



THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace

Présentée et soutenue par :

Louis GIRAUDET

le jeudi 3 décembre 2015

Titre :

Caractérisation de la surdité inattentionnelle, application à la sécurité aérienne

École doctorale et discipline ou spécialité :

ED AA : Neurosciences, comportement et cognition-Automatique, signal, productique et robotique

Unité de recherche :

Équipe d'accueil ISAE-ONERA CSDV

Directeur(s) de Thèse :

M. Christophe JOUFFRAIS (directeur de thèse)

M. Mickaël CAUSSE (co-directeur de thèse)

Jury :

M. Philip JACKSON - Rapporteur

M. Stéphane PERREY - Rapporteur

M. Jean-Baptiste VAN DER HENST- Rapporteur

M. Gilles COPPIN

M. Frédéric DEHAIS

M. Mickaël CAUSSE- Co-directeur de thèse

Remerciements

Il y a un peu plus de 4 ans, je m'apprêtais à terminer ma dernière année d'école d'ingénieure à Supaéro, école que j'ai choisie par passion de l'aéronautique. Mais quelque chose me manquait. De l'humanité, du contact, de l'échange, plus d'humain au milieu des machines... C'est avec beaucoup de questions, peu de réponses et plutôt désemparée par cette crise de carrière avant de l'avoir commencée, que j'ai rencontré **Frédéric Dehais**. C'est au détour d'une banale conversation qu'il a fait renaître ma curiosité, et m'a fait découvrir ce qui serait mes nouvelles passions : neurosciences, facteurs humains et neuroergonomie. Je suis donc particulièrement reconnaissante envers Frédéric, et son jeune ancien doctorant **Mickaël Causse**, nouvellement docteur, vers qui il m'a orientée pour discuter de ce qui allait devenir mon sujet de thèse. C'est grâce à leur passion, leur motivation et leur ouverture à accepter une ingénieure qui venait à peine d'ajouter « potentiels évoqués » à son vocabulaire que j'ai démarrée, poursuivie et achevée cette thèse.

Je remercie chaleureusement **Christophe Jouffrais**, qui a accepté l'aventure d'être le directeur de cette thèse, poussé par l'enthousiasme de Mickaël. Je leur suis reconnaissante de chaque conseil, chaque conversation, chaque remarque qu'ils m'ont fait tout au long de ces trois années, où il a fallu supporter mon enthousiasme désordonné, mes nombreuses et redondantes questions, mon débit trop rapide quand je m'emportais dans une description enflammée de mon code et mes idées plus naïves que révolutionnaires.

Je remercie ceux qui me font l'honneur d'être membre de mon jury, Gilles Coppin, Frédéric Dehais, ainsi que ceux qui ont aussi accepté de relire et rapporter mes travaux, Stéphane Perrey, Phillip Jackson et Jean-Baptiste Van der Henst.

J'ai eu la chance (et le stress) de définir moi-même mon sujet de thèse, et je remercie la Direction Générale de l'Armement d'offrir l'opportunité à de jeunes chercheurs de soumettre leurs idées et de leur accorder les moyens financiers de réaliser leur thèse.

Dès mon stage de fin d'étude, effectué au DCAS sous la direction de Mickaël en avant-goût de la thèse, j'ai pu faire la connaissance de Sébastien Tremblay, avec qui j'ai eu le plaisir de travailler. Je le remercie, ainsi que tous ceux qui se sont organisés pour me permettre à deux reprises d'effectuer un séjour à l'Université Laval, à Québec.

J'ai eu, au cours de cette thèse, l'occasion de collaborer avec de nombreuses personnes, toutes captivantes, ouvertes et généreuses. J'ai eu le plaisir de travailler sur ma première expérience avec la doctorante Marie-Eve St-Louis lors de son séjour à Toulouse, dont l'expertise statistique a beaucoup impressionné la débutante que j'étais.

Un grand merci à Jean-Paul Imbert pour son investissement démesuré, son aide bienveillante et compréhensive de doctorant et pour sa collaboration sur les deux expériences réalisées avec Laby.

Je tiens à remercier tous les participants à mes expériences, français et québécois, pour avoir accepté les (très) longues minutes d'installation du matériel, me laissant patiemment

ruiner leur coiffure pour toute la journée, et pour l'intérêt dont ils ont fait preuve envers nos recherches.

Merci à l'ensemble du personnel du DCAS, qui fait de ce département un environnement idéal pour l'accueil des nouveaux venus. Merci à eux pour leur accueil, leur bonne humeur affichée dès 8h du matin au café, leur enthousiasme évident pour les pots et autres barbecues, leur goût de la discussion et leur ouverture d'esprit envers tous les sujets possibles. Merci à eux de m'avoir laissée parler de roller derby à tout bout de champ les semaines de match, exhiber mes bleus la semaine suivante et envahir mon bureau et les couloirs d'affiches colorées. Je témoigne une reconnaissance particulière à Marie pour son soutien logistique et administratif impeccable toujours avec le sourire malgré mes nombreux oublis, ainsi qu'à Eric Poquillon pour son recul, son écoute et ses conseils aux moments où j'en avais besoin (et pour m'avoir confié des cours de dynamique du vol, un pur plaisir de retrouver mes premières amours).

Je remercie bien évidemment toute l'équipe des « facteurs humains », pour l'ambiance enthousiaste et la rigueur scientifique dont ils font preuve chaque jour. Merci à Gautier, pour son amitié depuis notre arrivée à Supaéro, ce fut un privilège de démarrer nos thèses ensemble, de partager le même bureau comme prolongement de notre colloc', bravo pour ton tout récent doctorat brillamment obtenu, je te souhaite beaucoup de succès pour la suite. Merci à Sébastien pour ses remarques pertinentes, sa gentillesse et le temps qu'il dépense pour chacun des membres de l'équipe, à Zarrin pour son expertise irremplaçable de l'anglais, sa disponibilité, sa bonne humeur et sa passion communicative pour le football féminin. Merci à Thibaut, Kévin, Angela, Seva et Benoit pour toutes les discussions enjouées sur des sujets, scientifiques ou non, aux pause-café. Je remercie également Eve, pour son soutien durant l'écriture de ce manuscrit, pour sa motivation et ses idées inépuisables, j'espère avoir l'opportunité de continuer notre collaboration pour voir l'aboutissement de tes projets.

Enfin, je tiens à remercier ceux qui ont vu (ou parfois subit) l'envers du décor. Sur le plan personnel, j'ai pu compter sur le soutien de ma famille et de nombreux amis. Merci à eux pour leur tolérance envers mes horaires variables et mes questionnements neuro-ergonomiques impromptus. C'est grâce à eux que j'ai, au cours de ces trois années, avancé et mûri aussi sur le plan humain. Merci Vincent, Elsa, Eva, Angela, Nathalie, toute la *féminiliste* et le *simu*, pour m'avoir présenté un matelas pour m'allonger quand j'en ai eu besoin. Merci à celles et ceux qui m'ont permis de garder la ligne, la santé, et de me défouler : mes coéquipières de derby, de Toulouse et d'ailleurs, toujours prêtes à me secouer si besoin, et les coachs, qui m'ont poussée à me dépasser sur tous les plans. Et bien sûr merci à toute ma famille, ainsi que la plus grande reconnaissance et toute mon admiration à Maryse, pour sa présence indispensable passée et à venir, son œil perçant pour les fautes d'orthographe et les longs trajets pour venir me voir en n'importe quelles circonstances.

Une pensée affectueuse pour David qui, avec l'aide de Taylor et Rick, est celui qui m'a épaulée et soutenue jusqu'à la ligne d'arrivée, et qui m'a fait envisager la suite avec un nouveau regard.

Merci à toutes ces personnes de continuer de m'accompagner dans mes futures aventures, dont la prochaine est le CAPES pour devenir professeure de Mathématiques.

C'est avec un grand bonheur que j'achève cette thèse et entame sereinement ma nouvelle vie professionnelle, bien loin de mes errances initiales.

Table des matières

Remerciements.....	3
Table des matières.....	7
Introduction.....	11
PARTIE 1 CONTEXTE THEORIQUE	
CHAPITRE 1 Mise en contexte	17
1.1 Les alarmes auditives dans l'aéronautique	18
1.1.1 Le pilotage.....	18
1.1.2 Le contrôle aérien.....	20
1.1.3 Avantages et limites des alarmes auditives.....	23
1.2 L'attention et ses limites.....	24
1.2.1 L'attention.....	24
1.2.2 La charge de travail et le stress.....	26
1.3 Surdité inattentionnelle.....	29
1.3.1 Définition générale.....	29
1.3.2 Etudes de référence	30
1.3.3 Synthèse et limitations	32
1.4 Positionnement du sujet et déroulement de l'étude.....	33
CHAPITRE 2 Outils de mesure de la surdité inattentionnelle.....	35
2.1 Présentation de l'approche neuroergonomique.....	36
2.2 Mesures physiologiques	36
2.2.1 Bases sur le fonctionnement du système nerveux	36
2.2.2 L'�lectroenc�phalographie.....	37
2.2.3 Oculométrie	42
2.2.4 Autres mesures physiologiques.....	44
2.3 Mesures comportementales pour la surdité inattentionnelle	45
2.4 Mesures subjectives.....	46
PARTIE 2 RESULTATS EXPERIMENTAUX	
CHAPITRE 3 Première expérience : la P300 comme indicateur de la surdité inattentionnelle	51
3.1 Fiche descriptive synthétique de l'article 1	52
3.1.1 Introduction	52
3.1.2 Matériel et méthode.....	52

3.1.3	Résultats comportementaux.....	53
3.1.4	Résultats physiologiques	54
3.1.5	Discussion	54
3.2	Article 1 (publié dans le journal PLOS ONE)	56
3.2.1	Introduction	56
3.2.2	Method	59
3.2.3	Results.....	65
3.2.4	Discussion	68
3.2.5	Conclusion.....	71
3.2.6	Acknowledgments.....	71
3.3	Résultats complémentaires ne figurant pas dans l'article publié	73

CHAPITRE 4 Deuxième expérience : Approche neuroergonomique pour l'évaluation de design d'interface avec mesures EEG 75

4.1	Laby	76
4.2	Fiche descriptive synthétique de l'article 2	81
4.2.1	Méthodologie	81
4.2.2	Résultats	82
4.2.3	Discussion	83
4.3	Article 2 (publié dans le journal of Behavioural Brain Research)	85
4.3.1	Introduction	86
4.3.2	Method	89
4.3.3	Results.....	93
4.3.4	Discussion	95
4.3.5	Conclusion.....	97
4.3.6	Acknowledgements.....	97
4.4	Résultats complémentaires ne figurant pas dans l'article publié	98

CHAPITRE 5 Troisième expérience : Intérêt de l'oculométrie dans l'étude de la surdité inattentionnelle..... 99

5.1	Fiche descriptive synthétique de l'article 3	100
5.1.1	Méthodes	100
5.1.2	Résultats	101
5.1.3	Discussion	101
5.2	Article 3 (soumis au journal Frontiers in Human Neuroscience)	102
5.2.1	Introduction	103
5.2.2	Materials and Methods	104
5.2.3	Objectives and hypotheses	106
5.2.4	Participants.....	106
5.2.5	Procedure.....	107
5.2.6	Results.....	107
5.2.7	Discussion	108
5.2.8	Acknowledgments.....	109
5.3	Résultats complémentaires ne figurant pas dans l'article soumis	111

PARTIE 3 DISCUSSION ET PERSPECTIVES

CHAPITRE 6 Etudes complémentaires.....	115
6.1 Etude de la distractibilité auditive.....	116
6.2 Contre-mesures cognitives exploitant les propriétés des neurones miroirs	118
CHAPITRE 7 Discussion générale et perspectives.....	121
7.1 Méthodologie	123
7.2 Caractéristiques de la surdité inattentionnelle	124
7.2.1 Facteurs de sensibilité	125
7.2.2 Les marqueurs physiologiques	125
7.3 Prévention	126
7.4 Détection en contexte de pilotage et de contrôle aérien	126
7.5 Perspectives de travail envisagées	127
7.5.1 Reproductibilité des résultats et variations des protocoles	127
7.5.2 Vers les essais en simulateur, puis en conditions réelles.....	128
7.6 Contributions	130
Références	133
Table des illustrations.....	145
Annexes	149

Introduction

Dans le monde de l'ingénierie, de la haute technologie et des systèmes complexes, il est souvent considéré que la sécurité aérienne est essentiellement dépendante des performances matérielles. Les accidents seraient alors causés principalement par des défaillances techniques : un matériau, une structure ou un circuit électronique défectueux. Ce portrait est rassurant, en cela que l'avancée des technologies permettrait donc de pallier ces défauts, mais il est hélas trop simpliste pour décrire la situation actuelle. La sécurité aérienne ne cesse de s'améliorer, les progrès techniques, scientifiques et de la formation des pilotes permettent de maintenir l'aviation comme moyen de transport le plus sûr, et les risques diminuent encore d'années en années. Mais dans un domaine où le nombre de vies en jeu, l'impact médiatique d'un crash et les pertes financières et matérielles sont aussi importants, nous sommes toujours à la recherche de possibilités d'amélioration. Et si l'avion en lui-même est à la pointe de la technologie, il existe encore une marge de progrès sur la prise en compte des humains opérant ces avions.

Pour prendre un exemple concret, intéressons-nous un instant à l'automobile, qui présente une histoire très similaire à celle de l'aviation. Entre 1985 et 2005, le nombre de tués a été divisé par plus de deux, alors même que la circulation augmentait de près de 80 % (moins de 400 milliards de kilomètres parcourus en 1985 contre 650 milliards en 2005). Cette diminution impressionnante du nombre d'accidents est due à de nombreuses avancées technologiques : l'ABS, les airbags, les alertes anti-franchissement de ligne blanche, les limiteurs de vitesse, etc. Autant de mesures pour se préserver au maximum des défaillances techniques. Mais cette tendance à la baisse du nombre d'accidents observée depuis 2005, est actuellement en stagnation. En examinant ces accidents et leur gravité, il en ressort que la responsabilité humaine apparaît dans plus de 90% des accidents corporels (alcool, vitesse excessive, distance de sécurité, fatigue au volant etc.).

Cet exemple illustre le rôle de la fiabilité et des performances techniques dans l'accroissement la sécurité, mais il met aussi en lumière les erreurs humaines qui jouent un rôle prépondérant dans les accidents. Et cette responsabilité humaine s'observe plus largement, à tous les postes d'opérateurs de systèmes critiques en matière de sécurité, notamment en aéronautique (pilotage, surveillance radar, contrôle aérien etc.). En effet, les statistiques de la sécurité aérienne montrent une évolution très semblable à celles de la sécurité routière. Depuis sa création en 1903, le transport aérien a connu un essor considérable et l'augmentation du trafic s'est traduite par une augmentation très importante du nombre d'accidents et de victimes. Mais comme pour l'automobile, les progrès techniques, l'ère électronique, et les efforts d'amélioration de la sécurité ont conduit les appareils à être extrêmement fiables. On peut citer par exemple l'évolution du Ground Proximity Warning System (GPWS), qui permet de détecter si l'avion se rapproche trop du sol. Le système inclue également une base de données géographiques permettant de déterminer l'état du terrain autour de l'appareil (Enhanced-GPWS). C'est précisément ce type d'équipement associé à une réaction rapide et appropriée de l'équipage qui ont récemment permis d'éviter un potentiel crash sur le mont Cameroun (vol AF 953 d'Air France, 2 Mai 2015). Il existe également la protection du domaine de vol sur les commandes de vol électriques, qui empêche l'avion de réaliser des manœuvres qui le forceraient à dépasser ses limites structurelles et aérodynamiques, et le Minimum Safe Altitude Warning (MSAW), qui avertit les contrôleurs des risques de collision des avions

avec le relief. Ces évolutions ont été extrêmement bénéfiques, au point que l'aviation commerciale est devenue depuis 2001 le moyen de transport le plus sûr en termes de passagers tués par 100 millions de passagers-kilomètres. Cependant, même si la proportion d'accidents par vol décroît légèrement actuellement, leur nombre absolu stagne, en raison de l'augmentation du trafic. De plus, les enjeux en termes de coûts matériels et humains évoluent avec l'apparition de très gros porteurs tels que l'airbus A380, pouvant emporter jusqu'à huit-cent passagers. Les analyses des causes des accidents révèlent que les responsabilités sont attribuables à l'opérateur humain dans 70 à 80 % des cas d'accidents dans l'aviation civile ou militaire [1, 2]. Les travaux de Wiegmann [2] mettent en évidence que les erreurs humaines étaient imputables dans 70% des cas à l'équipage, majoritairement pour des mauvaises gestions de communication entre les individus, de la hiérarchie et de la prise de décision. Tous les postes de supervision, nécessitant une attention soutenue et des prises de décisions critiques où sont en jeu des vies humaines, font désormais l'objet d'étude en **facteurs humains**. Ces études s'intéressent à la contribution humaine impliquée dans un événement. Cela consiste à étudier les caractéristiques, les contributions et les limites d'un opérateur humain aux commandes d'un système. Les facteurs humains ont fait leur entrée dans les stages de formation à la sécurité routière et les stages de conduite. Ils apparaissent également de plus en plus dans la formation aéronautique, dans les écoles d'ingénieurs et la formation des pilotes. Les facteurs humains ne sont pas une discipline nouvelle dans la sécurité aérienne. Depuis les années 1980, les facteurs humains ont été inclus dans les programmes de formation des opérateurs pilotes et contrôleurs aériens, et ont permis la mise en place d'interfaces homme-machines (IHM) plus utilisables dans un univers où l'ergonomie et le confort des opérateurs étaient très secondaires, pour des raisons techniques, historiques et à cause des délais nécessaires pour répercuter les évolutions du laboratoire jusque dans l'avion prêt à voler. Mais les impacts humain, économique et médiatique des accidents d'avions motivent le développement et l'élargissement des études des causes de ces accidents, en particulier sur les opérateurs humains, pour réduire toujours plus les risques. Les études des facteurs humains font d'ailleurs naturellement leur apparition dans notre vie quotidienne, on les retrouve par exemple dans la formation des conducteurs ou aux stages de récupération de points pour le permis de conduire.

Les interactions homme-système et notamment les erreurs de l'opérateur humain ont donc été modélisées et analysées, dans l'optique d'amener les humains à adopter un comportement et des réactions plus adaptées aux situations d'urgence. Si cette approche a permis de faire progresser les IHM, elle laisse néanmoins de côté un aspect essentiel. En effet, l'opérateur humain était considéré sans contrainte, capable de s'adapter (moyennant une formation) au système technologique à travers lequel il doit réaliser sa tâche. Mais le cerveau humain, même très entraîné, demeure faillible. L'homme est soumis aux limitations de sa mémoire, son attention, sa perception et sa capacité d'analyse ainsi qu'à de nombreux biais de prise de décisions (eg. persévération [3], « effet cri-au-loup » [4]). Lorsque ces contraintes cognitives sont prises en considération, elles font de certaines erreurs humaines la conséquence logique du fonctionnement normal du cerveau dans un contexte mal adapté. Or, comme nous venons de le voir, du point de vue de la sécurité aérienne, il est impensable d'ignorer cet axe de recherche.

La **neuroergonomie** [5, 6] nous fournit des outils qui permettent aux chercheurs de prendre en compte le fonctionnement cérébral de l'opérateur en lien avec l'ergonomie des interfaces. Nous pouvons ainsi analyser les réactions inadaptées des opérateurs (considérés comme des « erreurs humaines ») avec les outils des neurosciences

intégratives et de la neuropsychologie, en mettant en évidence les structures et fonctions cérébrales impliquées dans la réalisation d'une tâche par un humain, que ce soit une tâche complexe comme le pilotage d'un avion, la conduite d'une voiture, ou n'importe quelle activité quotidienne. Nous considérons l'opérateur humain comme un élément du système, et cherchons à optimiser ses performances avec son interface et son environnement. Cette nouvelle approche est très prometteuse, car elle permet à la fois d'appliquer les neurosciences à des activités concrètes, réalistes et complexes, mais aussi d'approfondir les diagnostics en ergonomie et d'optimiser l'utilisation d'une interface de travail jusqu'au niveau neurologique. Par ailleurs, l'intégration *in situ* de mesures neuropsychologiques de l'activité cérébrale de l'opérateur (pilote, contrôleur, etc.) sur les postes de travail réels pourrait permettre de détecter des états cognitifs et émotionnels spécifiques, et de réagir en ligne afin d'améliorer la sécurité.

Les erreurs humaines pourraient donc être dans certains cas assimilées à des perturbations des fonctions exécutives (habiletés cognitives de haut niveau) et des baisses de performance dues à des conditions de travail dégradées (stress, complexité). Certaines de ces perturbations (ou incapacitations temporaires), que l'on retrouve dans les rapports d'accident aériens, ont été définies et étudiées, par exemple la tunnellation attentionnelle [7-9]. Le terme désigne l'allocation excessive de l'attention sur un canal d'information particulier, une hypothèse de diagnostic ou un objectif. Ce faisant, l'opérateur néglige les événements des autres canaux, les autres hypothèses, et ses autres tâches ou objectifs. Cela peut mener par exemple un pilote à omettre des alarmes [7]. On peut également citer la persévération [3, 10, 11], c'est-à-dire l'engagement excessif dans une action avec une incapacité ou un refus à changer de stratégie malgré l'évolution de la situation, le coût financier, temporel ou cognitif de cette stratégie. La cécité inattentionnelle [12] désigne quant à elle le fait de ne pas « voir » une information visuelle pourtant dans notre champ de vue. Sans attention, certaines caractéristiques visuelles de notre environnement ne sont pas perçues (ou du moins pas consciemment perçues). Les observateurs peuvent ainsi échouer non seulement à détecter ou mémoriser des changements dans leur environnement (comme l'apparition d'une alarme visuelle, ou une jauge d'essence qui diminue) [13], mais aussi à la perception pure et simple d'un élément [12, 14, 15].

Un cas particulier de facteur favorisant l'erreur humaine reste cependant peu abordé : la **surdité inattentionnelle** [16-18], c'est-à-dire l'incapacité temporaire à entendre, à prendre conscience d'une information auditive. C'est le pendant de la cécité inattentionnelle sur la modalité auditive. Dans le domaine de l'aéronautique, cette défaillance cognitive est évidemment critique, car elle signifie l'omission d'alarmes auditives [17]. Le premier enjeu de cette thèse était de définir des métriques comportementales et physiologiques caractéristiques de la surdité inattentionnelle. Nous nous sommes intéressés en particulier à deux postes de travail critiques de la sécurité aérienne et soumis à des alarmes auditives : le pilotage et le contrôle aérien. Nous avons cherché à mettre en évidence les conditions contextuelles favorisant l'apparition de la surdité inattentionnelle, et plus spécifiquement l'influence de la charge de travail des opérateurs sur l'apparition de cette surdité inattentionnelle. Un second enjeu était d'identifier des pistes d'adaptation des interfaces avec les pilotes et les contrôleurs aériens, permettant de prévenir ou limiter la surdité inattentionnelle à ces postes spécifiques.

Une première partie de ce document illustre le positionnement théorique de la thèse. Les limites des alarmes auditives dans le pilotage et le contrôle aérien, jusqu'à la définition précise du phénomène de la surdité inattentionnelle sont présentées dans le

Chapitre 1 de cette première partie. Le Chapitre 2 est consacré aux mesures physiologiques, comportementales et subjectives fournies par la neuroergonomie et qui ont été utilisées dans cette thèse. La seconde partie de cette thèse présente les trois travaux expérimentaux que nous avons réalisés. Chaque chapitre présente une expérience et ses résultats, avec la publication associée à ces travaux, dans l'ordre chronologique dans lequel les études ont été réalisées. Les articles publiés sont présentés en anglais, tels que soumis aux journaux, et sont précédés d'une fiche descriptive synthétique en français. Le Chapitre 3 traite de l'impact de la charge de travail sur le traitement cérébral des alarmes auditives lors d'une tâche d'atterrissage. Le Chapitre 4 est consacré à l'étude de l'impact du design des alarmes visuelles sur les capacités de traitement cognitif des alarmes auditives, dans le cadre d'une simulation réaliste de contrôle aérien. Le Chapitre 5 traite de la pertinence des mesures oculaires comme indicateur de surdité inattentionnelle. Enfin, dans une troisième et dernière partie, nous présentons les perspectives de ce travail et discutons l'ensemble de nos résultats.

PARTIE 1.

Contexte théorique

CHAPITRE 1

Mise en contexte

Dans ce chapitre, nous présentons tout d'abord le contexte aéronautique, en détaillant en particulier les environnements de pilotage et de contrôle aérien. Une fois les enjeux explicités, nous définissons la surdité inattentionnelle, présentons le dysfonctionnement des processus attentionnels qui lui sont associés et nous précisons les facteurs et les conditions qui la favorise. La problématique de la thèse sera enfin formulée.

1.1 Les alarmes auditives dans l'aéronautique

1.1.1 Le pilotage

Afin de saisir les spécificités de la surdité inattentionnelle quand elle intervient chez les pilotes, il convient de présenter leur environnement et les alarmes auxquelles ils sont confrontés.

Le pilotage a des enjeux et des pratiques très variés, selon que l'on s'intéresse à l'aviation légère, commerciale, militaire, court ou long courrier, etc. En avion de chasse, il n'y a qu'un seul pilote, et les temps de réactions pour les prises de décision doivent être très courts. Pour l'aviation commerciale, plusieurs pilotes se trouvent généralement dans le cockpit, et durant la grande majorité des trajets, l'avion est contrôlé par le pilote automatique, suivant un plan de vol déterminé. Malgré les différentes formes que peut prendre le pilotage d'aéronefs, il existe de nombreux points communs. En effet, même sans piloter manuellement l'avion, les pilotes ont une tâche cruciale et complexe de supervision, qui demande une attention soutenue et continue pendant le vol. Ils doivent communiquer avec la tour de contrôle, confirmer les informations reçues et exécuter les directives qu'ils reçoivent en termes de cap, altitude, vitesse etc. Un vol est décomposé en plusieurs phases : le roulage (qui se passe au sol jusqu'au point de décollage), le décollage, la montée initiale (jusqu'à ce que l'avion atteigne son altitude de vol), la croisière, l'approche (descente d'altitude en approchant de l'aéroport d'arrivée), la finale (dernière ligne droite avant atterrissage), l'atterrissage et le roulage. Dans les phases de décollage et d'atterrissage, les pilotes doivent être vigilants aux aéronefs environnant tout en contrôlant en permanence leur vitesse et altitude. La vitesse est le paramètre crucial pour un atterrissage réussi. Il faut atterrir à la vitesse la plus faible possible, pour ne pas frapper violemment le sol et freiner au maximum l'avion. Mais il faut une vitesse suffisante pour que l'avion soit effectivement en train de voler : sous une certaine vitesse, appelée vitesse de décrochage, l'avion n'est plus porté par l'air et tombe en chute libre. Si cette situation est rattrapable à haute altitude, elle est catastrophique à proximité du sol.

On comprend donc que la plupart des contacts radio, des changements de paramètres de l'avion et des situations à risques se produisent dans les phases de décollage et d'atterrissage. Ces phases de vol, qui représentent seulement 6% du temps de vol, concentrent 71% des accidents et 41% des pertes humaines [1, 2]. Les pilotes sont soumis à une charge perceptuelle (nombreuses informations visuelles et auditives), cognitive (complexité de la situation à analyser, communications) et une pression temporelle très élevée [19, 20]. L'amélioration de l'ergonomie du cockpit est donc un enjeu primordial pour la sécurité aérienne : il faut s'assurer que les informations et les alertes sont transmises au moment adéquat et sous la forme la plus intelligible possible aux pilotes, sans surcharger leurs capacités perceptives et cognitives.

Les systèmes d'alerte dans le cockpit

Le pilotage des avions n'a cessé de se complexifier (cf. Figure 1). Les pilotes sont de plus en plus assistés par des systèmes automatiques, indispensables pour contrôler

certains appareils pour lesquels la force et les temps de réaction humains ne seraient pas suffisants. L'automatique embarquée sert également d'assistance aux pilotes, fournissant des informations sur l'état de l'avion et les paramètres de vol.

Parmi les principaux systèmes d'alertes sonores critiques dans le cockpit, on peut citer :

- l'alarme de décrochage : alarme auditive qui se déclenche dès que la vitesse de l'avion approche de la vitesse de décrochage (vitesse à laquelle l'avion ne peut plus se maintenir en l'air). Elle peut être accompagnée d'une vibration du manche ;
- le GPWS, Ground Proximity Warning System ou système d'alerte de la proximité du sol : dispositif qui déclenche une alarme quand l'avion se rapproche trop vite du sol. D'autres modes déclenchent l'alarme si la configuration train et/ou volets n'est pas conforme, si l'avion redescend après décollage, ou si l'écart sous le plan d'approche est trop grand en courte finale. Dans les versions les plus modernes, appelées E (Enhanced) -GPWS, une base de données cartographiques permet une représentation du relief sur l'écran de navigation ainsi que des alarmes de proximité du relief afin d'éviter de toucher le sol en dehors des pistes répertoriées ;
- le Master Warning : activé (avec un voyant lumineux rouge) pour informer les pilotes qu'une action immédiate est nécessaire (ex. procédure en cas de feu, descente d'urgence en cas de dépressurisation, perte de circuits hydrauliques imposant un atterrissage immédiat etc.) ;
- le Master Caution : alarme attirant l'attention de l'équipage sur le dysfonctionnement d'un système. Elle est associée à un voyant orange et ne nécessite pas d'action immédiate.



Figure 1. Cockpit d'un A400M. On constate la taille et la complexité visuelle de l'interface homme-machine. Par ailleurs les pilotes doivent également prendre en compte les communications radios, les alertes visuo-auditives et tout ceci dans le bruit de fond généré par le vol.

1.1.2 Le contrôle aérien

L'activité du contrôleur aérien consiste à guider un avion dans son secteur de contrôle en maintenant des distances et altitudes minimales de sécurité tout en optimisant les trajectoires et la fluidité du trafic. Il doit par ailleurs informer les équipages sur leurs conditions de navigation (météo, trafic environnement si nécessaire, régulations). Pour assurer ses missions, le contrôleur dispose d'une visualisation radar de son secteur de contrôle et communique avec les pilotes à l'aide de la radio VHF. Dans le cas du contrôleur aérien comme dans celui du pilote, la perception des informations à acquérir est cruciale dans le déroulement de sa tâche. Ils doivent percevoir et mémoriser un grand nombre d'informations dynamiques parmi lesquelles des alarmes émises par des systèmes d'aide. Ces alarmes sont de type visuel ou sonore, elles se traduisent par des informations mises en évidence sur la visualisation radar à l'aide de design spécifiques ou par des messages audio diffusés sur des hauts parleurs associés à la position de travail. La saillance de ces alarmes qui peuvent avoir une importance différente dans la réalisation de la tâche doit être adaptée et justifiée de façon à ne pas interrompre le contrôleur trop souvent ou à mauvais escient [21]. Cet aspect est particulièrement critique dans le domaine aéronautique où contrôleurs et pilotes sont soumis au stress ainsi qu'à une forte pression temporelle.

Le contrôle aérien a atteint un haut niveau de sécurité et les erreurs sont rares. Néanmoins, une étude du NTSB (National Transportation Safety Board, [22]) montre que dans plus de 90% des cas, elles proviennent d'erreurs humaines liées à l'attention, au jugement ou aux communications. Une étude classifiant les erreurs opérationnelles en fonction du niveau de conscience de la situation [23] montre que les problèmes de perception et de mémorisation sont la cause principale d'erreur humaine (71% des cas).

Le trafic aérien est en augmentation constante ces trente dernières années, et du fait de la limitation du nombre d'aéroports et de pistes, la congestion du trafic ne peut que s'aggraver en augmentant la charge de travail, le nombre de conflits, de pertes de séparation et incidemment les erreurs humaines.

L'espace aérien

L'espace aérien est découpé en zones gérées par des centres de contrôle en-route pour l'espace supérieur (altitude supérieure à 5800m), d'approche pour l'espace inférieur et du contrôle d'aérodrome, comme illustré en Figure 2. La France est découpée en cinq zones pour le trafic en-route. Le trafic d'approche est assuré par les grandes plateformes aéroportuaires Françaises. L'espace aérien est parcouru de routes aériennes, sous formes d'itinéraires définis par des séries de points à différents niveaux de vol. Le niveau de vol ou FL (Flight- Level), est l'unité d'altitude utilisée dans l'aéronautique. Il vaut 100 pieds soit environ 30 mètres, les avions sont positionnés à des niveaux séparés de 10 FL soit 1000 pieds. Chaque centre de contrôle est découpé en sous-zones, appelées secteurs, gérées par un binôme de contrôleurs ; un secteur gère une vingtaine d'avions au maximum.

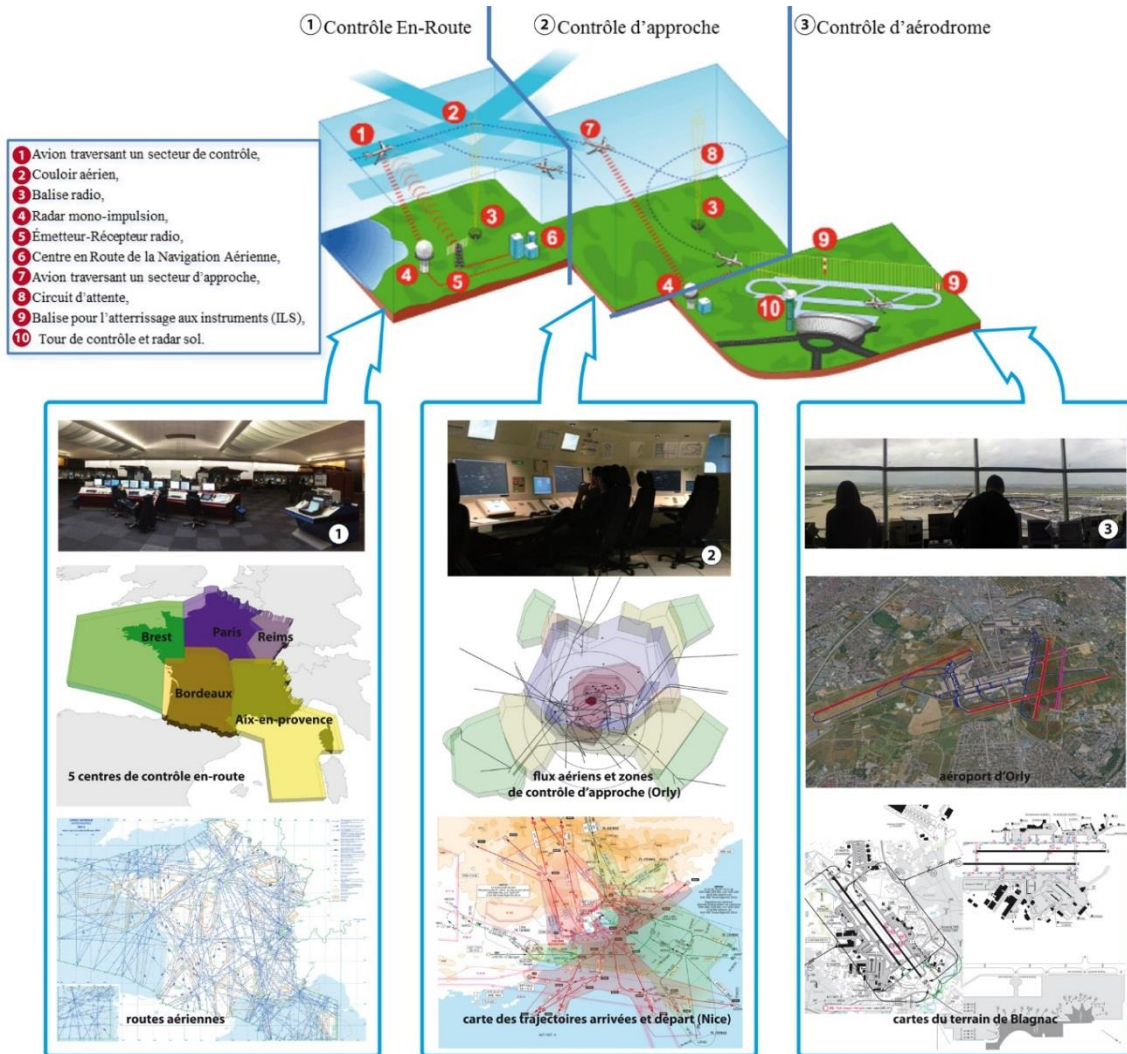


Figure 2. Du contrôle en-route au contrôle d'aérodrome (source : thèse Imbert, 2014)

Dans le binôme de contrôleurs, le contrôleur radariste est en communication radio avec les avions présents dans son secteur. Il supervise le trafic et donne les éventuels ordres nécessaires pour assurer les différents objectifs de sa tâche. Le contrôleur organique a une vision plus en amont du secteur géré par le radariste, il prépare l'entrée des vols dans le secteur traversé en faisant l'intégration des vols et en détectant d'éventuels conflits à venir. Il assure les coordinations (téléphoniques) avec les secteurs adjacents et peut résoudre les conflits en amont en demandant des modifications de trajectoires aux contrôleurs de secteurs adjacents (Figure 3).



