radar associé à une étiquette radar à partir de laquelle des menus et boîtes fonctions sont accessibles (affichés à la demande du contrôleur pour renseigner le système informatisé).
- La partie basse de la plateforme est l'interface d'interaction. Elle est composée de deux zones : La première est la zone de saisie permettant d'agir (déplacer le pointeur, réaliser une saisie) sur les objets de l'image radar en indirection par le biais du stylet. La seconde zone permet d'accéder aux réglages de l'image radar (zoom, déplacement de la position du secteur, affichage des balises radar) et à l'affichage d'informations complémentaires (réglage des vecteurs vitesse par exemple).



Figure 71. La position expérimentale composée d'une interface tout électronique et dans laquelle un eye-tracker a été intégré

Pour assurer la mise en place d'un environnement de contrôle « réaliste » d'un point de vue métier, la plateforme de contrôle a été complétée par une position de pseudo-pilote (la position IIPP, utilisée lors des études précédentes).

3.5.2. La séquence de trafic aérien

La séquence de trafic utilisée lors de l'expérimentation est identique à celle utilisée pour la première expérimentation de cette recherche (Cf. Chapitre 4, 3.4.2). Rappelons que cette séquence de 45 minutes, construite par un expert du trafic

aérien à partir d'enregistrements de trafic réel, se déroule sur le Secteur T et a pour principales caractéristiques d'avoir un niveau quasi-constant d'avions simultanément présents dans le secteur, et des phases de conflits clairement identifiées.

3.5.3. La consigne communiquée aux participants

Avant de débiter la tâche de contrôle de trafic aérien, la seule consigne donnée aux participants a été de leur demander de superviser la séquence de trafic comme il le ferait en position de contrôle (en termes de respect de règles et procédures et de modes opératoires employés). Il leur a également été indiqué le fait que la tâche de contrôle est à traiter de façon prioritaire (superviser et assurer la sécurité d'écoulement du trafic) par rapport à la tâche de renseignement du système informatisé.

3.6. Appareillage de la position expérimentale

Pour permettre l'enregistrement des données permettant d'évaluer le niveau de charge mentale, la position expérimentale a été principalement équipée par un eye-tracker, Tobii X-120, qui a été positionné sous l'écran radar. L'utilisation de l'eye-tracker a respecté les prérequis méthodologiques initialement définis (Cf. Chapitre 3, 2.2.1) et appliqués dans les études précédentes. Les données de trafic et du système informatisé ont là aussi été enregistrées par le biais de l'éditeur de trafic Rejeu (Cf. Chapitre 3, 2.1.3).

3.7. Procédure de l'expérimentation

Les passations, toutes encadrées par le même expérimentateur, ont été réalisées individuellement dans la salle de contrôle du CCR (Centre de Contrôle en-Route) Sud-Ouest. La luminosité de la salle a été maintenue constante pour répondre aux besoins relatifs à l'utilisation d'un eye-tracker (Cf. Chapitre 3, 2.2.1). Avant l'installation du participant à la plateforme expérimentale de contrôle, un questionnaire a été rempli pour récolter ses données personnelles (âge, sexe, expérience) et les objectifs de l'étude lui ont été présentés. L'installation du participant à la position expérimentale a ensuite suivi, en assurant le respect des besoins relatifs à l'évaluation effectuée (Cf. Chapitre 3, 2.2.4). Une phase préalable de présentation globale de l'interface (origine et historique) et de réponses aux éventuelles questions posées par le participant a été par la suite réalisée. La formation relative à l'utilisation de la plateforme de contrôle a ensuite eu lieu.

Avant que l'expérimentation ne débute, la phase de calibration de l'eye-tracker Tobii X-120 a été réalisée. La tâche expérimentale de 45 minutes a été exécutée par la suite. Au terme de la simulation de contrôle, un débriefing a été réalisé avec le participant, phase durant laquelle le participant a pu détailler son retour d'expérience relatif à l'utilisation de la plateforme et à d'éventuelles incompréhensions de mode de fonctionnement de l'interface. Cet échange a également permis au participant de compléter un questionnaire dans lequel figurait une évaluation du niveau de charge mentale ressentie au cours de la tâche de contrôle.

4. Analyse des données effectuée

L'analyse des données de cette étude est principalement orientée sur les données oculaires, alors que les études précédentes ont associé aux analyses des données oculaires, des analyses dites complémentaires.

Ce choix est justifié par la nature des hypothèses de recherche évaluées dans le cadre de cette étude. En effet, l'étude vise à déterminer dans quelle mesure le niveau de formation agit sur le niveau de charge mentale de contrôleurs aériens. Il a été dès lors nécessaire de réaliser une étude comparative de données confrontant les évaluations de charge mentale pour deux niveaux de formation, cette étude ne reflétant dès lors qu'une des conditions comparées.

4.1. Comparaison des données enregistrées pour deux niveaux de formation

Pour évaluer l'impact du degré de formation sur le niveau de charge mentale de contrôleurs aériens lorsque ces derniers sont amenés à utiliser un nouvel outil de contrôle, les données relatives à deux conditions expérimentales ont été comparées :

- La première condition, qui correspond à l'étude introduite précédemment dans le chapitre, illustre un faible niveau de formation, se limitant à un briefing d'une durée inférieure à une heure et est désignée sous le terme de « formation courte ». Cette condition est représentée par l'étude de ce chapitre réalisée auprès de treize contrôleurs aériens du CRNA Sud-Ouest.
- La seconde condition qui a permis la comparaison avec l'évaluation issue de l'étude présentée dans ce chapitre illustre la condition expérimentale incluant un niveau de formation significativement plus élevé tant par sa durée, que par la diversité de son contenu. Cette évaluation est celle proposée par la condition référence de l'étude précédente réalisée auprès de 12 contrôleurs aériens Européens.

Ces deux conditions sont comparables car elles correspondent à des simulations de contrôle du trafic aérien de durées équivalentes (aux environs d'une heure), incluant l'utilisation de la même plateforme de contrôle tout électronique.

Au contraire, elles se distinguent par deux caractéristiques principales :

- La première porte sur la population ayant réalisé la tâche expérimentale (deux populations indépendantes),
- La seconde est relative au niveau de formation qui a précédé la réalisation de la tâche expérimentale (Cf. Figure 72).

Les principales caractéristiques permettant de distinguer le contenu des deux niveaux de formation, sont présentées dans le tableau ci-dessous (Cf. Chapitre 5, Figure 49, pour plus d'informations sur le niveau de formation significativement plus élevé).

	Niveau de formation faible	Niveau de formation significativement plus élevé
Durée de la formation	30-45 minutes	Dizaine d'heures effectives réparties sur plusieurs jours
Moment d'occurrence de la formation	Précédant la tâche expérimentale	Formation composée de trois phases (détaillées ci-dessous). Seule la dernière phase est réalisée le même jour que la tâche expérimentale
Contenu de la formation	1. Présentation de l'interface (différentes parties, fonctionnement) en manipulant (actions possibles essais) 2. Phase de familiarisation à l'utilisation du stylet (jeu de pointage) 3. Phase de simulation de 15 minutes (utilisation de l'interface seulement)	1. Présentation théorique de l'interface
		2. Présentation appliquée de l'interface (manipulation)
		3. Phase de familiarisation à l'utilisation du stylet et à l'indirection (tâche de pointage)
		4. Phase de familiarisation au renseignement du système informatisé (jeu du labyrinthe)
		5. Premières phases de simulation (4*30 min)
		6. Présentation de la méthode de travail associée (par expert du contrôle)
		7. Deuxième phase de simulation (8*1 heure)
		8. Rappels et simulation (1 heure) précédant la tâche expérimentale

Figure 72. Tableau résumant le détail des deux niveaux de formation associés aux conditions expérimentales

Ces deux conditions expérimentales se distinguent également par les méthodes d'évaluation de la charge mentale mises en place. En effet, la méthode d'évaluation subjective de la charge mentale, ainsi que celle de la performance associée à la tâche de contrôle sont différentes entre les deux conditions (Cf. Figure 73). Cette distinction justifie l'impossibilité de comparer les données obtenues par le biais de ces analyses complémentaires, et donc la focalisation de l'analyse de données, réalisée dans le cadre de l'étude, sur les données oculaires.

	Condition expérimentale 1 : Formation « courte »	Condition expérimentale 2 : Formation « longue »
Analyse subjective	Evaluation post-tâche	Evaluation au cours de la réalisation de la tâche
	Evaluation simple (une seule valeur)	Evaluation multiple, temporelle (une valeur toutes les 5 min)
	Echelle d'évaluation de 0 à 5 (identique à celle utilisée lors de la première étude)	Evaluation avec l'échelle ISA (1 à 4)
Analyse de la performance associée à la tâche de contrôle réalisée	Calcul de la performance basée sur l'effectif et la nature des situations Hors-Normes (HN) relevées (identique à celui utilisée lors de la première étude)	Détermination du nombre de situations Hors-Normes (HN)

Figure 73. Les différences de méthodes d'évaluation distinguant les deux conditions expérimentales

4.2. L'analyse des données centrée sur la comparaison de paramètres oculaires

La comparaison de données oculaires en fonction de ces deux niveaux de formation a été orientée sur deux paramètres que sont les fixations oculaires significatives et la dilatation pupillaire maximale. Ainsi, les paramètres oculaires en question ont été comparés en fonction des catégories de zones d'intérêt pouvant être dissociées sur le contenu de l'image radar (les types d'avions constituant la séquence de trafic aérien supervisée et les composantes de l'interface du système informatisé) et de la condition expérimentale (formation courte et formation longue) dans laquelle les données ont été enregistrées.

5. Résultats obtenus à partir de la comparaison des données oculaires

La présentation des résultats obtenus par l'analyse des données oculaires est répartie en trois paragraphes, chacun d'entre eux étant dédié à un des indicateurs étudiés : l'effectif des fixations oculaires significatives, la durée de fixations oculaires et la dilatation pupillaire maximale atteinte durant les fixations oculaires.

5.1. La répartition des fixations oculaires significatives entre les zones d'intérêt et en fonction des conditions expérimentales

La dispersion des fixations oculaires orientées vers les différentes catégories d'avions composant la séquence de trafic supervisée par les participants au cours de la tâche de contrôle permet de montrer le respect de la hiérarchie préalablement identifiée dans la première étude de cette recherche (Cf. Figure 74). En effet, une distinction peut être effectuée entre les avions Hors-Secteur et les avions Sur Secteur, ces derniers étant les plus regardés. De plus, les avions impliqués dans les conflits (Sur Secteur Conflictuels) sont associés à un plus grand nombre de fixations oculaires que les avions qui ne le sont pas (Sur Secteur Non-Conflictuels). Enfin, l'analyse montre que la hiérarchie est respectée pour les deux conditions testées, à savoir une formation dédiée à l'utilisation de l'interface courte et une durée significativement plus longue.

L'analyse statistique réalisée au moyen d'une ANOVA à mesures répétées révèle deux effets venant confirmer ces observations : le premier est un effet significatif des catégories d'avions sur le nombre de fixations ($F(2 ; 21) = 39.755, p < .001, \eta^2 = .783$) et un effet non-significatif du niveau de formation ($F(1 ; 23) = .193, p > .05, \eta^2 = .048$).

Cette répartition des ressources attentionnelles en fonction des catégories d'avions distinguées, est observée pour les deux conditions expérimentales, et donc les deux niveaux de formation évalués.

L'analyse de la répartition des fixations oculaires entre les différentes composantes du trafic aérien supervisé par les contrôleurs aériens a permis de pointer deux observations principales :

- La gestion des ressources attentionnelles dédiées au trafic aérien géré par des

contrôleurs aériens ne semble pas être modifiée par l'utilisation d'une plateforme électronique, par rapport à celle observée dans une situation nominale de contrôle.

- La durée de la formation dédiée à l'utilisation du système informatisé inclus dans la plateforme de contrôle toute électronique ne semble pas non plus agir sur la façon dont les contrôleurs aériens répartissent leur attention dédiée au trafic aérien dont ils ont la charge.