Figure 3 : Binôme de contrôleurs radariste et organique

Les systèmes d'alerte

Plusieurs systèmes d'aide ont été intégrés aux postes de travail des contrôleurs aériens en France. Le filet de sauvegarde ou STCA (Short Term Conflict Alert) a pour mission de détecter les aéronefs dont les trajectoires vont les amener à une distance inférieure à la norme de séparation. Il se traduit par une notification sur la visualisation radar (champ ALRT rouge clignotant sur l'étiquette radar de l'avion concerné).

Les notifications sonores ne sont utilisées en France que dans les positions de travail concernant les zones d'approche. Le système MSAW (Minimum Safe Altitude Warning) détecte les trajectoires risquant d'amener un avion en descente à percuter le relief. Cette alerte est montrée sur l'étiquette radar de l'avion incriminé et un message sonore est diffusé sur les hauts parleurs 'Alerte relief' dans toute la salle de contrôle. Le système APW (Area Proximity Warning), détecte les intrusions dans des zones prohibées (zones militaires, de parachutage, centrales nucléaires etc.). Le contrôleur concerné par l'alerte doit associer le message sonore (diffusé globalement) avec les informations présentées sur son image radar et son secteur de contrôle.

Aux USA les alarmes sonores sont largement employées dans les postes de travail des contrôleurs aérien. Un rapport de la FAA (DOT/FAA/CT-TN04/04) de 2003 les recense et fait un bilan de leur emploi et des limitations liées à leur utilisation. Un grand nombre d'alarmes sonores vocales ainsi que des alarmes tonales peuvent être émises. Cette étude a mis en évidence que leur multiplicité posait des problèmes importants de compréhension et de différenciation, elles peuvent par ailleurs être masquées par le bruit environnant et sont parfois difficiles à localiser et associer avec la visualisation radar. Il montre que leur multiplicité peut amener l'opérateur à les considérer comme des nuisances et les occulter.

1.1.3 Avantages et limites des alarmes auditives

Les alarmes sonores semblent plus facilement perçues comme étant des nuisances. Elles peuvent être efficaces pour capter l'attention et aider à traiter les alertes de façon pré-attentive [24], couplées à des alertes visuelles elles diminueraient le temps de réaction des sujets [25]. Des alarmes auditives trop fréquentes ou non pertinentes peuvent néanmoins dégrader les performances de tâches visuelles [26].

Dans le pilotage comme dans le contrôle aérien, l'utilisation d'alarmes auditives est largement répandue. Leurs avantages sont indéniables, surtout en situation d'urgence. On peut citer notamment le fait qu'elles ne requièrent pas de mouvement de la tête, permettant de garder les yeux sur les informations visuelles primordiales. Elles ne viennent pas encombrer les interfaces visuelles, déjà encombrées, des pilotes et des contrôleurs aériens. Il a aussi été montré qu'elles provoquent des temps de réactions plus courts que les stimuli visuels [27], ce qui les rend extrêmement efficaces.

Cependant, leur usage semble avoir certaines limites. Leur efficacité n'est pas sans faille : la Revue d'Événements Aéronautiques révèle l'existence de nombreux cas d'accidents où les équipages n'ont pas tenu compte des alarmes auditives dans le cockpit. Il peut paraître étonnant que des alarmes auditives présentant un important niveau sonore puissent être négligées, alors que leur efficacité a déjà été attestée dans ces mêmes situations à de nombreuses reprises. Des études se sont intéressées aux effets psychologiques et physiologiques de ces alarmes, pour comprendre leurs limites. Elles mettent en avant le fait que leur nature agressive, distractive et perturbante [28] peut considérablement accroître le niveau de stress [29], ce qui peut potentiellement provoquer une chute des performances cognitives, embrouiller la compréhension de la situation, voire mener à la panique, et en conséquence mener à une diminution de la pertinence des prises de décision. D'autres problématiques liées aux alarmes auditives ont été révélés : leur nombre n'a pas cessé d'augmenter et elles sont parfois insuffisamment fiables [30], causant des déclenchements de type « fausses alertes ». Conséquence de ce manque de fiabilité, il a été observé que les pilotes ne leur font parfois pas confiance, ce qui constitue le « Cry-Wolf Effect » [31]. Croyant à une fausse alerte, les pilotes ignorent volontairement l'alarme, hélas parfois à tort, comme dans le cas du crash du vol Avianca Flight 011 en 1993. Dans cet accident, l'équipage se contente de répondre « bueno, bueno », sans réagir, à une alarme extrêmement critique de type « PULL UP » (retranscription des communications au sein du cockpit disponible à cette adresse¹).

Ces études et analyses d'accidents mettent en évidence des situations dans lesquelles des alarmes auditives sont mal comprises, mal interprétées, ou volontairement ignorées. Mais elles ne permettent pas de comprendre les accidents dans lesquels les équipages démontrent une absence totale de perception et de réaction au déclenchement d'alarme. Ce phénomène, que l'on retrouve en cause dans des accidents très médiatisés, est responsable de nombreuses victimes. En 1972, un premier cas spectaculaire fut le crash du vol Eastern Air Lines 401 dans les Everglades en Floride, où une alerte d'altitude n'a pas été entendue, provoquant la mort de 99 des 176 personnes présentes à bord. De même, en 1993, une alarme « proximité sol » a sonné, dans un Dash 8 de la Lufthansa, qui s'est pourtant écrasé à Roissy (4 morts) ; ou encore une alarme « dépressurisation », dans un Boeing 737 de la compagnie Helios Airways au-dessus de la Méditerranée en 2005 (121 morts).

¹ http://www.fomento.es/NR/rdonlyres/D53C568D-2A84-490B-BEE0-9EC81EE287C4/8766/Anexo_A.pdf

Un exemple d'omission d'une alarme auditive en situation réelle se trouve sur ce lien². On y voit 2 pilotes atterrir sur l'aérodrome de Megève (France) sans avoir sorti le train d'atterrissage, et ce malgré l'alarme de train qui se déclenche.

1.2 L'attention et ses limites

Le fait de ne pas traiter une information auditive, notamment lorsque l'attention est occupée ailleurs, constitue le phénomène de la **surdité inattentionnelle** [16]. Une des causes possibles de cette omission pourrait être en lien avec la nature des processus perceptuels et attentionnels impliqués dans les tâches de pilotage et de contrôle aérien. Dans un environnement comportant beaucoup d'informations de sources et de types variés, un individu peut se retrouver en situation de charge perceptuelle et mentale très élevée. Par ailleurs, des expérimentations récentes menées au DCAS (Département Conception et Conduite des véhicules Aéronautiques et Spatiaux) de l'ISAE (Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace) ont confirmé que l'apparition d'un fort stress pouvait générer des comportements de tunnellation attentionnelle où les opérateurs se focalisent excessivement sur la réalisation d'une tâche au détriment des autres, et peuvent ainsi être amenés à manquer des alarmes auditives [7, 17]. Dès lors, il devient important d'étudier plus en détail les processus impliqués dans la surdité inattentionnelle, puisque le pilotage et le contrôle aérien semblent être des situations particulièrement favorables à son apparition.

Pour comprendre un cas de déficit de l'attention tel que la surdité inattentionnelle, il faut tout d'abord comprendre dans quelle mesure les opérateurs aéronautiques peuvent contrôler ou adapter leur attention, mais aussi comment le rôle même de l'attention, qui est de sélectionner les informations pertinentes, peut mener dans certaines situations à des erreurs gravissimes.

Cette thèse n'a pas pour objectif de détailler toutes les théories sur l'attention et tous les modèles qui existent. Nous souhaitons ici juste présenter les principales théories et introduire les notions qui ont été utilisées dans cette thèse pour la conception de nos protocoles. Nous décrirons ensuite les effets de la charge de travail et du stress sur les mécanismes attentionnels.

1.2.1 L'attention

Le premier modèle de l'attention de Broadbent (1958) [32] présente l'attention comme la conséquence d'une contrainte cérébrale : processus de filtrage, l'attention permet au système de ne pas être surchargé d'informations et de lui fournir en priorité les informations jugées pertinentes. Ce processus de sélection fait ressortir certaines informations, et en néglige d'autres. Par la suite, Posner met encore plus en avant ce mécanisme de sélection (dès 1980, repris dans [33]), en définissant l'attention comme l'allocation de ressources cognitives à une sélection d'objets parmi tous ceux de l'environnement. Cette allocation de ressources peut être contrôlée consciemment par l'individu (attention endogène, « top-down »), ou automatique et incontrôlable (attention exogène, « bottom-up » ou « stimulus-driven »). C'est à cette définition que nous allons nous référer par la suite.

L'attention endogène (« provenant de l'individu ») est un contrôle délibéré de l'attention vers un objet précis par l'individu. Ce type d'attention dirigée par l'opérateur lui permet de s'orienter vers les informations utiles connues à sa tâche en fonction de son

² <https://www.youtube.com/watch?v=5McECUtM8fw>

apprentissage, ses habitudes, son expertise. Cette orientation contrôlée de l'attention est utilisée en permanence par les pilotes et les contrôleurs pour sélectionner et traiter les informations indispensables à leurs prises de décisions.

Pour l'attention exogène (« provenant de l'extérieur ») désigne quant à elle une orientation incontrôlée, subie, des ressources attentionnelles vers des stimuli extérieurs. Il existe des modèles de carte de saillance [34, 35] permettant déterminer les caractéristiques des stimuli qui accaparent l'attention exogène. Nous nous sommes en particulier référés au modèle NSEEV [34]. Ce modèle permet de prévoir la hiérarchie de traitement des informations visuelles par le cerveau, en fonction des caractéristiques de nouveauté, saillance, excentricité, attente et valeur de l'information. Il paraît souhaitable que les designs d'alertes dans les interfaces de pilotage réunissent un maximum de ces critères. Dès les premiers stades perceptifs, au niveau des cortex sensoriels, le traitement sensoriel est favorisé par ces caractéristiques. L'association, dans des structures neurales intégratives, des informations ainsi perçues permet de construire une représentation mentale des éléments dominants de l'environnement. Mais si rassembler les critères d'un modèle d'attention augmente la probabilité de la perception et du traitement d'une information, cela ne constitue pas une garantie. Un objet est plus facilement détecté s'il est proche du centre de l'attention visuospatiale (selon le critère d'excentricité du modèle NSEEV), mais la proximité n'est pas une condition suffisante à la détection et il peut toujours être manqué [36-38], notamment en présence d'autres stimuli attirant l'attention exogène, comme c'est le cas en situation d'urgence dans un cockpit ou une salle d'ATC.

Posner [33] définit également que l'attention relève de mécanismes antagonistes d'« accrochage » et de « décrochage ». Il est possible de postuler que des opérateurs focalisés sur un élément précis (en état de tunnellation attentionnelle) soient incapables de décrocher volontairement leur attention de la tâche qui les accapare pour pouvoir accrocher de nouveaux stimuli pertinents (ex : alarmes). Si le décrochage (focalisation spontanée de l'attention exogène) ne se produit pas naturellement à l'apparition d'une alarme, des contre-mesures cognitives peuvent être créées pour provoquer ce décrochage. Les contre-mesures cognitives consistent à retirer momentanément l'information sur laquelle le pilote est excessivement focalisé puis à la remplacer par l'information pertinente. Ainsi, c'est l'interface qui assure le décrochage (retrait ciblé d'informations) et l'accrochage attentionnel (envoi d'informations dans le champ visuel).

Enfin, il convient de définir les liens entre la prise de conscience d'une information et l'attention. Un exemple permet de comprendre rapidement que la relation entre les deux concepts n'est pas figée. Il a été observé que des pilotes portant toute leur attention sur un élément se retrouvent à négliger voir omettre les stimuli périphériques. Ils ne semblent pouvoir prendre conscience que de ce sur quoi ils portent leur attention. Au contraire, il leur est parfois impossible de ne pas diriger leur attention (phénomène exogène) vers un stimulus extérieur, même s'il est non-pertinent à la tâche. La prise de conscience intervient hors du focus attentionnel. C'est la distraction. Deux vues de l'attention sélective s'opposent encore aujourd'hui parmi les chercheurs. La théorie de la sélection tardive [39] prévoit que l'information est filtrée après perception et prise de conscience. Ce qui explique le phénomène de distraction involontaire qui peut se produire envers des stimuli non pertinents. L'individu ne prend conscience de la véritable valeur de l'information qu'une fois qu'il en a pris conscience. La théorie de la sélection précoce [40] suppose quant à elle que les informations sont examinées et éventuellement filtrées avant complète

perception et prise de conscience. C'est cette deuxième théorie qui nous intéresse principalement. Elle permet d'expliquer les situations où des stimuli sont négligés ou ignorés (ex. cécité ou surdité inattentionnelles). Cependant, dans les perspectives de ce travail de recherche, nous nous sommes également penchés sur les paradigmes de la sélection tardive et sur le phénomène de distraction. Car un moyen de faire prendre conscience d'une alarme à un opérateur pourrait être d'augmenter sa distractibilité, afin de forcer la perception et la prise de conscience de l'alarme (voir 6.1 Etude de la distractibilité auditive).

1.2.2 La charge de travail et le stress

Dans ce paragraphe, nous définissons le stress et la charge de travail, avant de présenter leur implication dans divers phénomènes attentionnels problématiques qui se retrouvent dans les causes d'accidents dans l'aviation, parmi lesquels la surdité inattentionnelle.

Charge de travail, définitions

Lorsque l'on étudie le comportement et l'état d'opérateurs pendant qu'ils effectuent une tâche, la difficulté de ladite tâche est un paramètre essentiel. Or, on s'aperçoit très vite qu'il est loin d'y avoir un consensus quant aux termes employés pour décrire cette difficulté. Charge de travail [41, 42], charge cognitive [43, 44], charge mentale [20, 45, 46], charge perceptuelle [16, 47, 48], ou simplement difficulté [49] sont autant de termes qui désignent des notions qui sont parfois complémentaires, parfois se recouvrent ou se confondent. De même, il n'existe pas de norme quant au niveau de difficulté. Les différents travaux sont donc parfois difficilement comparables. C'est pourquoi nous prenons soin ici de définir les termes et les théories que nous avons employés pour concevoir nos protocoles.

Charge perceptuelle

La charge perceptuelle peut être définie soit en termes de nombre d'éléments différents dans une tâche de reconnaissance perceptive (plus d'items impliquent une charge perceptuelle plus élevée), soit en termes de nombre et de complexité des opérations que la tâche implique (par exemple, discriminer le plus petit de deux objets de taille très différente implique une charge perceptuelle moindre que pour deux objets de taille proche) (pour une synthèse sur la charge perceptuelle, voir [47, 50, 51]).

La théorie de la charge perceptuelle de Lavie [52] émet l'hypothèse que le cerveau a une capacité de traitement des informations limitée, mais traite automatiquement, involontairement et obligatoirement toute information dans la mesure de sa capacité. Pour ne rien « gâcher » de ses capacités, le cerveau « s'occupe » toujours autant qu'il peut. Cela explique que sous faible charge perceptuelle se produise le phénomène de distraction -- l'attention exogène se dirige de façon involontaire sur des stimuli extérieurs à la tâche d'intérêt -- et la diminution de la perception de stimuli supplémentaires (par ex des alarmes) en charge perceptuelle élevée. La théorie de Lavie réconcilie donc la théorie de la sélection précoce et la théorie de la sélection tardive (voir paragraphe 1.2.1 L'attention), en fonction de la charge perceptuelle de la tâche effectuée par l'opérateur.

Charge cognitive

La charge cognitive désigne ce qui va occuper la mémoire de travail d'un individu en situation d'apprentissage ou de résolution de problème [44]. La charge cognitive inclut donc le nombre d'informations à stocker dans la mémoire de travail, leur éventuelle interaction entre elles, la façon dont la tâche ou les informations sont présentées, et la difficulté intrinsèque de la tâche à effectuer (opération simple ou complexe) [43].

On note que la charge cognitive n'est pas un concept orthogonal à celui de charge perceptuelle : la charge perceptuelle peut occasionner de la charge cognitive. Une situation de travail écologique complexe, implique à la fois une charge cognitive et une charge perceptuelle. Ces situations ne sont pas comparables aux tâches de références, conçues pour observer spécifiquement les effets d'un type de charge voulu. Or, ces deux types de charge ont des effets sur l'attention, et sur la probabilité d'apparition de la surdité inattentionnelle. Par exemple, la théorie de la charge cognitive de Sweller [44, 53] avance que, étant donné les capacités limitées de la mémoire de travail, une surcharge entraîne un mauvais stockage ou des erreurs dans la tâche entreprise, et notamment une réduction de la capacité à inhiber des distracteurs auditifs [54]. On remarque donc qu'un même phénomène (la distraction auditive) est réduit par la charge perceptuelle, comme vu au paragraphe précédent, mais favorisé par la charge cognitive.

Le stress

Le stress est omniprésent dans les tâches à haute responsabilité et critiques au niveau de la sécurité des personnes comme le pilotage et le contrôle aérien. Cependant, si tout le monde l'a déjà ressenti, ses effets sont très différents d'un individu à l'autre. C'est pourquoi il est essentiel de définir le stress comme une réponse physiologique d'un individu à un environnement [55] et non pas uniquement comme un ensemble de stimuli extérieurs (bruit, mouvement, pression temporelle etc.) pris indépendamment de la sensibilité des personnes. Ainsi, la charge de travail associée à une tâche peut constituer un facteur de stress, fonction de l'engagement personnel et de l'importance que l'opérateur accorde à cette tâche.

On peut représenter le stress comme le niveau de stimulation de l'organisme [56] qui va venir améliorer ou au contraire détériorer les performances cognitives, l'accès aux ressources attentionnelles et la capacité d'adaptation des sujets. Le stress est souvent représenté sur une courbe en « u inversé », avec une zone de confort médiane, atteinte pour un stress « moyen ». Celui-ci correspond à une stimulation optimale de l'organisme qui augmente les performances à leur maximum. L'hypostress ou l'hyperstress, au-delà de cette zone de confort, conduisent à l'extrême à l'incapacitation. Ils sont à éviter pour optimiser les réponses et la performance des opérateurs.

Parmi les réponses physiologiques mesurables qui illustrent le stress d'un individu, on peut citer l'augmentation du rythme cardiaque et de la réponse galvanique. Jusqu'à un certain point, l'augmentation du rythme cardiaque est souhaitable, elle augmente l'apport d'oxygène aux muscles et au cerveau. Du point de vue des performances, les sujets ont des temps de réponses plus courts et des capacités cognitives augmentées. Mais dépassé un certain seuil, cette augmentation peut être préjudiciable pour la performance de l'individu. Poussé à l'extrême, le niveau de stress peut atteindre ce qu'on appelle le stress débilitant (stress excessif menant à la perte de capacités cognitives d'un individu). De nombreuses études mettent en évidence les effets délétères du stress débilitant [57-60] sur le fonctionnement cognitif et exécutif. L'individu n'a plus accès à certaines capacités cognitives, son champ de vision se réduit [61] ce qui induit une probabilité élevée de

tunnellisation attentionnelle (voir paragraphe suivant). La prise de décision est entravée, avec la diminution de la flexibilité mentale.

Nous détaillons dans la suite différents comportements typiques qui apparaissent sous forte charge et sous stress, deux conditions qui sont réunies dans les cockpits et les tours de contrôle.

Tunnellisation attentionnelle

La tunnellation attentionnelle [8] désigne une focalisation excessive de l'attention. Elle peut être notamment favorisée par la fatigue, la charge de travail et le stress. Des sources de stress importantes peuvent induire un rétrécissement du champ de vision [61] et mener un opérateur à négliger des informations [7, 62].

Lors de l'utilisation d'un simulateur de vol mettant en jeu des systèmes de visualisation innovants type SVS (Synthetic Vision Display), il a été montré que la tunnellation attentionnelle est un facteur qui augmente très fortement la non-détection d'événements inattendus [63]. Des travaux ont montré que des solutions existent pour lutter contre ce phénomène, telles que les contre-mesures cognitives [64]. Ce champ de recherche est abordé en perspective de cette thèse (6.2).

La distraction

Si dans certains cas, le non traitement des stimuli auditifs est préjudiciable (ex. surdité inattentionnelle), cela peut être un avantage dans d'autres. Les stimuli sonores dits « non pertinents » désignent des stimuli qui ne sont pas en rapport direct, ou qui n'ont pas d'incidence immédiate sur la tâche qu'effectue un individu. Ainsi, une alarme auditive peut être considérée comme un stimulus non-pertinent à la tâche de pilotage, aussi critique et importante soit-elle. Les stimuli non-pertinents peuvent aussi être des distracteurs pénalisant la tâche de l'opérateur. Il faut donc trouver un compromis pour pouvoir rester concentré sur une tâche sans être perturbé par tous les stimuli de l'environnement, tout en gardant une certaine capacité à être distrait en cas de danger (par ex. l'apparition imprévue d'une alarme).

La distraction peut être définie comme une redirection involontaire de l'attention vers d'autres stimuli de l'environnement [65]. Il est important d'étudier les conditions qui amènent des stimuli auditifs non pertinents à la tâche à être ignorés, sans accaparer de ressources attentionnelles, tout en conservant une distractibilité minimale en cas d'alarme. Or, l'augmentation de la charge perceptuelle favorisant la surdité inattentionnelle, donc la négligence d'informations, cela suggère qu'une charge perceptuelle élevée aurait le bénéfice de limiter la distraction. Des études vont dans ce sens [66], montrant que les effets de distracteurs auditifs périphériques sont réduits en cas de charge perceptuelle plus élevée de la tâche principale (par rapport à une absence de tâche principale). Mais ces résultats sont contredits dans d'autres expériences [54], qui montrent au contraire une augmentation des effets des distracteurs avec la charge. Afin de pouvoir comparer ces différents résultats, il est nécessaire de passer par une discussion et une définition rigoureuse des termes de charge perceptuelle et cognitive, élevée ou faible, souvent mentionnés dans les articles scientifiques sans qu'un consensus n'ait été établi entre les auteurs quant à leur sens exact (voir le paragraphe 1.2.2 La charge de travail). La nature des tâches utilisées diffère également beaucoup d'un auteur à l'autre. Lavie explique ces résultats par la coexistence de deux mécanismes [52] : un mécanisme de sélection perceptive permettant de diminuer la perception des distracteurs non-

pertinents en situation de forte charge perceptuelle, et un mécanisme de contrôle cognitif permettant de réduire l'interférence des distracteurs perçus en situation de faible charge cognitive. Ainsi, une forte charge cognitive viendrait accaparer les capacités disponibles pour ce contrôle actif de l'attention et entraînerait une augmentation du traitement des distracteurs.

La c civit  inattentionnelle

La c civit  inattentionnelle est le pendant visuel de la surdité inattentionnelle. Il s'agit du phénomène de non perception d'une information visuelle. Cette c civit  inattentionnelle a été mise en évidence et étudiée depuis plus longtemps que le phénomène auditif. Le terme se trouve pour la première fois dans les travaux de Mack & Rock [12]. Quand toute l'attention est monopolisée sur une scène, un effet temporaire de c civit  peut avoir lieu : les individus ne parviennent pas à voir des objets ou des stimuli inattendus, même s'ils sont parfois saillants. Le phénomène est à rapprocher de la tunnellation attentionnelle. Dans ce cas particulier, la c civit  intervient parce que l'observateur est focalisé sur un objet précis de son environnement.

Le rôle de la charge perceptuelle dans la c civit  inattentionnelle a été étudié en détails dans l'article de Cartwright-Finch et Lavie [14]. Comme prédit par la théorie de la charge perceptuelle de Lavie, la conscience d'un stimulus non-pertinent a été considérablement réduite avec l'augmentation de la charge perceptuelle (avec une augmentation du nombre d'items recherchés, ou une tâche de discrimination plus facile).

1.3 Surdité inattentionnelle

1.3.1 Définition générale

Comme évoqué précédemment, lors de situations complexes comme le pilotage ou le contrôle de l'espace aérien, une grande quantité de ressources attentionnelles doit être allouée à la tâche focale. Par conséquent, il subsiste très peu de ces ressources attentionnelles pour le traitement d'informations supplémentaires, comme l'apparition d'une alarme. Le fait de ne pas traiter une information auditive dans un tel contexte constitue le phénomène de la surdité inattentionnelle [16, 67].

Tout comme pour la modalité visuelle, il existe un phénomène voisin appelé surdité au changement (*change deafness*) [18]. Dans ce cas, c' st un changement, parfois important, dans des stimuli auditifs complexes, qui n'est pas détecté. Par exemple un changement de voix [18], de fréquence d'un son [68], ou la disparition d'une source auditive parmi d'autres [69]. Le fait que ce soit un changement qui ne soit pas détecté, et pas un son en lui-même, semble indiquer que les stimuli auditifs sont perçus, mais ne sont pas suffisamment analysés pour mener à la détection consciente du changement. Comme l'on pourrait s'y attendre, cette surdité au changement est favorisée par la complexité auditive de la tâche, comme le nombre de sources auditives [69].

Les applications pratiques qui nous intéressent dans cette thèse, le pilotage et le contrôle aérien, présentent des situations écologiques se rapprochant de la surdité inattentionnelle plutôt que de la surdité au changement, notamment au niveau de la complexité auditive impliquées dans ces deux activités. Il arrive que des alarmes auditives flagrantes ne soient pas perçues, alors que l'environnement auditif des opérateurs est calme (comme illustré dans la vid o³). Cependant, les deux phénomènes présentent des

³ <https://www.youtube.com/watch?v=5McECUtM8fw>

1.3 Surdité inattentionnelle

similitudes, leurs protocoles d'étude sont proches et ils résultent tous les deux d'un manque d'attention et de ressources cognitives pour le traitement de stimuli auditifs [16, 17, 68, 69].

Une littérature grandissante apporte les preuves de capacités attentionnelles partagées entre les modalités visuelles et auditives [15, 66, 70]. En posant l'hypothèse de ce partage des ressources attentionnelles entre vision et audition, il apparaît qu'un engagement dans une tâche sous forte charge visuo-attentionnelle peut conduire à un déclin de la probabilité de pouvoir traiter un stimulus auditif concurrent.

Macdonald & Lavie (2011) [16] ont montré que 79% de participants engagés dans une tâche impliquant une charge perceptuelle élevée (tâche de discrimination de la branche la plus longue d'une croix)  taient incapables de prendre conscience d'un son. Alors que dans plusieurs situations de la vie quotidienne, un tel phénomène est de faible importance (ex : ne pas entendre quelqu'un s'adressant à nous alors que nous sommes engagés dans une tâche informatique), la surdité inattentionnelle peut avoir de graves conséquences au regard de la sécurité lorsque l'on considère les alarmes critiques. Le grand nombre d'écrans présents dans les cockpits d'avions modernes ou dans les salles de contrôle aérien (Figure 1, Figure 3), et les nombreuses informations visuelles affichées en parallèle peuvent très vraisemblablement favoriser la surdité inattentionnelle, d'autant que les ressources cognitives peuvent être réduites par certains stressseurs.

Nous présentons dans ce qui suit les deux principales études sur la surdité inattentionnelle (2009 et 2001) sur lesquelles nous nous sommes appuyés.

1.3.2 Etudes de référence

Influence de la charge perceptuelle

La théorie sur les ressources attentionnelles était que chaque modalité (visuelle et auditive) possédait son propre bassin de ressources attentionnelles. Deux tâches qui ne demandent pas les mêmes ressources parce qu'elles font appel à des modalités sensorielles différentes ne devraient pas interférer entre elles. Ainsi, selon cette théorie, il ne devrait pas y avoir de problème à traiter une alarme sonore, du ressort de la modalité auditive, lorsque l'on est occupé à une tâche visuelle, même si celle-ci demande énormément de ressources et engendre une charge perceptuelle et cognitive élevée. Mais depuis, de nombreuses preuves de l'existence d'un bassin commun de ressources entre les modalités visuelle et auditives ont été produites [15, 66, 70].

Macdonald et Lavie (2011) [16] ont en effet observé le phénomène de surdité inattentionnelle lorsque les participants sont impliqués dans une tâche visuelle. La surdité inattentionnelle est d'autant plus marquée lorsque la tâche visuelle présente un niveau de charge perceptive élevée comparativement à une charge perceptive faible. Au cours de leurs expériences, pendant les six premiers essais, apparaissait un point de fixation pendant 900 ms, puis un stimulus en croix pendant 150 ms, puis un écran blanc pendant 2850 ms durant lequel les participants donnent leur réponse. Ils devaient déterminer quel était le bras de la croix (vertical ou horizontal) de couleur bleue dans la condition de faible charge perceptuelle (low load), ou quel était le bras le plus long dans la condition de charge perceptuelle élevée (high load). Un bruit blanc était joué en continu à 48 dB dans des écouteurs pendant 1900 ms (du début de l'essai à 850 ms dans l'écran de réponse). Dans les essais 7 et 8, un stimulus sonore (« Critical Sound », CS, son pur de 180Hz à 28dB)  tait présenté concurremment au stimulus en croix, pendant 100 ou 150 ms. Le

déroulement des essais est illustré en Figure 4. Macdonald et Lavie ont réalisé trois blocs d'expérience : le premier (Exp1) où le son était joué en même temps que le bruit blanc, le deuxième (Exp2) sans le bruit blanc, et le troisième (Exp3) avec un plus grand nombre d'essais et en mélangeant les essais de charge faible et élevée aléatoirement. Dans la Figure 5 sont présentés les pourcentages des opérateurs ayant confirmé avoir entendu le son. La conscience du stimulus auditif est évaluée immédiatement après la réponse, par demande orale.

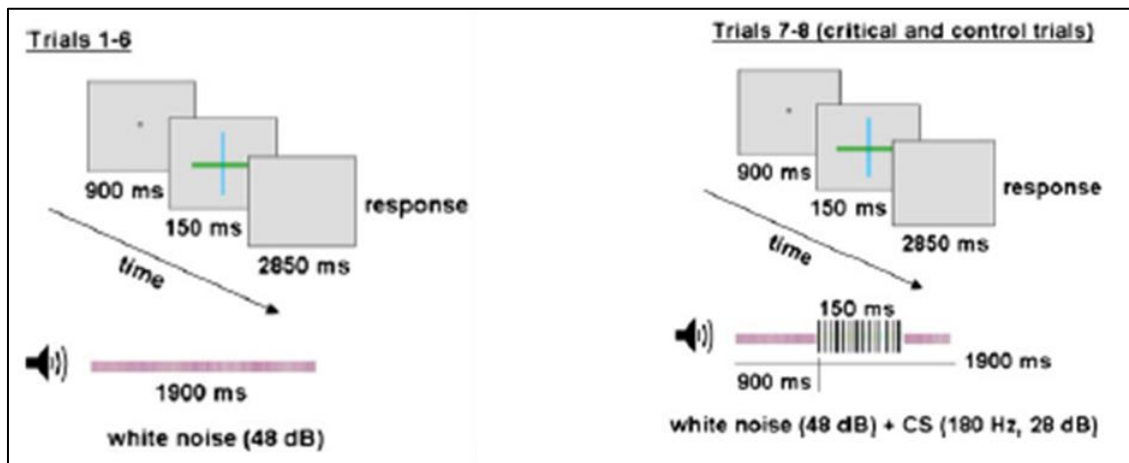


Figure 4. Présentation de la tâche de Macdonald (Macdonald & Lavie, 2011).

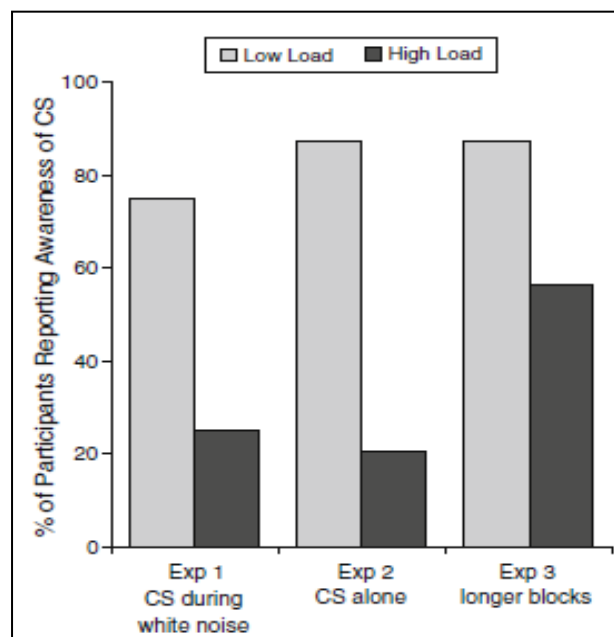


Figure 5. Résultats de Macdonald & Lavie (2011) : comparaison du nombre de participants signalant le son selon la charge perceptuelle de la tâche qui leur était demand e

On remarque que seulement 20% environ des participants ne prennent pas conscience du son lorsque la tâche qui leur était demand e était de faible charge mentale. Ce pourcentage passe à plus de 70% quand la tâche demand e entraînait une charge cognitive élevée. La difficulté de la tâche visuelle réduit donc la performance de détection du son. On notera aussi que l'allongement des séries et le mélange des conditions de

1.3 Surdité inattentionnelle

charge (« longer blocks » dans Figure 5) provoquent une meilleure conscience du bruit : seulement 50% des participants échouent à percevoir le son en charge élevée.

Influence de la charge cognitive

Koreimann (2009) [67] développe le champ d'application des expériences de surdité inattentionnelle à la musique, et montre qu'un groupe de non musiciens devant compter les coups de timbale dans un morceau de musique classique (condition charge cognitive élevée) ne remarque généralement pas un solo de guitare électrique rajouté à la fin. A l'inverse un groupe n'ayant aucune autre consigne que d'écouter le morceau (charge faible) le remarque mieux. La même expérience sur un groupe de musiciens amateurs donne des différences moins marquées mais suivant la même tendance (cf. Figure 6) : le solo de guitare électrique est moins perçu par les membres du groupe expérimental que ceux du groupe de contrôle. On note donc que l'expertise et l'habitude sont des facteurs modulant la surdité inattentionnelle.

En conclusion, une charge cognitive (compter les coups de timbale), même pour une tâche simple, va favoriser le phénomène de surdité inattentionnelle.