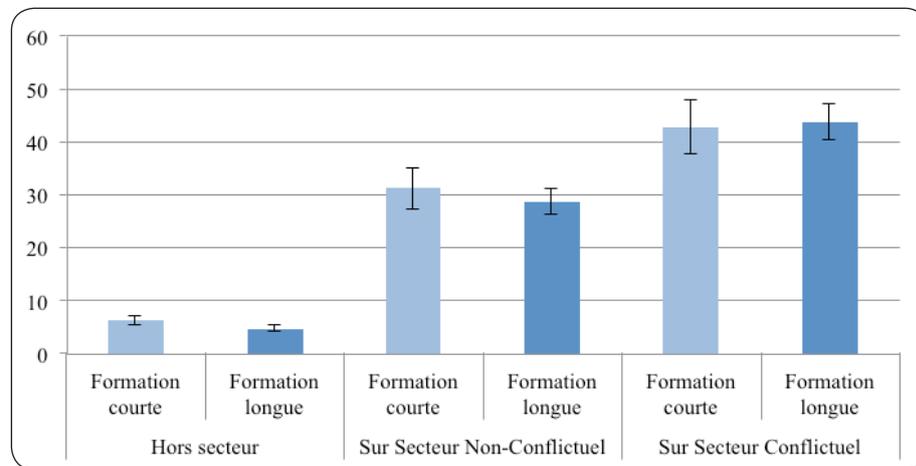


Figure 74. Nombre moyen de fixations oculaires significatives réalisées sur les différentes catégories d'avions en fonction du niveau de formation

L'analyse de la répartition des fixations oculaires a également porté sur l'interface de la plateforme de contrôle toute électronique utilisée lors des passations (Cf. Figure 75). Cette comparaison entre les deux niveaux de formation montre un nombre de fixations oculaires dédiées à l'interface plus élevé dans le cas de la formation courte par rapport à celui d'une formation plus longue. Cependant, cette observation n'est pas illustrée par un effet significatif du niveau de formation sur le nombre de fixations oculaires dédiées à l'interface ($F(1 ; 11) = 1.045$, $p > .05$, $\eta^2 = .087$).

Cette observation semble tout de même montrer que le niveau de formation suivi par les contrôleurs aériens, quant à l'utilisation de l'interface d'une position de contrôle tout électronique, serait susceptible d'agir sur la part d'attention qu'ils leur portent au cours de l'exécution de la tâche de contrôle d'une séquence de trafic aérien.

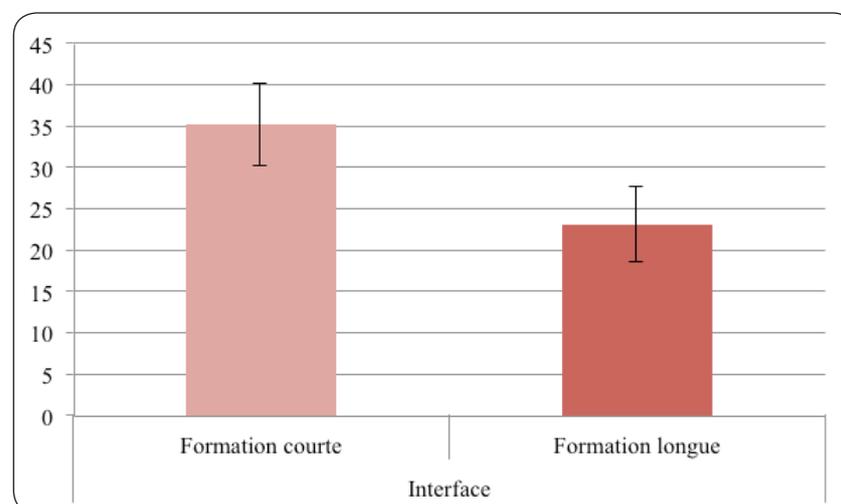


Figure 75. Nombre moyen de fixations oculaires significatives sur l'interface en fonction du niveau de formation

L'analyse des effectifs de fixations oculaires significatives entre les différentes zones d'intérêt de l'écran radar consulté par le contrôleur aérien, après le suivi d'une formation dédiée à l'utilisation de l'interface plus ou moins longue, a montré que le niveau de formation agit seulement sur l'effectif de fixations oculaires que porte le contrôleur aérien à l'interface, et non pas sur la façon dont il consulte les différents avions sur l'image radar.

5.2. La variation de la durée des fixations oculaires significatives en fonction de la zone d'intérêt regardée et de la condition expérimentale

La durée des fixations oculaires significatives portées aux différentes catégories d'avions composant la séquence de trafic aérien gérée par les contrôleurs aériens permet principalement de distinguer les avions Hors-Secteur des avions Sur Secteur (Cf. Figure 76).

Les avions Sur Secteur sont associés à une durée plus élevée des fixations oculaires significatives. Cette observation est d'ailleurs illustrée par la distinction d'un effet significatif de la catégorie d'avions sur la durée des fixations oculaires par le biais d'une ANOVA à mesures répétées ($F(2 ; 22) = 9.769, p < .005, \eta^2 = .47$).

La comparaison des fixations oculaires en termes de durée en fonction du niveau de formation dédiée à l'utilisation de l'interface montre que les variations entre catégories d'avions semblent stables entre les deux conditions. Toutefois, on peut noter une durée de fixations oculaires légèrement plus élevée pour les avions Sur Secteur Non-Conflictuels que celle relevée pour les avions Sur Secteur Conflictuels dans la condition « formation longue », ce qui n'est pas le cas dans la condition « formation courte ».

La durée des fixations oculaires (et notamment celles dédiées aux avions Hors Secteur et Sur Secteur Non-Conflictuels) paraît plus élevée dans la condition « formation longue » par rapport à celle relevée pour la condition « formation courte ». Ce résultat peut être associé au niveau de familiarisation des deux populations de contrôleurs aériens par rapport au trafic supervisé. En effet, alors que le groupe de contrôleurs aériens de la condition « formation courte » ont supervisé une séquence de trafic sur un des secteurs qu'ils supervisent quotidiennement, ceux du groupe « formation longue » ont opéré sur un secteur générique dont ils ont appris les caractéristiques (dont la nature des flux de trafic et des situations conflictuelles susceptibles de s'y produire) peu de temps avant l'expérimentation.

On peut donc penser que cette variation de durée de fixations serait associée à une différence du niveau d'expertise relative à la nature du trafic supervisé permettant de distinguer plus facilement (analyse plus courte) les avions impliqués ou non dans un potentiel conflit.

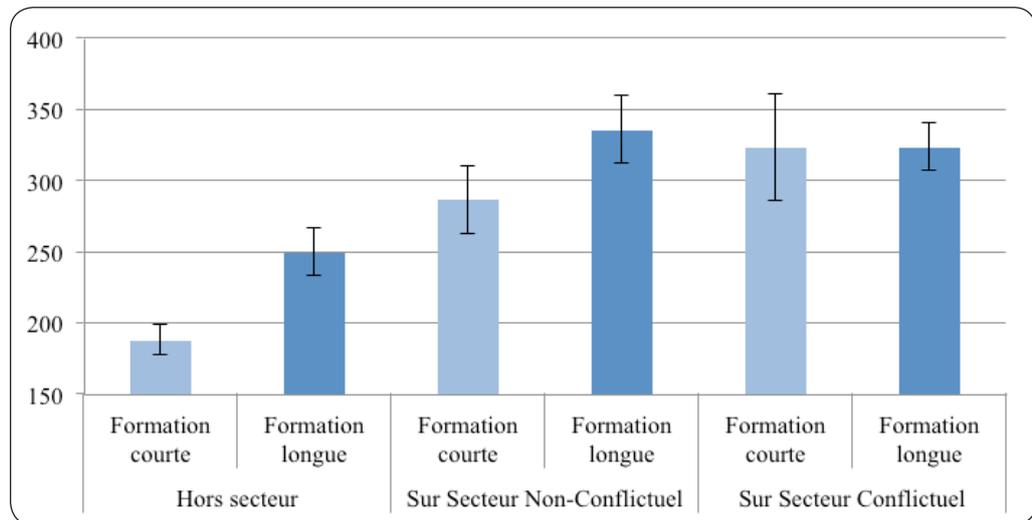


Figure 76. Durée moyenne des fixations oculaires significatives réalisées sur les différentes zones d'intérêt de l'image radar en fonction du niveau de formation (millisecondes)

La durée moyenne des fixations oculaires significatives portées sur l'interface de la plateforme de contrôle toute électronique semble quant à elle plus élevée quand les contrôleurs aériens ont suivi une formation longue, par rapport au cas d'une formation significativement plus courte (Cf. Figure 77). Toutefois, cette différence de durée des fixations ne se révèle pas significative d'un point de vue statistique ($F(1 ; 11) = .9$, $p > 0.05$, $\eta^2 = .076$).

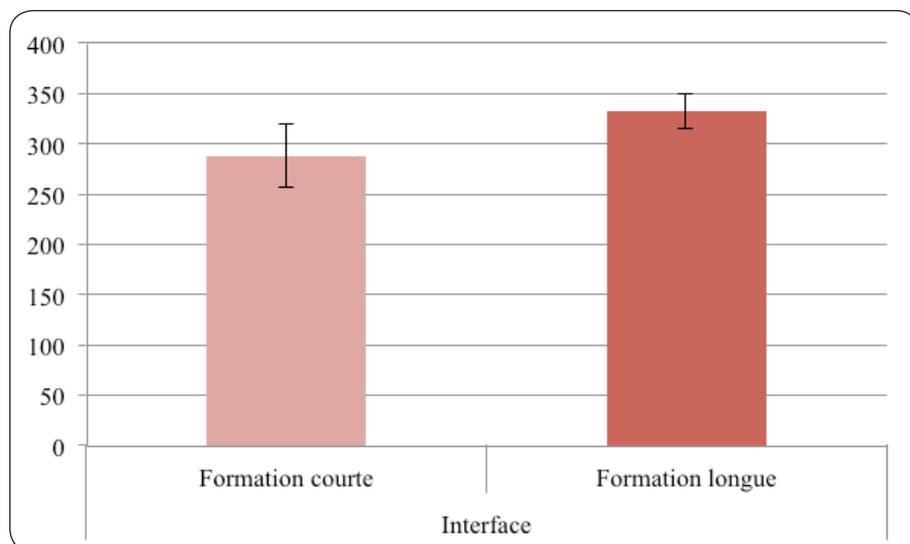


Figure 77. Durée moyenne des fixations oculaires sur l'interface en fonction du niveau de formation (millisecondes)

L'étude de la variation de la durée de fixations oculaires a permis de distinguer les avions Hors-Secteur des avions Sur Secteur pour les deux niveaux de formation évalués. De plus, le niveau de formation semblerait agir sur la durée des fixations oculaires dédiées à l'interface en générant une augmentation de leur durée moyenne.

Les caractéristiques associées aux fixations oculaires relevées au cours de la tâche de contrôle et pour deux niveaux de formation distincts, a permis de distinguer les différents effets que le niveau de formation serait susceptible de générer sur la répartition attentionnelle des contrôleurs aériens :

- Le premier d'entre eux porte sur les fixations oculaires portées aux différentes catégories d'avions composant le trafic supervisé par les contrôleurs aériens. Ainsi, il a été observé que le niveau de formation n'agissait pas sur la manière dont les contrôleurs aériens répartissent leurs ressources attentionnelles entre les différentes catégories d'avions. L'effectif des fixations oculaires suit ainsi la même hiérarchie entre les deux conditions reflétant chacune un niveau de formation : Hors-Secteur, Sur Secteur Non Conflictuel, Sur Secteur Conflictuel. De plus, la durée des fixations oculaires est distinguée entre les avions Hors-Secteur et les avions Sur Secteur (Non-Conflictuel et Conflictuel), ces derniers étant associés à une durée de fixations oculaires significativement plus longue. Ces observations illustrent les caractéristiques de la répartition attentionnelle mises en exergue précédemment dans le cas d'une situation de contrôle nominale. Dès lors, l'introduction d'une plateforme de contrôle tout électronique après une formation courte ou longue ne semblerait pas modifier la répartition de l'attention effectuée par les contrôleurs aériens dans la situation actuelle de contrôle.
- Le second impact majeur tiré de l'étude de la gestion des ressources attentionnelles des contrôleurs aériens porte sur le niveau d'attention consacrée à l'interface, en fonction du niveau de formation dédiée à l'utilisation de l'interface. Le niveau de formation diminuerait significativement l'effectif de fixations oculaires significatives portées sur l'interface, alors qu'il augmenterait faiblement la durée moyenne des fixations oculaires. Un niveau de formation plus élevé réduirait donc la part d'attention de contrôleurs aériens dédiée à l'utilisation de l'interface de la position de contrôle aérien.

5.3. La dilatation pupillaire maximale relevée au cours des fixations oculaires significatives sur les différentes zones d'intérêt de l'interface et fonction de la condition expérimentale

La dilatation pupillaire maximale des contrôleurs aériens relevée lorsque ces derniers ont consulté les différentes catégories d'avions composant la séquence de trafic aérien supervisée montre une hiérarchie identique à celle préalablement identifiée entre les différentes catégories d'avions (Cf. Figure 78).

Les avions Hors-Secteur apparaissent comme ceux dont le traitement nécessite le niveau de coût cognitif le plus faible, les avions Sur Secteur Non-conflictuels sont quant à eux associés à un niveau intermédiaire significativement plus élevé, alors que les avions Sur Secteur Conflictuels sont déterminés comme les avions les plus coûteux. Cette hiérarchie des catégories d'avions en termes de niveau de dilatation pupillaire maximale et donc de niveau de coût cognitif associé est observée pour les deux niveaux de formation évalués. L'analyse statistique, réalisée par le biais d'une ANOVA à mesures répétées, confirme l'effet significatif de la catégorie d'avions sur le niveau de dilatation pupillaire maximale ($F(2 ; 41) = 15.053, p < .001, \eta^2 = .497$).