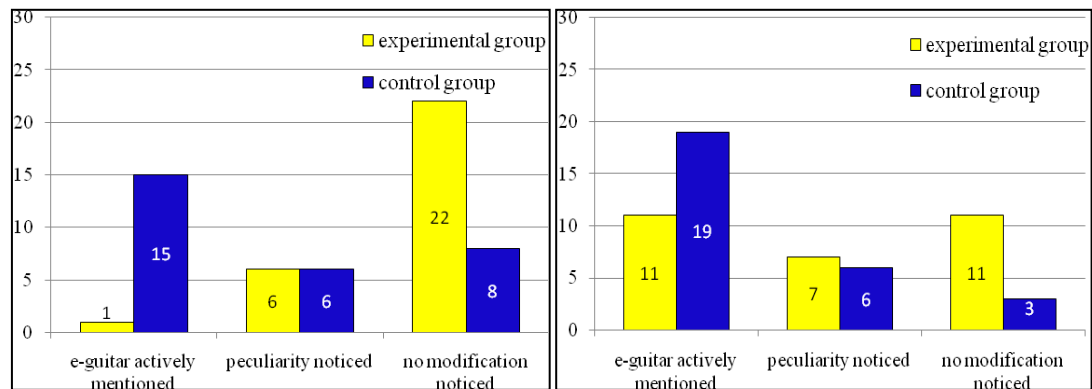


Figure 6. Résultats du groupe de non musiciens à gauche, de musiciens amateurs à droite, en jaune le groupe qui devait compter les coups de timbales, en bleu le groupe de contrôle. Issu de Koreimann (2009).

1.3.3 Synthèse et limitations

Ces travaux posent les fondations de l'étude de la surdité inattentionnelle. Ils mettent déjà en évidence des facteurs favorisant son apparition (les charges cognitive et perceptuelle). Mais en regard des cas pratiques dans le domaine de l'aviation, les tâches utilisées dans ces études sont très éloignées du travail réel d'un pilote ou d'un contrôleur. De plus, les protocoles utilisés ne permettent qu'une unique occurrence potentielle de surdité inattentionnelle pour chaque participant. Enfin, elles ne mettent au point aucune mesure objective (systématique, indépendante de la conscience des participants) de la surdité, elles se contentent de poser la question à postériori aux participants, ce qui n'est évidemment pas envisageable en situation de vol.

Sur cette dernière problématique, il est intéressant de se pencher un instant sur les travaux de Puschmann et al. sur la surdité au changement, publiés en 2013 (après le début de cette thèse) [68]. Ils introduisent des mesures de l'activité cérébrale par électroencéphalographie pour mettre en évidence les causes cognitives de la surdité. Leur tâche expérimentale consistait en la détection d'un changement de fréquence dans un son parmi six. Les changements, détectés ou non, provoquaient une amplification des réponses cérébrales précoces associées à l'encodage de l'information au niveau sensoriel, mais que

seuls les changements détectés provoquaient une amplification des réponses tardives associées au traitement des changements des stimuli perçus. Ces résultats suggèrent qu'il est possible de détecter au niveau cérébral la surdité. Mais de même que pour Macdonald et Lavie, et Koreimann, la tâche réalisée était très simplifiée, et une seule occurrence de surdité pouvait être observée, ce qui limite considérablement les mesures physiologiques pouvant être réalisées, la puissance statistique des analyses, et augmente le coût du matériel de mesure et les traitements du signal nécessaires.

Nous avons suivi une approche similaire à Puschmann et al. employant des mesures physiologiques pour détecter la surdité inattentionnelle, mais en cherchant à concevoir des protocoles permettant des observations répétées du phénomène, et des tâches plus proches de la réalité des pilotes et des contrôleurs aériens.

1.4 Positionnement du sujet et déroulement de l'étude

Il se dégage de cette analyse du contexte et de la littérature un certain nombre de problématiques auxquelles il faut répondre sur le plan théorique, mais aussi au regard des enjeux de sécurité aérienne qui en dépendent. Concernant la surdité inattentionnelle, qui est responsable d'un nombre important d'accidents, le manque de moyens existants pour la détecter incite à l'étudier en se concentrant sur des objectifs pragmatiques pour mettre en place rapidement des solutions efficaces.

Nous avons donc tenté, au cours de cette thèse, de trouver les moyens de détecter ce phénomène en situation écologique c'est-à-dire pendant une tâche de pilotage ou de contrôle aérien. Pour cela, il était nécessaire de pouvoir recréer le phénomène lors d'expériences en laboratoire. Le premier défi de cette thèse était donc de reproduire le phénomène de surdité inattentionnelle avec des protocoles expérimentaux bien contrôlés. Nous souhaitions également mettre en évidence les principales causes de la surdité inattentionnelle dans les cas du pilotage et du contrôle aérien. Une fois ces causes identifiées, il était possible d'envisager de limiter l'apparition de la surdité inattentionnelle en contrôlant les conditions de travail des opérateurs pour détecter les situations à risques.

Mais même si l'on peut alors diminuer la probabilité d'apparition de la surdité inattentionnelle, il restera toujours des situations inattendues dont la difficulté n'a pas été anticipée, qui pourront conduire à des alarmes non perçues. Il était donc primordial de dégager des pistes de mesures physiologiques ou comportementales qui peuvent indiquer de façon objective, et si possible en temps réel l'omission d'une alarme.

Notre objectif était de passer d'une constatation du phénomène en vol et de sa connaissance en conditions très simplifiées en laboratoire, à sa reproduction en situation écologique avec des mesures objectives et exploitables pour prévention ou détection en temps-réel.

Pour mesurer l'état de surdité des opérateurs de façon objective et en tirer des marqueurs caractéristiques utilisables pour la détection ou la prévention de ce phénomène, nous avons utilisé des mesures physiologiques, des mesures de performance comportementale, et des questionnaires. Ces outils sont présentés dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 2

Outils de mesure de la surdité inattentionnelle

2.1 Présentation de l'approche neuroergonomique

La neuroergonomie [5] est une discipline récente donc les concepts contribuent de plus en plus à l'étude des facteurs humains.

La neuroergonomie vise à prendre en compte les limites perceptives et cognitives du cerveau humain en lien avec une performance dans des tâches complexes. Pour cela, nous disposons de l'ensemble des outils théoriques et pratiques des neurosciences, que l'on applique à l'ergonomie, en vue d'optimiser l'organisation de l'environnement de travail, la présentation des informations, et en conséquence le confort, la sécurité et l'efficacité. Concrètement, il s'agit d'étudier la réalisation d'une tâche sous plusieurs angles complémentaires : physiologique, comportementale et subjectif. On considère l'opérateur d'une tâche comme un système biologique, soumis aux contraintes de fonctionnement de son cerveau en interaction avec un autre système, naturel ou artificiel.

Cela mobilise des connaissances dans deux domaines :

- les neurosciences (étude des processus perceptifs et cognitifs, d'un point de vue comportemental ou neural) ;
- Les facteurs humains (l'adaptation des technologies aux capacités et limitations humaines afin que l'utilisateur puisse travailler efficacement en toute sécurité).

La neuroergonomie permet de concevoir des interfaces adaptées au fonctionnement cognitif humain tout en prenant en compte la performance et le ressenti de l'opérateur sur l'utilisation du système. Elle a connu de récents progrès grâce à l'avancée des techniques de mesures neurologiques non invasives comme l'Imagerie par Résonance Magnétique Fonctionnelle (IRMf), l'imagerie spectroscopique proche infrarouge fonctionnelle (fNIRS) ou l'électroencéphalographie (EEG). Ainsi, de nombreux facteurs modulant la performance humaine peuvent être étudiés comme ceux de la charge de travail, des mécanismes attentionnels, de la mémoire de travail, du contrôle moteur etc. Par conséquent, l'aéronautique est un domaine d'application privilégié de la neuroergonomie. Bien sûr, pour des raisons techniques, dans le domaine qui nous intéresse et dans des tâches écologiques, certaines mesures sont impossibles, ou très difficilement réalisables par leur coût, leur encombrement, ou leurs limitations en termes de mouvement. Mais certaines mesures restent possibles, comme l'EEG, le comportement oculaire ou encore l'analyse du rythme cardiaque, indices périphériques de l'activité cérébrale. On peut ainsi mettre en évidence des caractéristiques comportementales et physiologiques systématiques des différents types d'erreurs humaines. Ces invariants sont le résultat de mécanismes cérébraux contraints par la neurophysiologie.

Nous présentons maintenant les mesures physiologiques que nous avons mises en place dans les expériences de cette thèse, dans le cadre de notre approche neuroergonomique. En particulier, ce sont des mesures qui peuvent être employées dans l'étude de la charge de travail.

2.2 Mesures physiologiques

2.2.1 Bases sur le fonctionnement du système nerveux

Le système nerveux inclut le cerveau, la moelle épinière, et l'ensemble des nerfs du corps humain qui permettent le fonctionnement du corps humain. D'un point de vue fonctionnel, il peut être divisé en deux sous parties : le système somatique, impliqué dans

les mouvements volontaires et les sensations conscientes, et le système autonome (SNA), responsable des fonctions non soumises au contrôle volontaire. Ce dernier (encore appelé système nerveux végétatif) intervient dans la régulation des fonctions vitales internes non volontaires. Il intervient notamment dans la digestion, la respiration, la circulation sanguine.... On distingue deux entités complémentaires dans le fonctionnement du SNA : le système nerveux sympathique, qui a un rôle de stimulation et de préparation de l'organisme à une activité (physique ou intellectuelle), et le système nerveux parasympathique dont le rôle est de réguler et ralentir l'activité de l'organisme afin d'économiser ses ressources. Les régulations effectuées par le SNA répondent à la charge de travail physique, mentale, mais aussi aux émotions ou au stress. Ainsi, en cas de stress, l'activation de la branche sympathique du SNA est responsable de différents changements physiologiques, comme la dilatation de pupilles et des bronchioles, l'augmentation du rythme cardiaque et respiratoire et de la pression sanguine. Ce sont ces effets physiologiques périphériques que nous pouvons mesurer, pour essayer d'en déduire les stimulations et les processus cognitifs dans lesquels le cerveau est engagé.

2.2.2 L'électroencéphalographie

Pour l'étude de la surdité inattentionnelle, nous ne pouvons pas nous fier à un signe extérieur témoignant de l'attention auditive des sujets. Pour avoir accès à des indices ou des preuves de traitement de l'information auditive, nous devons donc aller voir au plus près de l'activité cérébrale des zones impliquées. Pour cela, le moyen le moins cher, le moins encombrant, le plus rapide et le plus direct est l'électro-encéphalographie (EEG) [71], qui mesure l'activité électrique du cerveau à l'aide d'électrodes mises en contact du cuir chevelu (cf. Figure 7).



Figure 7. A gauche, un sujet équipé d'un EEG *Biopac* à 19 électrodes. A droite, un sujet équipé d'un bonnet de 128 électrodes *Biosemi*.

Il existe deux grandes méthodes de mesures, que l'on présente ici.

2.2 Mesures physiologiques

Méthode fréquentielle ou continue

La méthode continue (EEG-Continu) correspond à l'étude de l'activité fréquentielle du cerveau, avec les ondes Delta (jusqu'à 4Hz), Thêta (4-7 Hz), Alpha (8-12 Hz), Beta (12-30 Hz), Gamma (30-100+ Hz) associées. La méthode EEG-Continu permet, en associant les bandes de fréquences mesurées à l'état cérébral correspondant (sommeil, repos, éveil, excitation etc.), d'avoir une mesure continue de l'état global de l'opérateur [72, 73]. Ainsi, Dussault [74] a évalué l'activité des bandes beta et thêta et la charge mentale durant dix différentes phases de vol sur simulateur (12 pilotes, 8 novices et 4 experts). Il a mis en évidence une augmentation de l'activité Thêta et une baisse de l'activité Beta dans les phases de vol les plus complexes (VFR et IFR) par rapport aux phases de repos (voir Figure 8).

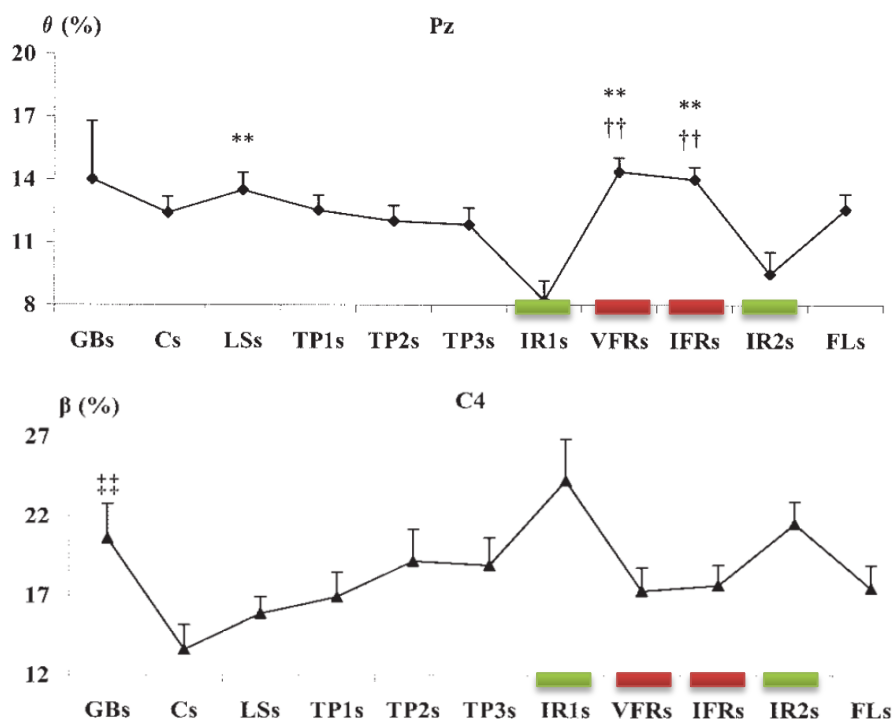


Figure 8. D'après Dussault (2005). Activité thêta (en haut) et Beta (en bas) lors des différentes phases de vol. En vert sont marquées les phases de repos, et en rouge les phases de vol VFR et IFR.

Cependant, la méthode fréquentielle ne permet pas une analyse fine du comportement et de l'état attentionnel. Il est également difficile de déterminer avec précision si un stimulus est la cause d'un changement fréquentiel, car beaucoup de facteurs influencent l'activité cérébrale, surtout lors de tâches complexes impliquant du mouvement et des stimuli variés.

Méthode ERP

La seconde méthode est appelée la méthode ERP (Event Related Potentials, potentiels liés à un événement) : plusieurs potentiels électriques cognitifs ont été associés au traitement de stimuli particuliers. Ils reflètent une activité mentale précise intervenant au cours de la réalisation de tâches. La méthode ERP nécessite que les mesures soient répétées plusieurs fois pour que les ERPs associés à l'événement étudié émergent du bruit électrique associé à l'activité cérébrale de fond, à l'activité musculaire ou l'environnement. En effet, si l'amplitude classique d'un ERP de type N100 (cf. suivant N100) est de l'ordre de la dizaine de microvolts, la contraction des muscles de la mâchoire atteint facilement 100

μ V. D'ailleurs, cette caractéristique de la méthode ERP mène à certains défis dans le protocole, contraignant l'utilisation des stimuli. Mais elle semble particulièrement pertinente pour l'étude de la surdité inattentionnelle dans le contexte aérien. Un exemple de protocole très utilisé dans l'étude de la surdité inattentionnelle par méthode ERP, et utilisé dans cette thèse, est la tâche de oddball. Il permet de mimer les alarmes auditives présentes dans le cockpit ou dans les tours de contrôle tout en conservant un protocole expérimental éprouvé [75, 76]. On présente au participant au moins deux stimuli différents, l'un est l'item non-cible (qui apparaît fréquemment), l'autre constitue l'item cible (son apparition est plus rare et demande une réaction de la part du participant). Il peut également y avoir un item distracteur (qui est peu fréquent et qui interfère avec l'item cible).

Ces méthodes d'acquisition de l'activité cérébrale ont l'avantage d'être non invasives (selon le matériel et dans une certaine mesure) et relativement peu coûteuses, mais elles restent difficiles à mettre en œuvre, du fait de la complexité (taille, fragilité) de l'équipement et de la faible amplitude des signaux électriques observés, facilement perturbés dans un environnement réel.

Un autre inconvénient notoire de ces méthodes est qu'il faut limiter au maximum les sources d'artefacts. Or ces sources sont multiples, variées et certaines incontrôlables. Il est possible de demander au participant de limiter ses mouvements, mais il restera toujours une activité résiduelle des muscles (d'autant plus dans des tâches qui se veulent écologiques). Même les contractions des muscles cardiaques parasitent le signal EEG. Il faut aussi éliminer au maximum toutes les sources extérieures de bruits (appareils électriques, bruit de pas dans la pièce, mouvements des fils des électrodes etc.). Mais la précision et la fiabilité des nouveaux EEG vont en s'améliorant, et de nouvelles techniques de filtrage toujours plus performantes permettent de plus en plus de s'affranchir de ces contraintes [77-80].

Dans le cas de la surdité inattentionnelle, c'est l'effet de sons qui est étudié. Ces sons constituent les événements particuliers générateurs de potentiels évoqués, selon la méthode EEG-ERP. En menant une expérience suffisamment longue, où les sons sont répétés plusieurs dizaines de fois, il est possible d'observer plusieurs potentiels évoqués particuliers, représentant les différents traitements cérébraux de ces sons. Nous détaillons ici les principaux potentiels évoqués d'intérêt qui reflètent l'analyse auditive.

N100

La N100, ou N1, est un potentiel évoqué négatif (N) mesurable par électroencéphalographie. Son pic est localisé en général entre 75 et 180 ms après la présentation d'un stimulus [81]. La N100 est répartie principalement dans les aires frontales et centrales du cerveau. Ce potentiel est provoqué (ou évoqué) par un stimulus imprévisible en l'absence de consigne (ex : fréquence discordante d'un son dans une série homogène). La N100 est souvent suivie de la P200, potentiel positif (P) dont le maximum est situé aux alentours de 200ms après le stimulus. La recherche étudie principalement la N100 avec des stimuli auditifs, mais la N100 se retrouve également avec des stimuli visuels [82], olfactifs, de température, de douleurs [83] etc.

La N100 est dite préattentive, c'est-à-dire qu'elle se produit de façon précoce, avant la prise de conscience et le traitement cognitif du stimulus. Dans le cas de stimuli auditifs, l'amplitude de la N100 peut varier notamment selon l'amplitude des sons, leur fréquence, l'intervalle de temps qui sépare deux stimuli et la variation de fréquence avec le son

2.2 Mesures physiologiques

précédent [84]. Il a aussi été montré que son amplitude et sa latence évoluent avec l'âge [85], comme la P300. La N100 reflète l'activité des cortex auditif et l'analyse précoce des caractéristiques des stimuli [86, 87]. Qu et al. [88] ont montré que la N100 évoquée par des stimuli auditifs considérés comme non pertinents à la tâche en court est affectée par la mémoire de travail visuelle lors d'une tâche de reconnaissance de visage. Selon les auteurs, les informations auditives et visuelles interagissent au niveau du cortex préfrontal, qui à son tour module les processus de mémoire de travail et d'attention sélective de façon multimodale.

MMN

La MMN ou Mismatch Negativity est une onde cérébrale générée par la discordance entre des stimuli auditifs successifs (changement de fréquence, d'intensité, de contenu sémantique, etc.). La réponse MMN est considérée comme un déplacement négatif et est obtenue en soustrayant les ERP des sons standards aux ERP des sons déviants ou nouveaux [65]. Elle est provoquée sans que les sujets soient nécessairement engagés dans une tâche en relation avec les sons qui la provoquent.

Les principaux générateurs de la MMN se situent au niveau du cortex auditif et dans les régions centrales et fronto-centrales du cerveau. La MMN culmine généralement à 150-250 ms après l'apparition du changement de son [89] (cf. Figure 9). C'est un ERP automatique et plutôt pré-attentif qui permet d'établir les processus cérébraux sous-tendant l'initiation du déplacement de l'attention vers une perception consciente du changement de son provoqué par un stimulus inattendu.

Une condition nécessaire au déclenchement de la MMN est que le système auditif central se soit fait une représentation des aspects répétitifs de la stimulation auditive avant l'apparition du stimulus déviant. La MMN sera ensuite déclenchée par ce stimulus déviant qui viole la représentation. Ainsi, la tâche de oddball permet d'observer la MMN.

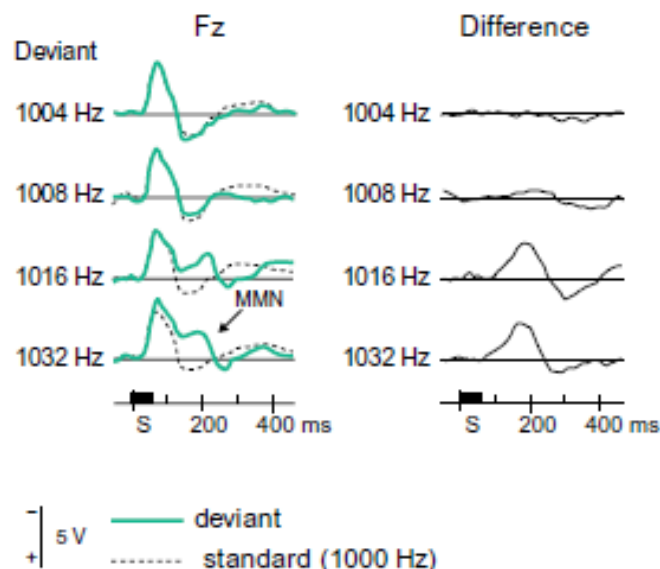


Figure 9. Exemple de MMN provoquées par des changements de fréquence dans un flux de sons de fréquence standard.

P300

La P300, ou P3, est une réponse de voltage positif apparaissant avec une latence d'environ 300 ms après le stimulus [90] (cf. Figure 10). Elle est classiquement enregistrée

dans les régions pariétales et associée au traitement de stimuli pertinents (i.e. qui sont les cibles de la tâche accomplie par le participant) et rares. Elle est d'autant plus ample que la probabilité d'apparition du stimulus est faible (i.e. quand le stimulus est rare). On distingue généralement deux composantes de la 300: la P3a et la P3b (voir [90] pour review complète). La première résulte de la surprise liée à la rareté du stimulus entendu, elle reflète une évaluation et un déplacement attentionnel vers l'information nouvelle [91]. La P3b est provoquée par des stimuli inattendus, rares et pertinents, c'est-à-dire, des stimuli en lien direct avec la tâche à accomplir. Elle est indicatrice des processus mnésiques et de préparation de la réponse motrice [90, 92, 93], témoignant du fait que l'item rare ciblé demande une réponse (par ex. un comptage, ou signalement par pression sur un bouton).

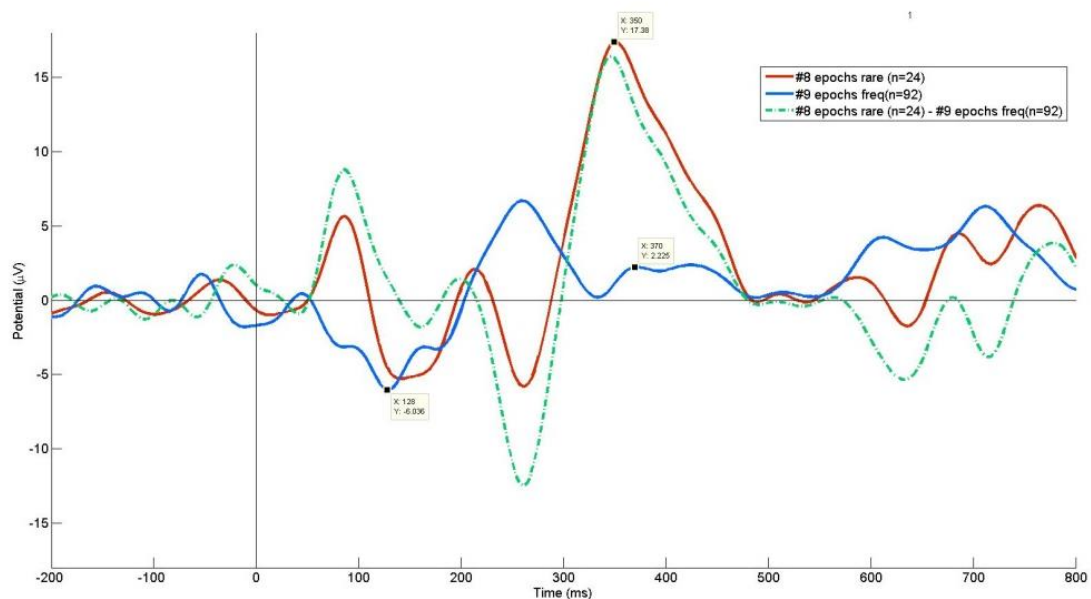


Figure 10. P300 évoquée par des sons fréquents et des alarmes selon la tâche de oddball.

La procédure à partir de laquelle l'onde P300 est la plus souvent étudiée est la tâche de oddball. Le fait que l'item cible soit rare et qu'il requiert une réponse implique la présence de la P3b, et le caractère nouveau procuré par la rareté de l'item distracteur par rapport aux stimuli fréquents procurera une P3a.

La P300 est influencée par la charge de travail, à tel point qu'elle est même utilisée comme mesure de la charge de travail. Par exemple Fowler [42] a réalisé une expérience de simulation de tâche de pilotage, dans les phases d'approche et d'atterrissage, sous différents niveaux de charge. La charge était manipulée en introduisant des turbulences et de l'hypoxie (diminution de l'apport en oxygène). Les pilotes devaient réaliser en plus un oddball visuel et auditif. La latence de la P300 a montré une nette augmentation avec la difficulté, s'accompagnant d'une baisse de performance, à la fois dans la modalité visuelle et la modalité auditive. Ces résultats suggèrent le ralentissement des processus cognitifs et perceptuels par la charge de travail.

Plusieurs études ont montré que l'amplitude de la P300 auditive peut être diminuée en double-tâche audio-visuelle, par rapport à une tâche auditive seule [94-97], et qu'elle est modulée par la charge cognitive [98, 99]. La réduction de la capacité de distraction avec

2.2 Mesures physiologiques

l'augmentation de la charge cognitive réduit l'amplitude P3a, signifiant que moins de ressources attentionnelles sont disponibles pour percevoir et traiter ces stimuli inattendus, ce qui peut mener à terme à la surdité inattentionnelle. Ainsi, la P300 est un indicateur de la charge de travail, mais nous allons chercher à savoir si elle est plus précisément l'indicateur, sous forte charge de travail provoquant l'omission d'alarmes, du traitement cognitif des alarmes.

2.2.3 Oculométrie

L'œil étant un organe « externe » facilement observable en fait une source de mesure très intéressante, mais aussi peu chère (par rapport à la mesure de l'activité EEG par exemple), et comme nous allons le détailler dans la suite, non invasive voire transparente pour l'utilisateur. On peut ainsi mesurer la position du regard, le clignement des paupières, le diamètre pupillaire, mais aussi l'activité électrique des muscles de l'œil pour avoir des informations sur l'attention visuelle ainsi que sur la charge de travail à laquelle est soumis un individu (cf. Figure 11).



Figure 11. A gauche, un eye-tracker Pertech, avec une caméra frontale filmant le champ de vision, et une caméra qui vient filmer l'œil du sujet. A droite, un eye-tracker fixe Tobii, qui se place sous l'écran présentant la tâche.

La rétine contient des photorécepteurs qui détectent la lumière. Ces cellules spécialisées convertissent la lumière en signaux électrochimiques. Ces signaux se propagent le long des fibres du nerf optique vers le cerveau, où ils sont interprétés dans le cortex visuel.

Les yeux se meuvent à l'aide d'un système de six muscles. L'œil humain fonctionne avec trois types de mouvements oculaires : la poursuite lisse (les mouvements que les yeux font pour suivre le mouvement d'un objet), les fixations (maintien du regard à un endroit précis) et les saccades (mouvements d'exploration d'une scène visuelle). Il existe également des mouvements involontaires de l'œil, comme les micro-saccades qui ont lieu, même en fixation, afin de stimuler continuellement les photorécepteurs pour continuer de voir l'objet fixé.

Métriques oculaires possibles

L'oculométrie implique un matériel relativement abordable et peu encombrant. Du point de vue de la neuroergonomie, c'est une technique particulièrement avantageuse, car elle permet d'obtenir des mesures de façon non-invasive, voire quasi-transparente pour l'utilisateur, et en temps réel.

Le suivi du mouvement de l'œil peut fournir des indices du fonctionnement cognitif: l'oculométrie a beaucoup aidé à l'étude des processus cognitifs impliqués dans la lecture et la mémoire [100, 101]. L'oculométrie est également très utile pour la conception de l'interface ainsi que pour des tests d'utilisabilité [102].

Il y a un relatif consensus sur le fait que les mouvements oculaires peuvent mesurer le traitement de l'information [103, 104]. La question se pose de savoir si les mouvements oculaires peuvent indiquer les traitements au-delà du simple encodage visuel de l'information sur les tâches pertinentes [105]. On sait déjà que l'oculométrie peut fournir des indices de l'endroit où l'attention est dirigée sur un affichage visuel. Par exemple, dans des tâches de recherche visuelle ou de surveillance, l'analyse de l'alternance des fixations et des saccades dans diverses régions d'intérêt (appelées ROI), supposée être sous contrôle attentionnel top-down [106], peut révéler les avantages d'une interface pour la recherche d'information ou la prise en compte d'alarmes. La mesure des fixations oculaires peut également révéler la quantité de traitements appliquée à des objets. Le temps passé fixé sur un emplacement peut être considéré comme un indice de l'effort de codage, où de plus longues durées de fixation sont habituellement associées à un plus grand engagement dans l'interprétation ou concernant les représentations de composants dans l'interface de représentations intériorisées [102, 107].

A l'ISAE, un oculomètre a été utilisé pour mettre en évidence l'efficacité d'une contre-mesure pour la tunnellation attentionnelle [108]. Une tâche de contrôle de véhicule à distance a été mise au point. Le scénario introduisait un conflit entre le pilote et son véhicule, à l'issue d'une panne de batterie qui provoquait automatiquement un « retour à la base » du véhicule. Les participants étant en situation de tunnellation attentionnelle ne remarquaient pas la notification de panne de batterie et forçaient le véhicule à continuer sa mission. Une contre-mesure (l'affichage en plein centre de l'interface de la notification de batterie après suppression de l'écran de la caméra de contrôle du véhicule) a été testée. Le groupe bénéficiant de la contre-mesure a démontré un rythme cardiaque moins élevé et a pris la bonne décision (de faire revenir le véhicule à la base), comparé au groupe contrôle sans contre-mesure. Les mouvements oculaires ont permis de mettre en évidence la rapidité de la réaction des participants et l'efficacité du retrait d'information pour faire « décrocher » l'attention. Leur regard se redirige vers les paramètres de la batterie dès la disparition de l'écran de la caméra, avant même l'apparition de la contre-mesure.

En plus des mesures des mouvements oculaires eux-mêmes, d'autres mesures peuvent informer sur le traitement cognitif. Par exemple, la dilatation de la pupille, qui est influencée par l'activité du système nerveux autonome, a montré être sensible à diverses manipulations psychologiques telles que la valeur émotionnelle des stimuli [109, 110], la charge de travail cognitive [111, 112] et de l'excitation [113]. Il a notamment été démontré que le diamètre augmente à mesure que la difficulté d'une tâche s'accroît [114-116]. Selon Beatty [114], la pupille est également sensible à l'effet de l'incongruité de sorte que son diamètre est augmenté. De même, Laeng [117] a montré que le diamètre pupillaire est augmenté par l'effet Stroop. En effet, les analyses des réponses pupillaires ont révélé que les distracteurs non-congruents induisent une forte augmentation de la taille de la pupille alors que les distracteurs congruents induisent une augmentation relativement faible. L'analyse du diamètre pupillaire est donc un bon indicateur de la charge de travail. Cette mesure est néanmoins sensible à de nombreux paramètres de l'environnement, tels que la luminosité, la température, mais aussi la fatigue ou l'excitation.

2.2.4 Autres mesures physiologiques

Réponse électrodermale

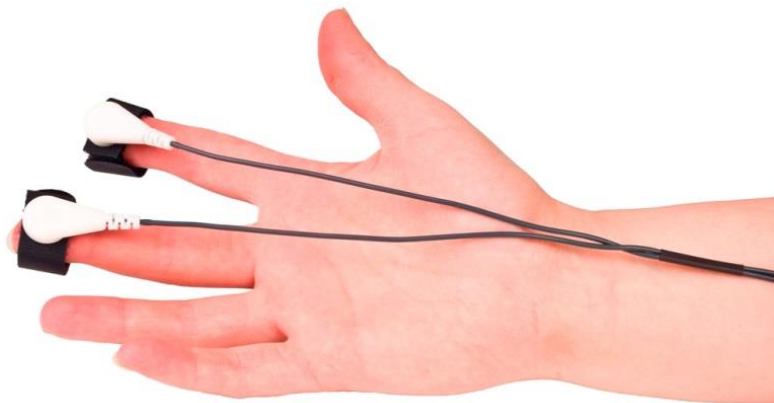


Figure 12. Electrodes pour la mesure de la résistance électrodermale

La réponse électrodermale (RED) est une mesure possible du SNA. La peau possède des glandes sudoripares contrôlées par le SNA [118]. En plaçant deux électrodes à la surface de la peau (classiquement la pulpe de deux doigts), on peut alors mesurer les variations de conductivité entre ces deux électrodes, la conductivité augmente avec l'activation des glandes sudoripares en réponse aux processus émotionnels [119] ou à la charge mentale [120]. Ces changements de l'activité électrodermale sont donc un bon indicateur de l'expérience émotionnelle. L'activité électrodermale possède l'avantage d'offrir un pattern de réponses extrêmement dynamique, avec une latence relativement faible (environ une seconde) et un développement complet relativement rapide (de l'ordre de quelques secondes), ce qui en fait une mesure adaptée pour observer, par exemple, l'impact du traitement successif et rapide d'alarmes auditives. Cette technique a été particulièrement utilisée par l'équipe de Bechara [121] pour mettre en évidence le rôle de l'émotion dans le processus de prise de décision. La réponse électrodermale est néanmoins sujette à des variations dues à l'effort physique, à la pression exercée sur les électrodes ou à la température, ce qui pose problème en situation écologique.

Activité cardiaque

Le système cardiovasculaire étant innervé par les deux branches du SNA, sympathique et parasympathique [122], il fait ainsi l'objet d'une régulation complexe : une augmentation de l'activité de la branche sympathique conduit à une accélération du rythme cardiaque, par exemple lors de fortes émotions positives ou négatives [123, 124], tandis qu'une augmentation de l'activité de la branche parasympathique se traduit par un ralentissement. En plus du rythme cardiaque, il existe des mesures de la variation de l'activité cardiaque, comme la pression artérielle, décomposée en systole (contraction du cœur) et diastole (relâchement), ou la variabilité du rythme cardiaque. Sinha [125] a par exemple montré que la pression diastolique augmentait pendant la colère, alors que la peur et la joie généraient une augmentation de la pression systolique.



Figure 13. Positionnement des électrodes pour la mesure d'un électrocardiogramme.

L'activité cardiaque est également un indicateur de la demande mentale générée par une tâche [126, 127] et peut donner des indications sur la performance.

fNIRS

La spectroscopie proche infra-rouge fonctionnelle (Functional Near Infra-Red Spectroscopy) est une technique de neuro-imagerie non-invasive qui est relativement peu coûteuse, portable et a une bonne résolution spatiale. Cela qui en fait une technique prometteuse pour la recherche [128]. Sa principale limitations provient de son fonctionnement optique par lumière infra-rouge, qui empêche de la placer sur les zones du crane avec des cheveux. Elle se place sur le front, permettant donc une bonne observation du cortex préfrontal, qui est impliqué dans de multiples capacités détectées avec succès par la fNIRS, comme la surveillance des états attentionnels [129], la vigilance [130, 131] et de la divagation attentionnel ou la perte d'engagement [132].

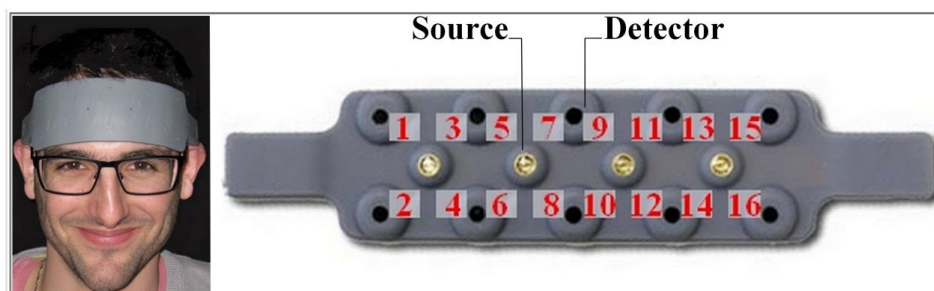


Figure 14. A gauche, un bandeau fNIRS porté. A droite le détail des 4 émetteurs infra-rouge et des 16 détecteurs.

2.3 Mesures comportementales pour la surdité inattentionnelle

Un des enjeux de la neuroergonomie est de concilier les techniques de mesures de l'activité neurale avec des protocoles expérimentaux réalisés en situation réaliste. Ainsi, les liens entre l'activité cérébrale et la performance dans la tâche réalisée peuvent être mis en évidence. Il convient donc, en plus des mesures physiologiques, de procéder à des mesures comportementales permettant d'associer précisément un comportement (par ex. la surdité inattentionnelle) à son corrélat physiologique.

2.4 Mesures subjectives

Les activités de pilotage et de contrôle aérien ont notamment la particularité d'être multitâches : elles impliquent un suivi de différents paramètres de vol, la manipulation de ces paramètres, la communication entre pilotes et contrôleurs, et la réactivité à des alarmes visuelles et auditives le cas échéant. L'attention et les efforts cognitifs sont donc divisés entre différentes sous-tâches, ce qui requiert l'enregistrement des données comportementales (performance et temps de réponse) de l'ensemble de ces tâches.

Dans le cas particulier de la surdité inattentionnelle, la donnée comportementale à obtenir est le signalement ou non de l'alarme auditive, preuve de la perception de l'alarme. Pour cela, nous avons besoin que les opérateurs manifestent leur bonne perception des alarmes, en les signalant. Nous devons notamment utiliser des protocoles oddball actifs (nécessitant une réponse de la part de l'opérateur), pour déterminer quelle alarme est entendue, et laquelle ne l'est pas, contrairement à une tâche de oddball passif où le décompte des alarmes a posteriori ne permet pas de remonter à cette donnée. La méthode la plus écologique et la plus simple est de demander aux participants de signaler les alarmes entendues en appuyant sur un bouton. En effet le signalement verbal de l'alarme ne permet d'avoir une mesure plus objective et systématique des temps de réaction par exemple.

Le taux de fausses alarmes, les temps de réaction et leur variabilité peuvent également être analysés dans le but de dissocier une baisse de la priorisation du traitement des sons ou un manque de temps pour répondre d'une véritable situation de surdité inattentionnelle. En effet, un changement dans les priorités des participants (la tâche de pilotage devient plus prioritaire quand la charge de travail augmente par exemple) ou dans le seuil de détection pourrait également diminuer le taux de détection des alarmes auditives. L'analyse du taux de fausses alarmes permet de déterminer le changement ou non du seuil de détection des participants. S'il reste constant alors que le nombre d'alarmes manquées augmente, cela démontre que les participants ne changent pas leur niveau de critère de réponse et ne sont pas plus focalisés sur la tâche principale, ce qui aurait conduit à une diminution à la fois du taux d'alarmes signalées et du taux de fausses alarmes. L'analyse des temps de réaction permet de s'assurer que l'augmentation de charge cognitive ne vient pas surcharger les participants au point de ne plus leur laisser suffisamment de temps pour signaler les alarmes, ce qui se traduirait par une augmentation des temps de réaction. Dans ces conditions, se nombre d'alarmes non déclarées pourra être attribué à la surdité inattentionnelle, augmentant avec la charge cognitive.

2.4 Mesures subjectives

Le NASA TLX (Task Load Index, annexe 1) est un outil pour définir la charge perçue par un participant selon six échelles : la demande mentale, la demande physique, la demande temporelle, la performance, l'effort et la frustration. Le score est noté de 1 (demande faible)   20 (demande élevée), avec le cas particulier de la performance, 20 correspondant à l'échec et 1 à la réussite [45].

Le NASA TLX permet d'obtenir une mesure de la charge mentale subjective, ressentie par les opérateurs. Cette indication est essentielle dans l'approche neuro-ergonomique. Dans certains cas (comme dans l'expérience 2, CHAPITRE 4), l'analyse de la performance et des résultats comportementaux peut être en désaccord de l'évaluation subjective. Les opérateurs ne sont pas forcément conscients des bénéfices d'un nouvel outil, d'où la nécessité de mesures objectives. Mais l'avis des opérateurs sur l'utilisation d'un nouveau

ystème ou d'une nouvelle interface ne doit pas être négligé, car ils sont les plus à même d'évaluer l'envie d'utiliser le système. Leur acceptation est primordiale pour une utilisation optimale des systèmes, d'autant plus dans des contextes critiques de sécurité.

PARTIE 2.

Résultats expérimentaux

CHAPITRE 3

Première expérience : la P300 comme
indicateur de la surdité inattentionnelle

3.1 Fiche descriptive synthétique de l'article 1

Il s'agit pour cette première expérience, de mettre en évidence un marqueur caractéristique de la surdité inattentionnelle (ou, à l'inverse, une preuve du traitement cognitif d'une alarme). Une fois ce marqueur identifié, il sera possible de concevoir de futures expériences pour comparer des alarmes auditives, et de mettre en évidence des conditions ou des scénarios qui sont particulièrement propices à la surdité inattentionnelle. Mais le premier pas est bien de trouver un indicateur pertinent, mesurable dans le cadre d'une expérience en laboratoire. On anticipe dès à présent un problème de portabilité, en simulateur ou en conditions réelles, mais le premier pas pour de futures études est d'identifier des indicateurs objectifs de la surdité inattentionnelle.

3.1 Fiche descriptive synthétique de l'article 1

3.1.1 Introduction

Comme nous l'avons présenté dans la première partie de cette thèse, la mesure physiologique la plus directement reliée au traitement cognitif d'une information auditive semble être les ERPs N100 et P300. Une première étape dans ce travail de recherche a donc consisté à déterminer dans quelle mesure la N100 et la P300 sont affectées en situation de surdité inattentionnelle. L'analyse de ces deux composantes a permis d'indiquer si les variations de la charge cognitive dans une tâche donnée affectent les processus pré-attentionnels précoces ou les processus plus tardifs.

Objectifs

Nous avons poursuivi trois objectifs principaux dans cette étude. Tout d'abord, nous avons cherché à concevoir un protocole expérimental qui provoque un nombre suffisant d'occurrences du phénomène de surdité inattentionnelle pour chaque participant, permettant d'atteindre une puissance statistique satisfaisante pour évaluer ses effets au niveau électrophysiologique. Deuxièmement, nous avons tenté d'observer l'apparition de la surdité inattentionnelle en fonction de la variation de charge cognitive. Un mélange aléatoire des conditions de faible charge et de charge élevée se rapprochait d'une situation de pilotage écologique et permettait d'éviter les biais. Enfin, nous nous sommes concentrés sur la concomitance entre la surdité inattentionnelle et la diminution de l'amplitude de la P300. Pour cela, nous avons effectué des mesures de l'EEG en continu, au cours d'une tâche de prise de décision de pilotage simplifiée -- mais plausible -- dans laquelle les participants devaient signaler à la fois des signaux visuel et auditif déviants. Les alarmes auditives étaient présentées selon la tâche de oddball.

Hypothèses

Les hypothèses envisagées pour cette expérience sont : 1) qu'une augmentation de la charge cognitive provoque une diminution du taux de détection d'alarmes (sons déviants), 2) que des composantes ERP (et les processus de traitement cognitif correspondant) sont affectées par la charge cognitive, et 3) que les effets mesurés sur ces composantes sont directement corrélés au taux de surdité inattentionnelle.

3.1.2 Matériel et méthode

La forme finale de la tâche expérimentale est une série de 400 essais successifs, contenant chacun une vidéo de situation d'atterrissage, suivie d'un écran d'attente de réponse de 2 s pendant laquelle le participant devait répondre. Il devait apporter sa

réponse à la situation d'atterrissage qui lui est présentée (selon les règles détaillées dans l'article 2). Un son, standard ou déviant (alarme), était joué pendant chaque vidéo. Les participants devaient signaler les alarmes en appuyant sur un bouton spécifique pendant la fenêtre de réponse. Deux niveaux de charge étaient programmés et s'alternaient de manière aléatoire (cf. figure 6). Pour le niveau de charge faible, les indicateurs étaient affichés en verts, et le critère d'atterrissage était plus simple. Pour la charge élevée, les indicateurs étaient affichés en rouge et il y avait des vérifications à faire entre les trois types de capteurs pour déterminer quelle était la règle à appliquer (cf. figure 7).

A la suite de la série expérimentale, une série de contrôle de 200 essais était réalisée, pour obtenir les performances et amplitudes ERP de référence des participants, avec uniquement la tâche de oddball auditif. Les participants faisant plus de 15% d'erreur d'identification des sons lors de cette tâche contrôle ont été éliminés de l'étude.

Procédure

Voici la procédure suivie pour la conduite de l'expérience chez les 20 participants :

- Réponse au questionnaire de fatigue de Pichot et passage du test PASAT pour évaluer la mémoire de travail (cf. ANNEXE I) ;
- Présentation approfondie de la tâche expérimentale (tâche de détection et tâche d'atterrissage) et du matériel ;
- Entraînement à la tâche sur deux séries de 20 essais, qui présentaient toutes les combinaisons se trouvant dans la véritable expérience ;
- Ecoute des deux types de sons sans tâche concurrente ;
- Mise en place du matériel EEG, EOG et GSR, et test ;
- Lancement de la tâche expérimentale : 400 essais (40 min) ;
- Réponse au Nasa TLX, et évaluation détaillée de leur performance aux tâches d'atterrissage et de détection des alarmes auditives et visuelles (cf. annexe 1).
- Lancement de la tâche de contrôle : 200 essais (20 min) ;
- Retrait du matériel ;
- Réponse au questionnaire de latéralité.

EEG Biopac

Pour acquérir le signal EEG, nous avons utilisé le bonnet à 19 électrodes de taille medium de Biopac, le CAP100C. Les 7 électrodes utilisées étaient : Fz (frontale), Cz (centrale), Pz (pariétale), T4 et T7 (temporales), O5 et O18 (occipitales) (cf. annexe 3 pour les détails sur l'acquisition et le traitement des données Biopac).

3.1.3 Résultats comportementaux

Nasa TLX

On remarque la demande mentale ressort particulièrement. Elle a été notée en moyenne à 14,27 (SD = 2,69) pour la double tâche.

Tâche d'atterrissage

Le taux de bonnes réponses à la tâche d'atterrissage dans la condition de charge faible (M = 96,4%, SD = 2,7%) était plus élevé que le taux de bonnes réponses dans en charge élevée (M = 90,0%, SD = 3,6%). Nous avons également observé une diminution du taux de détection de la cible visuelle lorsque la charge augmente. Cet effet correspond à un taux de détection nettement plus grand dans les essais de charge faible (M = 87,7%, SD = 13,6%) que dans les essais de charge élevée (M = 75,0%, SD = 21,0%).

3.1 Fiche descriptive synthétique de l'article 1

Tâche de détection du son rare

Le taux d'alarmes non signalées a augmenté avec la charge de la tâche d'atterrissage. Il est plus faible dans la condition contrôle ($M = 3,0\%$, $SD = 4,7\%$) qu'en double tâche en charge faible ($M = 21,7\%$, $SD = 21,5\%$), et plus faible en charge faible qu'en charge élevée ($M = 31,9\%$, $SD = 26,6\%$).

Les temps de réponse aux alarmes étaient significativement plus faibles dans la condition contrôle ($M = 0,530$ s, $SD = 0,124$ s) qu'en faible charge ($M = 1,047$ s, $SD = 0,215$ s) et qu'en charge élevée ($M = 1,170$ s, $SD = 0,362$ s). Enfin, il n'y avait pas de différence significative dans les temps de réaction entre une faible charge et une charge élevée ($p = 0,38$).

Les tests de rang signé ne montrent aucune différence dans le nombre de sons déviants non signalés à travers le temps, que ce soit pour la charge faible ou la charge élevée.

Enfin, le taux de fausses alarmes, mesuré pour les deux cibles visuelles et auditives, n'a montré aucune différence significative entre faible charge ($M = 3,2\%$, $SD = 2,1\%$) et forte charge essais ($M = 3,8\%$, $SD = 2,1\%$) dans la double tâche.

3.1.4 Résultats physiologiques

Les deux conditions contrôles ne montrant pas de différences significatives, elles ont été moyennées en une unique condition « contrôle ».

N100

Aucun effet de la charge cognitive n'a été trouvé sur l'amplitude de la N100.

P300

Les analyses ont été faites principalement sur la P300 évoquées par les sons rares, au site Pz. Les analyses ont montré que la P300 observée dans la condition de contrôle ($M = 6,08$ mV, $SD = 7,32$ mV) était significativement plus élevée que dans la condition de faible charge ($M = 1,62$ mV, $SD = 4,58$ mV); et la P300 dans la condition de faible charge significativement plus élevée que dans la condition de charge élevée ($M = -0,76$ mV, $SD = 2,62$ mV), (HSD, $p < 0,05$).

Nous avons aussi étudié la corrélation entre les alarmes non signalées et l'amplitude de la P300. La corrélation était significative de l'état de charge faible ($r = -0,79$, $p < 0,001$) ce qui signifie que les participants avec un grand nombre de sons déviants non signalés avaient aussi une P300 plus faible. La corrélation n'était pas significative dans la condition de charge élevée ($r = -0,45$, $p = 0,09$).

3.1.5 Discussion

La véritable contribution de cette étude résulte dans la mise en parallèle de résultats comportementaux et physiologiques pour tenter de caractériser directement un état de surdité attentionnelle. Là où la surdité inattentionnelle n'était étudiée que de façon comportementale, par questionnaire à la suite d'un essai unique [16, 67], nous avons introduit une mesure de l'activité cérébrale afin de caractériser électrophysiologiquement l'état de surdité inattentionnelle d'un opérateur. La P300 est clairement un indicateur de la charge de travail gérée par un opérateur et de ses ressources attentionnelles disponibles. De plus, nous avons mis en évidence une corrélation directe entre l'amplitude de la P300 et le nombre d'alarmes manquées. Cette diminution de la P300 peut être exploitée en tant que précurseur pour déterminer la susceptibilité d'un individu à une

mauvaise détection des alarmes, ou pour comparer des designs d'alarmes auditives qui conserveraient mieux que d'autres l'amplitude de la P300 et donc la capacité des opérateurs à prendre conscience des alarmes.

Un autre apport spécifique de ce travail est la mise en place d'un protocole permettant d'étudier plusieurs occurrences du phénomène de surdité inattentionnelle pour un même participant, et non plus un essai unique non reproductible comme dans les études comportementales menées jusqu'à présent [16].

Limites

Le nombre de sons omis dépendant énormément du participant, et la durée de l'expérience étant limitée par le matériel, il n'est pas possible d'étudier uniquement les ERPs élicités uniquement par les alarmes manquées (pour les comparer aux alarmes traitées). Nous observons malgré tout une corrélation entre le nombre d'essais manqués par les participants et l'amplitude moyenne de leur P300, mais des expériences complémentaires doivent être menées afin de préciser cette corrélation et de pouvoir l'exploiter dans la détection d'un état de surdité attentionnelle chez un pilote.

De plus, les deux niveaux de difficulté dans la tâche d'atterrissage comprenaient à la fois une charge visuelle et cognitive. Il n'était donc pas possible de mettre en évidence le ou les facteurs précis qui favorisaient l'apparition de la surdité inattentionnelle.

3.2 Article 1 (publié dans le journal PLOS ONE)

P300 event-related potential as an indicator of inattentive deafness?

Louise Giraudet¹, Marie-Eve St-Louis², Sébastien Scannella¹, Mickaël Causse¹

¹DMIA, ISAE, Université de Toulouse, 10 av. E. Belin, 31055 Toulouse Cedex 4, France

²École de Psychologie, Université Laval, 2325, rue des Bibliothèques, Québec, Canada G1V 0A6

Abstract

An analysis of airplane accidents reveals that pilots sometimes purely fail to react to critical auditory alerts. This inability of an auditory stimulus to reach consciousness has been coined under the term of inattentive deafness. Recent data from literature tends to show that tasks involving high cognitive load consume most of the attentional capacities, leaving little or none remaining for processing any unexpected information. In addition, there is a growing body of evidence for a shared attentional capacity between vision and hearing. In this context, the abundant information in modern cockpits is likely to produce inattentive deafness. We investigated this hypothesis by combining electroencephalographic (EEG) measurements with an ecological aviation task performed under contextual variation of the cognitive load (high or low), including an alarm detection task. Two different audio tones were played: standard tones and deviant tones. Participants were instructed to ignore standard tones and to report deviant tones using a response pad. More than 31% of the deviant tones were not detected in the high load condition. Analysis of the EEG measurements showed a drastic diminution of the auditory P300 amplitude concomitant with this behavioral effect, whereas the N100 component was not affected. We suggest that these behavioral and electrophysiological results provide new insights on explaining the trend of pilots' failure to react to critical auditory information. Relevant applications concern prevention of alarms omission, mental workload measurements and enhanced warning designs.

Keywords: P300, event-related potentials, neuroergonomics, inattentive deafness

3.2.1 Introduction

In aeronautics, auditory alerts are known to present various advantages in emergency situations as compared to visual stimuli. They provide information for pilots without requiring head/gaze movements [28] and provoke faster reaction times [27]. Yet, the analysis of air safety reports reveals that a significant number of accidents are due to a lack of reaction or misperception to auditory alarms [133]. Two reasons related to cognitive biases are usually proposed to account for such a lack of response. The primary explanation is the 'cry-wolf effect' [4] resulting from a high false-positive rate from the alerting system which leads to pilots mistrusting alarms [134-136], especially under high workload conditions [30]. The second explanation is that the aggressive, distracting, and disturbing nature of auditory alarms [28, 137] can considerably increase pilot stress levels during warning events [138]. In fact, the immediate reaction for many pilots is to find a way to consciously silence the noise, rather than analyze the meaning of the alert. Nevertheless, these reasons are not sufficient to fully explain the misperception of critical auditory warnings as often reported in accident analyses [139] and observed in flight simulators [62]. A complementary explanation is the role of the sustained mental

processes engaged in the cockpit. Despite the impressive complexity and processing power of the human brain, it exhibits severe capacity limits in information processing; the neural basis of which has been shown in neuroimaging studies [140, 141]. In addition, goal-directed behavior requires focusing attention on goal-relevant stimuli while ignoring irrelevant distractors. The occurrence of an alarm during a nominal period of piloting is often unexpected for the crew and unrelated to their current task.

Moreover, there is evidence that tasks involving a high perceptual load consume most of the attentional capacity, leaving little or none remaining for processing any additional visual information [47]. Consequently, high perceptual load contexts tend to prevent the processing of unexpected and task-irrelevant information (e.g. alarms) and facilitate various forms of inattentive blindness [12]. However, this propensity to remain unaware of unexpected, though fully perceptible stimuli, is not limited to vision. Indeed, unexpected salient sounds can remain unnoticed under attention-demanding settings [142-145]. Although less well-known than its visual counterpart, this inattentive deafness phenomenon [67] is likely to have important consequences for safety-critical situations as pilots often have to deal with auditory alarms whilst being overloaded with various information. In the literature, two experimental paradigms address this failure of attention: the inattentive deafness paradigm and the interference paradigm. In the inattentive deafness paradigm, the ability to perceive an unexpected sound during a task is directly assessed by the participant's behavioral response to it. In the interference paradigm, the subject is asked to ignore a distractor stimulus while performing an ongoing task. The available resources of the attentional system are measured by the level of interference caused by the distractor stimulus on the ongoing task.

Interestingly, Macdonald and Lavie [16] demonstrated in the inattentive deafness paradigm that participants involved in a visual discrimination task were subject to inattentive deafness. The inattentive deafness rate was further increased when the visual task involved a high level of perceptual load compared to a moderate perceptual load. It appears that engaging in a task under high perceptual load may lead to a decline in the probability of processing an auditory stimulus. While this previous study concentrated on the influence of perceptual load on inattentive deafness, some other researchers focused on the effect of cognitive load by using the interference paradigm. For example, Berti and Schröger [146] analyzed how cognitive load in working memory alters the vital automatic attentional orientation toward unexpected stimuli by using an interference paradigm. The behavioral results showed that the ability to automatically process supplementary auditory stimuli (distraction effects) was still present but reduced markedly with higher task demands. SanMiguel, Corral, & Escera [147] found similar results: distraction caused by novel sounds was reduced in a 1-back working memory condition versus a no-memory control condition. According to the authors, involuntary attention allocation is under the control of top-down mechanisms that are affected by cognitive load.

Classically, the inattentive deafness paradigm manipulates perceptual load, whereas the interference paradigm often manipulates cognitive load. For example, in aeronautics, the complexity of cockpits generates a high cognitive load and alarms require an active immediate response. Therefore, we combined an inattentive deafness paradigm, where explicit responses to alarms have to be made, with cognitive load variations (manipulation generally used in interference paradigm).

Uncovering the neural correlates of inattentive deafness

The brain activity involved in processing auditory information has been extensively studied using Electroencephalography (EEG) techniques to measure Event-Related Potentials (ERPs), even in an aeronautical context [148-151]. The P300 component, one of the most commonly studied ERPs, reflects the detection of an expected but unpredictable target (the oddball) in a stream of stimuli [90]. It can be elicited by the “oddball” paradigm. The P300 is typically observed in a time window between 300 to 600 ms after the auditory stimulus onset and reflects the occurrence of cognitive and attentional processes (c.f. [90] and [152] for a detailed review). When attentional focus deviates from the target, the P300 amplitude significantly decreases [97]. This link indicates that the P300 component is an excellent candidate to determine whether an auditory stimulus has broken through the attentional barrier. Importantly, it is generally accepted that a distinction can be made between two subcomponents of the P300, namely the novelty P3 and the target P3 (also called P3b, or “classical” P3). Novelty P3 is a large positive deflection with a fronto-central scalp distribution that is elicited by novel, non-target stimuli and that mainly reflects involuntary attention shifts to changes in the environment [153, 154]. It is functionally related to another subcomponent called P3a, that seems to be more specifically related to deviant auditory non-target events [155]. In contrast, the P3b, has a more posterior-parietal scalp distribution and a somewhat longer latency than novelty P3 and P3a. The P3b has been regarded as a sign of processes of memory access that are evoked by evaluation of stimuli in tasks that require some form of action like a covert or overt response, ecologically closer to a real alarm occurring in a cockpit [156].

Several studies have revealed that the auditory P300 amplitude might be lower in audio-visual dual-tasks compared to a singular auditory task [94-96, 157]. Auditory ERPs modulations by cognitive load were also observed [98, 99, 146]. In those studies, the researchers recorded auditory ERPs responses to deviant tones while participants had to perform a visual task (interference paradigm). The reduced openness to distractors with increasing cognitive task load reduced the P3a amplitude, i.e. less attentional resources were available to perceive unexpected stimuli, potentially leading to inattentive deafness.

Another commonly studied ERP is the auditory N100. This component is considered to reflect auditory cortices activity (eg. [86]) and early analysis of stimuli characteristics such as intensity [87]. Traditionally, considered too early to be impacted by top-down influences, several studies showed that some cognitive processes, such as attention [158], can also affect its amplitude. Qu et al. [88] showed that auditory N100 evoked potential following task irrelevant auditory clicks was affected by the visual working memory load during a face recognition task. According to the authors, auditory and visual pieces of information interact in the prefrontal cortex, which in turn modulates working memory processes and selective attention in a cross-modal manner.

To the best of our knowledge, the relationship between the inattentive deafness phenomenon and P300 amplitude has never been explicitly investigated. The analysis of both N100 and P300 component modulations can indicate whether variations of cognitive load in a given task affect early pre-attentional or later attentional processes.

Objectives

There are three main objectives in this work. Firstly, we aimed at designing an experimental paradigm that allowed a sufficient number of occurrences of the inattentive deafness phenomenon within each participant as to reach a satisfactory

statistical power to assess its effects at the electrophysiological level. In the Macdonald and Lavie study [16], only one occurrence of the inattentive deafness phenomenon was successfully reproduced, further attempts failing due to the impact of the pre-exposure to the sound. Secondly, we attempted to observe the occurrence of inattentive deafness with respect to contextual variation in cognitive load. Interleaved low load and high load trials would be closer to an ecological piloting situation and would prevent differences in the overall level of motivation, attentional set, vigilance, task engagement, or performance strategies, which are likely to occur when participants perform long series with the same load context (i.e. block design). Finally, we strived to examine the possible concomitance between inattentive deafness and P300 amplitude modulations. For this purpose, we performed EEG measurements during a simplified but plausible aviation decision-making task in which participants were asked to take into account both visual and auditory signals. Auditory signals were based on the oddball paradigm.

To summarize, the experiment's key points are the following: we aim to test 1) whether an increase in cognitive load provokes a decrease in the alarm detection rate (deviant sounds), and 2) which of the ERP components (and corresponding processing stages) are affected by cognitive load.

3.2.2 Method

Ethics Statement

The experiment received the ethics committee approbation CERUL (Comités d'Ethique de la Recherche avec des Etres Humains de l'Université Laval) 2010-028. Participants were given full information about the experimental protocol, received monetary compensation, and an informed written consent was obtained before participation.

Participants

Sixteen right-handed healthy male volunteers (mean age = 20.9 years, SD = 1.22) were recruited at Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace (ISAE) for this study. All participants were French undergraduate students; none of them had a history of neurological disease, psychiatric disturbance, substance abuse, or taking psychoactive medications. One participant was excluded because he demonstrated an alarm detection rate below 95% during the oddball control condition. All participants went through the same procedure, which began with a fatigue assessment using Pichot's fatigue scale [159]. Participants with a score over 22 (excessively tired) would have been excluded. However, all scored below this threshold. Next, they performed the Paced Auditory Serial Addition Test (PASAT, [160]) to assess their working memory performance. No participant obtained a prohibitive score in this test (below 35% for the PASAT 3" or below 23 for the PASAT 2"). Finally, they completed a laterality test (Edinburgh Handedness Inventory, [161]) to confirm that they were right handed. This was a necessity with the experimental set up.

Tasks

Two different tasks were used in this study: an aviation decision-making task (landing task) and an auditory task (oddball task). The combination of both tasks is called *dual-task scenario*. The unique performance of the oddball task is named *control scenario*. The landing task had two levels of difficulty: interleaved low load trials and high load trials. We thus defined three load conditions: the control condition, the low load condition and the high load condition.

3.2 Article 1 (publié dans le journal PLOS ONE)

The landing task. Correct response rates in landing and visual alarm detection rates were the dependent variables. The participants were submitted to a series of trials that consisted of a 2 to 4.5 second video clip reproducing a landing situation, followed by a 2 second response time window during which they had to respond if they would authorize the landing or not by pressing a button (see Figure 15). During the videos, a Primary Flight Display (PFD) inspired from plane cockpits was presented with various indicators: the heading (“Cap”), the magnetic declination, and the wind speed (“Vent”) were located in the upper left corner. The magnetic declination had to be added to the heading. All these indicators were static during the video. In addition, two moving cursors representing an Instrument Landing System (ILS) were displayed: one on a vertical axis and the other on the horizontal axis. During the response window, the PFD instrument was removed to indicate the beginning of the response window, and the ILS cursors were frozen but still displayed on the screen. In order to provide the participants with complete information for the landing decision, all other indicators were also displayed. Importantly, participants were asked to decide whether the landing was possible or not according to the indicators and the final position of the cursors. Figure 16 presents the rules for landing decision depending on the cursors and indicators. The rules varied depending on the cognitive load level of the trial. In the low-load trials, the indicators located on the upper left corner appeared in green and did not show any potential problems. They clearly indicated a perfect nominal heading, no magnetic deviation, and no wind. Hence, the decision to land relied solely on the two cursors, which had to be located between -2 and +2 on the arbitrary scale. In the high-load trials, the indicators’ values appeared in red, i.e. they showed a degradation of the aircraft status. The distance between the two cursors and the center of their respective axes became more conservative the larger the deviation of the indicators from their nominal values (Figure 16Figure 15). During the response time window, participants responded by pressing the response button for possible landing (right) or no landing (left).

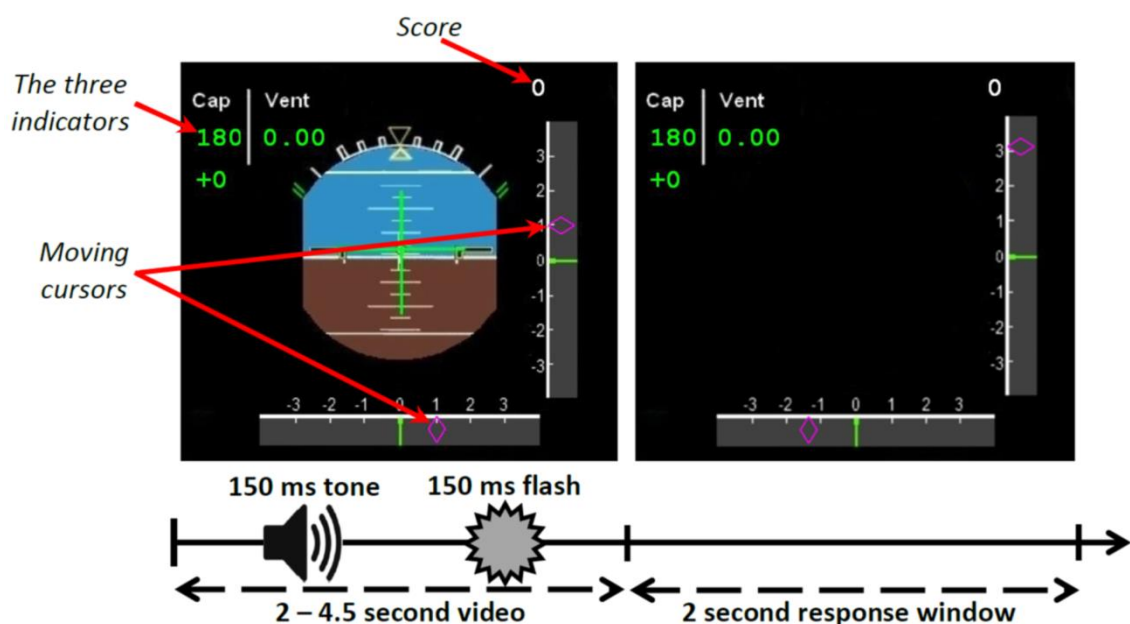


Figure 15. Diagram of the scenarios' process. First a 2 to 4.5-second video was displayed, during which a sound was played and a colored circle displayed, followed by a 2-second response time window. The 3 indicators are in the upper left corner, the score to the landing task in the upper right corner.

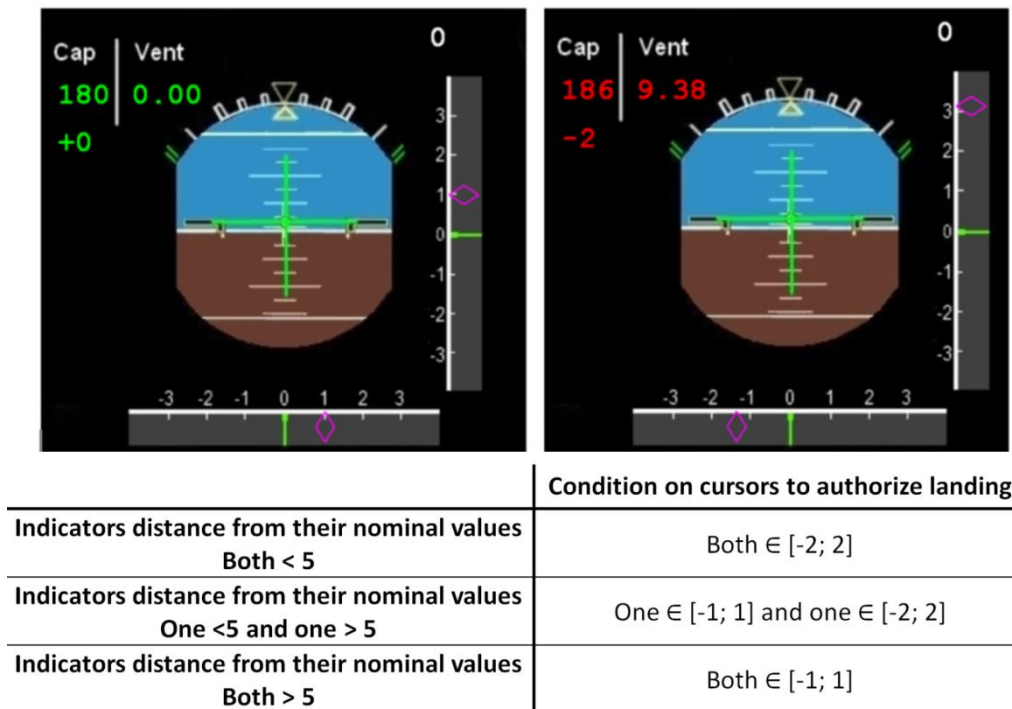


Figure 16. Illustration of the two landing task difficulty levels and the table of rules for landing. On top, a low load landing task video on the left, and a high load landing task video, on the right. In the high load condition, indicators appeared in red. Below, the rules for deciding whether it was possible or not to land in the landing task.

To further increase the visual load associated with the landing task, a colored circle was displayed for 150 ms during both low load and high load trials, at a random time, during the first time window. This circle was either green (probability = 0.9) or red (probability = 0.1) and equally likely to be displayed on the right or on the left of the screen during all cognitive load trials. A red circle represented a visual alarm. The participants were asked to report this alarm during the response window, after answering to the landing task, by pressing the central button of the response box.

An ongoing tally of the correct landing task score was displayed on the upper right corner of the PFD (see Figure 15). For each correct landing response, the score increased by 1 point. When participants missed a response, or made an incorrect response, this score remained the same (no addition or subtraction). The score system was used to engage and motivate the participants. Low and high load trials of the landing task were interleaved throughout the trial series and were equally likely to occur. We did not change the design of the auditory alerts across the levels of difficulty of the landing task. Changing the design of a sound may result in the attentional set being more or less clearly focused on some characteristics of the sound [162]. Finally, we chose to interleave the two cognitive loads conditions within the same run instead of creating blocks of the same difficulty. This decision prevented the use of response strategies as the participants could not predict the load of the next trial. The random variation of the cognitive load within the same run is close to an ecological piloting situation where the occurrence of alerts is unpredictable.