Il peut également être relevé que le niveau de dilatation pupillaire maximale durant les fixations oculaires significatives réalisées sur les avions Sur Secteur Non-Conflictuels dans la condition « formation longue » paraissent plus longues, que celles relevées au

cours de la condition « formation courte ». On peut justifier une telle observation par la même explication que dans le cas des durées des fixations oculaires, c'est-à-dire par la différence d'expertise des contrôleurs aériens quant à l'espace de trafic aérien supervisé, et donc à la distinction des points « conflictuels » du secteur.

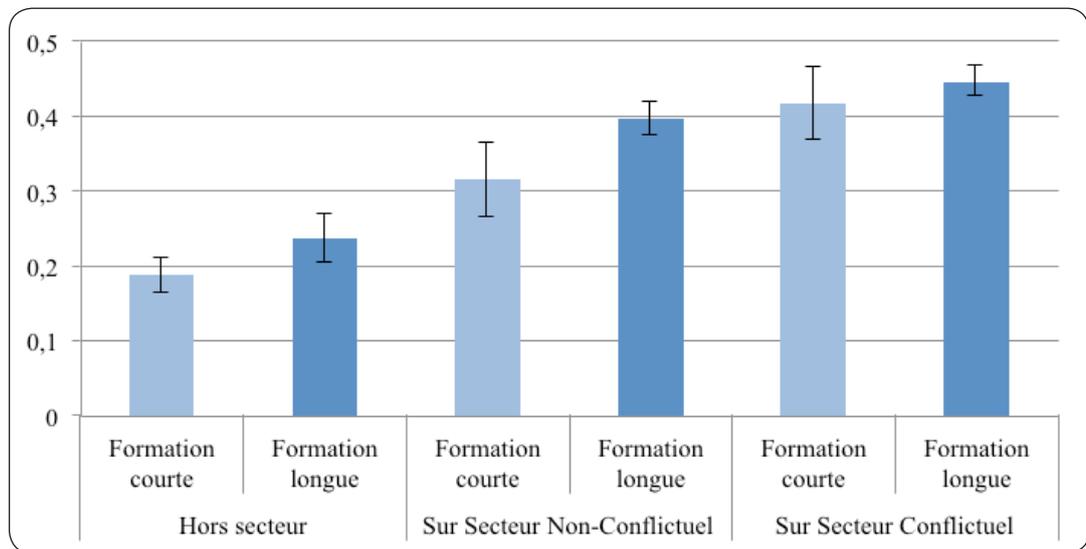


Figure 78. Moyenne de la dilatation pupillaire maximale durant les fixations oculaire significatives réalisées sur les différentes catégories d'avions en fonction du niveau de formation (score z)

L'analyse des variations de la dilatation pupillaire maximale au cours des fixations oculaires sur les différentes parties de l'interface de la plateforme de contrôle toute électronique ne montre, quant à elle, aucun effet marquant du niveau de formation dédiée à l'utilisation de l'interface sur le niveau de coût cognitif moyen associé à l'interface (Cf. figure 79). En effet, aucune variation de la dilatation pupillaire maximale n'est relevée entre la condition « formation courte » et la condition « formation longue ». L'ANOVA à mesures répétées ne permet d'ailleurs pas la mise en évidence d'un effet significatif ($F(1 ; 11) = .143, p > .05, \eta^2 = .013$).

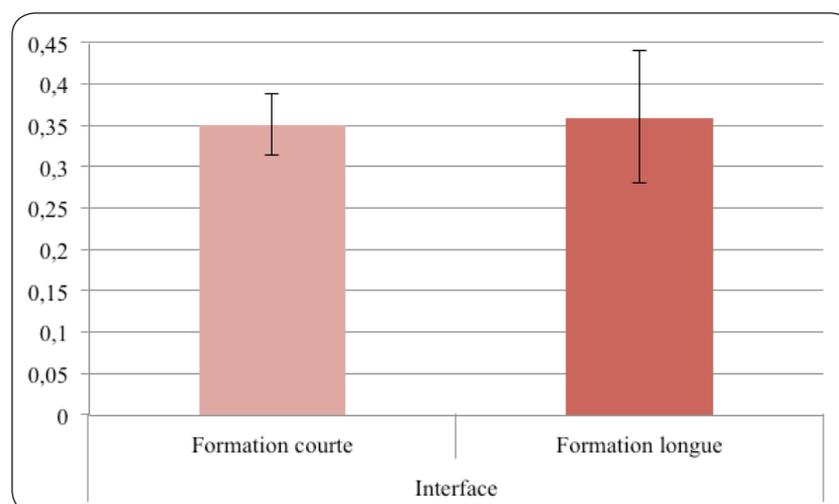


Figure 79. Moyenne de la dilatation pupillaire maximale au cours des fixations oculaires significatives dédiées à l'interface en fonction du niveau de formation (score z)

L'étude de la dilatation pupillaire au cours des fixations oculaires significatives a permis de montrer que le niveau de formation dédiée à l'utilisation de l'interface de la

plateforme de contrôle tout électronique n'agissait pas sur le niveau de coût cognitif moyen associé à chacune des zones d'intérêt distinguées au sein de l'écran radar consulté par le contrôleur aérien au cours d'une tâche de contrôle. En effet, le niveau de coût cognitif moyen, évalué à partir de la moyenne de dilatation pupillaire maximale relevée au cours des fixations oculaires significatives, a été considéré comme stable entre les deux conditions expérimentales, que ce soit pour les différentes catégories d'avions ou pour l'interface.

La hiérarchie de coût cognitif moyen, relevée entre les différentes catégories d'avions, a également illustré le fait que la gestion de la charge mentale dédiée à la gestion du trafic aérien dont le contrôleur aérien a en charge la supervision ne semble pas être impactée par l'introduction d'un système de contrôle tout électronique, peu importe le niveau de formation suivie par le contrôleur quant à l'utilisation de ce système incluant de nouvelles technologies.

6. Discussion et conclusion de l'étude

Les résultats issus de cette étude permettent de distinguer l'impact que pourrait engendrer le niveau de formation dédié à l'utilisation de l'interface dans le cadre de l'introduction d'une plateforme de contrôle de dernière génération tout électronique.

Ainsi, il en ressort la distinction d'un effet du niveau de formation sur l'attention dédiée par le contrôleur à un outil de contrôle de nouvelle génération, incluant le renseignement d'un système informatisé. En effet, plus le niveau de formation dédiée à l'utilisation de l'outil en question est important, plus le niveau d'attention lui étant porté est faible. Ce résultat vient confirmer la première hypothèse émise dans le cadre de cette étude. De plus, il a été pointé le fait que la durée de formation ne semblait pas impacter le niveau de charge mentale moyen associé à l'utilisation de l'interface.

Toutefois, les résultats obtenus par le biais de l'étude montrent que le niveau de charge mentale dédié au trafic aérien supervisé respecte une hiérarchie entre les différentes catégories d'avions, hiérarchie en accord avec les niveaux d'exigences leur étant associés dans une situation nominale de contrôle (situation de contrôle illustrant la position de contrôle actuellement mise en place en centre de contrôle En-Route).

Pour résumer, l'étude indique que la charge mentale ressentie par des contrôleurs aériens au cours de la supervision d'une séquence de trafic incluant l'utilisation d'un outil de contrôle de nouvelle génération, et ce après un degré de formation significativement différent, serait stable alors que l'écran est visuellement traité différemment (répartition du regard).

Si l'on peut rapprocher cette étude à celles portant sur la régulation de la charge mentale (Spérandio, 1978 ; Cegarra & Hoc, 2006), il pourrait être considéré que

les opérateurs maintiennent constant leur niveau de charge par des stratégies de régulation. Ainsi, après une formation de très courte durée, les contrôleurs aériens focaliseraient plus leurs ressources attentionnelles et cognitives sur la gestion de l'interface, mais probablement en diminuant celles associées à la gestion du trafic. Une autre stratégie opératoire pouvant être mise en place par les contrôleurs aériens pour pallier leur manque de maîtrise de l'outil consisterait à donner la priorité à la tâche de contrôle lorsque la difficulté associée à cette dernière augmente (hausse du nombre de conflits à gérer par exemple) au détriment de la tâche de renseignement du système (repousser le renseignement du système informatisé dans certaines phases de trafic chargées). Dans ce cas, le contrôleur aérien organiserait et répartirait dans le temps son action entre la tâche de supervision de contrôle, et celle de renseignement du système informatisé pour limiter les effets de son manque d'assurance quant à l'utilisation de l'outil de contrôle.

Cette étude a donc permis d'illustrer l'effet du niveau de formation dédié à l'utilisation d'un nouvel outil sur la gestion de la charge mentale effectuée par les contrôleurs aériens au cours d'une tâche de contrôle réaliste. Elle a notamment permis de montrer que le niveau de formation agissait sur la répartition de l'attention, mais pas sur le niveau de charge mentale dédié à la consultation et au renseignement d'une interface de contrôle de nouvelle génération. Cette étude a également permis de montrer que la répartition des ressources attentionnelles et cognitives des contrôleurs relative à une situation nominale n'a pas été altérée par l'utilisation d'une nouvelle plateforme de contrôle, que ce soit à la suite d'une phase de formation significative ou non.

Synthèse des résultats obtenus

Le travail de thèse réalisé a permis d'évaluer la gestion de la charge mentale effectuée par les contrôleurs aériens dans trois contextes différents : Une situation nominale reflétant la situation de contrôle du trafic aérien actuelle, une situation de contrôle tout électronique dans laquelle ont été intégrés des outils d'aide à la gestion des conflits, une situation de contrôle tout électronique pour laquelle le niveau de formation dédiée à son utilisation a été variable. Ces dernières ont principalement permis de distinguer les principales caractéristiques associables à la gestion de la charge mentale effectuée par les contrôleurs aériens au cours de leur activité de travail et à la façon dont cette dernière peut être impactée par des changements intégrés à leur environnement de travail, et à la façon dont ils peuvent être préparés à opérer dans une situation modifiée par rapport à celle d'origine. Avant de conclure sur ce travail de recherche, il est proposé de synthétiser l'ensemble des résultats obtenus et de les répartir en fonction des évaluations réalisées dans le cadre cette recherche. Pour distinguer aisément les contributions obtenues en fonction de l'étude réalisée, la synthèse des résultats est présentée sous forme de tableau.

<p>Étude 1</p> <p>Évaluation de la gestion de la charge mentale de contrôleurs aériens en situation nominale</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Le rôle occupé par les avions dans la situation de trafic aérien (Secteur/Conflit) supervisée par les contrôleurs aériens agit sur l'attention et la charge mentale leur étant allouée. • La présence de conflits agit sur le niveau de charge mentale déployé par les contrôleurs aériens pour satisfaire aux exigences de la tâche de contrôle. • Les phases de détection et de résolution des conflits sont particulièrement coûteuses en termes de ressources cognitives à allouer par les contrôleurs aériens. • Les stratégies opératoires mises en place pour résoudre les conflits diffèrent en fonction des contrôleurs aériens, qui peuvent être distingués sous formes de profils.
<p>Étude 2</p> <p>Évaluation de la gestion de la charge mentale de contrôleurs aériens en situation « électronique et automatisée »</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Le mode de répartition de l'attention et la charge mentale allouées à la gestion du trafic aérien par les contrôleurs aériens n'est pas impactée par les modifications de la position de contrôle envisagées par le projet SESAR, et est constante par rapport à celle relevée en situation nominale. • La part de ressources attentionnelles allouées aux avions impliqués dans un conflit, définis préalablement comme les plus coûteux, a tendance à être réduite lorsque la plateforme est équipée d'un service de résolution automatique de conflits. • Les ressources cognitives dédiées aux avions conflictuels restent stables malgré l'introduction de services d'aide à la gestion des conflits, lorsqu'il est évalué à partir de données psychophysiologiques. • L'évaluation subjective de la charge mentale et celle des communications indiquent une baisse de sollicitations des contrôleurs aériens dans le cas où un service de résolution automatique de conflits (associé ou non à un service de détection des conflits) est intégré à la plateforme de contrôle. • Les ressources attentionnelles et cognitives des contrôleurs aériens qui sont attribuées à l'interface de la position de contrôle sont plus importantes lorsque la position de contrôle est équipée de services d'aide à la gestion des conflits
<p>Étude 3</p> <p>Évaluation de la gestion de la charge mentale de contrôleurs aériens en situation d'apprentissage</p>	<ul style="list-style-type: none"> • La formation suivie par les contrôleurs aériens pour s'approprier la plateforme de contrôle tout électronique n'agit pas sur leur mode de répartition des ressources attentionnelles et cognitives allouées au trafic aérien, si on le compare à celui identifié dans une situation nominale. • La part de ressources attentionnelles dédiées à l'interface de la plateforme touteélectronique est réduite en fonction du niveau de formation de familiarisation à son utilisation. • Le niveau de charge mentale alloué à l'interface de la plateforme de contrôle tout électronique ne diffère pas en fonction du niveau de formation des contrôleurs aériens.