The oddball task. This task consisted of a classical oddball sound series. Reaction times (RTs) and percentage of correctly reported deviant tones were the dependent variables in this task.

During the video clip of the landing situation, one of two 50 dB (SPL) tone types lasting 100 ms was randomly played between 500 ms after the start and 500 ms before the end of the first time window. The tone was either standard (frequency = 1900 Hz, $p = 0.8$) or deviant (frequency = 1950 Hz, $p = 0.2$). The frequencies were chosen from the study of P300 components conducted by Kolev et al. [163]. The tones were clearly distinctive and perceptible from the white noise (as assessed during the control condition). Participants were asked to report the alarm by pressing a button during the response-window following the short video. They were asked not to press any buttons if the standard tone was played. During the response window, participants were instructed to respond to the landing task at first, and then to report the potential alarm. The 2-second response window elapsed independently of the response. We separated the first time window from the response time window to avoid all motor responses when tones were played. A white noise at 50 dB (SPL) was played continuously during the task. The deviant tones were never played when a red circle (visual alarm of the landing task) was displayed in the same trial. As a consequence, only one critical event (a deviant tone or a red circle) occurred and had to be reported per trial.

Scenarios

Participants had to go through two scenarios: the first one was the dual-task scenario, during which they had to perform both tasks (landing task and oddball task simultaneously), and the second one was the control scenario, during which they only had to perform the oddball task while the landing task was displayed but to be ignored.

The dual-task scenario. Participants responded to a set of 400 trials. This scenario assessed the participants' ability to detect the deviant tones (oddball task) while performing the landing task in parallel. To avoid effects of attentional set, an equal emphasis was placed on the aviation decision-making task and the classical oddball task across the two levels of difficulty. Attentional set is a preparatory state of the information processing system that prioritizes stimuli for selection based on attended features [164]. It is linked to endogenous (top-down) processes [165]. Manipulation of the task load is supposed to exert exogenous (bottom-up) effects on participants' performances. Attentional set may act as a confounding factor if different instructions are provided with respect to the processing load level – participants may be inclined to focus more on one of the concurrent tasks at the expense of the other task. In this case, the diminution of performance on the other task may be related to a reduced priority rather than differences in the availability of processing capacity.

The control scenario. In the control scenario, participants responded to a set of 200 trials to obtain their nominal behavioral and electrophysiological responses to the auditory stimuli. The landing task was also displayed on the screen but participants were instructed not to pay attention to the landing task, but rather to fixate on the central green cross of the PFD and to report the deviant tones (oddball task).

Procedure

The whole procedure lasted 150 min, including 30 min to install the EEG sensors and 60 min of EEG recording (Figure 17). First, we asked to complete the behavioral questionnaires (15 min). Next, participants were trained for the three experimental

conditions using two sets of 20 trials. Here, we trained participants for all possible situations that could occur during the experiment. Importantly, participants had to demonstrate their ability to detect each type of alarm (auditory and visual). Once competency was achieved, the EEG electrode cap was placed as well as the Electro-OculoGraphic (EOG) electrodes (blinks or saccades detection). In the main experiment, participants were seated in a comfortable reclining armchair, placed in a dimly lit, in a sound-dampened room. They were instructed to keep their forearms stable on the chair's arms, with their two hands resting on the central response pad. The dual-task scenario had 400 experimental trials and lasted 40 minutes. Immediately after the main experiment, participants filled out the NASA Task Load Index (NASA TLX, [41]) questionnaire. This questionnaire gave us an evaluation of the subjective mental demand elicited by the dual task. Finally, participants finished the experiment with the 200 trials control scenario (20 min).

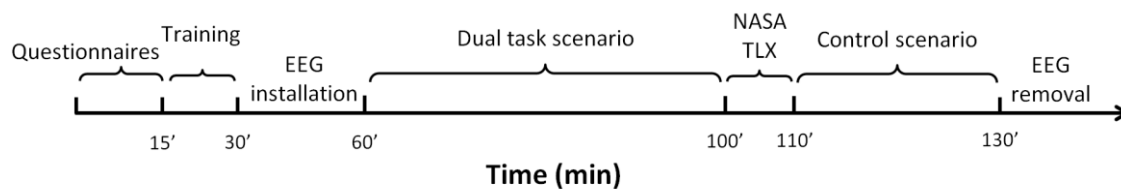


Figure 17. The procedure timeline.

EEG recordings and pre-processing

EEG data was continuously recorded with a Biopac EEG system (BIOPAC Systems, Inc. 42 Aero Camino Goleta, CA 93117). Prior to the experiment, a 19-electrode cap (CAP100C) was placed on the participant's head. Eight electrodes sites were recorded, distributed throughout the brain volume according to the International 10/20 system: Fz (frontal), Cz (central), Pz (parietal), T3 and T4 (temporal), O1 and O2 (occipital), and the ground electrode. The Biopac was connected by parallel cables with the experimental computer in order to mark trial onsets on EEG data. Three EOG electrodes were placed to the left, right, and above the eyes. Artifacts created by eye movements were removed in real-time from the cerebral signal with *Acqknowledge 4.0* (BIOPAC Systems) EOG artifacts removal function. Impedance of the cap electrodes was kept below 5 k Ω . Signals were recorded with a 0.1 Hz high-pass filter (6 dB/Oct) and a 49 Hz low-pass filter (18 dB/Oct). The sampling rate was 500 Hz with a 16-bit A/D conversion.

Offline data processing

EEG data analysis was performed using EEGLAB 11.0.3.1b [166] running under MATLAB 7.1 (The Mathworks, Inc.). EEG signals were segmented in each trial to obtain epochs starting from 200ms before the stimulus onset until 1000ms after stimulus (baseline -200 to 0 ms). The EEG was low-pass filtered at 30 Hz (IIR, attenuation: 40 dB, transition interval: 1 Hz) filter. Data rejection was performed to remove epochs not fitting in a [-100 μ V, 100 μ V] window. For the low load dual-task condition, 200 ERP trials were administered for each participant, and a mean of 182.2 trials were retained after artifact rejection. For the high load dual-task condition, 200 trials were administered for 183.4 retained, and for the control condition, 200 trials were administered for 183.8 retained. Averaged ERPs were then independently calculated for each channel and condition. The time window for the average amplitude of the P300 was determined both from visual

inspection and from results of significant one-way ANOVA (factor “type of tone”, standard vs. deviant tones) of consecutive 50-ms latency windows from 370 to 620 ms post stimulus, resulting in a 520 to 570 ms time window. The same methodology was applied to the initial time window, 100 ms to 250 ms post-stimulus for the N100 component, with no 50-ms window showing a significant result. For subsequent N100 analyses the final time window for the N100 component was 100 ms to 250 ms (according to literature and visual inspection).

Statistical analysis

All data was analyzed with Statistica 7.1 (StatSoft ©). Mean percentage of correct responses to the landing task, mean percentage of unreported auditory alarms, the false alarm rate as well as mean reaction times (RT) for the auditory alarm detection were analyzed. In addition, mean auditory N100 and P300 amplitudes were calculated for the three task conditions. No ERPs analysis was performed on the visual stimuli. Finally, NASA TLX scores on a range of 1-20 were collected after the participants had completed the dual task.

Behavioral analyses. We performed Kolmogorov–Smirnov goodness-of-fit test in order to test against normal distribution for the percentage of alarm detection within the control and the dual-task scenarios. Since both variables were not normally distributed, we chose non-parametric tests (Friedman’s ANOVA and Wilcoxon signed-rank tests for post-hoc comparison) to examine the effects of the cognitive load on the alarm detection rate.

Correct response rate of the landing task was assessed by a 2 x 2 ANOVA with within-subjects factors “cognitive load” (low vs. high) and “type of tone” (standard vs. deviant). The main goal of this analysis was to ensure that there was a significant difference between both cognitive load conditions (low vs. high), which would confirm successful manipulation of the difficulty. If those assumptions were met, then the performance would be higher in the low load condition than in the high load condition. To analyze the potential effect of time on the participants’ performance over the duration of the experiment within the dual-task scenario, a complementary analysis was conducted. For this analysis, the mean rates of unreported tones for the 40 low load trials and the 40 high load trials were divided into two groups: the first and last twenty trials of the dual task scenario. We then performed a Wilcoxon signed-rank test comparing the alarm detection performance in the first half with the performance in the second half of the scenario.

NASA TLX. We administered the NASA TLX immediately at the end of the dual-task scenario to examine which of the six mental workload subscales (mental demand, physical demand, temporal demand, performance, effort, and frustration level) was the most exerted by our task.

ERP analyses. While seven electrodes sites were recorded, ERPs analyses were focused on the three midline electrodes (Fz, Cz, Pz). A two-step analysis was conducted for each ERP component of interest. First, we focused only on the control scenario. For this data, a three-way repeated measures ANOVA (2 x 2 x 3) with within-subjects factors “load” (low vs. high cognitive load of the landing task), “type of tone” (standard vs. deviant) and “electrode” (Fz vs. Cz vs. Pz) was used. Its purpose was to determine the best electrode site for the ERP component, and the absence of effect of the load in the control scenario, ensuring that participants were not doing the landing task in both low load and high load

landing task trials. Regarding the dual-task scenario, we focused on the effect of cognitive load on the alarm-related ERP amplitudes. For this purpose, a two-way ANOVA was conducted with the three experimental conditions (control condition vs. low cognitive load dual-task condition vs. high cognitive load dual-task condition) on the three midline electrodes. Tukey's HSD tests were used as post-hoc tests.

3.2.3 Results

Behavioral results

NASA TLX. The mental demand dimension was most exerted by the dual task, with a mean rating of 14.27 (SD = 2.69), 1 representing a low mental demand and 20 a high mental demand. The other dimensions were rated as follow: physical demand: M = 8.00, SD = 6.32 ; temporal demand: M = 12.07, SD = 4.15 ; performance: M = 7.73, SD = 2.58 ; effort: M = 13.2, SD = 3.80 ; frustration: M = 9.20, SD = 5.10. We performed a one-way ANOVA with within-factor "dimension", there was a significant main effect ($F(5, 70) = 7.19, p < .001, \eta^2 p = .34$). Tukey's HSD test revealed that mental demand was rated significantly higher than frustration (HSD, $p < .05$), physical demand (HSD, $p < .01$) and performance (HSD, $p < .001$). The effort dimension was significantly higher than physical demand (HSD, $p < .01$) and performance (HSD, $p < .01$). Temporal demand was significantly higher than performance (HSD, $p < .05$).

Landing task performance. The correct response rate to the landing task in the low load condition (M = 96.4%, SD = 2.7%) was higher than the correct response rate in the high load condition (M = 90.0%, SD = 3.6%), $F(1, 14) = 91.60, p < .001, \eta^2 p = .87$. This suggests that the difficulty was successfully manipulated. There was no difference in performance between trials with the standard tone (M = 93.2%, SD = 3.5%) and trials with the deviant tone (M = 93.8%, SD = 2.1%), $p = .54$, and no significant interaction between these two variables, $p = .97$. Finally, we observed a decrease in the detection rate of the visual target with increasing load. This effect corresponded to a significantly higher detection rate in low load trials (M = 87.7%, SD = 13.6%) than in high load trials (M = 75.0%, SD = 21.0%), $F(1, 14) = 7.10, p < .05, \eta^2 p = .34$.

Auditory alarm detection. First, the mean rate of unreported deviant tones increased with the load of the landing task (Friedman's ANOVA: $\chi^2(15) = 22.107, p < .001$). It was lower in the control condition (M = 3.0%, SD = 4.7%) than in the low load condition (M = 21.7%, SD = 21.5%), $Z = 3.180, p < .001$, and it was lower in the low load condition than in the high load condition (M = 31.9%, SD = 26.6%), $Z = 2.197, p < .05$, as shown in Figure 18. The signed-rank test also indicated that the inattentive deafness rate in the control condition was significantly lower than in the high load condition ($Z = 3.474, p < .001$).

Second, the RTs to report the rare auditory target were significantly lower in the control condition (M = 0.530 s, SD = 0.124 s) than in low load (M = 1.047 s, SD = 0.215 s) and high load trials (M = 1.170 s, SD = .0362 s), $p < .001$ for both comparisons. Finally, there was no significant difference in the reaction times between low load and high load trials ($p = .38$).

Third, the signed-rank tests showed no difference in the mean rate of unreported deviant tones across time, either for the low load (20 first trials: M = 21.7%, SD = 21.0%; 20 last: M = 20.0%, SD = 24.0%, $p = .50$) or the high load condition (20 first trials: M = 35.0%, SD = 30.9%; 20 last: M = 28.7%, SD = 26.4%, $p = .33$).

Finally, the false alarm rate, measured for both visual and auditory targets, showed no significant difference between low load ($M = 3.2\%$, $SD = 2.1\%$) and high load trials ($M = 3.8\%$, $SD = 2.1\%$) in the dual task (signed-rank test: $p = .22$).

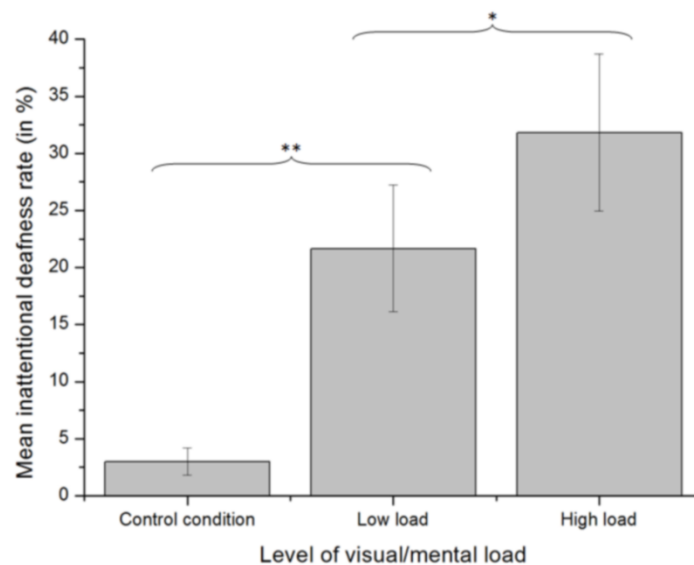


Figure 18. Mean inattentional deafness rate across the three levels of cognitive load. Error bars represent the standard error of the mean. *significant difference at $p < .05$. **significant difference at $p < .001$

N100 results

Control scenario. The ANOVA revealed no significant effect of the type of tone on the N100 amplitude ($F(1, 14) = 0.15$, $p = .70$), and a significant effect of the electrode site ($F(1, 14) = 18.35$, $p < .001$, $\eta^2 p = .58$). Tukey's HSD test revealed that N100 amplitude at Fz ($M = -3.28 \mu V$, $SD = 3.56 \mu V$) was significantly bigger than at Cz sites ($M = -2.72 \mu V$, $SD = 2.69 \mu V$) (HSD, $p < .05$), and Pz ($M = -2.02 \mu V$, $SD = 2.61 \mu V$) (HSD, $p < .001$). Given those results, we chose the Fz site for the subsequent N100 analysis. In addition, there was no significant effect of the load of the landing task on the N100 amplitude ($F(1, 14) = 0.02$, $p = .90$), justifying the merging of the two load conditions into one "control condition" for the following N100 analysis.

Effects of the cognitive load on the N100 amplitude. This analysis still revealed a significant main effect of the electrode site ($F(2, 28) = 6.57$, $p < .01$, $\eta^2 p = .32$), no main effect of the load ($F(2, 28) = 0.65$, $p = .53$) and no electrode * load interaction ($F(4, 56) = 0.70$, $p = .59$).

P300 results

Control scenario. In line with the behavioral analysis, the $2 \times 2 \times 3$ ANOVA with within-subjects factors "load", "type of tone" and "electrode" revealed that the load factor had no significant effect over the P300 amplitude ($F(1, 14) = 0.02$, $p = .89$), which confirms that participants did not process differently low and high load trials in the control scenario, and support our decision to merged those two load conditions into one "control condition". A significant main effect was found for the electrode site ($F(1, 14) = 21.19$, $p < .001$, $\eta^2 p = .62$): the P300 peak was higher at Pz ($M = 2.75 \mu V$, $SD = 6.36 \mu V$) than at Fz ($M = -1.641 \mu V$, $SD = 7.96 \mu V$) (HSD, $p < .001$), and at Cz recording sites ($M = 0.65 \mu V$, $SD = 6.38$

μV), (HSD, $p < .05$). In addition, there was a significant electrode * type of tone interaction ($F(2, 28) = 11.66, p < .001, \eta^2p = .45$). As expected, Tukey's HSD test revealed that the effect of the type of tone was higher at Pz with rare tones eliciting a higher P300 ($M = 6.08 \mu\text{V}, SD = 7.32 \mu\text{V}$) than standard tones ($M = -0.57 \mu\text{V}, SD = 2.42 \mu\text{V}$) (HSD, $p < .001$). Based upon the previous results, we focused subsequent analysis of load manipulation on rare tones.

Effects of the cognitive load on the P300 amplitude. This analysis still revealed a significant main effect of the electrode site ($F(2, 28) = 15.69, p < .001, \eta^2p = .53$), no main effect of the load ($F(2, 28) = 2.14, p = .14$) and a significant electrode * load interaction ($F(4, 56) = 9.72, p < .001, \eta^2p = .41$). Tukey's HSD test post-hoc analyses showed that at the Pz site, the P300 observed in the control condition ($M = 6.08 \mu\text{V}, SD = 7.32 \mu\text{V}$) was higher than in the low load condition ($M = 1.62 \mu\text{V}, SD = 4.58 \mu\text{V}$) (HSD, $p < .001$); and the P300 in the low load condition was higher than in the high load condition ($M = -0.76 \mu\text{V}, SD = 2.62 \mu\text{V}$), (HSD, $p < .05$), as shown in Figure 19.

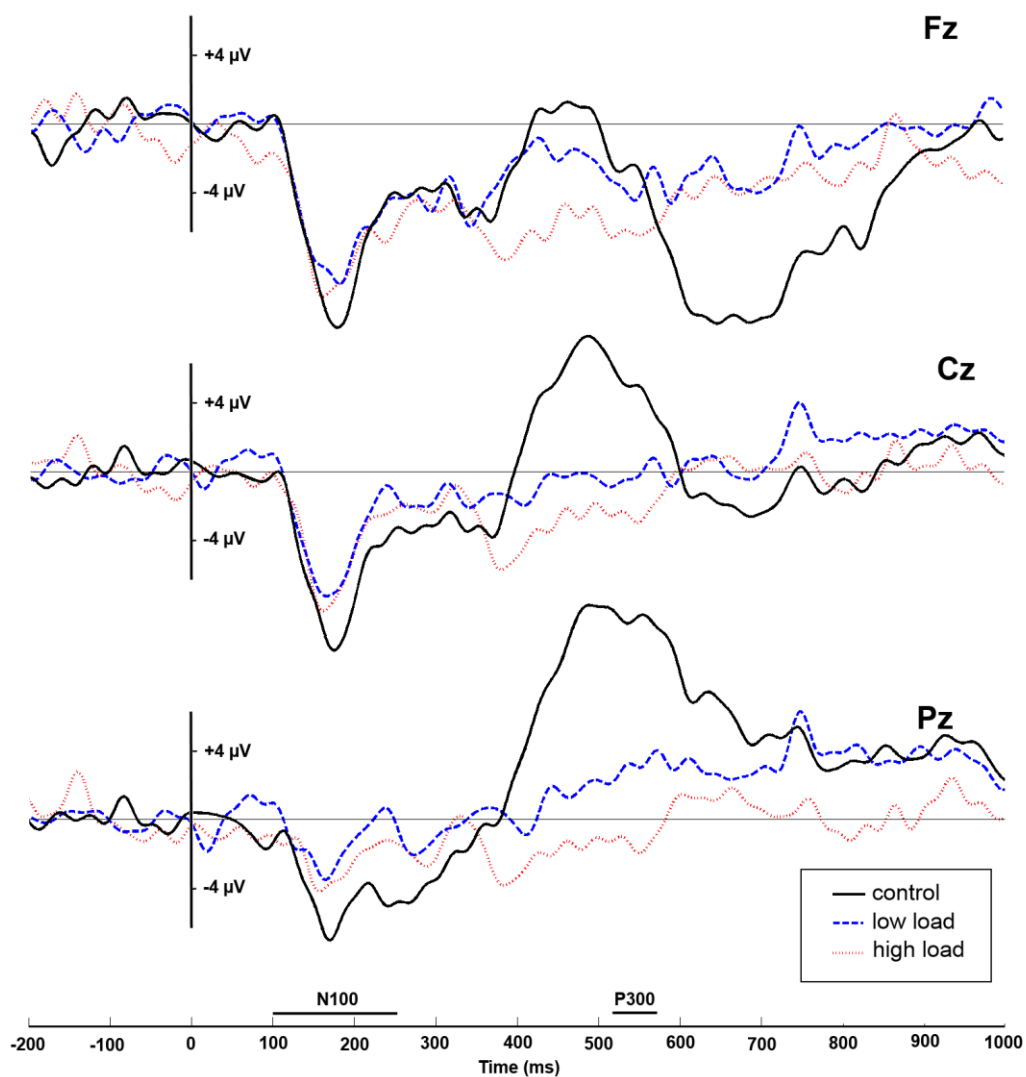


Figure 19. Mean ERPs and mean P300 amplitudes for the three levels of load on the three midline electrodes. For each electrode, the horizontal axis denotes time in ms, with the N100 and P300 time-windows used for analysis indicated, and the vertical axis denotes amplitude in μVolts .

Correlation between unreported deviant tones rate and P300 amplitude. We examined the Spearman rank order correlations between the individual P300 amplitude elicited by the deviant tones and the individual rate of unreported deviant tones, in the low and high load conditions. The correlation was significant in the low load condition ($r = -.79, p < .001$) meaning that participants with a high unreported deviant tones rate also had low P300 amplitudes (Figure 20). The correlation was not significant in the high load condition ($r = -.45, p = .09$). We calculated the same correlations removing the outlier (low load condition, rate of unreported deviant tones: 82.5%, P300 amplitude: $-4.11 \mu\text{V}$). The results remained the same: a significant correlation in the low load condition ($r = -.87, p < .001$) and no correlation in the high load condition ($r = -.33, p = .25$).

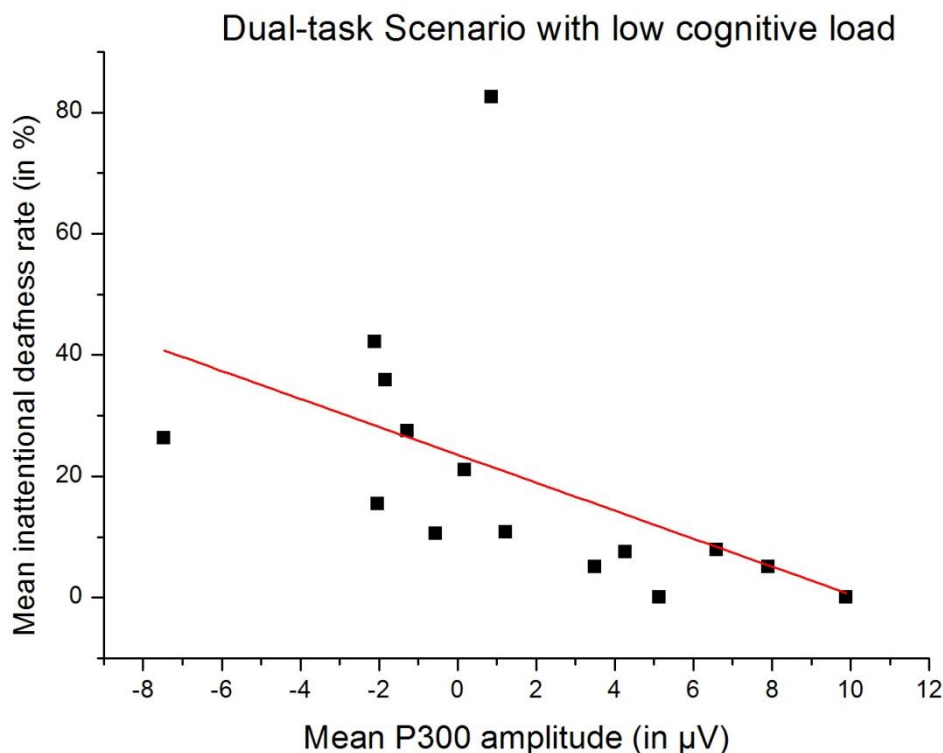


Figure 20. Correlation between the mean inattentional deafness rate and the mean auditory P300 amplitude. On the horizontal axis, the mean P300 amplitude during the dual task scenario, in μV . On the vertical axis, the mean inattentional deafness rate, during the dual task scenario ($p < .01$). Linear regression intercept: 23.57, slope: -2.30.

3.2.4 Discussion

Our study aimed at studying the links between ERPs amplitudes and the inattentional deafness phenomenon by creating an experimental paradigm in which the inattentional deafness phenomenon could occur numerous times for each participant. We designed a simplified landing task with two levels of cognitive load (high vs. low). To study the effect of contextual variation in the cognitive load and prevent changes in motivation, vigilance, priorities or strategy, low load and high load trials were interleaved. While participants were subject to this task, an oddball paradigm was simultaneously administered to assess their ability to detect an alarm (i.e. the rare deviant sound in the oddball paradigm). We hypothesized that variations in cognitive load would alter the participants' ability to detect alarms. In addition, we assumed that the occurrence of inattentional deafness would be concomitant with an alteration of ERP components, and that this alteration would be proportional to the cognitive load level. An effect of the

cognitive load on the auditory N100 amplitude would indicate an alteration of pre-attentive or early attentive components whereas alteration of the P300 (more specifically the P3b) would indicate an alteration of mechanisms related to voluntary orientation of attention.

The behavioral results showed that our task was successful in provoking inattentive deafness. Indeed, the NASA TLX results suggested that participants used a substantial amount of cognitive resources (mental demand dimension) in the task, favoring the occurrence of inattentive deafness and thereby validating the experimental procedure. As low and high cognitive load conditions were interspersed through the runs, their respective mental demands could not be compared. In the control scenario (oddball task alone), only 3 % of the alarms were not reported by the participants. In the low load condition of the dual-task scenario, 21.7 % of the alarms were missed when the low load dual-task was processed. This number significantly increased to 31.8% in the high load condition of the dual-task scenario. This result showed that cognitive load can provoke inattentive deafness. This result is consistent with previous work of Macdonald and Lavie [16] on the impact of perceptual load. Importantly, the comparison between the control and the dual-task scenarios should be considered with caution. In addition to a higher cognitive load in the dual-task scenario than in the control scenario (auditory oddball), a response competition occurred between the landing task and the auditory task. This competition did not exist in the control scenario. Therefore, the comparison between the low and high load condition in the dual-task scenario must be considered as the most important analysis. Furthermore, unreported alarms can reasonably be considered as the result of inattentive deafness rather than the consequence of another phenomenon altering the response rate of the participants, such as changes in the participants' priority modality (landing task or oddball task) or vigilance depending on the level of cognitive load. Indeed, the false alarm rate was very low and remained constant in both cognitive load conditions, contrary to the decreased rate of reported alarms with respect to the increased load. Those results indicate that participants did not simply change their response criterion level or were more focused on the landing task, which would have led to a decrease in both the reported alarm rate and the false alarm rate. The increasing number of unreported alarms is arguably due to an inattentive deafness increasing with cognitive load. The response times were also the same in both cognitive load conditions, i.e. the reduced reported sound rate in the high load condition was not related to the limited response time.

The effect of the cognitive load on the ability to detect an alarm was also significant on electrophysiological measures, as showed by the variation in amplitude of the P300 ERP component. ERP analysis showed that a drastic diminution of the auditory P300 amplitude was concomitant with the increased occurrence of inattentive deafness. Auditory P300 amplitude diminished in the landing task with low load condition in comparison to the control condition and further diminished with an increase of the load (high load vs. low load). These results tend to confirm that our aviation landing task left few resources to process auditory alarm in the low-load condition and even fewer in the high-load condition. fMRI studies of oddball paradigms have identified a "target detection network" involving inferior parietal [167-169] and frontal generators of the P3b [170-172]. According to Bledowski [169], the involvement of these cortical areas in the generation of the P3b can be integrated in Kok's model of the P3b potential [173]. In this model, the P3b amplitude reflects the cognitive capacity invested in the categorization of task-relevant or significant events, controlled by the joint operation of attention and working memory.

Thus, even if participants were asked to allocate similar priority to both tasks, the visual dominance and the complexity of the landing task may have led to an implicit prioritizing rule, leaving less available resources for the auditory target detection within the aforementioned cortical structures. This P300 diminution could be used as a precursor to determine the susceptibility of an individual to alarm misdetection.

Interestingly, this susceptibility to alarm misdetection along with P300 modulation might be in line with other studies using the interference paradigm [98, 99, 146]. Those studies interpreted reduced P300, provoked by an increased cognitive load, as a decreased “openness” of the attentional system to distractors. Our results and these studies suggest that a high cognitive load leads to an extremely reduced openness of the attentional system which encourages the participants to neglect the deviant tones. Yet, it is vital to be able to take into account unpredictable environmental changes, even when the cognitive system focuses on another task. For example, we have to be able to hear an approaching car when crossing the street while using a phone at the same time.

In our study, the inattentive deafness rate did not significantly diminish with time-on-task. This result suggests a robust and sustained effect of load on the ability to perceive unpredictable auditory stimuli. In addition, further analysis showed that individual mean P300 amplitude was correlated with the individual inattentive deafness rate. It gives additional evidence on the link between the inattentive deafness occurrence and the P300 potential. Importantly, we assumed that the considered subcomponent is the P3b (rare event related P3). This is supported by the fact that participants have to respond to the deviant tones in all cases. Indeed, the P3a seems to be more specifically related to deviant auditory non-target events [90, 155, 169] with a more fronto-central distribution. In contrast, the P3b has a more posterior-parietal scalp distribution and a slightly longer latency than P3a. P3b has been regarded as a sign of processes of memory access that are evoked by evaluation of stimuli in tasks that require a covert or overt response (eg. [156]).

Finally, the absence of effect on the N100 amplitude suggests that the cognitive load did not alter early sensory processes and had only an impact on late attentional process. One could expect that visual dominance would have involve sensorial gating mechanisms [88, 150] in such task; however, in the present study we manipulated the load in terms of cognitive demand and not perceptual complexity which may have led to attentional but not pre-attentional effects. In addition, the fact that cognitive load altered the P300 rather than the N100 suggests that cognitive load had an impact on the voluntary orientation of attention rather than a more general and non-task specific impact. Indeed, P3b is known to index the maintenance and control of ongoing information [174] requiring some form of overt response.

Taken all together, behavioral and EEG results support the hypothesis that the inability of pilots to react to some auditory warnings in the cockpit during critical flight phases is not voluntary but rather associated with cognitive and attentional limitations.

There are several limitations in the present study. One limitation is the difference between the detection of a 50 Hz change between single sounds (frequencies chosen from [163]) and the salient acoustic alarms in a real cockpit. In order to observe and reproduce numerous occurrences of inattentive deafness, we were compelled to increase the discrimination difficulty between the deviant and the standard tones. However, the deviant tones were clearly distinctive from the standard tones and from the white noise, as showed by the high level of detection during the control condition (i.e. 97% of detection). In addition, the ambient noise level in the cockpit is considerably high (engine, wind noise, communications etc). Experiments in flight simulator showed that even salient

realistic alarms can be unnoticed in high cognitive load context [17]. In consequence, increasing the signal-to-noise ratio is certainly not sufficient to efficiently prevent the inattentive deafness phenomenon in aviation.

Another limitation of the study is the lack of significant correlation between the inattentive deafness rate and the P300 amplitudes in the high cognitive load condition (while this correlation was significant in the low cognitive load condition). We arguably state that this may be explained by the suppression of the P300 component and thus its lack of variation among the participants in the high vs. low load condition.

One also could claim that the inability to detect the alarm was related to the expiration of elements within short-term memory rather than perceptual and cognitive limitations. For example, Friedman & Trott [175] showed that variations in P300 amplitudes may be an indicator of whether an item will be recollected or not. However, in Friedman's experiment, the restitution phase took place separately and significantly after the phase of encoding an item. To circumvent this short-term memory problem, participants within this experiment were asked to immediately report each alarm they perceived during the response window (mean delay between the alarm and the response window onset = 3.25 s). Under such conditions, we limited the possibility that participants would simply forget they heard the alarm before needing to report it.

Finally, future studies could focus on modulating separately perceptual and cognitive loads, to identify their respective roles on the inability to detect auditory warnings. Source localization could be also considered for further analyses of the cognitive process involved in inattentive deafness. This technique would help to clarify the relationship between ERPs characteristics and the attentional state of a pilot in situations that are likely to provoke inattentive deafness.

3.2.5 Conclusion

The major contribution of this study lies in the co-occurrence of inattentive deafness during an aviation task and alterations of the P300 (P3b) ERP, a component associated with the voluntary orientation of attention. While inattentive deafness has been studied through oral responses following a single trial [16, 67], we developed a paradigm inducing multiple occurrences of the inattentive deafness phenomenon in each participant. We demonstrated that a task with high cognitive workload interfered with the ability to perceive an unpredictable auditory alarm. In parallel, auditory P300 amplitude diminished in the landing task with low load condition in comparison to the control condition and further diminished with an increase of the load (high load vs. low load). These results tend to confirm that our aviation landing task left few resources to process auditory alarm in the low-load condition and even fewer in the high-load condition. P300 amplitude could be used as a precursor to determine the susceptibility of an individual to alarm misdetection, even in absence of behavioral abnormalities.

3.2.6 Acknowledgments

The authors are grateful to Etienne Perrin for his help with experimental setup, and to Andrea A. Gutierrez, Julia Behrend, and Zarrin Chua for proofreading and correcting the English. Also the authors express their gratitude to two anonymous reviewers whose valuable comments helped to improve the paper. Correspondence concerning this article should be addressed to Louise Giraudet, Centre Aéronautique et Spatial, Institut Supérieur

3.2 Article 1 (publié dans le journal PLOS ONE)

de l'Aéronautique et de l'Espace (ISAE), 31054 Toulouse CEDEX 4, France. E-mail:
louise.giraudet@isae.fr

3.3 Résultats complémentaires ne figurant pas dans l'article publié

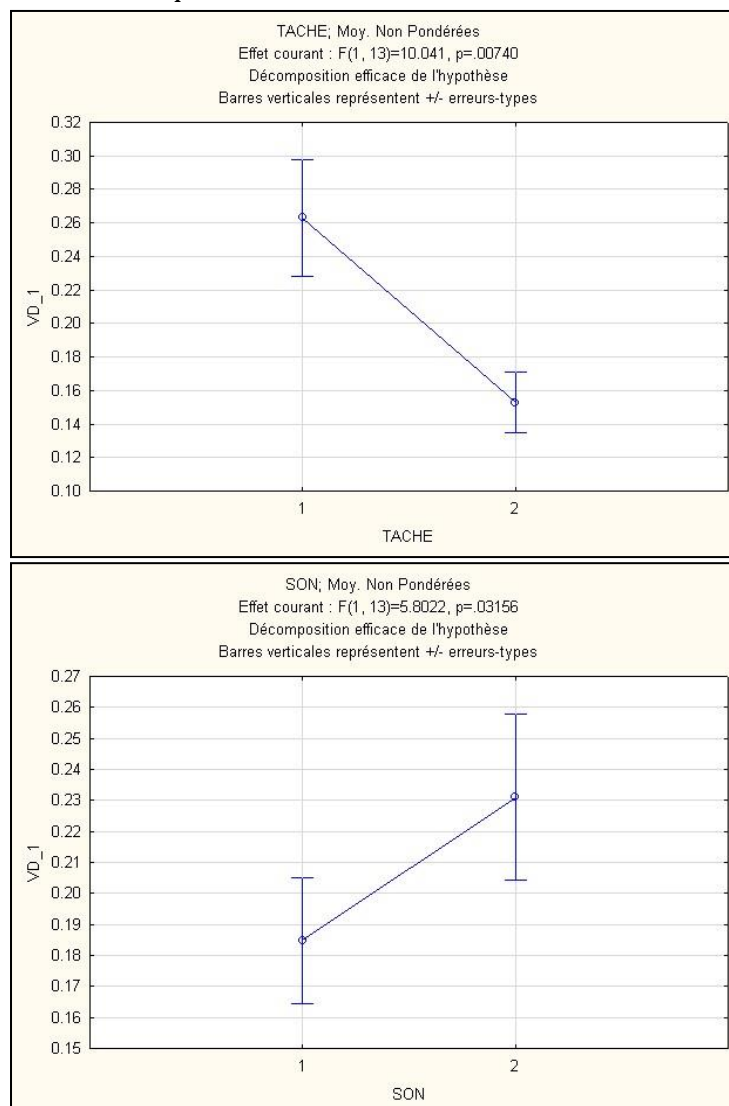
Analyse de la RED

Deux types de données peuvent être examinés à partir du signal de RED : la fréquence des pics et leur amplitude. Malgré les faibles variations de stress auxquelles nous nous attendions (le stress n'est pas un facteur que nous manipulons entre les conditions), nous avons observé des effets significatifs de la tâche et du type du son, ainsi qu'un effet de l'interaction tâche*charge sur les variations de fréquences (nombre d'occurrence d'une réponse électrodermale significative).