Conclusions des recherches menées

Le domaine du contrôle du trafic aérien va être amené à évoluer pour adapter son fonctionnement aux évolutions de trafic aérien prévues. Les moyens technologiques actuellement disponibles offrent de nombreuses perspectives pour définir une situation de contrôle de nouvelle génération. L'évolution principalement envisagée consisterait à définir une situation de contrôle où l'opérateur humain serait amené à collaborer avec des systèmes artificiels en mesure d'assurer une partie des tâches ne revenant jusqu'à présent qu'à l'opérateur humain. Dans le cadre du projet SESAR, deux perspectives d'évolution de la situation de contrôle En-Route sont principalement envisagées : l'introduction d'une plateforme de contrôle toute électronique, et celle de services d'aide à la gestion des conflits.

Le changement d'une situation de travail induisant une transformation de la nature de la tâche à effectuer par l'opérateur humain peut avoir des conséquences néfastes de grande ampleur si son adaptation et son acceptation de la part des opérateurs ne sont pas préalablement validées. Dans le cas du contrôle aérien où la sécurité est primordiale pour superviser les déplacements des avions dans l'espace aérien, le contrôleur aérien doit avoir la maîtrise parfaite de la situation et de ses évolutions. Collaborer avec des systèmes artificiels nécessite dès lors que le contrôleur aérien intègre leurs actions sur la situation dans la représentation qu'il se construit du trafic supervisé. Une incompréhension du fonctionnement des systèmes, pourrait engendrer des erreurs de la part du contrôleur aérien. En effet, un tel cas de figure serait susceptible de provoquer une situation de « tunnelisation mentale » où l'opérateur perd la représentation de la situation globale qu'il supervise (Tessier & Dehais, 2012).

Dans ce contexte, l'objectif de la thèse a été de déterminer les modes actuels de gestion de la charge mentale mis en place par les contrôleurs aériens, et de déterminer dans quelle mesure les modifications apportées à leur environnement de travail, par le biais du projet SESAR, pourraient les impacter.

Les études menées dans le cadre de cette recherche ont ainsi permis de distinguer certaines des caractéristiques relatives à la gestion de la charge mentale effectuée par les contrôleurs aériens au cours de l'exécution de leur tâche dans la situation de contrôle actuelle. De cette évaluation, il ressort que la présence de situations conflictuelles dans le trafic supervisé par les contrôleurs aériens agit significativement sur le niveau de ressources attentionnelles et cognitives qu'ils mobilisent au cours de leur activité. De plus, les phases de détection et de résolution des conflits potentiels ont été déterminées comme les plus coûteuses en termes de niveau de charge mentale ressentie par les

contrôleurs aériens. Cette étude a également montré que les stratégies opératoires déployées par les contrôleurs aériens pour résoudre les conflits détectés ne sont pas équivalentes. En effet, alors que certains contrôleurs ont tendance à laisser « pourrir » la situation pour voir diminuer la part d'incertitude relative à la situation conflictuelle et mettre en place une action « fine » de contrôle modifiant faiblement les trajectoires initiales des avions impliqués ; d'autres vont mettre en place une action de résolution plus rapidement, même si cela leur demandera de peut-être intervenir de nouveau au moment où l'incertitude quant au devenir de la situation sera plus faible.

Les évaluations réalisées ont également offert la possibilité d'estimer l'effet généré par l'introduction d'une nouvelle plateforme de contrôle tout électronique, comprenant des services d'aide à la détection et à la résolution des conflits de la situation de trafic supervisée, sur la gestion des ressources attentionnelles et cognitives des contrôleurs aériens. Une telle modification ne semble pas agir de façon notable sur le mode de gestion de la charge mentale allouée à la supervision du trafic par les contrôleurs aériens. De plus, l'introduction d'un service d'aide à la résolution d'une part des conflits de la situation de trafic semble représenter un bénéfice en termes de sollicitations des contrôleurs aériens, et donc potentiellement au niveau de charge mentale mobilisée.

Enfin, l'étude complémentaire réalisée dans le cadre de la recherche a montré l'effet que le niveau de formation dédiée à l'utilisation d'une nouvelle plateforme de contrôle tout électronique pourrait générer sur la gestion de la charge mentale de contrôleurs aériens. Ainsi, le niveau de formation permettrait de limiter le niveau de ressources attentionnelles dédiées à l'utilisation de l'interface de la plateforme sans agir sur le niveau moyen de charge mentale lui étant dédié.

Pour résumer, la recherche effectuée permet de pointer le rôle essentiel joué par les conflits de la situation de trafic aérien sur le niveau de charge mentale des contrôleurs aériens, mais aussi le potentiel que l'introduction de services d'aide à la gestion des conflits, et notamment de résolution, pourrait représenter dans le cadre de l'augmentation du seuil de gestion du système de contrôle existant.

Les conclusions que l'on peut apporter à ce travail de recherche portent également sur la détermination des apports et des limites pouvant lui être associés.

Tout d'abord, on peut associer à cette recherche des apports méthodologiques. En effet, le travail de référence, proposé par la première étude réalisée, a permis de confronter les différents paramètres oculaires enregistrés dans le cadre de l'évaluation de la charge mentale ressentie par les contrôleurs aériens. L'analyse des blinks et celle de la dilatation pupillaire par moyenne ont ainsi été définies comme inopportunes pour l'étude de la charge mentale de contrôleurs aériens En-Route au cours de l'exécution d'une tâche de contrôle. Au contraire, l'analyse des fixations oculaires significatives et celle de la dilatation pupillaire maximale ont été définies comme des approches appropriées pour appréhender respectivement l'attention et la charge mentale des contrôleurs aériens En-Route lors d'une tâche de contrôle.

Le travail d'analyse des données oculaires réalisé dans cette recherche, a également permis de souligner la nécessité de pré-traiter les données brutes enregistrées. De cette analyse, a été déduit un ensemble d'étapes à réaliser avant d'entreprendre la phase d'analyse des données. Enfin, l'élaboration d'un logiciel (OCTAVE) de traitement des données a permis d'inclure l'ensemble de ces étapes de pré-traitement afin d'automatiser cette phase d'analyse préalable des données oculaires.

Les apports qui peuvent être associés à cette recherche portent également sur l'évaluation de la charge mentale de contrôleurs aériens proposée. Il peut être premièrement souligné l'effectif important de participants à la partie empirique de ce travail, et tout particulièrement la première étude réalisée qui a compté quarante participants. Une population aussi importante a permis d'obtenir des résultats robustes d'un point de vue statistique.

L'emploi d'une technique d'eye-tracking pour étudier la charge mentale des contrôleurs aériens au cours d'une tâche de contrôle réaliste constitue également un apport. Ce dernier porte notamment sur la mise en relation entre les données oculaires et les données de trafic qui a pu être effectuée. Ainsi, la répartition des données attentionnelles et cognitives des contrôleurs aériens a pu être « contextualisée » avec la nature de la situation de trafic qu'ils ont été amenés à superviser.

L'analyse des variations de la charge mentale par le biais de la dilatation pupillaire maximale qui a été réalisée pour les phases de gestion de conflits a permis d'illustrer certaines des caractéristiques du modèle TLI (Task Load Index) à partir de données psychophysiologiques. L'augmentation entre la phase de détection et de résolution du conflit, ainsi que la baisse importante de charge mentale suivant la résolution, évoquées dans le modèle TLI, ont en effet été illustrées à partir de l'analyse des variations de la dilatation pupillaire maximale.

Même si ce travail de recherche présente de nombreux apports, certaines limites peuvent toutefois lui être associées. Deux limites peuvent notamment être indiquées. La première porte sur la méthodologie d'analyse des données oculaires employée. La comparaison des indicateurs oculaires dans le cadre de l'évaluation de la charge mentale effectuée n'a en effet pas été en mesure d'intégrer les saccades oculaires, ces dernières ne pouvant facilement être identifiées dans les données brutes. Il n'a pas été dès lors possible de se positionner sur cet indicateur oculaire pour évaluer la charge mentale de contrôleurs aériens. Une autre limite que l'on peut pointer quant à la méthode d'évaluation de la charge mentale réalisée est un manque d'évaluation temporelle réalisée à partir des données oculaires. Une telle évaluation permettrait d'intégrer l'effet provoqué par l'évolution de la situation de trafic sur le niveau de charge mentale ressentie par les contrôleurs aériens au cours de leur activité.

La seconde limite associée à ce travail porte sur l'évaluation de la charge mentale de contrôleurs aériens proposée. En effet, l'évaluation proposée dans le cadre de ce travail

est centrée sur le contrôleur radariste alors que l'activité de contrôle est collaborative, les contrôleurs aériens travaillant en binômes. Enfin, la deuxième limite associée à l'évaluation de la gestion de la charge mentale des contrôleurs aériens En-Route, porte sur la détermination de profils de contrôleurs aériens basée sur l'analyse de leurs modes opératoires pour résoudre les conflits susceptibles de se produire dans la situation de trafic supervisée. L'étude du *Maturing-Time* a permis de distinguer des différences de stratégies opératoires illustrant l'existence de profils de contrôleurs aériens, mais elle n'a pas permis une analyse détaillée permettant de définir les différents seuils distinguant les profils les uns par rapport aux autres.

Ces limites qui ont été distinguées permettent de définir les axes de perspectives qui pourraient être données à cette recherche. Ces perspectives sont détaillées dans la suite et fin de ce manuscrit.

Perspectives de la recherche

L'approche multifactorielle, centrée sur l'analyse d'indicateurs oculaires associés au contenu de la situation de trafic aérien, qui a été mise en place dans cette recherche afin d'évaluer la charge mentale de contrôleurs aériens au cours de situations réalistes de contrôle, pourrait être optimisée par l'implémentation d'analyses complémentaires. Trois axes de perspectives sont principalement envisageables :

- Le premier axe, qui pourrait être étudié, résulterait d'une analyse temporelle de la charge mentale des contrôleurs aériens au cours de l'exécution d'une tâche de contrôle, notamment à partir de l'analyse du signal de la dilatation pupillaire. Analyser les variations du signal de la dilatation pupillaire permettrait de détecter au cours du temps, les phases d'augmentation de la dilatation, atteintes sous forme de pics du signal (Beatty, 1982, Klingner, 2008). Ces augmentations, illustrant une hausse du niveau de charge mentale, pourraient par la suite être mises en relation avec les caractéristiques de la situation de trafic aérien (présence de conflits à gérer, séparation des avions par exemple). On pourrait notamment envisager d'étudier l'évolution de la dilatation pupillaire de contrôleurs aériens lorsque des situations Hors Normes se produisent. Cette analyse permettrait également de déterminer les conséquences que cette perte de sécurité de la situation de trafic engendre sur le niveau de la charge mentale de contrôleurs aériens, mais peut être aussi de définir les caractéristiques du signal laissant présager l'apparition d'une telle situation.

Ainsi, l'évaluation de la charge mentale, réalisée à partir des données de dilatation pupillaire, deviendrait dynamique. Une telle possibilité permettrait d'analyser plus finement l'évolution de la charge mentale des contrôleurs aériens au cours des phases de gestion de conflits. L'analyse de la dilatation pupillaire au cours de la tâche de contrôle dessine également la possibilité d'évaluer en temps réel la charge mentale de contrôleurs aériens au cours de leur activité de travail, et peut-être même de détecter des phases d'augmentation importante pouvant devenir la cause d'erreurs.

- La deuxième perspective d'évolution, relative à la méthode d'évaluation de la charge mentale de contrôleurs aériens, porte sur la détermination de profils de contrôleurs aériens en fonction de la stratégie opératoire qu'ils privilégient pour résoudre les situations conflictuelles potentielles de la situation de trafic supervisée. Cette stratégie est illustrée par la durée du Maturing-Time (Averty et al., 2002) correspondant au temps s'écoulant entre la détection du conflit potentiel et le moment où une (des) action(s) de résolution est (sont) mise(s) en place par le contrôleur aérien. Cette analyse consisterait à analyser la durée du Maturing-Time par contrôleur et par situation conflictuelle potentielle, pour ainsi déterminer des seuils de Maturing-Time,

qui définiraient différents profils de contrôleurs aériens. Enfin, les profils pourraient être mises en relation avec les caractéristiques des contrôleurs aériens (âge, années d'expérience en tant que Premier Contrôleur, années d'expérience sur le secteur étudié par exemple) afin de détecter des liens de corrélation entre le « parcours » des contrôleurs aériens et leur profil relatif à la gestion des conflits.

- La dernière perspective d'évolution relative à la méthode d'évaluation de la charge mentale de contrôleurs aériens porte sur la cible de l'analyse. Dans le travail proposé, l'évaluation est centrée sur le contrôleur radariste car ce dernier joue un rôle essentiel dans la gestion des situations conflictuelles susceptibles de se produire dans la situation de trafic supervisée.