On observe ainsi que l'introduction de la tâche d'atterrissage fait baisser la fréquence d'occurrence des pics dans le signal RED. Cette augmentation des latences inter-pics indique vraisemblablement une baisse de l'attention portée aux sons pendant la tâche et d'une baisse d'attention au cours de la tâche expérimentale.

Les sons rares, quant à eux, provoquent une augmentation significative de la fréquence des pics dans le signal RED, quelle que soit la tâche (Figure 21), ce qui témoigne de la surprise à l'entente de ce stimulus différent et de l'attention que lui porte le participant.

Voici l'illustration des effets que nous avons mis en évidence :



3.3 Résultats complémentaires ne figurant pas dans l'article publié

Figure 21 : effet de la tâche et du son, moyennes des fréquences RED

Nous observons également interaction tâche * charge cognitive.

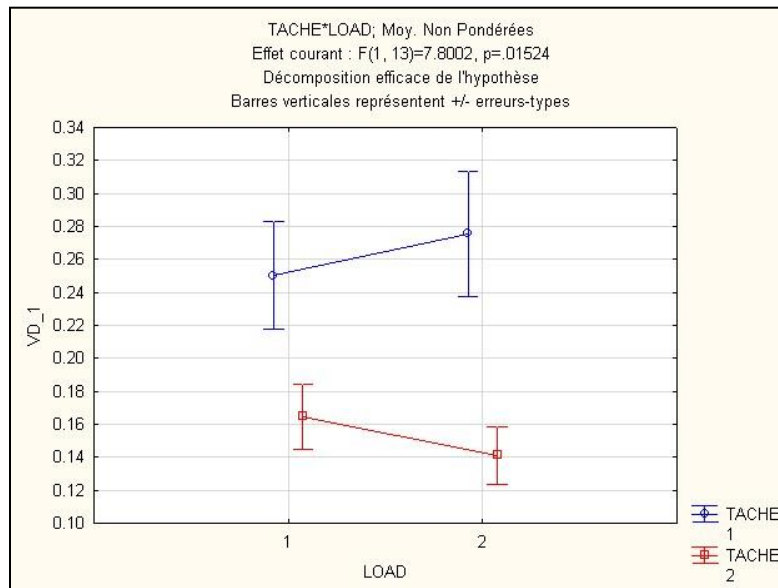


Figure 22 : diagramme des moyennes pour l'interaction tâche*load. TACHE 1 : tâche de contrôle, TACHE 2 : tâche expérimentale.

Le test HSD de Tukey nous permet de décomposer cet effet et de l'attribuer principalement aux effets de la tâche parallèle.

	TACHE	LOAD	[176]	[176]	[176]	[87]
1	1	1		0,221379	0,000238	0,000202
2	1	2	0,221379		0,000202	0,000201
3	2	1	0,000238	0,000202		0,273949
4	2	2	0,000202	0,000201	0,273949	

Figure 23 : HSD de Tukey pour l'interaction tâche*load

CHAPITRE 4

Deuxième expérience : Approche
neuroergonomique pour l'évaluation de
design d'interface avec mesures EEG

Suite à la première expérience (cf. CHAPITRE 3), nous nous sommes intéressés à préciser l'influence de la charge visuelle et de la charge cognitive, tout en se rapprochant de conditions expérimentales écologiques. L'environnement réaliste de pilotage impliquant beaucoup de mouvements, de communication, nous avons préféré progresser par étape. Nous nous sommes intéressés à un intermédiaire entre les simulations très simplifiées et les simulateurs de vol réalistes. Nous avons eu l'opportunité de travailler avec un outil de simulation de contrôle aérien : Laby, qui offre de nombreux leviers pour adapter les scénarios et faire varier certains paramètres tels que le nombre d'items affichés, la vitesse, et différentes alertes visuelles et sonores. De plus, des études préexistantes comparant les performances des contrôleurs selon la saillance des alertes visuelles venaient d'être réalisées. Nous allons pouvoir analyser l'impact du design des alertes visuelles sur les capacités auditives. Nous avons donc élaboré une expérience en utilisant Laby, en y incluant une tâche de oddball auditif similaire à la première expérience, tout en mesurant l'activité cérébrale des participants. Nous avons également utilisé une autre version de Laby pour notre troisième expérience.

Nous présentons donc tout d'abord le fonctionnement et le principe de Laby en détails.

4.1 Laby

Création

Laby est un projet développé en interne de l'équipe PII (Performance et Innovation des IHM) du centre de R&D Français dans le domaine ATC [177, 178]. Il a été développé à l'origine pour prototyper et évaluer dans un contexte expérimental contrôlé de nouveaux designs ou de nouvelles interactions pour la visualisation des contrôleurs aériens opérationnelle. Selon cet objectif de réalisme, il reprend un certain nombre de caractéristiques de cette visualisation opérationnelle.

Principe général

Ce micro-monde a été conçu autour d'une tâche principale de contrôle aérien, consistant à guider un ou plusieurs avions sur une route déterminée, un couloir aérien matérialisé en vert clair (Figure 24). Les participants doivent contrôler le cap, le niveau de vol ou la vitesse en cliquant sur l'étiquette radar des avions, faisant apparaître des listes de valeurs, afin de maintenir les avions dans leur trajectoire. Ils doivent également renseigner le système avec des consignes (de cap, vol ou vitesse) qui apparaissent au fur et à mesure du trajet de l'avion dans le labyrinthe. Il est aussi possible de déclencher l'apparition d'obstacles sur le parcours de l'avion, ou d'avions interférents gérés par le système pour complexifier la tâche du contrôleur aérien. Par exemple, un avion interférent peut être utilisé pour créer un rapprochement ou un croisement dangereux avec un avion du labyrinthe. Des notifications peuvent être déclenchées sur les avions interférents. La taille et la forme du labyrinthe sont libres. Ainsi, de nombreux scénarios et configurations différents peuvent être générés en fonction des besoins de l'utilisateur, que ce soit pour le développement du système et de l'évaluation, ou à des fins de formation. Il s'agit d'un environnement multitâche complexe, ce qui peut impliquer le contrôle de plusieurs aéronefs et l'engagement dans d'autres tâches concurrentes (consignes, notifications visuelles ou auditives sur avions périphériques).

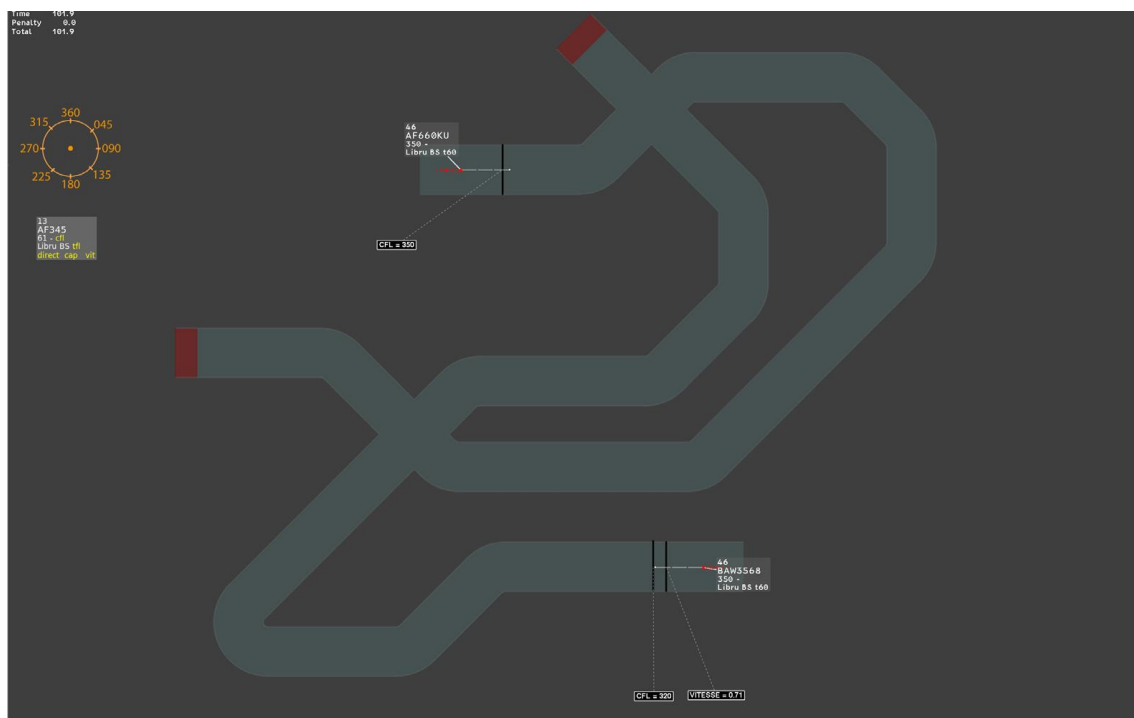


Figure 24. Le micro-monde ATC Laby (source : thèse Imbert, 2014).

Concevoir un scénario

L'outil appelé LabyEdit permet de dessiner le ou les trajets à faire suivre aux avions guidés. Il permet également de positionner les consignes éventuelles à saisir le long de ces trajets. La Figure 25 présente l'édition d'un Labyrinthe à l'aide de LabyEdit (voir [179] pour plus d'explications sur cet outil) avec un tronçon droit, une zone de départ et d'arrivée ainsi qu'une zone de consigne. L'avion guidé commence son trajet dans la zone de départ, et son passage dans la zone d'arrivée termine déclenche la fin du scénario. La zone de consigne possède un côté « début de consigne » (avec le rectangle noir). L'avion, en traversant ce rectangle noir, va déclencher l'apparition de la consigne associée. Dès que la consigne a été correctement renseignée, elle disparaît. Le côté « fin de consigne » matérialise le seuil qui va provoquer l'effacement de la consigne associée si celle-ci n'a pas été réalisée. Ainsi, la durée d'affichage des consignes dépend de la longueur de la zone de consigne.

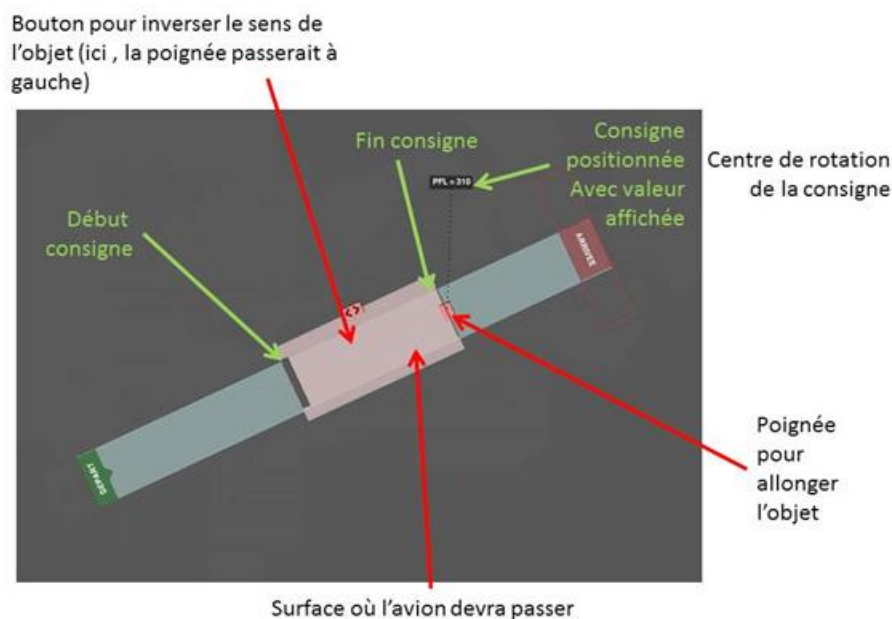


Figure 25. Un Labyrinthe minimaliste édité (source : thèse Imbert, 2014).

Un score peut être affiché au participant, calculé dynamiquement en fonction des erreurs (par exemple, des pénalités en cas de déviation de la route, pénétrer dans une zone interdite, ne pas maintenir la distance minimale de séparation entre deux avions, ne pas prendre en compte une alerte etc.). Ce score donne un retour au participant sur sa performance qui couvre les principales caractéristiques et paramètres de la tâche Laby pour la gestion du trafic et des conflits potentiels (pour des mesures de complexité dans l'ATC voir [180]), et il inclut aussi des indicateurs basés sur la capacité du contrôleur à renseigner le système avec les informations demandées pendant le parcours. Pendant la passation, ce score peut également être utilisé pour fournir un retour aux participants sur leur performance et de cette façon les aider à rester concentrés sur la tâche principale, même lorsque les tâches secondaires doivent être traitées simultanément. En plus du score de performance, il est possible de collecter de grandes quantités de données comportementales pour évaluer plus précisément la manière dont la performance peut être affectée par l'interface ou les difficultés du parcours. Les temps de réaction précis de toutes les actions se déroulant pendant une passation sont enregistrés par Laby, de sorte que la performance peut être évaluée en termes de temps mis pour saisir une consigne, son exactitude, le nombre de clics etc.

Applications possibles

Les scénarios Laby évoluent dynamiquement en fonction des avions interférents commandés par le système, des consignes prévues, et en fonction des actions effectuées par le participant. Des scénarios « opaques » [181] peuvent être créés dans le sens où le participant a besoin d'anticiper l'impact du changement de différentes variables sur l'appareil qu'ils guident, par exemple, la vitesse ou la correction de cap nécessaire pour éviter une zone interdite ou un conflit potentiel avec un autre avion. Laby permet de concevoir une tâche de laboratoire plus ou moins réaliste, plus ou moins complexe, et ainsi de s'adapter à des participants novices ou des contrôleurs aériens expérimentés selon la question de recherche abordée. Il fournit un environnement suffisamment réaliste en fonction des tâches demandées aux participants, et n'implique pas forcément une expertise spécifique au domaine. La nature complexe et dynamique de Laby, ainsi que la facilité avec laquelle les variables spécifiques peuvent être manipulées et mesurées, le

rendent utile pour les chercheurs dans un large éventail de domaines concernant les facteurs humains et la psychologie appliquée. De plus, il est possible d'examiner une série de variables à la fois isolément ou en combinaison, afin d'acquérir une compréhension globale de l'impact d'une variable particulière sur la performance dans son ensemble : un gain sur une dimension (par exemple la précision nécessaire pour ouvrir un menu) peut être accompagné d'une perte dans une autre dimension (comme le temps de réponse augmenté). Il est important qu'un outil conçu pour aider et assister ne compromette pas les performances dans un autre domaine [182]. Utiliser Laby afin de parvenir à une meilleure compréhension des processus cognitifs mis en œuvre lors de son utilisation pourrait permettre ultérieurement d'élaborer des dispositifs de soutien plus adaptées à des situations complexes. Enfin, Laby permet également d'évaluer les différences individuelles sur les performances multitâches (la capacité de travail, la mémoire, les temps de réaction).

Du point de vue des applications au contrôle aérien, la quantité croissante d'informations à afficher, souvent sur plusieurs écrans, et les exigences cognitives que cela implique pour les contrôleurs peuvent parfois être trop importantes. Laby permet de recréer ces conditions en environnement contrôlé et d'évaluer la validité des solutions proposées. Laby a notamment été utilisé pour comparer l'usage d'une souris ou d'un stylet pour désigner des avions [177], dans des conditions très comparables à la tâche d'ATC dans le monde réel. Ces expériences en micro-monde constituent un intermédiaire intéressant avec les expériences en simulateur de vol réaliste, qui requièrent un échantillon de participants très qualifiés et forcément plus restreint, mais qui sont une étape indispensable pour tester certains protocoles de recherche [183]. Inversement, Laby représente une première étape importante pour l'ingénierie des systèmes, permettant d'évaluer des prototypes, des nouvelles procédures ou des nouveaux designs dans un environnement simulé à faible coût et sans risque. Alors que les plateformes expérimentales plus fondamentales ne fournissent pas un niveau assez élevé de réalisme pour rendre compte de la demande cognitive induite par des situations complexes, dynamiques et sous pression temporelle, Laby permet de réaliser des expériences suffisamment réalistes permettant une première évaluation de l'interface avant une utilisation réelle.

La flexibilité de Laby pour différentes configurations permet de faire usage de différentes modalités d'entrée d'information et de représentation d'informations (signaux auditifs, indices visuels), ce qui peut contribuer aux recherches sur l'intégration multimodale et des interactions entre les différentes modalités [150, 184]. Par exemple, les tâches de surveillance sont particulièrement adaptées pour des protocoles sur la cécité au changement [185, 186]. Il est possible de soumettre les participants à un changement inattendu de vitesse ou de trajectoire d'un aéronef dans Laby. Par ailleurs, les alarmes sonores peuvent être utilisées pour étudier de la même façon la surdité inattentionnelle ou la surdité au changement [16, 18, 69].

La quantité importante d'informations affichées sur l'écran permet également à Laby d'explorer les effets de la charge visuelle dans des tâches de recherche visuelle ([187, 188]), de la charge cognitive [52, 53], d'étudier les processus cognitifs de vigilance [189], de capture attentionnelle à l'aide d'attracteurs auditifs/visuels [176, 190]) et de conscience de la situation [23, 191, 192].

Plus largement, la tâche de guidage d'avion le long d'un parcours utilise les caractéristiques d'une activité de supervision et de contrôle (la surveillance, l'attention, l'anticipation, la prise de décision dynamique, l'exécution d'une séquence d'actions), caractéristiques qui se retrouvent dans un certain nombre d'autres domaines tels que la conduite, le pilotage, la surveillance, la gestion de crise et l'intervention d'urgence. Laby fournit une plateforme adaptable à l'étude des processus cognitifs et des limites des capacités humaines en situations multitâches.

Limites

Laby n'est pas exempt de limitations, la première étant qu'il ne permet pas de reproduire les interactions verbales qui existent dans un environnement de travail réel entre les contrôleurs et les pilotes via radio. La communication verbale est une partie importante de l'ATC, il n'est donc pas possible de généraliser complètement les résultats des scénarios menés dans Laby avec ceux obtenus dans un simulateur plus complexe qui inclut cette tâche supplémentaire. L'ajout d'une autre modalité pour transmettre et recevoir des informations augmentera certainement la charge cognitive. Par ailleurs, même le bruit de fond qui n'est pas pertinent pour la tâche est connu pour affecter certains aspects de l'exécution des tâches en vol [183, 193] ; il est donc possible que la saisie d'informations dans Laby soit impactée par la communication verbale.

Laby est un environnement ATC simplifié. Il peut aider à comprendre les fonctions et les interactions sous-jacentes au contrôle aérien, mais les résultats doivent ensuite être validés dans les simulateurs plus réalistes. De même, Laby peut aider avec les premières étapes de la formation des contrôleurs, mais l'expérience avec le système actuel est toutefois nécessaire afin d'apprendre les aspects techniques spécifiques à l'IHM opérationnelle. Laby satisfait la plupart des exigences décrites dans le guide défini par Buchner [194] et par Frensch et Funke [195], mais il ne peut pas être utilisé pour évaluer la performance des contrôleurs en équipe et ne fonctionne qu'en mono secteur.

Enfin, sa dynamique dépendant des actions des participants, la durée des scénarios, d'une zone d'alarmes, ou le nombre de sortie de route dépendent énormément des participants, surtout dans une population non experte de l'ATC. Tous les paramètres ne sont pas contrôlés.

4.2 Fiche descriptive synthétique de l'article 2

Objectifs

Pour cette expérience, nos objectifs étaient :

- D'évaluer deux des designs les plus significatifs issus des travaux précédents [179] en les confrontant à des notifications sonores,
- de mesurer l'impact des designs de notifications visuelles sur les performances des participants à la tâche de guidage, et à la détection des alarmes sonores à l'aide de mesures EEG ERP P300,
- de préciser les conditions d'apparition de la surdité inattentionnelle avec Laby en modulant la difficulté de la tâche, d'une part grâce à la vitesse de l'avion guidé dans le labyrinthe, et d'autre part avec la charge visuelle en jouant sur le nombre d'avions périphériques à observer.

4.2.1 Méthodologie

Paramètres de Laby

Les 42 sujets ont été divisés en deux groupes, et devaient réaliser la tâche Laby avec un avion principal à guider. En plus de l'appareil central à guider en altitude et en cap, les participants devaient surveiller un ensemble d'aéronefs statiques situés autour du couloir principal. Des notifications visuelles apparaissaient dans ou autour de l'étiquette radar de ces avions périphériques, que les participants devaient valider en cliquant sur l'aéronef concerné. Ces notifications étaient soit de type Color-Blink pour le premier groupe, ou de type Box-Animation pour le deuxième groupe. Color-Blink consiste en l'apparition du mot «ALRT» qui clignote en rouge et blanc à une vitesse de 800 ms ON / 200 ms OFF (voir Figure 28). Il est utilisé dans la visualisation radar ATC opérationnel pour les alertes de conflit à court terme hautement prioritaires. Box-Animation comporte le même texte "ALRT", avec en plus quatre chevrons jaunes placés autour de l'étiquette de l'avion notifié.

Les participants étaient séparés en deux groupes, selon le type d'alarmes visuelles utilisées (BoxAnimation ou ColorBlink). Chacun d'entre eux devait jouer les quatre scénarios Laby correspondants aux configurations suivantes :

- A : vitesse lente, peu d'avions périphériques
- B : vitesse lente, beaucoup d'avions périphériques
- C : vitesse rapide, peu d'avions périphériques
- D : vitesse rapide, beaucoup d'avions périphériques.

En parallèle à la tâche ATC, les participants devaient effectuer une tâche de détection d'alarmes auditives selon la tâche de oddball. Des sons standards (1000 Hz, 52,5 dB, 500 ms de temps, la probabilité = 0,8)   ignorer, et des sons déviants (2000 Hz, 52,5 dB, 500 ms longues, probabilité = 0,2)   signaler, ont été joués aléatoirement durant chaque scénario.

Afin de déterminer les amplitudes individuelles de référence de la P300, les participants effectuaient à la suite deux tâches de contrôle avec la tâche de oddball seul.   l'issue de chaque scénario, un questionnaire d'auto-évaluation de la charge de travail (NASA-TLX) devait être rempli.   l'issue des passations, les participants devaient remplir un questionnaire ad hoc sur l'expérience et la stratégie globale adoptée (notamment priorités données aux différentes tâches, ressenti général sur l'expérience) ainsi que sur les notifications visuelles et auditives (cf. Annexe 4).

Matériel

L'expérience se déroulait sur un ordinateur portable dans une salle insonorisée. Le participant était installé face à un écran de 30", distant de 60cm, une souris dans la main droite pour la tâche de guidage et la tâche de validation des notifications, et un bouton-poussoir pour la tâche de oddball. Des enceintes de part et d'autre de l'écran génèrent les sons de la tâche oddball et le bruit blanc. Les puissances sonores étaient : 42dB pour le bruit blanc, 52.5dB pour les sons graves et aigus de la tâche de oddball.

Les enregistrements EEG étaient effectués à l'aide de trois électrodes placées pour des mesures bipolaires : l'électrode positive sur le site Pz (lobe pariétal), l'électrode de référence sur le côté gauche du front et l'électrode de masse avec un clip sur le lobe de l'oreille droite.

Méthode statistique

Les taux de réponse aux consignes de guidage, les taux de détection moyens des notifications visuelles et des alarmes auditives ont été calculés pour les quatre scénarios. Les amplitudes ERP ont été calculées pour les quatre scénarios Laby et pour les deux tâches de contrôle. Les différences entre les conditions expérimentales ont été étudiées avec des tests ANOVA suivis par des tests post HSD de Tukey.

4.2.2 Résultats

Réalisation de la tâche de guidage

Seul un effet principal significatif de la vitesse a été observé. Lorsque le tempo était plus rapide, le pourcentage de consignes bien renseignées diminuait, passant de 96% à 85%.

Sur le temps de saisie des consignes, l'analyse ne montre pas d'effet du design des notifications, mais un effet principal significatif de la vitesse est observé. La pression temporelle augmentant avec la vitesse, les sujets réalisaient leurs saisies plus rapidement.

Réalisation de la tâche de validation des notifications

L'analyse statistique a montré un effet principal significatif pour le type de design de notification (Color-Blink ou Box-Animation) ainsi que pour la vitesse. Lorsque les notifications sont du type ColorBlink, 95.7% de ces notifications sont correctement validées. Ce nombre passe à 99.8% pour BoxAnimation.

Lorsque la vitesse augmente, le taux d'alarmes visuelles signalées diminue significativement, passant de 99.1% à 96.5%. L'analyse de comparaisons multiples (test HSD de Tukey) montre un effet significatif de la vitesse sur le pourcentage de notifications validées sur le design Color-Blink, mais pas sur le design Box-Animation. La performance de validation en BoxAnimation ne se dégrade donc pas avec l'augmentation de la charge de travail.

L'analyse des temps de réaction pour valider les notifications montre un effet principal significatif du type de design et de la vitesse.

Réalisation de la tâche de « oddball » auditive

La vitesse des tâches de contrôle ne provoque pas d'effet significatif sur le taux de détection des sons rares. La comparaison a ensuite été faite entre la tâche de contrôle et Laby tous scénarios confondus. L'analyse montre un effet significatif entre la tâche de

contrôle et Laby (3.5% d'alarmes manquées). La vitesse n'a pas d'effet significatif entre les scénarios Laby.

Résultats physiologiques, analyse de la P300

Un effet significatif de la tâche Laby sur l'amplitude de la P300 par rapport à la condition contrôle a été observé.

Un test post-hoc a ensuite été effectué pour chaque condition de la tâche Laby, on observe une interaction significative entre le type de sons et le design des notifications. Il n'y a aucun effet significatif de la vitesse sur l'amplitude de la P300. Le test montre que Box-Animation élicite une meilleure P300 par rapport à Color-Blink.

Résultats subjectifs

L'exigence mentale et temporelle, la performance et l'effort ont été perçus plus élevés dans la condition vitesse rapide.

4.2.3 Discussion

L'objectif principal de cette étude était d'étudier si un design visuel renforcé peut améliorer le traitement cérébral de stimuli auditifs supplémentaires pendant la tâche ATC.

Les résultats comportementaux ont montré que les participants qui ont utilisé l'interface de l'ATC avec la conception Box-Animation étaient plus précis dans la détection des notifications périphériques par rapport à ceux qui ont eu les notifications Color-Blink. Nous avons constaté que les participants du groupe Box-Animation étaient également moins (voire pas) affectés par l'augmentation de la vitesse. L'absence d'impact de la conception de notification sur les tâches concurrentes (guidage de l'avion central et détection d'alarmes auditives) montre l'efficacité de la conception Box-Animation à attirer l'attention des participants vers des notifications périphériques, sans provoquer d'interférence indésirable avec d'autres tâches essentielles. Ces résultats tendent à montrer qu'il y a une véritable libération de ressources attentionnelles grâce au design Box-Animation, et pas seulement un compromis entre les notifications visuelles et les tâches concurrentes.

Cependant, les questionnaires subjectifs (NASA TLX) ont révélé que les participants ne perçoivent pas une demande mentale inférieure avec Box-Animation par rapport à Color-Blink. Pourtant, les tailles d'effet calculées ont montré que l'impact comportemental (taux de notification périphériques) du type de notification était supérieur à l'impact de la vitesse (respectivement, $\eta^2_p = .37$ et $\eta^2_p = .30$). Cette incohérence entre l'évaluation subjective et la performance comportementale objective démontre l'importance de tenir compte tant des données objectives que subjectives pour la validation d'un design d'interface. Le jugement subjectif ne doit pas être rejeté, même s'il ne transparait pas sur les performances mesurables, car l'acceptation d'une interface par les opérateurs est essentielle.

Les résultats comportementaux ont confirmé que les participants qui utilisaient Laby avec le design Box-Animation ont mis moins de temps à valider les notifications et leur taux de validation était plus élevé qu'avec Color-Blink. BoxAnimation s'est révélé particulièrement efficace lorsque la difficulté de la tâche ATC (vitesse) augmentait. Le pourcentage de validation des notifications n'a pas été affecté par l'augmentation de la difficulté avec Box-Animation alors qu'il s'est dégradé dans le cas du groupe ColorBlink. La qualité de l'attracteur visuel Box-Animation semble supprimer cet effet de la complexité de la tâche, il permet au sujet de limiter les efforts sur le scanning visuel.

4.2 Fiche descriptive synthétique de l'article 2

Le principal résultat obtenu grâce à cette expérience concerne l'analyse de l'amplitude de la P300 et l'impact du type de design des notifications sur celle-ci. La meilleure performance dans le groupe Box-Animation coïncide avec une plus grande amplitude de P300 auditive provoquée par les alarmes, par rapport à celle observée dans le groupe Color-Blink. Lorsque les tâches ATC ont été réalisées avec Box-Animation, l'amplitude de la P300 observée sur les sons déviants s'est rapprochée de l'amplitude observée en baseline. L'amplitude de la P300 observée dans le groupe Color-Blink était bien plus faible. Cette tendance des résultats suggère que la notification Box-Animation génère une moins grande diminution des ressources attentionnelles que Color-Blink.

Comme la P300 auditive reflète la réponse cérébrale à un stimulus auditif, la réduction de P300 suggère une baisse de la probabilité de détection d'un stimulus auditif. Ceci est soutenu par le taux de détections auditives plus petit (mais pas statistiquement significatif) dans le groupe Color-Blink pour la condition de vitesse élevée, par rapport au groupe Box-Animation. La diminution de P300 avec Color-Blink peut également être considérée comme un effet précurseur de la diminution des ressources attentionnelles de perception et de traitement, ce qui conduirait à terme à une baisse du taux de détection auditive si les ressources cognitives étaient encore plus sollicitées.

4.3 Article 2 (publié dans le journal of Behavioural Brain Research)

The Neuroergonomic Evaluation of Human Machine Interface Design in Air Traffic Control using behavioral and EEG/ERP measures

Giraudet, L.¹, Imbert, J-P.², Bérenger, M.¹, Tremblay, S.³, Causse, M.^{1,3}

¹Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace, 10 avenue Edouard Belin, 31055 Toulouse, France

²Laboratoire d'Informatique Interactive, Ecole Nationale de l'Aviation Civile, Université de Toulouse, 31055 Toulouse, FRANCE

³School of Psychology, Université Laval, Québec, QC G1V 0A6, CANADA

Corresponding author: GIRAUDET Louise, ISAE service DCAS, 10 avenue Edouard Belin, 31055 Toulouse Cedex 4, France
e-mail : louise.giraudet@isae.fr

Tel :

0033

683947003

Abstract

The Air Traffic Control (ATC) environment is complex and safety-critical. Whilst exchanging information with pilots, controllers must also be alert to visual notifications displayed on the radar screen (e.g. warning which indicates a loss of minimum separation between aircraft). Under the assumption that attentional resources are shared between vision and hearing, the visual interface design may also impact the ability to process these auditory stimuli. Using a simulated ATC task, we compared the behavioral and neural responses to two different visual notification designs - the operational alarm that involves blinking colored "ALRT" displayed around the label of the notified plane ("Color-Blink"), and the more salient alarm involving the same blinking text plus four moving yellow chevrons ("Box-Animation"). Participants performed a concurrent auditory task with the requirement to react to rare pitch tones. P300 from the occurrence of the tones was taken as an indicator of remaining attentional resources. Participants who were presented with the more salient visual design showed better accuracy than the group with the suboptimal operational design. On a physiological level, auditory P300 amplitude in the former group was greater than that observed in the latter group. One potential explanation is that the enhanced visual design freed up attentional resources which, in turn, improved the cerebral processing of the auditory stimuli. These results suggest that P300 amplitude can be used as a valid estimation of the efficiency of interface designs, and of cognitive load more generally.

Keywords

Air Traffic Control, attentional resources, ERP, Human Machine Interface evaluation, Neuroergonomics

4.3.1 Introduction

Within safety-critical, continuously-evolving, and visually-rich environments such as air traffic control, supervisory control of emergency response, and security surveillance, operators must deal with dynamic and cognitively demanding tasks whilst confronted with temporal pressure, stress, and high-risk decision-making situations. In the case of Air Traffic Control (ATC), the main task is to guide aircraft through controlled airspace with the safety requirements of maintaining a minimal distance and an altitude of separation between them while optimizing their trajectories. Each controller is responsible for an airspace volume that is represented on a radar visualization system where numerous aircraft positions are displayed. They also must be vigilant and responsive to the occurrence of various on-screen visual notifications triggered by safety nets. In the present study, within a simulated-ATC task, we used one key safety-critical visual notification that serves to indicate an impending loss of separation between aircraft.

The auditory channel is also essential for ATC as controllers also need to exchange information with pilots and other controllers through radio and phone communications. Auditory warnings such as ground collision avoidance alerts or area infringement warnings have been increasingly integrated into ATC workstations. This recent introduction of auditory alerts raises new human factors issues, as several theories have indicated that a high cognitive load context can lead to a neglect of auditory alerts. One could argue that the high perceptual and cognitive load typical of ATC operations may consume a large proportion of attentional resources – especially when sub-optimal visual designs are used – which in turn can reduce the available attentional capacity for

processing the task at hand, as well as for additional unexpected events. Indeed, according to perceptual load theory [47, 50, 52], tasks involving high perceptual load can consume most of attentional capacity, leaving little remaining for processing information that is not directly related to the focal task, such as unexpected alarms [142, 144, 145, 196]. In this sense, several researches have shown that attentional resources are shared between vision and hearing [15, 16, 66, 70]. Some authors also postulate that tasks with high cognitive load (e.g., load in working memory) can lead to a reduced openness to additional stimuli such as auditory distractors [98, 99, 146]. In line with these theories, we suggest that introducing efficient and salient visual designs that can reduce the perceptual and cognitive load is important not only to improve performance of the ATC task itself, but to also help preserve attentional resources that may potentially be required by other information channels.

Several studies have demonstrated that salient stimuli promote fast and effortless processing of information (see [197] for review). This automatic and preattentive process has been explained by salience map models; two-dimensional maps that encode locations to be processed in priority according to their salience. This is supported by recent work concerning the brain structures that might contain such salience maps [198]. Nardo et al. [199] showed the efficacy of a bottom-up signal for the orienting of spatial attention in a complex and dynamic environment. By using a more salient visual design for the critical visual notifications occurring in ATC, the allocation of visual spatial attention should be directed foremost toward those stimuli, sparing controllers a costly visual search in terms of attentional resources.

Concerning the evaluation of cognitive load, the use of the oddball paradigm together with event-related brain potentials (ERP) has been proposed as a valid cognitive load index in various realistic tasks such as simulated flight missions [148, 149], gauge monitoring [200] or video games [201]. However, to the best of our knowledge, very few authors have explicitly used such paradigms to measure the cognitive load elicited by various human machine interface (HMI) designs. P300, usually measured between 300 and 500 ms post-stimulus [90] is one of the most commonly studied ERPs and is known to be observed during oddball paradigms. In this paradigm, participants are instructed to detect targets among non-targets (series of standard to-be-ignored stimuli; see [90]). The oddball paradigm is a well-known example that incorporates cognitive and attentional processes for stimulus recognition and attention allocation [202]. When attentional focus deviates from the target detection task (e.g., in a dual task paradigm), the P300 amplitude decreases significantly [97-99]. P300 is also modulated by the load of the concurrent task as increases in memory load reduce P300 component size because task processing demands increase [173, 203]. Importantly, it is generally accepted that a distinction can be made between two subcomponents of the P300, the P3a and the P3b. The P3a seems to be more specifically related to the novelty of deviant auditory stimuli [155], independently of task-relevance. It has a shorter latency, a fronto-central scalp distribution and its generation involves the frontal lobe and the hippocampus. The P3a amplitude decreases with repetition and habituates rapidly. It is sensitive to variations in top-down monitoring by frontal attention mechanisms engaged to evaluate incoming stimuli and is related to the orienting response [90]. In contrast, the P3b potential, partially generated in the medial temporal lobe, has a more posterior-parietal scalp distribution, a somewhat longer latency and is less sensitive to habituation, than P3a. Several studies also suggests that the locus coeruleus-norepinephrine (LC-NE) system underlies P3b generation for a target

detection task [204], which is consonant with attentional resource allocation and arousal-related effects in humans. The P3b has been thought to reflect such processes as memory access, memory storage and response initiation that are evoked by the evaluation of stimuli in tasks that require some form of action like a covert or overt response. In summary, P3a is produced in response to the processing of sensory stimuli with frontal lobe activation from attention-driven working memory changes; conversely, P3b is produced as a result of temporal/parietal lobe activation from memory and context updating operations and subsequent memory storage. In this paper, the term P300 will be used to refer to P3b, as our oddball task was task-relevant and required an open response. The high cognitive load involved in ATC should solicit the temporal lobe for sensory processing and memory operations, therefore affecting those functions and limiting auditory target processing.

Our study is based on a neuroergonomic approach [5, 205-207] which merges knowledge and methods from cognitive psychology, system engineering, and neurosciences. This approach aims to improve the system safety and efficiency at the workplace by considering human brain functioning. We used an ATC-like synthetic environment called Laby [208] which simulates key features of a dynamic visual monitoring radar task. Participants had to acknowledge notifications displayed close to aircraft located in peripheral vision, which simulated a collision avoidance alarm. Two notification designs have previously been shown to elicit a difference in performance in this environment [208]. Box-Animation (BA), a very salient visual notification, with brackets pulsing around the notified aircraft, is extremely well detected by the controllers. On the contrary, the Color-Blink (CB) notification — similar to the classical operational design of the critical notification indicating a loss of minimum separation between aircraft — is a much less salient design that causes a lower detection rate. The Box-Animation design is very noticeable and does not require a sustained visual search to be perceived; on the other hand, the Color-Blink notifications can sometimes go unnoticed if the controller is not actively monitoring the radar screen.

Objectives and hypotheses

Two groups of participants were recruited. One group performed the ATC task with Box-Animation and the other with Color-Blink notifications. To further improve the level of realism, each participant performed the task according to two levels of cognitive load (tempo, i.e. the number of events per unit of time) with various numbers of aircraft in the visual scene (between 5 and 21). Simultaneously with the ATC task, participants were asked to respond to the occurrence of low probability tones and to ignore high probability tones. P300 auditory-evoked potentials were recorded from the occurrence of the tones both in parallel with the ATC task and in two control conditions (tones alone without the ATC task), as an indicator of remaining attentional resources. Measuring P300 amplitude variations will indicate if the variations in HMI design affected attentional processes and response initiation.

We predicted that the introduction of the ATC task would reduce ERPs amplitude to the rare target tones in comparison to the baseline condition, in which the ATC task is not administered. This might demonstrate a reduced availability of the attentional resources for processing the auditory stimuli. According to the initial study comparing the two notification types [208], we also hypothesized that the ATC task would consume fewer

attentional resources when performed with Box-Animation compared to Color-Blink notifications. Consequently a lower subjective mental load, a better detection rate and higher ERPs amplitude should be observed with Box-Animation than Color-Blink notifications.

4.3.2 Method

Participants

42 volunteers, all students of Université Laval between 19 and 46 years old, were recruited for this study. None had a history of neurological disease, psychiatric disturbance, substance abuse, or took psychoactive medications. They all received full information on the experiment protocol, signed an informed consent and received compensation for their participation in the study. All participants had a STAI Y-B score below 55 (average anxiety). Six participants were removed from the analysis due to a lack of compliance with instructions and/or data acquisition problems. The 36 remaining participants (M = 24.1 years, SD = 5.8) were divided into two groups of 18. The first group was associated with the classic ATC type of visual notifications called Color-Blink, and the second group with the newly-developed type of notification called Box-Animation.

The Laby microworld and the auditory oddball task

The ATC Task. The Laby microworld is a functional simulation of ATC, built on the main task of guiding an aircraft around a route shown on the center part of the screen (Figure 27). Participants had to regularly modify the flight path and altitude of an aircraft using drop-down menus. The instructions were given via a pop-up window close to the aircraft (cf. Figure 26).

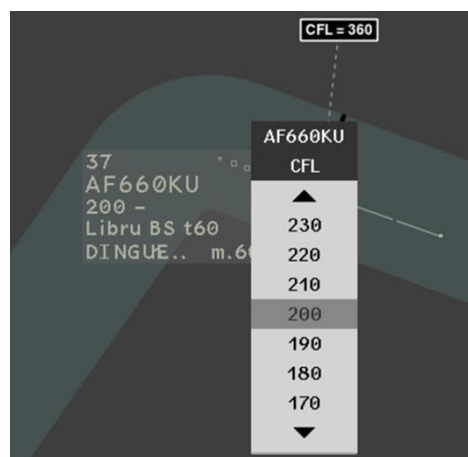


Figure 26. Zoom on the Laby interface. Participants had to select the altitude of the central aircraft according to the instruction given on the black window above the aircraft.



Figure 27. Screenshot of the Laby microworld simulation. On the top, an example with 5 static peripheral aircraft positioned around the corridor. Below, an example with 21 peripheral aircraft. The radar labels of the peripheral aircraft are always displayed. In both images, the main aircraft navigates through the corridor. An altitude instruction is displayed on its left (the radar label of the main aircraft appears only in this case).

In addition to the central aircraft, participants had to monitor a set of static aircraft located around the main aircraft corridor (Figure 27). Visual notifications were displayed in or around the radar label located in the vicinity of these peripheral aircraft, either the Color-Blink type for the first group, or the Box-Animation type for the second group (Figure 3). Color-Blink is colored text with the word “ALRT” which blinks at a rate of 800 ms on/200 ms off (see Figure 28, 1a-1b). It is used in ATC operational radar visualization for high-priority short-term conflict alerts. Box-Animation involves the same colored text “ALRT” but also four yellow chevrons placed around the label of the notified plane (Figure

28, 2a-2b). These chevrons move outwards from the label by 60 pixels following a slow in/slow out animation cycle of 1 Hz. It corresponds to a radar display prototype being used in a previous study [209].

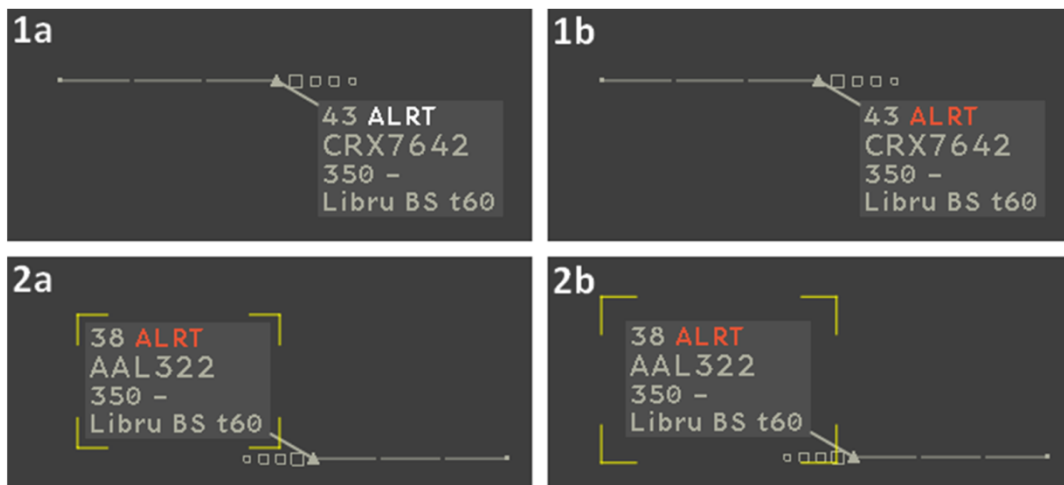


Figure 28. The two types of visual notifications inspired from the one triggered in ATC radar screen when minimum separation between aircraft is lost. In the Color-Blink notification, the text ALRT switches from white (1a) to red (1b) at a rate of 200 ms white on/800 ms red. In the Box-Animation notification, the text ALRT is displayed in red (2b) and four yellow chevrons placed around the label (2a) move outward from the label (2b) by 60 pixels following a slow in/slow out animation cycle of 1Hz.

Participants had to acknowledge the notifications by clicking on the associated aircraft. The notified aircraft was randomly selected among the static aircraft, and only one notification was issued at a time. The notification disappeared as soon as the participant clicked on the aircraft. If the participant did not react within a given time (depending on the speed condition), the notification disappeared. Thirty-four visual notifications were displayed in each scenario.

In order to engage the participant in the ATC-like simulation, a score was displayed on the top left of the screen. The score decreased for the following three reasons: first, when a participant led the aircraft outside of the corridor, second when he/she gave an incorrect instruction, third when he/she failed to click on a peripheral notification in the time limit. The simulation ended as soon as the aircraft reached the arrival area, colored in red, at the end of the corridor.

To further improve the level of realism, the participants performed the simulated ATC-like tasks within the Laby microworld software in four different scenarios: two with low cognitive load and two with high cognitive load. The cognitive load was manipulated by the speed of the task. In the low cognitive load condition, the central aircraft moved to 0.6 velocity units and peripheral aircraft notifications were displayed every 17 seconds on average. In the high cognitive load condition, the central aircraft moved to 0.99 velocity units and peripheral aircraft notifications were displayed every 12 seconds on average. In addition, the number of aircraft in the visual scene varied, from 5 in two scenarios to 21 in the two other scenarios. We only considered the effect of the speed. The number of paths, altitude instructions and visual notifications were the same in each of the four scenarios, and the order of the four scenarios was counterbalanced among participants.

Auditory oddball task. In parallel to the ATC task, participants had to perform an auditory alarm detection task. Standard tones (1000 Hz, 52.5 dB, 500 ms long, probability

= 0.8) and deviant tones (2000 Hz, 52.5 dB, 500 ms long, probability = 0.2) were randomly played. The tones were not representative of the auditory alerts recently integrated in ATC operations. The frequencies were chosen from the study of P300 components conducted by Kolev et al. [163]. The mean time window between successive tones depended on the speed of the scenario (slow = 4.2; fast = 2.6 mean time window in seconds between two tones). Participants were told to consider the deviant tones as auditory warnings and to report them as fast as possible by pressing a specific button. The auditory oddball detection task had no impact on the score. The number of auditory alarms ($n = 20$) was the same in each of the four scenarios.

In order to determine individual baseline P300 amplitudes, participants were asked to perform two auditory oddball control tasks. These oddball control tasks were similar to the auditory oddball task administered in parallel to the ATC task, the only difference was that a white cross was displayed at the center of the screen instead of the ATC task. One auditory control task was performed in the slow speed condition, and another one was performed in the high speed condition. The order was counterbalanced among participants. These two oddball control tasks were completed after the four ATC scenarios. Importantly, after having checked the lack of significant effect of speed on N100 and P300 components, we merged these two oddball control tasks into a “baseline condition”. A 42 dB white noise was played continuously during each ATC scenario and during the oddball control tasks.

Procedure

The whole procedure lasted about 2.5 hours. First, participants had to fill out two behavioral questionnaires: the Pichot Fatigue questionnaire [159] and the State-Trait Anxiety Inventory (STAI Form Y-B, [210]). Next, participants were seated comfortably at 60 cm from the 30 inch screen in a sound-attenuated room with their right hand on the computer mouse and their left hand on the auditory alarm button. Second, they completed a training phase to familiarize with the Laby microworld software, i.e. enter correctly path and altitude instructions by the drop-down menus, acknowledge visual notifications, and report deviant sounds. After the training, electrodes were placed on the participants' scalps before they completed the four counterbalanced ATC scenarios. Between each scenario, participants filled out the NASA Task Load Index (NASA TLX, see [45]). Finally, participants performed the two control oddball tasks in the two speed conditions.

EEG recordings and data processing

Continuous EEG recordings were performed with a ProComp Infinity™ encoder (Thought Technology Ltd) during the four ATC scenarios and the two control tasks. Prior to the four scenarios, three electrodes were placed for bipolar measurements: the positive electrode on the Pz site (parietal lobe), the reference electrode on the left side of the forehead and the ground ear-clip electrode on the right ear lobe. The EEG signal was recorded at a sampling rate of 256Hz.

EEG data analysis was performed using EEGLAB 11.0.3.1b [166] running under MATLAB 7.1 (The Mathworks). The EEG signals were filtered with a 0.5Hz high-pass filter and 20Hz low-pass filter, and then segmented into epochs around the auditory stimulus (from 200 ms before stimulus onset to 1000 ms after stimulus onset). The amplitude of the P300 was defined as the average amplitude within 364 to 464 ms post-stimulus. These windows were determined from a 100 ms wide time window around the peak latency for

deviant tones (414 ms post-stimulus) among participants during the control task (oddball alone).

Statistical analysis

Mean detection rates of peripheral visual notifications were calculated for the four scenarios. ERP amplitudes were computed for the four Laby scenarios and for the two oddball control tasks. Statistical analyses were performed using Statistica 7.1 (StatSoft ©). Differences between the experimental conditions were investigated with the use of ANOVA followed by post hoc testing (Tukey's honestly significant difference, Tukey HSD).

4.3.3 Results

Subjective results

We performed 2 * 2 ANOVAs with “group” (notification type) as a categorical variable and within-subject factor “speed” (cognitive load) to investigate the effect of the notification design and the task speed on the “mental demand” and “temporal demand” dimensions (NASA TLX). Although the mean scores for mental and temporal demands were lower in the Box-Animation vs. Color-Blink groups (mental demand: 57.42 vs. 48.06; temporal demand: 54.24 vs. 49.31) there was no significant main effect of the group (mental demand: $F(1, 34) = 1.86, p = .18, \eta^2p = .05$; temporal demand: $F(1, 34) = .55, p = .46, \eta^2p = .02$). These results reveal that participants did not feel a significantly lower effort with the noticeable Box-Animation design compared to the basic Color-Blink design. There was a main effect of the speed on both mental demand ($F(1, 34) = 30.84, p < .001, \eta^2p = .48$) and temporal demand ($F(1, 34) = 31.77, p < .001, \eta^2p = .48$), and no interaction. The effect of the speed shows that the increase in speed was perceived by participants as an increase in difficulty (mental and temporal demands).

Behavioral results

Peripheral notifications detection rate. We performed a 2 * 2 ANOVA with “group” (notification type) as a categorical variable and within-subject factor “speed” (cognitive load) to investigate the effect of the notification design and the task speed on the peripheral notifications detection rate. Importantly, we found a main effect of the group ($F(1, 34) = 20.14, p < .001, \eta^2p = .37$). As expected, participants had a higher notification detection rate in the Box-Animation group (mean $M = 99.83$, standard deviation $SD = 0.33$) than in the Color-Blink group ($M = 95.70, SD = 3.89$). We also found a main effect of speed ($F(1, 34) = 14.78, p < .001, \eta^2p = .30$). Significantly fewer visual notifications were reported under the fast condition ($M = 96.41, SD = 6.48$) than under the slow condition ($M = 99.11, SD = 2.42$). Interestingly, there was a significant interaction between speed and group ($F(1, 34) = 11.24, p = .002, \eta^2p = .25$). Tukey HSD post-hoc analysis revealed that increasing simulation speed significantly decreased the detection rate of peripheral notifications for the participants that used the Color-Blink design ($p < .001$) while the detection rate of the participants that used the Box-Animation notifications was unaffected by the higher level of speed ($p = .99$). Box Animation design seems to ease the detection task up to a point where speed increases did not affect detection rate.

Accuracy to the central aircraft guiding and the oddball task

As a supplementary analysis, we examined the effects of group and speed on the accuracy rate to the central aircraft guiding task with a 2 * 2 ANOVA with group as

categorical variable. There was a significant effect of the speed ($F(1, 34) = 44.71, p < .001, \eta^2p = .57$) on the accuracy for altitude instructions, no effect of the group ($F(1, 34) = 1.39, p = .25, \eta^2p = .04$) and no interaction ($F(1, 34) = .69, p = .41, \eta^2p = .02$). We also performed a $2 * 2$ ANOVA with group as categorical variable on the rare tones detection for the ATC scenarios. There was no effect of the speed ($F(1, 34) = .95, p = .34, \eta^2p = .03$), no effect of the group ($F(1, 34) = 30.84, p = .52, \eta^2p = .01$) and no interaction ($F(1, 34) = 2.96, p = .095, \eta^2p = .08$). Interestingly, though not statistically significant, there was a numerical difference between the means performance to the oddball task for this interaction. In the slow condition, participants had very similar tone detection rates (Box-Animation group: $M = 95.62\%$, $SD = 6.39$; Color-Blink group: $M = 96.25\%$, $SD = 5.19$), while in the fast condition, they had a slightly better performance in the Box-Animation group ($M = 96.46\%$, $SD = 3.06$) than in the Color-Blink group ($M = 93.26\%$, $SD = 10.50$). These results may suggest that the better accuracy to peripheral notification detection allowed by the Box-Animation design was not detrimental to auditory detection or guiding the central aircraft, and could even marginally improve the performance in auditory detection.

EEG results

Averaging of the two oddball control tasks into one baseline condition. We first compared the two oddball control tasks (slow and fast) before merging them into a single baseline condition, to exclude potential effects of the speed on the auditory P300 amplitude. The $2 * 2$ ANOVA with within-subject factors “speed” and “type of sound” showed no effect of the speed ($F(1, 35) = 1.72, p = .20, \eta^2p = .05$), a classic significant effect of the type of sound ($F(1, 35) = 68.78, p < .001, \eta^2p = .66$), with a higher P300 for target deviant tones ($M = 4.57 \mu V, SD = 3.37 \mu V$) than for standard tones ($M = -.13 \mu V, SD = 1.52$). There was no significant interaction ($F(1, 35) = .12, p = .73, \eta^2p = .003$). Speed of the oddball control task having no impact P300 amplitude, the two control tasks were averaged to create the baseline condition. For the following analyses, we only focused on the deviant tones.

P300 results. We compared the deviant tones P300 response in the baseline condition to the Laby scenarios with a one-way ANOVA with within-subjects factor “task” (baseline condition vs. the four Laby scenarios averaged). There was a significant main effect of the introduction of the ATC task ($F(1, 35) = 13.20, p = .001, \eta^2p = .27$), with a lower P300 when the ATC task was performed ($M = 2.64 \mu V, SD = 2.35 \mu V$) than in the baseline condition ($M = 4.57 \mu V, SD = 3.37 \mu V$). This result is coherent with Kramer, Trejo [46] findings that showed that P300 amplitude is sensitive to the mental workload generated by the introduction of a radar-monitoring task vs. a baseline condition (tones alone) [211].

Finally, a $2 * 2$ ANOVA on the Laby scenarios with within-subject factor “speed” and categorical variable “group” revealed a significant main effect of the group ($F(1, 34) = 4.20, p = .048, \eta^2p = .11$), no main effect of the speed ($F(1, 34) = 1.29, p = .04$) and no interaction ($F(1, 34) = 2.41, p = .13, \eta^2p = .07$). These results revealed that Box-Animation notifications elicited a higher P300 for deviant tones ($M = 3.41 \mu V, SD = 2.70 \mu V$) in comparison to Color-Blink notifications ($M = 1.87 \mu V, SD = 1.68 \mu V$), as shown in Figure 29. As expected, it suggests an enhanced processing of auditory deviant target tones allowed by a release of attentional resources when the better HMI design was used.

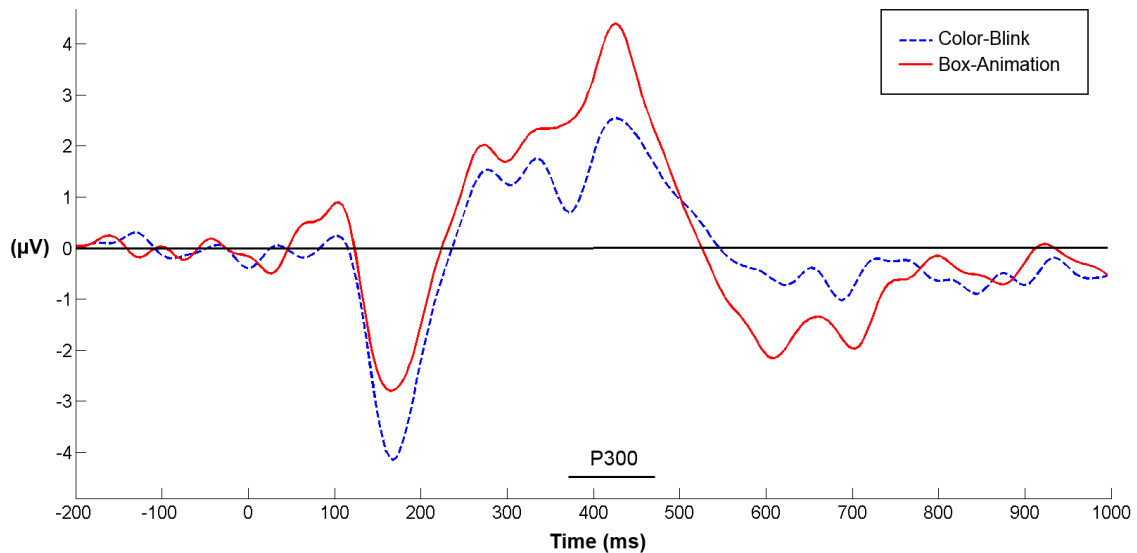


Figure 29. ERPs for the BA (red) and CB (blue) and Control (black) conditions, for alarm tones, on the Pz electrode. The horizontal axis denotes time in ms, and the vertical axis denotes amplitude in μV . P300 amplitude is significantly higher in BA group than in CB group.

4.3.4 Discussion

The current study used EEG techniques to assess the impact of cognitive load during a simulated ATC task that also required responding to auditory targets. The visual notification detection aspect of the ATC task was performed either with the Box-Animation design, a very noticeable visual notification, or with the Color-Blink design, a much less perceptible notification. The main objective of this study was to investigate if an enhanced visual design can improve the cerebral processing of supplementary auditory stimuli during the ATC task.

Behavioral results showed that participants who used the ATC interface with the Box-Animation design were more accurate in the detection of peripheral notifications compared to those who were presented with the Color-Blink notifications. In addition, we found that those participants in the Box-Animation group were also less affected – or even unaffected – by an increase in speed. It is essential in multi-task situations to evaluate performance across all tasks to ensure that any new design does not just improve performance on one particular task while degrading performance on others [212]. Accordingly, the lack of impact of the notification design on the concurrent tasks (guiding the central aircraft and detecting auditory targets) shows the efficiency of the Box-Animation design to draw participant's attention towards peripheral notifications, without causing undesirable interference with other critical tasks. This pattern of results may be taken to suggest that there is a release of attentional resources due to the Box-Animation design and not only a trade-off between visual notifications and the concurrent tasks.

However, the subjective questionnaires (NASA TLX) revealed that participants did not perceive a lower mental demand with the noticeable Box-Animation design compared to the basic Color-Blink design. Yet, the effect sizes calculated using the partial eta squared showed that the behavioral impact (peripheral notification rates) of the notification type was higher than the simulation speed (respectively, $\eta^2p = .37$ and $\eta^2p = .30$). This inconsistency between the subjective assessment and the objective behavioral performance demonstrates the importance of considering both subjective and behavioral objective metrics in design evaluation. Nevertheless the subjective judgment should not be

dismissed; indeed, the compliance of the operators of critical systems is essential, especially as it can jeopardize the use and acceptability of the system.

In the ATC-like Laby simulation, participants were instructed to focus on the main task of guiding an aircraft around a given route, in accordance with centrally displayed instructions, always appearing next to the central aircraft. The validation of visual notifications displayed in the periphery of the screen at random locations was regarded as secondary to the main guiding task. According to the NSEEV's model [213], these latter notifications are more likely to be missed, especially under high cognitive load, because of their greater eccentricity (higher effort needed to direct attention toward the item of interest), their occurrence in a random location (lower expectancy of the event to appear in a particular location), and the fact that they are seen as secondary to the main guiding task (lower value of the item). However the current experiment demonstrates that this effect may be compensated by a more salient design. The Box-Animation design is larger than color-blink (static salience, see [214]), and the slow in/slow out animation involves greater dynamic salience [176]. While both notifications involve a repeated animation cycle, the 'popping' motion of the chevrons in Box-Animation creates a 'deviant' quality that is more likely to capture attention analogous to deviance in the auditory modality, [190]. As such, detection of the Box-Animation notifications required fewer attentional resources than Color-Blink notifications, meaning that detection was achieved with greater ease and was less vulnerable to increases in workload. Accordingly, when the difficulty of the ATC task increased (speed), participants' performance remained unaffected in the Box-Animation condition while it declined with Color-Blink.

The analysis of physiological results showed a higher P300 in the baseline condition – which required participants to simply detect the oddball sounds – than when performing the simulated ATC-like set of tasks. This analysis also revealed that, as hypothesized, the better performance in the Box-Animation group was concomitant with a greater auditory P300 amplitude for deviant tones compared to that found in the Color-Blink group. It seems that when the simulated ATC-like tasks were performed with the Box-Animation design, the P300 amplitude observed for the deviant tones (3.41 μV) was much closer to the amplitude observed in the baseline condition (4.57 μV) in comparison with the P300 amplitude observed in the Color-Blink group (1.87 μV). This pattern of results suggests that there is a lower depletion of attentional resources from working with the Box-Animation notification design. Taken together, these results support the idea that P300 amplitude can serve as a reliable cognitive load index in ecological settings [46, 148, 200, 201].

As the auditory P300 reflects the cerebral response to an auditory stimulus, it seems likely that P300 reduction may also indicate a decline in the probability of detecting an auditory stimulus. This is supported by the smaller auditory detection rate (though not statistically significant) in the Color-Blink group for the high speed condition, compared to the Box-Animation group. The P300 decrease in the Color-Blink can also be seen as a precursory effect of the diminishing attentional and perceptual processing resources, which would eventually lead to a decrease in performance on the auditory detection task if cognitive resources were completely exhausted. According to several authors [17, 133], the problem of missed alarms occurs frequently across a range of flight environments and extends to ATC since the development of auditory notifications and warnings is increasingly integrated within ATC workstations [215]. In addition to their well-documented limitations (e.g. stress, cry-wolf effect, cf. [28], auditory alarms sometimes fail to be perceived, especially in critical situations. This propensity to remain unaware of fully

audible stimuli under high workload conditions is referred to as inattentional deafness (e.g. [67]). Consequently, using more salient notification designs to restore P300 could help prevent inattentional deafness in high multitasking situations such as ATC and piloting.

4.3.5 Conclusion

The analysis of behavioral, subjective and physiological results, i.e. the neuroergonomic approach, gives us a more complete understanding of the complex impact of changes in interface design. The benefits of the Box-Animation design were better understood given its impact on the subjective perception of participants, on their behavioral performance and their cerebral response, the latter revealing an otherwise invisible effect on available attentional resources. The neuroergonomic approach offers a more complete and objective way to evaluate HMI design. Our study corroborates the assumption that an enhanced HMI design liberates attentional resources of an operator, making him/her more efficient to process other additional critical stimuli such as auditory alarms. We also confirmed that P300 amplitude represent a reliable cognitive load index in ecological settings. The investigation of the relationship between HMI design in an ATC context and ERPs amplitude is the first step towards real-time monitoring of operators for adaptive intelligent systems.

4.3.6 Acknowledgements

We would like to thank Danny Lebel for his technical support, and Anaït Bagramian and Marie-Pierre B. Tremblay for their help running the experiment. We are also grateful to Zarrin Chua, Julia Behrend and Helen Hodgetts for proofreading earlier versions of the paper. Financial support was provided by a Discovery grant from the National Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC), awarded to Sébastien Tremblay [grant number CG073877], by the Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace to in the form of an operating grant to M. Causse, and also by the Direction Générale de l'Armement in the form of a scholarship to L. Giraudet.

4.4 Résultats complémentaires ne figurant pas dans l'article publié

Effet de la charge perceptuelle

Nous avons examiné l'effet de la charge perceptuelle (nombre d'avion périphériques) sur la performance de guidage, de validation des notifications visuelles et de détection des alarmes sonores.

Concernant la tâche de guidage, la charge perceptuelle n'avait pas d'effet significatif sur le pourcentage de consignes bien renseignées, mais avait un effet significatif sur les temps de réaction à la saisie des consignes ($F(1,34) = 8.495, p=0.006, \eta^2_p = 0.2$), qui augmentent avec la charge perceptuelle.

Nous avons également observé un impact significatif sur le pourcentage de notifications validées, qui diminue avec la charge. Sur la charge visuelle, le test HSD de Tukey montre un effet significatif sur le pourcentage de notifications validées avec le design Color-Blink ($p=0.007$), mais pas sur le design Box-Animation ($p=0.96$). La performance de validation du BoxAnimation ne se dégrade donc pas avec l'augmentation de la charge visuelle. Le pourcentage de notifications ColorBlink validées se dégrade très nettement lorsque la charge perceptuelle augmente. La qualité de l'attracteur visuel Box-Animation semble supprimer l'effet lié à la complexité de la tâche de scanning visuel nécessaire dans le cas du Color-Blink.

L'analyse des temps de réaction ne montre pas d'effet significatif de la charge perceptuelle.

Enfin, il n'est ressorti aucun effet significatif de la charge perceptuelle sur le taux d'alarmes sonores détectées, ni sur les temps de réaction pour signaler les alarmes.

CHAPITRE 5

Troisième expérience : Intérêt de
l'oculométrie dans l'étude de la surdité
inattentionnelle

5.1 Fiche descriptive synthétique de l'article 3

L'étude précédente tend à démontrer qu'une tâche visuelle plus facile libérerait des ressources pour la modalité auditive ce qui se traduisait par une P300 auditive plus ample en réponse aux alarmes. Cependant, avec la version de Laby que nous avons utilisée, le taux d'alarmes non détectées restait très faible, ce qui réduisait notre capacité à analyser précisément la surdité inattentionnelle. Néanmoins, cette étude a été riche d'enseignements, et dans une troisième expérience nous avons modifié le protocole dans le but de provoquer une plus grande implication dans la tâche. La première version qui impliquait des actions ponctuelles de réponse aux consignes de guidage et aux notifications visuelles ne provoquait probablement pas une charge cognitive suffisamment forte et soutenue dans le temps. Par ailleurs, l'analyse des ERP permet de repenser a posteriori les designs et les conditions expérimentales favorisant la surdité inattentionnelle. Cependant nous avons souhaité utiliser un autre dispositif de mesure qui n'est pas contraint par les mêmes limites que l'EEG, notamment la faible commodité de mise en œuvre et l'aspect invasif. De plus, l'EEG-ERP nécessite de nombreuses répétitions du phénomène pour palier le faible rapport signal sur bruit, en particulier en conditions écologiques comme dans l'ATC (mouvements des membres, communications radios...). Nous avons décidé d'explorer la validité des mesures oculaires comme indicateur de la surdité inattentionnelle. En effet, les durées de fixation sont sensibles à la charge cognitive [216], elle-même étant un précurseur de surdité inattentionnelle.

5.1 Fiche descriptive synthétique de l'article 3

Objectif

Nous avons souhaité observer l'impact de la charge cognitive et de la surdité inattentionnelle sur des mesures oculaires pendant une tâche de contrôle aérien.

5.1.1 Méthodes

Modifications de Laby

Pour évaluer la validité de l'oculométrie comme un indicateur de la charge cognitive et, in fine, de la surdité inattentionnelle, nous avons enregistré les données oculaires de 20 participants lors de scénario réalisés avec Laby, avec une tâche de détection de notifications visuelles et une tâche de « oddball » auditive, sur le même modèle que l'expérience précédente. Pour tenter de causer un nombre élevé d'alarmes manquées, nous avons adapté la dynamique des scénarios Laby, en ne gardant que la condition de vitesse élevée et en augmentant la difficulté par l'apparition à mi-parcours d'un second avion à guider dans le couloir aérien. Nous avons également rendu manuel le contrôle du cap des avions au centre, alors qu'il était automatique dans la première expérience (il suffisait de valider le cap proposé sur l'étiquette). Cette dernière modification permettait de grandement améliorer l'engagement des participants, et ce tout au long de la tâche. Enfin, nous avons uniquement conservé les notifications de type Color-Blink afin d'avoir une tâche visuelle demandant plus de ressources attentionnelles, tout en étant plus proche de l'interface opérationnelle.

Hypothèses

La charge cognitive était manipulée par le nombre d'avions centraux à guider (un ou deux). Deux scénarios Laby ont été effectués, dans un ordre aléatoire, avec des variations dans le nombre d'appareils périphériques (entre 5 et 21). Simultanément à la tâche ATC, les participants ont été invités à répondre à une tâche de oddball auditive, tandis que leur

comportement oculaire était enregistré. Nous avons mesuré les durées de fixation lorsque des alarmes étaient jouées pour déterminer si ces mesures pouvaient efficacement prédire si une alarme était perçue ou non. Plus précisément, nous avons formulé l'hypothèse que lorsque les participants échouaient à reconnaître une alarme en raison de la surdité inattentionnelle, c'est parce que leur attention était engagée dans la tâche principale, focalisée sur les avions centraux. Cela devait se manifester par des fixations oculaires plus longues par rapport aux alarmes entendues et signalées.

5.1.2 Résultats

Détection des alarmes

Le nombre d'avions à guider a eu un effet significatif sur le taux d'alarmes sonores détectées. Le taux de non signalisation d'alarmes auditives était extrêmement élevé, en particulier en condition de difficulté élevée. Le taux de surdité inattentionnelle était significativement plus élevé avec deux avions ($M = 53,79\%$, $SD = 30,81$) qu'avec un seul ($M = 71,24\%$, $SD = 21,84$).

Résultats oculométriques

Nous avons eu un effet significatif du nombre d'avions également sur la durée de fixation lorsque les alarmes se sont produites. Les fixations mesurées étaient plus longues dans la condition de faible charge ($M = 0.60$ s ; $SD = 0.13$) que dans la condition de charge élevée ($M = 0.52$ s ; $SD = 0.10$).