Cependant, le contrôle du trafic aérien s'exécute dans le cadre d'un travail collaboratif. En effet, les contrôleurs travaillent en binôme. Ici, la collaboration apparaît comme une stratégie déployée pour optimiser la sollicitation de ressources collectives (binôme de contrôleurs en position) et de ressources individuelles (ressources cognitives notamment) en fonction du niveau d'exigences de la tâche évalué (nature du trafic à gérer). Cette caractéristique induit une incidence sur la nature des modes opératoires employés par l'opérateur. Dans les cas où une adaptation est nécessaire pour l'atteinte d'un niveau de performance acceptable, un délestage d'actions peut s'effectuer. Ce recours permet à l'opérateur d'augmenter sa capacité instantanée. Ces actions peuvent toutefois être réalisées par un autre opérateur ayant les ressources disponibles pour cela (Hourlier, 2001).

Il apparaît dès lors opportun d'analyser ultérieurement dans quelle mesure le collectif agit sur le niveau de charge mentale ressentie par les contrôleurs aériens. Cette analyse semble notamment primordiale pour évaluer l'impact que l'introduction de systèmes de contrôle de nouvelle génération serait susceptible de provoquer sur la répartition des exigences à satisfaire et des ressources à allouer entre les membres du binôme de contrôleurs aériens.

Un autre champ de perspectives est également envisageable pour l'évaluation de la charge mentale de contrôleurs aériens. Ce dernier concerne les prochaines études susceptibles d'être réalisées dans le cadre du projet Européen SESAR, et notamment sur la partie WP.4, dédiée à la situation de contrôle En-Route.

Les perspectives d'évolution de la situation de contrôle du trafic aérien En-Route envisagées par ce projet ont été jusqu'à présent étudiées sous formes de projets indépendants. Une évaluation de l'ensemble des modifications semble nécessaire à l'évaluation globale de la situation de contrôle En-Route de nouvelle génération proposée par le projet SESAR. L'évaluation de la charge mentale de contrôleurs aériens dans une situation de contrôle intégrant l'ensemble de ces évolutions permettrait d'évaluer l'impact qu'elles génèreraient sur la gestion de la charge mentale effectuée par les contrôleurs aériens au cours de leur activité de contrôle. Elle représenterait

donc un moyen d'évaluer la validation des perspectives d'évolution de la situation de contrôle En-Route proposées par le projet SESAR.

Au final les travaux menés ne peuvent pas être réduit à une étude a posteriori des choix de conception des outils d'aide portés seulement par des ingénieurs. En effet, ils permettent d'infléchir au plus tôt de la conception une véritable réflexion sur les Facteurs Humains. L'ingénierie cognitive propose notamment l'intégration de la dimension écologique et donc les connaissances sur l'activité, dans le cadre de projet de conception, en IHM notamment (Blanche, Goubert et Morineau, 2006). Cette approche à l'intersection de la Psychologie cognitive, de l'Ergonomie et de l'Ingénierie (Rasmussen, 1986), se distingue des approches classiques en conception basées sur une décomposition fonctionnelle de l'artefact (Haué, 2004).

Les travaux réalisés dans le cadre de ce doctorat permettent d'enrichir cette démarche par une véritable approche Facteurs Humains. La recherche en Facteurs Humains, est, quant à elle, également renforcée par un ensemble de contributions sur la charge mentale qui pourront être exploités dans d'autres domaines, notamment en aéronautique.

Références bibliographiques

- Ahern, S. K. & Beatty J. (1979). Pupillary responses during information processing vary with scholastic aptitude test scores. *Science*, 205, 1289-1292.
- Allen, J.F. (1983). Maintaining Knowledge about Temporal Intervals. *Communications of the ACM*, 26, 11, 832- 843.
- Allison, R. S., Eizenman, M., & Cheung, B. S. K. (1996). Combined head and eye tracking system for dynamic testing of the vestibular system. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 43, 1073-1082.
- Amalberti, R. (1996). *La conduite des systèmes à risques*. PUF, coll. Le Travail Humain, Paris.
- Amalberti, R. (1998). Automation in Aviation : A human factors perspective, in D.Garland, J.Wise & D. Hopkin (Eds) *Aviation Human Factors*, (pp 173-192, chapter 7), Hillsdale- New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates.
- Amalberti, R. (2005). *Psychologie Ergonomique. Cours de licence de psychologie 2^{ème} année*, IED Paris VIII.
- Amalberti, R., Auroy, Y., Berwick, D. & Barach, P. (2005). Five System Barriers to Achieving Ultrasafe Health Care. *Annals of Internal Medicine*, 142, 756-764.
- Averty, P. (1998). Les effets de la charge de trafic sur le niveau d'activation psychophysologique du contrôleur aérien. *Thèse de Doctorat en Psychologie Cognitive*, Université Lumière Lyon 2.
- Averty P., Athènes S., Collet C., Dittmar A. (2002). Evaluating a new index of mental workload in real control situation using psychophysiological measures, *21st Digital Avionics Systems Conference proceedings DASC2002 (7a4p1-13)*, USA October 2002.
- Averty, P., Collet, C., Dittmar, A., Athènes, S. & Vernet-Maury, E. (2004). Mental workload in air traffic control: an index constructed from field tests. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, vol. 75, iss. 4, p. 333-341(9), April 2004.
- Averty, P., Johansson, B., Wise, J. A., & Capsie, C. (2007). Could ERASMUS speed adjustments be identifiable by Air Traffic controllers? *Proceedings of the 7th USA/ Europe ATM R&D Seminar*, Barcelona, Spain, 2-5 July.
- Ayaz, H., Shewokis, P. A., Bunce, S., Izzetoglu, K., Willems, B. & Onaral, B. (2012). *NeuroImage*, 59. 36-47.
- Baccino, T. (2002). Oculométrie Cognitive. In G.Tiberghien (Ed.), *Dictionnaire des Sciences Cognitives* (pp. 202-203). Paris: Armand Colin.
- Bach,C., Brangier, E. & Scapin, D.L. (2005). Exigences ergonomiques, méthodes, et normes pour la conception de Systèmes d'Information centrés humain. In: *Le management des hommes au travail*, Eyrolles (Eds).
- Baddeley, A.D. & Della Sala, S. (1996). Working memory and executive control. *Proceedings of the Royal Society London*, B,351, 1397–1404.
- Baddeley, A.D. (1998) Mémoire de travail, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences Paris, Sciences de la vie*, 321, 167-173.
- Baddeley, A.D. (2000) Working Memory. *APA Encyclopedia*.
- Bainbridge, L. (1977). Possibilités oubliées en matière d'habileté et de charge de travail. *Le Travail Humain*, 40, 203-224.
- Bainbridge, L. (1978). Forgotten alternatives in skill and workload. *Ergonomics*, 21, 169–185.
- Bainbridge, L. (1987). Ironies of automation. In J. Rasmussen, K. Duncan and J. Leplat (eds.), *New Technology and Human Error*. London: Wiley

- Bainbridge, W. S. (1989). The Religious Ecology of Deviance. *American Sociological Review*, 54 : 288-295.
- Barouillet, P. (1996). Ressources, capacités cognitives et mémoire de travail : postulats, métaphores et modèles. *Psychologie française*, 41, 319-338.
- Bayssié, L. & Chaudron, L. (2002). Évaluation de la performance d'un opérateur en fonction de sa tâche. Application aux IHM. In P., Girard, T., Baudel, M., Beaudouin-Lafon, E., Lecolinet & D. L. Scapin (Eds.), *IHM 2002* (pp. 219-222). Poitiers, France.
- Beatty, J., & Kahneman, D. (1966). Pupillary changes in two memory tasks. *Psychonomic Science*, 5, 371-372.
- Beatty, J. (1982). Task-evoked pupillary responses, processing load, and the structure of processing resources. *Psychological Bulletin*, 91, 276-292.
- Beatty J., Brennis J. W. (2000). The pupillary system, In *Handbook of Psychophysiology*, eds Cacioppo J. T., Berntson G., Tassinari L. G., Cambridge: Cambridge University Press, 142–162.
- Bellenkes, A.H., Wickens, C.D., and Kramer, A.F. (1997). Visual scanning and pilot expertise: The role of attentional flexibility and mental model development. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 68(7), pp. 569-579.
- Benjamin, D. (2003). Les difficultés d'appropriation des NTIC par les acteurs de l'entreprise : quelle contribution possible de la fonction « ressources humaines », *Congrès de l'AGRH*, Grenoble, France.
- Billings, C. (1997). *Human Centered Aviation Automation*, Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Bisseret, A. (1995). *Représentation et décision experte. Psychologie cognitive de la décision chez les aiguilleurs du ciel*. Toulouse, Octarès éditions.
- Blanche, C., Goubert, E., Morineau, T. (2006). Une approche d'ingénierie cognitive pour la gestion intégrée de sonde côtières: le cas d'un barrage sur un estuaire. *Vertigo*, 7 (3).
- 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. Cabon, 1996.
- Bobillier Chaumon, M.E., Bessière, C., & Brangier, E. (2002). Les effets du changement technologique sur le travail collaboratif : le cas d'une équipe de conception informatique. *Revue d'Interaction Homme-machine / Journal of Man-Machine Interaction*, 4(1), 37-58.
- Boeing. (2010). Current Market Outlook. Boeing Commercial Airplanes, Randy Tinseth, Vice President, Marketing.
- Brangier, E. & Barcenilla, J. (2003). *Concevoir un produit facile à utiliser*, Editions d'Organisation.
- Brangier, E., Lancry, A., Louche, C. (2004). *Les dimensions humaines du travail*. Nancy, Presses Universitaires de Nancy.
- Brennen, S.D. (1992). An Experimental Report on Rating Scale Descriptor Sets for the Instantaneous Self Assessment (ISA) Recorder, DRA/TM/CAD5/92017. Defence Research Agency. Portsmouth.
- Brookings, J., Wilson, G., & Swain, C. (1996). Psychophysiological responses to changes in workload during simulated air traffic control. *Biological Psychology*, 42(3), 361-377.
- Bruneau, D., Sasse, M. A. & McCarthy, J.D. (2002). The Eyes Never Lie: The use of eyetracking data in HCI research. *Proceedings of the CHI2002 Workshop on Physiological Computing*, Minneapolis.
- Bunecke, J. L. (1987). Quantifying some information processing requirements of the pilot's instrument cross check. *Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting*, 31, 1301-1305.

- Callantine, T. J., Lee, P. U., Mercer, J. S., Prevot T. & Palmer E. A. (2005). Air and Ground Simulation of Terminal-Area FMS Arrivals with Airborne Spacing and Merging. *Proceedings of the 6th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar*, Baltimore, MD.
- Castaño, D. & Parasuraman, R. (1999). Manipulation of pilot intent under free flight: A prelude to not-so-free flight. In *Proceedings of the 10th International Symposium on Aviation Psychology* (pp. 170–176). Columbus: Ohio State University.
- Cegarra, J. & Chevalier, A. (2008). The use of Tholos software for combining measures of mental workload: towards theoretical and methodological improvements. *Behavior Research Methods*, 40, 988-1000.
- Cegarra, J., & Hoc, J.-M. (2006). Cognitive styles as an explanation of expert individual differences: A case study in computer-assisted troubleshooting diagnosis. *International Journal of Human-Computer Studies*, 64, 123-136.
- Cellier, J.-M. (1996). Exigences et gestion temporelle dans les environnements dynamiques. In J.-M. Cellier, V. De Keyser, & C. Valot (Eds.), *La gestion du temps dans les environnements dynamiques* (pp. 19-48). Paris: PUF.
- Chalandon, X. (2003). Situation awareness en conception système. In J. M. C. Bastien (Ed.), *Actes des Deuxièmes Journées d'Étude en Psychologie Ergonomique – ÉPIQUE'2003* (pp. 55-62). Boulogne-Billancourt, France.
- Chanquoy, L., Tricot, A., & Sweller, J. (2007). *La charge cognitive*. Paris : Armand Colin.
- 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* [CD-ROM]. Reston, VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Chauvin, C., Clostermann, J.P. & Hoc, J.-M. (2008). Situation awareness and the decision-making process in a dynamic situation: avoiding collisions at sea. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 2, 1- 23.
- Chauvin, C., Clostermann, J. P. & Hoc, J. M. (2009). Impact of training programs on decision-making and situation awareness of trainee watch officers. *Special Issue: Research in ergonomic psychology in the transportation field in France*. Safety Science, Vol. 47, No. 9, pp. 1222-1231.
- Chialastri, A. (2012). *Automation in aviation*, Chapter 5. Dr. Florian Kongoli (Ed.).
- Clarion, A. (2009). Recherche d'indicateurs électrodermaux pour l'analyse de la charge mentale en conduite automobile. Thèse de doctorat, Mention : Neurosciences du comportement. Université de Lyon.
- Colle, H. A., & Reid, G. B. (1999). Double trade-off curves with different cognitive processing combinations: Testing the cancellation axiom of mental workload measurement theory. *Human Factors*, 41, 35-50.
- Collet C., Averty P., Delhomme G., Dittmar A. & Vernet-Maury E. (2003). Subjective aspects of mental load in air-traffic control. In G.R.J. Hockey, A.W.K. Gaillard et O. Burov (eds.) *Operator functional state and impaired performance in complex work*. NATO ASI series, Series A, Life Sciences, New-York, Plenum Press, 291-302.
- Corker, K., Gore, B., Fleming, K., & Lane, J. (2000). Free flight and context of control: Experiments and modeling to determine the impact of distributed air-ground air traffic management on safety and procedures. *Proceedings of the 3rd USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar*, Naples, Italy.
- Crawford, S. & Wiers, V.C.S. (2001). From Anecdotes to Theory: A review of Existing Knowledge on Human Factors of Planning and Scheduling. In B. L. Mac Carthy & J. R. Wilson (Eds.), *Human performance in planning and scheduling: fieldwork studies, methodologies and research issues* (pp. 15-43). London: Taylor & Francis.
- De Jong, R. (2001). Adult age differences in goal activation and goal maintenance. *European Journal of Cognitive Psychology*, 13, 71-89.
- De Montmollin, M. (1986). *L'intelligence de la tâche : éléments d'ergonomie cognitive*. Berne : Peter Lang.

- De Montmollin, M. (1994). La compétence dans le contexte du travail, dans Minet, F., Parlier, M. et S. De Witte. *La compétence, mythe, construction ou réalité ?*, Paris, L'Harmattan, 39-44.
- De Montmollin, M. (1995). *Vocabulaire de l'ergonomie*. Octarès. Toulouse.
- Debernard, S., & Hoc, J.M. (2003). Conception de la répartition dynamique d'activités entre opérateur humain et machine. Leçons tirées d'une collaboration pluridisciplinaire dans le contrôle de trafic aérien. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, 37, 187-211.
- Delignières, D. (2004). Difficulté de la tâche et performance. In J. La Rue & H. Ripoll (Eds), *Manuel de Psychologie du Sport*, tome 1 (pp. 85-112). Paris: Editions Revue EPS.
- Delignières, D., Legros, P., & Famose, J.P. (1991). Perception de l'effort et difficulté de la tâche. *Science et Motricité*, 13, 14-18.
- Denecker, P. (1999). Les composantes symboliques et subsymboliques dans la gestion des situations dynamiques. *Le Travail Humain*, 62, 363-385.
- Descalle, A-C., Mandran, N., Meillon, B., Pellegrin-Mille, A., Roux, C., Vidal, A. (2006). Gate-to-Gate RTS1B Eye tracking results, Multicom/Floralis, pp.25.
- De Waard, D. (1996). The measurement of drivers' mental workload. PhD thesis, University of Groningen. Haren, The Netherlands: University of Groningen, Traffic Research Centre.
- Di Nocera, F., Terenzi, M., & Camilli, M. (2006). Another look at scanpath: distance to nearest neighbour as a measure of mental workload. In D. de Waard, K.A. Brookhuis, A. Toffetti (Eds.), *Developments in Human Factors in Transportation, Design, and Evaluation* (pp. 295-303). Maastricht, the Netherlands: Shaker Publishing.
- Dinand, J. P. & Defayolle, M. (1969). Utilisation des potentiels évoqués moyennés pour l'estimation de la charge mentale. *Agressologie*, 1969, 10, 525-533.
- Drogoul, F. (2008). *ERASMUS Baseline Scenario - Second Experiment of the Performance Assessment : Refinement of the Initial Findings* (Rapport technique No 2008-013). Bretigny, France : EUROCONTROL Experimental Center.
- Duchowski, A. T., Clemson University, Clemson, SC, USA. *Eye Tracking Methodology: Theory and Practice*, 2nd ed. Springer.
- Ebenholtz, S. M. (2001). *Oculomotor Systems and Perception*. New York: Cambridge University Press, 2001. Pages: 212.
- Endsley, M. R. (1995). Toward a theory of situation awareness, *Human Factors*, 37 (1), 32-64.
- 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, 1, 21-44.
- Endsley, M. R., Mogford, R. H., Allendoerfer, K. R., Snyder, M. D. & Stein, E. S. (1997). *Effect of free flight conditions on controller performance, workload, and situation awareness* (DOT/FAA/CT-TN97/12). Atlantic City International Airport, NJ: Federal Aviation Administration, William J. Hughes Technical Center.
- Ephrath, A. R., Tole, J. R., Stephens, A. T., & Young, L. R. (1980). Instrument scan - Is it an indicator of the pilot's workload? *Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting*, 24, 257-258.
- Ettlinger, G. & Kalsbeck, J.E. (1962). Changes in tactile discrimination and in visual reaching after successive and simultaneous bilateral posterior parietal ablations in the monkey. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 25, 256-268.
- Eurocontrol. (2007). Trends in air traffic, Volume 2, A matter of time : Air traffic delay in Europe. Report n° EEC-2007-052.
- Eyferth, K., Niessen, C., & Spaeth, O. (2003). A model of air traffic controllers' conflict detection and conflict resolution. *Aerospace Science and Technology*, 7, 409-416.

- Famose, J. P., Sarrazin, P., Cury, F., & Durand, M. (1993). Study of the effects of perceived ability, motivational goal and competitive context upon the selection of task difficulty in a free choice situation. In S. Serpa, J. Alves, V. Ferreira, & A. Paulo-Brito (Eds.), *the VIII World Congress of Sport Psychology* (pp. 799-803). Lisbon: FMH.
- Fischer, U., Orasanu, J. M. & Montvalo, M. (1993). Efficient decision strategies on the flight deck. In R.S. Jensen (Ed.), *the Seventh International Symposium on Aviation Psychology* (pp. 198-203). Columbus, OH.
- 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. *International Journal of Aviation Psychology*, 11, 71-93.
- Gamberale, F. (1972). Perceived exertion, Heart Rate, Oxygen Uptake and Blood Lactate in Different Work Operations. *Ergonomics*, 15, 5, 545-554.
- Gevens, A., Smith, M. E., Leong, H., McEvoy, L., Whitfield, S. & Du, R., (1998). Monitoring working memory load during computer-based tasks with EEG pattern recognition methods. *Human Factors*, 40, 79-91.
- Gianazza, D. & Guittet, K. (2006). Evaluation of air traffic complexity metrics using neural networks and sector status. In : *Proceedings of the International Conference on Research in Air Transportation (ICRAT 2006)*.
- Goldberg, H. J., & Wichansky, A. M. (2003). Eye tracking in usability evaluation: A practitioner's guide. In J. Hyöna, R. Radach, & H. Deubel (Eds.), *The mind's eye : Cognitive and applied aspects of eye movement research*, pp. 573-605). Amsterdam Elsevier.
- Goldberg, J.H. & Kotval, X.P. (1998). A brief review of eye-movement based interface evaluation followed by a discussion of temporally and spatially-based measures.
- Goldberg, J.H. & Kotval, X.P. (1998). Eye movement-based evaluation of the computer interface. In: Kumar, S. (ed.) *Advances in occupational ergonomics and safety*, pp. 529-532. ISO press, Amsterdam.
- Goldwater, B. (1972). Psychological significance of pupillary movements. *Psychological Bulletin*, 77: 340-355.
- Gopher, D. & Donchin, E. (1986). Workload: An examination of the concept. In K. Boff, and L. Kaufman, (Eds.). *Handbook of Human Perception and Performance* (pp. 1-49). New York: Oxford University Press.
- Hancock, P. A. & Chignell, M.H. (1988). Mental workload dynamics in adaptive interface design. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 18 (4), 647-658.
- Hancock, P. A. & Meshkati, N. (1988). *Human Mental Workload*. Elsevier Science Publishers, North-Holland.
- Hancock, P. A. & Williams, G. (1993). Effect of task load and task load increment on performance and workload. In R. S. Jensen (Ed.), *Seventh International Symposium on Aviation Psychology* (pp. 328-334). Columbus: Ohio.
- Hankins, T. C., & Wilson, G. F. (1998). A comparison of heart rate, eye activity, EEG and subjective measures of pilot mental workload during flight. *Aviation Space and Environmental Medicine*, 69 (4), 360-367.
- 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. 139-183). North-Holland: Elsevier Science Publishers.
- Haué, J-B. (2004). Intégrer les aspects situés de l'activité dans une ingénierie cognitive centrée sur la situation d'utilisation, *@ctivités*, 1 (2), 170-194.
- Heitz, R.P., Schrock, J.C., Payne, T.W. & Engle, R.W. (2008). Effects of incentive on working memory capacity: behavioral and pupillometric data. *Psychophysiology* 45, 119-129.

- Henrion, M. and Cooley, D.R. (1987). An experimental comparison of knowledge engineering for expert systems and for decision analysis, In: *Proceedings of AAAJ*, Seattle, 471-476.
- Hess, E. H., & Polt, J. M. (1964). Pupil size in relation to mental activity during simple problem-solving. *Science*, 143: 1190-1192.
- Hilburn, B. G., & Parasuraman, R. (1997). Free flight: Military controllers as an appropriate population for evaluation of advanced ATM concepts. In *Proceedings of the 10th International CEAS Conference on Free Flight* (pp. 23–27). Amsterdam: Confederation of European Aviation Societies.
- Hilburn, B., & Jorna, P. G. A. M. (2001). Workload and air traffic control. In P. A. Hancock & P. A. Desmond (Eds.), *Stress, workload, and fatigue: Human factors in transportation* (pp. 384–394). Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Hilburn, B. (2004). *Cognitive complexity in air traffic control: A literature review* (EUROCONTROL Experimental Centre Note No. 04/04). Brussels, Belgium: EUROCONTROL.
- Histon, J. M. & Hansman, R. J. (2002). *The impact of structure on cognitive complexity in air traffic control* (Rep. No. ICAT-2002-4). Cambridge, MA: MIT International Center for Air Transportation.
- Hoc, J-M. (1987). Analysis of cognitive activities in process control for the design of computer aids. An example: the control of a blast furnace. In H. J. Bullinger, B. Shackel, K. & Kornwachs (Eds.), *Human-Computer Interaction - INTERACT'87* (pp. 257-262). Amsterdam, North-Holland.
- Hoc, J-M. & Amalberti, R. (1994). Diagnostic et prise de décision dans les situations dynamiques. *Psychologie Française*, 39, 177-192.
- Hoc, J-M. & Amalberti & R., Boreham, N. (1995). Human operator expertise in diagnosis, decision-making, and time management. In J.-M. Hoc, P. C. Cacciabue, & E. Hollnagel (Eds.), *Expertise and technology: cognition & human-computer cooperation* (pp. 19-42). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Hoc, J-M. & Amalberti, R. (1999). Analyse des activités cognitives en situation dynamique : d'un cadre théorique à une méthode. *Le Travail Humain*, 62, 97-130.
- Hoc, J-M. (2001). Towards a cognitive approach to human-machine cooperation in dynamic situations. *International Journal of Human-Computer Studies*, 54, 509-540.
- Hoc, J-M. & Amalberti, R. (2003). Adaptation et contrôle cognitif: supervision de situations dynamiques complexes. In J. M. C. Bastien (Ed.), *Actes des Deuxièmes Journées d'Étude en Psychologie Ergonomique – ÉPIQUE'2003* (pp. 135-147).
- Hoc, J-M. & Amalberti, R. (2007). Cognitive control dynamics for reaching a satisficing performance in complex dynamic situations. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 1, 22-55.
- Hockey, G. R. J. (1993). Cognitive-energetical control mechanisms in the management of work demands and psychological health. In A. D. Baddeley & L. Weiskrantz (Eds.), *Attention, Selection. Awareness and Control: A Tribute to Donald Broadbent* (pp. 328-345). Oxford University Press.
- Hockey, G. R. J. (1997). Compensatory control in the regulation of human performance under stress and high workload: A cognitive energetical framework. *Biological Psychology*, 45, 73-93. Hollnagel, 2009.
- Hollnagel, E., Mancini, C., Woods, D.D. (1988). *Cognitive engineering in complex dynamic worlds*. Academic Press, Harcourt Brace Jovanovich Publishers.
- Hollnagel, E., (1993). *Human Reliability Analysis: Context and Control*. Academic Press, London.
- Hollnagel, E. (2009). *The ETTO Principle: Efficiency - Thoroughness Trade - Off. Why things that go right sometimes go wrong ?* Farnham (U.K.): Ashgate.

- Hourlier, S. (2001). Transformation de l'organisation du travail et adaptation collective. *Congrès de la SELF & XXXIIème Congrès de l'ACE (Association Canadienne d'Ergonomie)*. Montréal, Canada.
- Hwang, I. & Tomlin, C.J. (2002). Protocol-based conflict resolution for air-traffic control. Department of aeronautics and astronautics. Stanford university. CA 94305.
- IFEN, Institut Français de l'Environnement. (2004). Transport aérien de passagers et effet de serre. *Les données de l'environnement*, 97, 1-4.
- Jacob, R. J. K. & Karn, K. S. (2003). Eye tracking in Human-Computer Interaction and usability research : Ready to deliver the promises, In J. Hyöna, R. Radach, & H. Deubel (Eds.), *The mind's eye : Cognitive and applied aspects of eye movement research*, pp. 573-605). Amsterdam Elsevier.
- Janisse, M-P. (1977). *Pupillometry : The psychology of the pupillary response*. Hemisphere Pub. Corp.
- Jordan, C. S. (1992). Experimental Study of the Effect of An Instantaneous Self Assessment Workload Recorder on Task Performance, DRA/TM/CAD5/92011. Defence Research Agency. Portsmouth.
- Jorna, P. G. A. M. (1997). Context simulation: an interactive methodology for user centred system design and future operator behaviour validation. In: *Cognitive Engineering in the Aviation Domain*. Sarter & Amelberti (eds.) Lawrence Erlbaum Associates. In press.
- Jourdan, M. & Theureau, J. (2002). *Charge mentale : notion floue et vrai problème*. Toulouse : Octarès éditions.
- Just, M. A. & Carpenter, P. A. (1976). Eye Fixations and Cognitive Processes. *Cognitive Psychology*, 8, 441-480.
- Kahneman, D. (1973). *Attention and effort*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Kalsbeek, J. W. H. & Ettema, J. H. (1965). L'arythmie sinusale comme mesure de la charge mentale. Communication au *IIIe congrès d'Ergonomie de Langue Française*, Paris.
- Klein, G. (2008). Naturalistic decision making. *Human Factors*, 50 (3), 456-460.
- Klingner, J., Kumar, R. & Hanrahan, P. (2008). Measuring the Task-Evoked Pupillary Response with a Remote Eye Tracker. *Eye Tracking Research and Applications*.
- Klingner, J. (2010). Measuring Cognitive Load During Visual Tasks by Combining Pupillometry and Eye Tracking. *Ph.D. dissertation*, Stanford University Computer Science Department.
- Koechlin, E., Ody, C. & Kouneiher, F. (2003). The architecture of cognitive control in the human prefrontal cortex. *Science*, 302, 1181–1185.
- Kopardekar, P., & Magyarits, S. (2003). Measurement and prediction of dynamic density. Paper presented at the 5th USA/Europe ATM R&D Seminar, Budapest, Hungary.
- Kuk, G., Arnold, M., & Ritter, F. E. (1999). Effects of light and heavy workload on air traffic tactical operations: A hazard rate model, *Ergonomics*, 42 (9), 1133-1148.
- 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.
- Lautrey, J. (2003). La psychologie différentielle à l'épreuve de la variabilité intraindividuelle. In A. Vom Hofe, H. Charvin, J.-L. Bernaud, & D. Guédon (Eds.), *Psychologie différentielle: recherches et réflexions*. Rennes: Presses Universitaires de Rennes.
- Laville A., Teiger C. & Duraffourg J. (1972) Conséquences du travail répétitif sous cadence sur la santé des travailleurs et les accidents, *Rapport n° 29, Laboratoire de Physiologie du travail et d'Ergonomie*, CNAM, Paris.
- Leplat J., Sperandio J.-C. (1967). La mesure de la charge de travail par la technique de la tâche ajoutée. In: *L'année psychologique*, 1967. Vol. 67, n°1. pp. 255-277.

- Leplat, J., & Pailhous, J. (1969). The Analysis and Evaluation of Mental Work. In W. T. Singleton, J. G. Fox & D. Whitfield (Eds.), *Measurement of man at Work* (pp. 51-56). London: Taylor & Francis.
- Leplat, J. (1977). Les facteurs déterminant la charge de travail. *Le Travail Humain*, 40, 2, 195-202.
- Leplat, J. (1985). *Erreur humaine, fiabilité humaine dans le travail*. Paris : Armand Colin.
- Leplat, J. (1988). Les habiletés cognitives dans le travail. In Pierre Perruchet (Ed.), *Les automatismes cognitifs* (pp. 103-137). Liège, Bruxelles, Pierre Mardaga.
- Leplat, J. (1988). Les simulateurs comme instruments d'étude de la fiabilité humaine. *Cinquième séminaire européen sur la sécurité des systèmes*. Cannes, pp. 211-227.
- Leplat, J. (2003). La modélisation en ergonomie à travers son histoire. In J. C. Spérandio & M. Wolf (Eds), *Formalismes de modélisation pour l'analyse du travail et l'ergonomie* (pp.1-26). Paris, Presses Universitaires de France.
- Leplat, J. (2005). Les automatismes dans l'activité : pour une réhabilitation et un bon usage. *Activités*, 2005, volume 2 numéro 2
- Leplat, J. (2006). La notion de régulation dans l'analyse de l'activité. *Pistes*, 8(6).
- Leroux, M., Alliot, J-M. (1992). *ERATO*, un système expert d'aide au contrôle du trafic aérien. Avignon 1992, (1992/07/11).
- Liao, J. & Moray, N. (1993). A simulation study of human performance deterioration and mental workload. *Le Travail Humain*, 56(4), 321-344.
- 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.
- Lowenstein, O. & Lowenfeld, I. E. (1959). Scotopic and photopic thresholds of the pupillary light reflex in normal man. *Amer J. Ophthal.*,48.1, Part II.
- Manning, C., Mills, S., Fox, C., Pfeiderer, E. & Mogilka, H. (2002). *Using air traffic control taskload measures and communication events to predict subjective workload* (No. DOT/FAA/AM-02/4). Washington DC: Federal Aviation Administration Office of Aviation Medicine.
- Marshall, A. (1890). *Principles of Economics: an introductory text*. London: Macmillan and Co.
- Marshall, S. P. (2000). Cognitive workload and pupil dilation: A useful and usable indicator of cognitive activity. In E. Granholm & S. Steinhauer (chairs), *In the mind's eye: A view through the pupil at cognition in psychopathology*. Symposium presented at the 40th Annual Meeting of the Society for Psychophysiological Research, San Diego.
- Marshall, S. P. (2002). The Index of Cognitive Activity: Measuring cognitive workload. In *Proceedings of the 2002 IEEE 7th Conference on Human Factors and Power Plants* (pp. 7.5 – 7.9). New York: IEEE.
- Matthews, G., Middleton, W., Gilmartin, B. & Bullimore, M. A. (1991). Pupillary diameter and cognitive load. *J Psychophysiology*, 5. 265-271.
- Mc Elhatton, J. & Drew Batelle, C. (1993). Time pressure as a causal factor in aviation safety incidents: the hurry up syndrome. In R.S. Jensen (Ed.), *Proceedings of the Seventh International Symposium on Aviation Psychology* (pp. 269-274), Columbus: Ohio State Univ.
- McKenzie, R. E., Buckley, E. P., & Sarlanis, K. (1966). *An exploration study of psychophysiological measurements as indicators of air traffic control sector workload* (Memorandum Report). Atlantic City, NJ: National Aviation Facilities Experimental Center.
- Mertz, C., Vinot, J-L. (1999). Interface gestuelle pour écran tactile, animations et design graphique : un guide de conception. Onzième conférence francophone sur l'interaction Homme-Machine (IHM'99). Montpellier, France, Novembre 99. Cépaduès ed., Vol 1, p1-8.

- Meshkati, N. (1988). Toward the development of a cohesive model of workload. In P. A. Hancock and N. Meshkati (Eds.), *Human Mental Workload* (pp. 305-314), Amsterdam: North-Holland.
- Metzger, U. & Parasuraman, R. (2001). The role of the air traffic controller in future air traffic management: An empirical study of active control versus passive monitoring. *Human Factors*, 43, 519–528.
- Michaut, G. & Pin, M.C. (1965). Effets sur quelques variables psychophysiologiques de la conduite automobile urbaine, communication au III^{ème} Congrès d'Ergonomie de langue française, Paris.
- Miyake, S., Yamada, S., Shoji, T., Takae, Y., Kuge, N. & Yamamura, T. (2009). Physiological responses to workload change. A test/retest examination. *Applied Ergonomics*, 40: 987-996.
- 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 (No. DOT/FAA/CT-TN95/22). Atlantic City, NJ: Federal Aviation Administration, William Hughes Technical Center.
- Morineau, T., Hoc, J.M., & Denecker, P. (2003). Cognitive control levels in air traffic radar controller activity. *International Journal of Aviation Psychology*, 13, 107-130.
- Navon, D. & Gopher, D. (1979). On the economy of the human-processing system. *Psychological review*, 86, 214-255.
- Norman, D. A. & Bobrow, D. G. (1975). On data-limited and resources-limited processes. *Cognitive psychology*, 7, 44-64.
- Nunes, A. & Mogford, R. H. (2003). Identifying controller strategies that support the «picture» *Proceedings of the 47th Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society*. Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomics Society.
- Parasuraman, A. (1997). Reflections on Gaining Competitive Advantage Through Customer Value. *Academy of Marketing Science Journal*, 25 (2), 154-161.
- Parasuraman, R., & Hancock, P. A. (2001). Adaptive control of workload. In P. A. Hancock & P. E. Desmond (Eds.), *Stress, workload, and fatigue* (pp. 305–320). Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Parise, R. (1997). Les processus d'appropriation de l'outil : hypothèses sur le rôle du collectif de travail (cas d'outils d'ingénierie de conception). Thèse de Doctorat, Université de Toulouse.
- Paubel, P-V. (2011). Évaluation d'un système de résolution de conflits, ERASMUS. Apport de l'oculométrie comme mesure de la charge mentale chez les contrôleurs aériens en-route. Thèse de Doctorat, Université de Toulouse.
- Poirot-Delpech, S. (2009). Mémoires et histoires de l'automatisation du contrôle aérien. Sociobiographie du CAUTRA. Eds. Harmattan, Paris.
- Pomplun, M. & Sunkara, S. (2003). Pupil dilation as an indicator of cognitive workload in human-computer interaction. In D. Harris, V. Duffy, M. Smith & C. Stephanidis (Eds.), *Human-Centred Computing: Cognitive, Social, and Ergonomic Aspects. Vol. 3 of the Proceedings of the 10th International Conference on Human-Computer Interaction, HCII 2003, Crete, Greece*, 542-546.
- Poole, A., Ball, L. J. & Phillips, P. (2004). In search of salience : A response time and eye movement analysis of bookmark recognition. In : *People and Computer XVIII, Proceedings of HCI 2004*. Springer, London, 363-378.
- Poole, A., & Ball, L.J. (2005). Eye tracking in human-computer interaction and usability research. In C.Ghaoui (ed.), *Encyclopedia of human computer interaction*. Idea Group, Pennsylvania, 2005, 211-219.
- Raabe, M., Rutschmann, R.M., Schrauf, M. & Greenlee, M.W. (2005). Neural Correlates of Simulated Driving: Auditory Oddball Responses Dependent on Workload. In Schmorrow, D. D. (Ed.), *Foundations of Augmented Cognition* (pp.1067-1076). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, Inc. Publishers.

- Raby, M. & Wickens, C. D. (1990). Planning and Scheduling in Flight Workload Management. In D., Woods, & E., Roth, (Eds.), *Proceedings of the Human Factors Society 34th Annual Meeting* (pp. 71-75), Santa Monica, USA.
- Rantanen, E. M., & Levinthal, B. R. (2005). Time-based modeling of human performance. *Proceedings of the 49th Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society* (pp. 1200–1204). Santa Monica, CA: HFES.
- Rasmussen, J. (1986). *Information processing and human-machine interaction: an approach to cognitive engineering*. New-York: North-Holland.
- Rasmussen, J. and Lind, M. (1981). Coping with complexity. In H.G. Stassen (Ed.), *First Annual European Conference on Human Decision-Making and Manual Control*. New York: Plenum Press. (pp. 70-91).
- Rayner, K., & Pollatsek, A. (1989). *The psychology of reading*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Reason, J. (1990). *Human error*. Cambridge University Press.
- Recarte, M. A., & Nunes, L. M. (2000). Effects of verbal and spatial-imagery task on eye fixations while driving. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 6, 31–43.
- Recarte, M.A. & Nunes, L.M. (2003). Mental workload while driving: effects on visual search, discrimination, and decision making. *J.Exp Psychol Appl* 2003, 9: 119-137.
- Reid, G. B., & Nigren, T.E. (1988). The subjective workload assessment technique : A scaling procedure for measuring mental workload. In P.A. Hancock and N. Meshkati (Eds.). *Human mental workload*. pp. 185-218. Amsterdam : North Holland.
- 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.
- Robert, J-M. (2013). Charge mentale de travail. IND6406, Ergonomie Cognitive. Ecole polytechnique de Montréal.
- Rouse, W. B., Edwards, S. L., & Hammer, J. M. (1993). Modeling the dynamics of mental workload and human performance in complex systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 23, 1662–1670.
- Rubio, S., Diaz, E., Martin, J., & Puente, J. M. (2004). Evaluation of subjective mental workload: A comparison of SWAT, NASA-TLX, and Workload Profile, *Applied Psychology: An International Review*, 53 (1), 61-86.
- Rudolph, E., Schönfelder, E., & Hacker, W. (1987). *Tätigkeitsbewertungssystem - Geistige Arbeit (TBS-GA)*. (Psychodiagnostisches Zentrum an der Humboldt-Universität).
- 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(4), 257-283.
- Segal, L. D. & Wickens, C. D (1990). TASKILLAN II: Pilot Strategies for Workload Management. In: D., Woods, & E., Roth, (Eds.), *Proceedings of the Human Factors Society 34th Annual Meeting*, (pp. 66-70), Santa Monica, USA.
- Seip, R.L., Snaed, D., Pierce, E.F., Stein, P., & Weltman, A. (1991). Perceptual responses and blood lactate concentration: effect of training state. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 23, (1), 80-87.
- Sereno S.C., & Rayner K. (2003). Measuring word recognition in reading: Eye movements and event-related potentials. *Trends in Cognitive Sciences*, Vol.7(11) pp 489-493.
- SESAR (2012). The Roadmap for Sustainable Air Traffic Management. *European ATM Master Plan*. Edition 2.
- Siegel, A. I. & Wolf, J. J. (1969). *Man-Machine Simulation Models*. New York, NY: Wiley-Interscience.
- Smith, K. & Hancock, P. A. (1995). Situation awareness is adaptative, externally directed consciousness. *Human Factors*, 37, 137-148.

- Smolensky, M. W., & Stein, E. S. (1998). *Human Factors in Air Traffic Control* (Chapter 1). Academic Press.
- Spérandio, J. C. (1971). Variation of operator strategies and regulating effects on workload. *Ergonomics*, 14, 571-577.
- Spérandio, J. C. (1977). La régulation des modes opératoires en fonction de la charge de travail chez les contrôleurs de trafic aérien. *Le Travail Humain*, 40, 249-256.
- Spérandio, J. C. (1980). *La Psychologie en ergonomie*. Paris : PUF.
- Spérandio, J. C. (1988). *L'Ergonomie du travail mental*. Paris : Masson.
- Stein, E. S. (1989). *Air traffic controller visual search* (DOT/FAA/CT-TN89/9) DOT FAA. Technical Center : Atlantic City International Airport, New Jersey.
- Stein, E. S. (1992). *Air traffic control visual scanning*. (DOT/FAA/CT-TN92/16). Atlantic City, NJ: Department of Transportation, Federal Aviation Administration Technical Center.
- Steinhauer, S.R., Condray, R. & Holcomb, A., (2000). Cognitive modulation of midbrain function: Task-induced reduction of the pupillary light reflex. *Int. J. Psychophysiol.*, 39, 21-30.
- Sweller, J., Chandler, P., Tierney, P. & Cooper, M. (1990). Cognitive load as a factor in the structuring of technical material. *Journal of Experimental Psychology: General*, 119, 176-192.
- Sweller, J., & Chandler, P. (1994). Why some material is difficult to learn. *Cognition and Instruction*, 12(3), 185-233.
- Tessier, C. & Dehais, F. (2012). Authority Management and Conflict Solving in Human-Machine Systems. *Aerospace Lab Journal*.
- Theureau, J. (1997). L'utilisation des simulateurs de salle de contrôle de réacteur nucléaire et de cockpit d'avion à des fins autres que de formation : présentation et discussion des tendances actuelles, in Béguin P. & Weill-Fassina A. eds., *La simulation en ergonomie : connaître, agir et interagir*. Octarès, Toulouse, pp. 113-136.
- Theureau, J. (2001). La notion de charge mentale est-elle soluble dans l'analyse du travail et la conception ergonomiques, *Conférence introductive aux Journées Act'ing/ Ergonomia*, 14-15/06/01, Cassis.
- Tommola, Jorma & Niemi, P. (1986). Mental load in simultaneous interpreting : an on-line pilot study. In : L. Evensen (ed.) *Nordic Research in Text Linguistics and discourse Analysis*. Trondheim : Tapir, 171-184.
- Tort, B. (1976). Bilan de l'apport de la recherche scientifique à l'amélioration des conditions de travail, In J. Theureau & B. Tort (Eds.), *L'apport potentiel des travailleurs à la recherche et à l'aménagement ergonomique* (pp. 38-68). CORDES, Paris.
- Tricot, A. & Chanquoy, L. (1996). La charge mentale. *Psychologie Française*, 41 (4), 313-318.
- Tricot, A. (1998). Charge cognitive et apprentissage. Une présentation des travaux de John Sweller. *Revue de Psychologie de l'Éducation*, 3, 37-64.
- Valot, C. (1996). Gestion du temps, gestion du risque. In J.-M. Cellier, V. De Keyser, & C. Valot, (dir.), *La gestion du temps dans les environnements dynamiques* (pp. 244-265). Paris, PUF.
- Van Daele, A. & Carpinelli, F. (1996). Anticipation de l'action et anticipation du processus : l'influence de la situation. In J.-M. Cellier, V. De Keyser & C. Valot (dir.) *La gestion du temps dans les environnements dynamiques* (pp. 200-220). Paris, PUF.
- Van Orden, G. C., Pennington, B. F. & Stone. O. G. (2001). What do double dissociations prove ? *Cognitive Science*, 25, 111-172.
- 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.

- Webster, F. E. (1981). Top management's concerns about marketing issues for the 1980s. *Journal of Marketing*, 45, 9-16.
- Wickens, C. D. (1992). *Engineering Psychology and Human Performance* (2nd ed.). New York : Harper Collins Publishers Inc.
- Wickens, C. D. & Hollands, J. G. (2000). *Engineering psychology and human performance* (3rd ed.). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Wiener, E. L., Curry, R. E. & Faustina, M. L. (1984). Vigilance and task load: in search of the inverted U. *Human Factors*, 26, 215-22.
- Wildervanck, C., Mulder, G., & Michon, J. A. (1977). Une tentative en vue de dresser la « carte de la charge mentale » de la conduite automobile. *Le Travail Humain*, 40, n°2/1977, pages 273 à 278.
- Willems, B. & Truitt, T. R. (1999). Implications of Reduced Involvement in En Route Air Traffic Control. (Technical Report). Atlantic City, NJ: FAA Technical Center.
- Wilson, G.F. & O'Donnell, R.D. (1988). Measurement of operator workload with the neuropsychological workload test battery. *Human Mental Workload*. (pp.63-115.) P.A. Hancock and N.Meshkati. Amsterdam, NL, Elsevier Science Publishers B.V. (North Holland).
- Wise, J.A., D.W. Abbott, D. Tilden, J. L. Dyck, P.C. Guide, & L. Ryan. (1994). Automation in the corporate automation environment. In: *Applications of Psychology to the Aviation System*, (N. McDonald, N. Johnston, & R. Fuller, Eds.) Cambridge: Avebury Aviation. pp 287-292.
- Xu, X. & Rantanen, E.M. (2003). Conflict Detection in Air Traffic Control: A task analysis, a literature review, and a need for further research. *Proceedings of the 12th Biennial International Symposium on Aviation Psychology*. April 14-17, 2003, Dayton, OH: USA.
- Yarbus, A. L. (1967). *Eye Movements and Vision*. New York: Plenum Press. (Translated from Russian by Basil Haigh).
- Young, M. S. & Stanton, N. A. (2002). Malleable attentional resources theory: A new explanation for the effects of mental underload on performance. *Human Factors*, 44 (3), 365-375.

Les productions de la thèse

Article dans une revue scientifique :

Martin, C., Hourlier, S., Cegarra, J. (2013). La charge mentale de travail : un concept qui reste indispensable, l'exemple de l'aéronautique. *Le Travail Humain*, PUF.

Chapitre d'ouvrage :

Cegarra, J., Dehais, F., Causse, M., Martin, C (2011). Contribution de l'ergonomie à la sécurité aérienne, In J. Dinet & C. Bastien (Eds.), *L'ergonomie des objets et des environnements physiques et numériques*. Paris : Hermes.

Actes de colloques et de congrès (avec comité de lecture) :

Martin, C., Cegarra, J., Averty, P. (2011). Analysis of Mental Workload during En-route Air Traffic Control Task Execution based on Eye-Tracking Technique, Proceedings of the 14th International Conference on Human-Computer Interaction (HCI'11). Orlando, Florida, USA.

Martin, C., Cegarra, J. (2011). Analyse de la charge mentale de contrôleurs aériens lors de l'utilisation d'une nouvelle IHM. *EPIQUE 2011*. Metz, France.

Martin, C., Cegarra, J. (2012). Effect generated by the use of a new all-electronic Air Traffic Control position on the level of mental workload felt by Air Traffic Controllers. Proceedings of HFES Europe Chapter Conference. Toulouse, France.

Martin, C., Cegarra, J. (2012). Evaluation de la charge mentale de contrôleurs aériens lors de l'utilisation d'une interface de contrôle toute électronique. *Ergo'IHM 2012*. Biarritz, France.

Martin C., Imbert, J-P. (2012) Introduction of a more automated environment in En-Route Air Traffic Control. Evaluation of impact generated on the operator by mental workload assessment. *SESAR Innovation Days*. Braunschweig, Germany.

Martin C., Cegarra, J. (2013). Evolution de la charge mentale selon le niveau de formation : Une étude auprès de contrôleurs aériens confrontés à un nouvel outil. *Epique 2013*, Bruxelles, Belgique.

Résumé

Les contrôleurs du trafic aérien ou « aiguilleurs du ciel », dont l'activité consiste à assurer la sécurité de l'écoulement du trafic aérien, vont bientôt être confrontés à une évolution sans précédent de leur activité de travail. Pour pallier à une évolution de contexte, associée principalement à une augmentation significative du niveau de trafic aérien, la construction d'un nouvel environnement de contrôle induisant l'introduction de nouvelles technologies et de l'automatisation partielle de la tâche de contrôle est visée. Ces perspectives, qui ont pour objectif de diminuer les sollicitations des contrôleurs aériens, afin d'augmenter le seuil capacitaire de gestion du trafic aérien, suscitent l'interrogation. Notamment, comment assurer la validation de ces évolutions en vue des objectifs visés ?

Ce doctorat porte sur l'étude de la charge mentale de contrôleurs aériens dans différents contextes, afin d'évaluer les effets engendrés par de telles modifications apportées à leur environnement de travail quotidien. L'évaluation proposée repose sur une approche multidimensionnelle centrée sur l'analyse de paramètres oculaires enregistrés grâce à une technique d'*eye-tracking* dans des situations de contrôle écologiquement valides, en référence à la tâche de contrôle du trafic aérien.

La première étude a tout d'abord permis de caractériser la gestion de la charge mentale effectuée par les contrôleurs aériens au cours de leur activité dans une situation nominale (reflétant la situation de contrôle du trafic aérien actuelle). La deuxième étude porte sur les effets générés par l'introduction de nouveaux systèmes informatisés d'aide à la décision induisant une automatisation partielle de la tâche de contrôle. Enfin, la dernière étude souligne l'effet du niveau de formation sur les modes de gestion des ressources cognitives employés par les contrôleurs aériens.

Mots-clés : *Contrôle aérien En-Route, Charge mentale de travail, Eye-tracking, Pupillométrie, IHM, Apprentissage*

Abstract

The air traffic controllers, whose job is to ensure the safety of air traffic flow, will soon be faced to an unprecedented change in their work activity. To compensate a change of context, mainly associated with a significant increase of the air traffic density, the elaboration of a new air traffic control environment is considered. In particular, the introduction of new technologies (all electronic devices) causing the partial automation of the control task, has been defined as prospects for the En-Route air traffic control work position. These perspectives aim at reducing the air traffic controllers' requirements in order to increase the capability threshold of air traffic management associated with air traffic control service rendered. Such a change may however query. Indeed, how to ensure the validation of these developments to the objectives?

This research aims to study the air traffic controllers' mental workload in different contexts. The objective of this approach is to assess the effects caused by such changes in the air traffic controllers' daily work environment. The proposed assessment is based on a multidimensional approach mainly focused on the analysis of ocular parameters recorded through an eye-tracking technique in air traffic control situations ecologically valid with reference to the features of air traffic control task.

The results deduced from the empirical work of this research were first used to characterize the management of mental workload carried by air traffic controllers during their activity in the nominal situation (reflecting the current air traffic control situation). The results obtained through this research also focused on the effects generated by the introduction of new computerized systems inducing a partial automation of the control task, and those induced by the level of training dedicated to the use of such systems on the management methods of cognitive resources employed by air traffic controllers.

Keywords: *En-Route Air Traffic Control, Mental Workload, Eye-Tracking, Pupil Dilation, HMI, Learning*