Il y a également eu un effet significatif de la détection des alarmes (alarmes manquées vs. signalées) sur la durée de fixation. Les fixations étaient plus significativement plus longues lorsque les alarmes ont été manquées que lorsqu'elles étaient signalées.

Enfin, nous avons trouvé une interaction significative entre la « détection » et le « nombre d'avions », de sorte que, en condition facile, des fixations plus longues étaient observées lorsque les alarmes n'étaient pas signalées. En condition difficile l'inverse se produisait, les participants démontraient des fixations plus courtes lorsque les alarmes n'étaient pas signalées (cf. Article pour illustration).

5.1.3 Discussion

Nous avons observé que la durée des fixations oculaires lors de l'apparition d'une alarme variait selon que l'alarme était détectée ou non, et ces variations étaient différentes selon le niveau de charge cognitive de la tâche. En charge faible, si l'alarme intervenait pendant une fixation longue, l'opérateur, focalisé sur la réalisation de la tâche visuelle, entendait moins fréquemment l'alarme auditive que quand il était en fixation plus courte. Alors qu'en charge plus élevée, si une alarme intervenait lorsque l'opérateur présentait des fixations courtes, elle avait moins de chance d'être perçue que lors d'une fixation plus longue. Il semblerait qu'il y ait un « juste milieu » dans les durées de fixation, indiquant une focalisation modérée sur la tâche principale pour être encore sensible aux alertes, tout en ayant suffisamment de ressources attentionnelles pour les détecter. Ces ressources attentionnelles peuvent être, en faible charge, accaparées par la tunnellation sur une tâche, ou en charge élevée par le traitement de trop nombreuses informations.

Ainsi, la mesure de l'activité oculaire pourrait s'avérer être un marqueur de la probabilité de détection des alarmes auditives par les opérateurs, en fonction de la charge.

5.2 Article 3 (soumis au journal *Frontiers in Human Neuroscience*)

Inattentional Deafness in Simulated Air Traffic Control Tasks: What The Eyes Can Reveal About What You Hear

Louise Giraudet^{1*}, Jean-Paul Imbert², Christophe Jouffrais³, Sébastien Tremblay⁴, Mickaël Causse¹.

¹Facteurs humains, Department DCAS, ISAE, Toulouse, France

²ENAC LII

³CNRS & Université de Toulouse, IRIT, Toulouse, France

⁴Université Laval

* **Correspondence:** Louise Giraudet, Department DCAS, ISAE, 10 avenue Edouard Belin, Toulouse CEDEX 4, 31055, France.

louise.giraudet@isae.fr

Keywords: inattentional deafness, eye fixation, air traffic control.

Abstract

The Air Traffic Control (ATC) environment is complex, dynamic and safety-critical. Controllers have to communicate with aircraft and to make high-risk decisions while remaining alert to the occurrence of critical auditory alarms (e.g. collision avoidance). This high information load means that controllers' attention has to be shared between several subtasks, so one could assume that less attentional resources are available for processing additional information not directly related to the focal task. Lack of attentional resources may lead to the failure to detect an auditory alarm, a phenomenon known as inattentional deafness. Given that recent data suggests that fixation duration is a reliable indicator of the processing load, the current study examines the potential of this measure to predict the occurrence of inattentional deafness. Twenty participants performed two ecological ATC scenarios – in the Laby ATC-like microworld – guiding one (low cognitive load) or two (high cognitive load) aircrafts around a given route, while responding to visual notifications related to peripheral aircrafts. At the same time, participants were played standard tones which they had to ignore (probability = 0.80), or deviant tones (probability = 0.20) which they had to report. Behavioral results showed that 28.8% of alarms were not reported in the low load condition and up to 46.2% in the high load condition. In addition, the participants showed longer fixations when they were unable to report auditory alarms. These results suggest that fixation duration could constitute a behavioral indicator of processing load, a precursor of the occurrence of inattentional deafness. Fixation duration measurements have the advantage of being non-invasive and easy to obtain compared to other physiological measures (e.g. skin conductance or electrocardiogram). Potential applications relate to online measurement of cognitive load and integrative online detection and prevention of alarm omission in dynamic and safety-critical situations.

5.2.1 Introduction

The Air Traffic Control (ATC) environment involves supervisory control of emergency response, and security surveillance. Air Traffic controllers must deal with dynamic and cognitively demanding tasks: guiding aircraft through controlled airspace with the safety requirements of maintaining a distance and altitude separation minima between them, while optimizing their trajectories. They must complete this task while being confronted with temporal pressure, stress, and high-risk decision-making situations. They also must be vigilant and responsive to the occurrence of various auditory alarms triggered by safety nets. The auditory channel is essential for air traffic controllers since they have to exchange information with pilots and other controllers through radio and phone communications. Auditory warnings such as ground collision avoidance alerts or area infringement warnings have been increasingly integrated into ATC workstations.

Auditory alerts are known to present various advantages in emergency situations. They provide information without requiring head/gaze movements [28] and have faster reaction times [27]. Yet the risk of missed alarms remains – especially in safety critical situations involving high cognitive load and sustained attention – with several theories indicating that a high cognitive load context can lead to the neglect of auditory alerts [49, 52, 144, 145, 196]. The high perceptual and cognitive load typical of ATC operations may consume most of attentional resources, thus reducing the remaining attentional capacity for processing secondary tasks and additional unexpected events such as auditory alarms. This failure to perceive auditory alarms, called inattentional deafness [16, 67], needs to be detected, so that it can be anticipated or avoided in high risk environments. Characterizing inattentional deafness by behavioral, and most importantly by physiological indicators, both objective and systematic, is essential.

Recent studies have found electro-encephalographic evidence of the occurrence of inattentional deafness [217, 218], through the amplitude of the P300 evoked potential. However, this technique requires many repetitions of the phenomenon to increase the low signal-on-noise ratio implied by EEG under ecological conditions, such as ATC simulation. It allows for a posteriori analysis, testing designs and experimental conditions favoring inattentional deafness, but not online detection or counter-measures. A more direct way to identify inattentional deafness when it occurs, and one that would enable online detection, is still to be developed. One previous study demonstrated that an easier visual task released resources for auditory awareness and stimulus analysis, increasing the auditory P300 to alarms [217]. With the visual modality monopolizing most of attentional resources, we suggest that recording eye behavior while operators are exposed to alarms can inform about their auditory capacity in real time, particularly if they are showing inattentional deafness.

Eye-tracking has been very useful for interface design and for usability tests [102]. Several behavioral ocular metrics – such as the number of fixations and their duration, the scanpath direction and length, or the switching rate between areas of interest-- can provide, non-invasively, a measure of cognitive activity (see [219] for a review). Evidence suggests that when the eye is free to move, fixation location is a strongly correlated with where attention is focused [220]. But while eye tracking is known to reflect visual cognition, it is uncertain whether ocular behavior could reflect further mental processes beyond basic visual encoding of task-relevant information. The present study explores the use of eye-movement measures as indicators of the cognitive processing of unattended auditory alarms.

To evaluate the validity of oculometry as an indicator of inattentive deafness, we recorded the ocular data of participants when performing a realistic ATC simulation task called Laby [177], together with an auditory oddball task. Participants had to acknowledge auditory alarms, as an indicator of their awareness of the sound, while performing the ATC task. Inducing a high level of missed alarms enables comparison between the ocular measurements of missed and reported alarms. To explore the impact of cognitive load on eye behavior and auditory processing, we implemented two levels of cognitive load in terms of the number of aircraft to control in the Laby scenarios.

5.2.2 Materials and Methods

The Laby microworld and the auditory oddball task

The ATC Task

The Laby microworld is a functional simulation of ATC, developed to create and evaluate new designs for controller's visualization. It is built on the main task of guiding one or two aircraft around a route shown on the center part of the screen. For the first half of the Laby scenario, there was only one aircraft to monitor. At the beginning of the second half of the scenario, a second aircraft entered the corridor and participants had to guide both aircraft along the route (Figure 30).

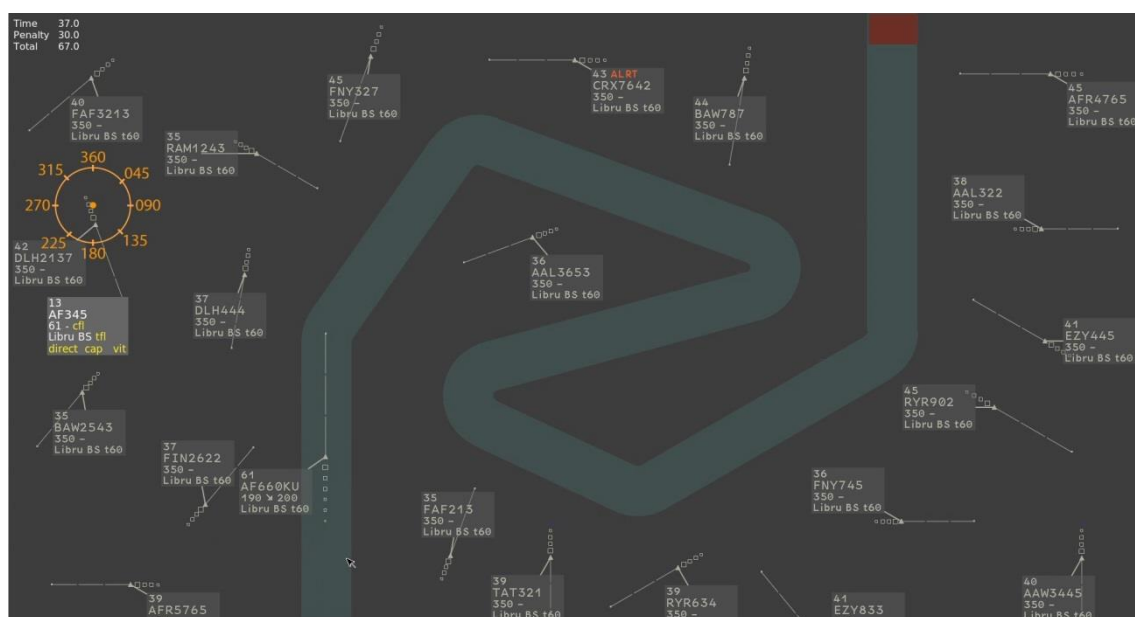


Figure 30. Screenshot of the Laby microworld simulation. An example with 21 static peripheral aircraft positioned around the corridor. The main aircraft navigates through the corridor.

In order to maintain the aircraft within the corridor or to follow altitude instructions, participants had to regularly modify their flight path and altitude, using drop-down menus. The altitude instructions were given via a pop-up window close to the aircraft (cf. Figure 31).

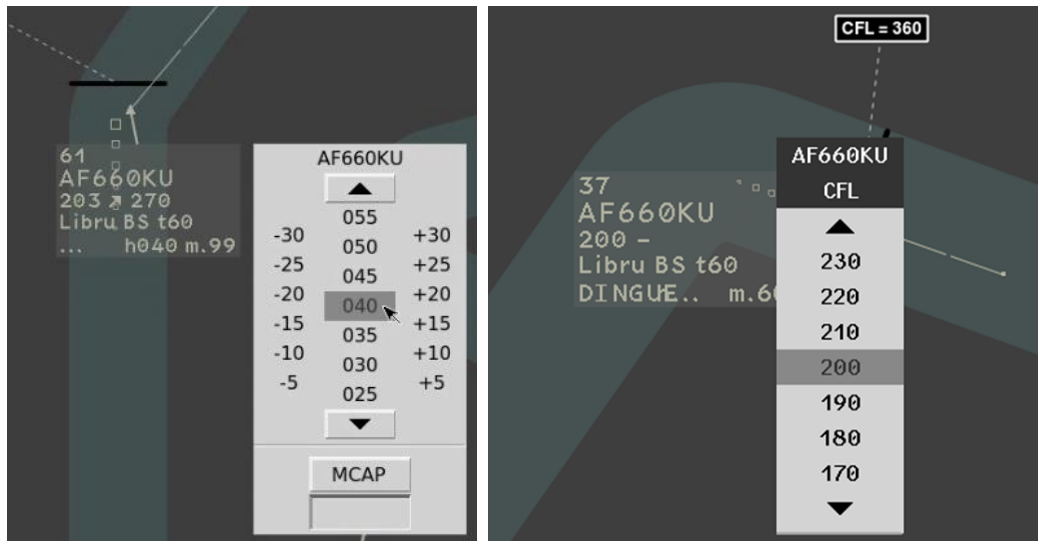


Figure 31. Zoom on the Laby interface. On the left: The window used to select the heading of the plane, which appeared when clicking on the plane's label. On the right: the window used to select the altitude of the plane.

In addition to the central aircraft, participants had to monitor a set of static aircraft located around the main aircraft corridor (Figure 30). “Color-Blink” visual notifications were displayed in or around the radar label located in the vicinity of these peripheral aircraft (Figure 32). Color-Blink uses colored text with the word “ALRT” which blinks at a rate of 800 ms on/200 ms off (see Figure 32, a-b). It is used in ATC operational radar visualization for high-priority short-term conflict alerts. The Laby interface design is similar to operational radar visualization, and has been used in a previous study comparing the performance of several visual notifications in peripheral vision [177]. Compared to other enhanced designs, the Color-Blink notification was found to be less salient and had a lower detection rate among controllers (see [177] for the complete study), suggesting that missed alarms should be relatively high in the current experiment.



Figure 32. The visual notification inspired from the one triggered in ATC radar screens when minimum separation between aircraft is lost. The text ALRT switches from white (a) to red (b) at a rate of 200 ms white/800 ms red.

Visual notifications were randomly displayed in or around the radar label located in the vicinity of these peripheral aircraft. Only one notification was issued at a time. The notification disappeared as soon as the participant clicked on the aircraft. If the participant did not react within a given time, the notification disappeared. Thirty-four visual notifications were displayed in each scenario.

In order to engage the participant in the ATC-like simulation, a score was displayed on the top left of the screen. The score decreased for the following three reasons: first, when a participant led an aircraft outside of the corridor; second, when he/she gave an incorrect altitude instruction; third, when he/she failed to click on a peripheral notification in the

time limit. A deviation in the assigned route resulted in the aircraft crossing the border and initiating a visual alert in the center of the screen. An error in the altitude instructions resulted in the aircraft maintaining its trajectory, with no alert, and continued control. The simulation ended as soon as the first aircraft reached the arrival area (colored red), at the end of the corridor.

To further improve the level of realism, participants performed the simulated ATC-like tasks within the Laby microworld software in two different scenarios with different numbers of peripheral aircraft around the corridor (between 5 and 21). The cognitive load was manipulated by the number of aircraft in the corridor. The low cognitive load condition was the first half of the scenarios, with one aircraft to guide. The high cognitive load condition was the second half of the scenarios, with the additional aircraft. We only considered the effect of the cognitive load with the number of aircraft to guide.

Auditory oddball task

In parallel to the ATC task, participants had to perform an auditory alarm detection task. Standard tones (to be ignored, 1000 Hz, 52.5 dB, 500 ms long, probability = 0.8), and deviant tones (alarms to report, 2000 Hz, 52.5 dB, 500 ms long, probability = 0.2). The tones were not representative of the auditory alerts recently integrated in ATC operations. The frequencies were chosen from the study of P300 components conducted by Kolev et al. [163], and in accordance with previous work on Laby with EEG recording [217]. The mean time window between successive tones depended on the speed of the scenario (slow = 4.2; fast = 2.6 mean time window in seconds between two tones). Participants were told to consider the deviant tones as auditory warnings and to report them as fast as possible by pressing a specific button. The auditory oddball detection task had no impact on the score. The number of auditory alarms (20) was the same in each scenario, 10 in the first half (with one main aircraft) and 10 in the second half (two aircraft). A 42 dB white noise was played continuously during each ATC scenario and during the oddball control tasks.

5.2.3 Objectives and hypotheses

Twenty participants were recruited for this experiment. The cognitive load of the Laby task was manipulated, with the introduction of a second aircraft to guide halfway during the scenarios. To improve the level of realism and engagement in the task, two Laby scenarios were performed, in a counterbalanced order, with variations in the number of peripheral aircraft. Simultaneously with the ATC task, participants were asked to respond to the occurrence of low probability tones (auditory alarms) and to ignore high probability tones, while their ocular activity was recorded. Measuring fixation durations of the eyes and gaze position when alarms are played will indicate if these metrics can effectively reflect participants' deafness or awareness of these alarms.

We predicted that when participants failed to acknowledge an alarm due to inattentive deafness, their attention would instead be engaged in the main task, focused on the central aircrafts, and so demonstrating longer ocular fixations compared to when they heard and reported the alarms.

5.2.4 Participants

Twenty volunteers, all students of Université Laval were recruited for this study (Mean age = 23.5 years, Standard Deviation = 4.2). None had a history of neurological disease, psychiatric disturbance, substance abuse, or took psychoactive medications. They all

received full information on the experimental protocol, signed an informed consent and received compensation for their participation in the study.

5.2.5 Procedure

The whole procedure lasted about 1 hour. First, participants had to fill out two behavioral questionnaires: the Pichot Fatigue questionnaire [37] and the State-Trait Anxiety Inventory (STAI Form Y-B, [38]). Next, participants were seated comfortably at 60 cm from the 30 inch screen in a sound-attenuated room with their right hand on the computer mouse and their left hand on the auditory alarm button. Second, they completed a training phase of 5 minutes to familiarize with the Laby microworld software, i.e. enter correctly path and altitude instructions by the drop-down menus, acknowledge visual notifications, and report deviant sounds. After the training, the eye tracker was calibrated and participants completed the two ATC scenarios. Between scenarios, participants filled out the NASA Task Load Index (NASA TLX, see [39]), and we recalibrated the eye tracker. Finally, participants answered questionnaires about their performance and the design of the task.

Eye tracking measurements and data processing

Continuous binocular eye tracking was performed with a Tobii T1750 during the two ATC scenarios and the two control tasks. The signal was recorded at a sampling rate of 300 Hz. The position of the gaze on the screen was recorded. The fixation duration was calculated as the length of the fixation until the onset of the deviant tones. Data analysis was performed using MATLAB 7.1 (The Mathworks).

Statistical analysis

Statistical analyses were performed using Statistica 7.1 (StatSoft ©). Mean detection rates of auditory alarms and eye fixation duration were calculated for the two cognitive load conditions. Differences between the experimental conditions were investigated with the use of ANOVA followed by post hoc testing (Tukey's honestly significant difference, Tukey HSD).

5.2.6 Results

Behavioral results

There was a significant effect of the number of planes on the detection rate of auditory alarms ($F(1, 19) = 24.50, p < .001, \eta^2 p = .56$). Fewer alarms were reported with two planes ($M = 53.79\%$, $SD = 30.81$) than with one plane ($M = 71.24\%$, $SD = 21.84$)

Physiological results

Fixation duration:

There was a significant main effect of cognitive load on the fixation duration ($F(1, 16) = 40.03, p < .001, \eta^2 p = .71$), with longer fixations in the low load condition ($M = 0.60$ s ; $SD = 0.13$) than in the high load condition ($M = 0.52$ s ; $SD = 0.10$).

There was also a significant effect of detection (missed vs. reported alarms) ($F(1, 16) = 7.687, p < .05, \eta^2 p = .32$). Fixations lasted longer when alarms were missed ($M = 0.58$ s ; $SD = 0.15$) than when participants reported them ($M = 0.54$ s ; $SD = 0.09$).

Finally, there was a significant 'detection x cognitive load' interaction ($F(1, 16) = 73.47, p < .001, \eta^2 p = .82$), as illustrated in Figure 33. Longer fixations were observed with

missed alarms than with the detected ones in the low load condition, whereas in the high load condition the effect was the opposite: shorter fixations with missed alarms than with reported alarms.

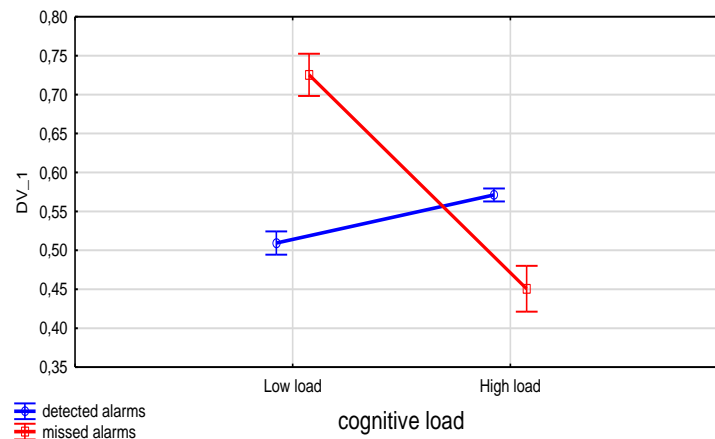


Figure 33. Eye fixation duration when alarms are missed or detected, in the low and high load condition. There is a significant detection x cognitive load interaction, $p < .001$.

5.2.7 Discussion

We used a realistic ATC micro-world in conjunction with an auditory alarm detection task (oddball paradigm). Participants had to guide one (low load condition) or two aircraft (high load condition) within an airspace corridor, while responding to visual notifications auditory alarms (deviant sounds). The number of reported auditory alarms was used as an indicator of their awareness of the auditory alarms. We recorded participants' fixation duration, anticipating difference between missed and reported auditory alarms, opening the way to online detection of inattentive deafness.

In the low load condition, we observed that participants successfully detected the alarms when they were engaged in shorter fixations, while missed alarms were associated with longer fixations. This result can be interpreted as the variations of fixation duration according to the level of workload. Fixation duration is known to reflect the attention of an observer [220], and its mental effort [221]. In this last study on simulated flights, De Rivecourt showed momentary altitude changes resulted in increased mean fixation duration. In our experiment, even if the overall resulting cognitive load was considered as a "low load condition", cognitive load varied during this first part of the scenarios, depending on the apparition of an instruction, a notification or a change of path. Those changes may certainly require that participants momentarily make a greater effort to deal with the ATC task, using more attention and cognitive resources. As cognitive load has already been proven to induce inattentive deafness [218], these moments of higher load are more likely to fill the attentional capacity of the participants, then causing them to miss auditory alarms. This propensity of a visual scene to monopolize attention resulting in excessive focus and reduced peripheral awareness is known as attentional tunneling [7, 9]. Long fixations can be considered as the results of an important orientation of participants' attention on a particular detail of the main task, while short fixations reflect a moderate engaging of attention, leaving remaining attentional resources for the detection of unexpected events. In this situation, the analysis of fixation duration provides not only a direct measure of mental effort or cognitive load, but also indirectly an indication on the perception outcome of an alarm.

Interestingly, this difference in the mean fixation duration between reported and missed alarms is reversed in the high cognitive load condition. This apparent contradiction requires a more detailed analysis of the ATC task, to demonstrate that shorter fixations are not, under these specific circumstances, the result of lower mental effort as suggested in our previous point. In the high load condition, participants had to manage two planes in the corridor. Guiding both planes securely was equally important. To manage that, participants had to split their attention, according less time to each plane in comparison to the low load condition. Therefore, participants logically shifted from one plane to the other more frequently, resulting in a decrease in the mean fixation duration. The shorter fixations hence cannot be interpreted as a decrease in cognitive load in this particular task, but quite the contrary as the multiplication of visual targets to monitor. In this way, reported alarms occurred when participants were exhibiting longer fixations, reflecting the moments when participants had successfully dealt with urgent matters regarding the path of both planes. They were not completely monopolized by shifting their attention between them, then having remaining capacity for attending to auditory alarms. As for missed alarms, they are associated with the shorter fixations, indicating the participants are under higher mental effort shifting from one plane to the other more frequently, and then have a higher probability of enduring inattentive deafness.

The significant difference of fixation duration between missed and reported alarms can then be interpreted as the indirect impact of cognitive load in both conditions. Furthermore, the fixation duration associated with reported alarms in the high load condition was not significantly different that in the low load condition, suggesting the existence of a middle ground ideal for controllers awareness to alarms, with fixations not too long to induce attentional tunneling, and not too short as a result of too many visual targets to attend to. But this implies that depending on the number of visual targets of the task, eye movements' strategies can be modified. The direction of the difference in fixation duration can change. A careful examination of the task and a precise calibration will be required, for each specific task phase.

The present study suggests that oculometry can provide reliable cues on the upcoming perception of an auditory alarm during ATC simulation task. Depending on the level of cognitive load implied and the nature of the task, fixation duration can reflect the inability of an operator to treat an unexpected alarm. These results are very promising for upcoming research on online evaluation of mental workload, but also more specifically and surprisingly on the online detection of inattentive deafness. The usability and reaction times of eye tracking metrics such as fixation duration make them efficient and encouraging candidates for brain-computer interfaces [102], even in realistic and dynamic environments like ATC simulation. Eye tracking measurements can provide information about the objective capacity of an operator within a mission context, and then provide a basis for the intelligent adaptation of computer-based assistance [222] if needed.

5.2.8 Acknowledgments

We would like to thank Danny Lebel for his technical support, and Marie-Kim Côté for her help running the experiment. We are also grateful to Zarrin Chua for proofreading earlier versions of the paper. Financial support was provided by a Discovery grant from the National Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC), awarded to Sébastien Tremblay [grant number CG073877], by the Institut Supérieur de

5.2 Article 3 (soumis au journal *Frontiers in Human Neuroscience*)

l'Aéronautique et de l'Espace to in the form of an operating grant to M. Causse, and also by the Direction Générale de l'Armement in the form of a scholarship to L. Giraudet.

5.3 Résultats complémentaires ne figurant pas dans l'article soumis

Performance à la tâche centrale de guidage des aéronefs

Les résultats n'ont montré aucun effet significatif du nombre d'avions centraux dans le couloir (charge cognitive), ni de la charge visuelle sur le nombre d'instructions d'altitude entrés correctement (resp. $F(1, 19) = 0,86$, $p = 0,36$, $\eta^2p = .04$ et $F(1, 19) = 0,64$, $p = 0,43$, $\eta^2p = 0,03$).

L'analyse des temps de réaction a montré un effet significatif de la charge cognitive ($F(1, 19) = 31,20$, $p < 0,001$, $\eta^2p = 0,62$), avec de plus grands temps de réaction pour entrer les instructions d'altitudes avec deux avions ($M = 5,49$, $SD = 1,44$) que un avion dans le couloir ($M = 3,98$ s, $SD = 0,45$), et aucun effet de la charge visuelle ($F(1, 19) = 1,43$, $p = 0,25$, $\eta^2p = .07$).

Taux de détection des notifications visuelles

Nous avons observé un effet significatif de la charge cognitive sur le taux de détection de notification ($F(1, 19) = 37,46$, $p < 0,001$, $\eta^2p = 0,66$), et aucun effet de la charge visuelle ($F(1, 19) = 3,74$, $p = 0,07$, $\eta^2p = 0,16$). Moins de notifications ont été détectés avec deux avions ($M = 47,45\%$, $SD = 17,73$) qu'avec un avion ($M = 62,25\%$, $SD = 17,08$).

Nous avons aussi mis en évidence un effet significatif du nombre d'avions sur les temps de réaction aux notifications visuelles ($F(1, 19) = 13,43$, $p < 0,01$, $\eta^2p = 0,412$), avec des temps de réaction plus long avec deux avions ($M = 3,16$ s, $SD = 1,09$) qu'avec un seul ($M = 2,70$ s, $SD = 0,44$), et aucun effet de la charge visuelle ($F(1, 19) = 0,19$, $p = 0,67$, $\eta^2p = 0,01$).

PARTIE 3.

Discussion et perspectives

CHAPITRE 6

Etudes complémentaires

6.1 Etude de la distractibilité auditive

L'objectif à long terme de cette thèse est de réduire (voire de faire disparaître) la surdité aux alarmes. Cependant, il serait dangereux d'augmenter la distractibilité des pilotes car la performance à la tâche principale pourrait en être affectée. Les processus cognitifs sous-tendant la surdité attentionnelle et la distraction sont partiellement communs [49, 91, 146]. Cela nous a amené à nous intéresser aussi au phénomène de distraction en contexte aéronautique.

Les tâches d'interférence permet de mesurer l'impact de stimuli distrayeurs sur la réalisation d'une tâche principale, cette dernière étant associée à différents degrés de charge cognitive [49, 146]. Quand la charge cognitive est élevée, le distracteur ne devrait plus avoir d'effet sur la tâche principale, puisqu'il sera impossible d'allouer des ressources pour le traiter si la tâche principale les accapare. Nous nous sommes intéressées, dans le cadre du stage de M2R de Marine Gonzalez au DCAS, à la mesure de la distraction auditive.

La distraction (cf. paragraphe 1.2.2) peut être définie comme une redirection involontaire de l'attention vers d'autres aspects de l'environnement [65]. L'interférence désigne un phénomène de compétition entre deux stimuli. Le stimulus non-pertinent à la tâche en cours, mais proche du stimulus cible, va créer l'interférence, qui sera le reflet de processus dynamiques et adaptatifs de l'attention sélective, tel que l'inhibition par exemple.

Les tâches de distraction permettent donc d'observer la perturbation des performances comportementales dans une tâche primaire auditive ou visuelle, par des sons déviants et imprévisibles apparaissant en dehors du focus attentionnel. La chronologie de la participation des processus cérébraux impliqués dans la distraction peut s'observer au travers de la génération de potentiels évoqués tels que la N1, la MMN ou la P300 [65]. L'étude de l'interférence est complémentaire de celle de surdité inattentionnelle dans la compréhension des phénomènes de négligence d'alarme auditive. En effet, alors que l'évaluation directe de la surdité inattentionnelle oriente volontairement l'attention des participants vers le stimulus cible, auquel il doit répondre, le paradigme d'interférence permet d'évaluer la capacité du participant à allouer automatiquement des ressources à un type de stimulus non attendu. Les stimuli non attendus, mais pourtant critiques, sont légions dans l'historique des incidents et accidents aéronautiques.

Description du protocole

Pour l'expérience que nous avons menée au DCAS (stage M2R de Marine Gonzalez, 2014), la tâche principale était une tâche de pilotage dans laquelle le participant devait diriger un avion situé à droite de l'écran à l'aide d'un joystick. Trois autres avions de couleur différente (rouge, vert, bleu ou jaune) étaient disposés en ligne horizontale sur la gauche de l'écran. A chaque essai, un mot de couleur (ex : bleu) était présenté au centre de l'écran. L'objectif était de suivre l'avion correspondant au mot de couleur écrit parmi les trois présents sur l'écran (instruction écrite). Un mot de couleur était aussi présenté verbalement et simultanément à l'instruction écrite. Ces stimuli auditifs devaient eux être ignorés. Les stimuli auditifs (distracteurs) étaient soit compatibles, soit incompatibles avec l'instruction écrite.

Nous avons utilisé ce paradigme de compétition visuo-auditive afin d'évaluer l'effet des distracteurs auditifs sur une tâche de pilotage simplifiée dont la réalisation nécessite

le traitement de stimuli visuels (instruction écrite ; voir la Figure 34, pour une description plus complète, voir annexe 5).

Nous avons aussi fait varier la charge cognitive associée à la tâche à l'aide d'une tâche de n-back. L'expérience était réalisée suivant deux conditions : une condition 0-back où les participants devaient appliquer directement l'instruction écrite et une condition 2-back où les participants devaient appliquer l'instruction écrite présentée deux essais en amont. La réalisation de la condition 2-back nécessite de bonnes capacités de mémoire de travail et est associée à une plus grande charge cognitive que la condition 0-back [223] (cf. Figure 34).

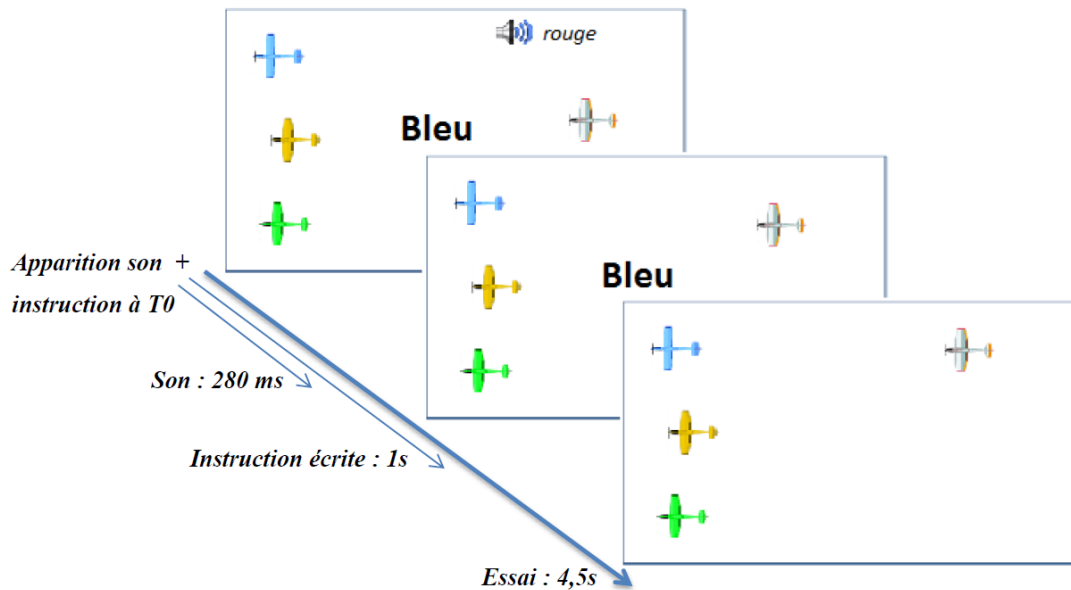


Figure 34. Déroulement d'un essai de la tâche expérimentale.

En plus de nos hypothèses sur l'augmentation de la difficulté de la tâche principale qui devrait provoquer une moins bonne intégration des instructions visuelles et auditives (accroissement des temps de réaction, diminution de l'amplitude de la N100, de la P300 et augmentation du diamètre pupillaire) [95, 96, 112, 114, 146, 224, 225], nous avons émis l'hypothèse que l'effet d'interférence (i.e. le traitement du stimulus distracteur) devrait diminuer avec l'augmentation de la charge cognitive associée à la tâche. Ces prévisions devraient corroborer la théorie de Lavie, s'appliquant quant à elle aux effets de la charge perceptuelle.

Seize participants de sexe masculin ont été recrutés pour l'expérience. Ils étaient âgés en moyenne de 24.7 ans (écart type = 1,8).

Résultats

L'analyse du questionnaire NASA-TLX montre que les participants ont constaté une augmentation de la difficulté en condition 2-back par rapport à la condition 0-back. Les résultats ont montré une diminution de l'amplitude de la P300 ainsi qu'une augmentation du diamètre pupillaire, accompagnées d'une dégradation des performances dans la condition de charge cognitive la plus élevée (n-back 2) par rapport à la condition de faible charge cognitive (n-back 0). Comme déjà démontré dans la littérature [90, 111, 218, 225],

le diamètre pupillaire et l'amplitude de la P300 semblent être de bons indicateurs du niveau de charge cognitive.

En plus de cette sensibilité à la charge cognitive liée à la mémoire de travail, les résultats ont révélé que la réaction pupillaire reflète également la charge cognitive induite par le traitement des stimuli auditifs non-pertinents. Dans la condition de faible charge, les stimuli auditifs non-congruents évoquaient une plus grande réponse pupillaire par rapport aux distracteurs congruents, montrant un effort supérieur pour résoudre le conflit d'interférence auditif-visuel. Cet effet n'a pas été retrouvé dans des conditions de charge plus élevées. Pour la présentation complète des résultats pupillométriques, voir [226]. L'augmentation du diamètre pupillaire et les réponses à la tâche principale indiquent qu'en condition de faible charge cognitive, les participants sont à court de ressources cognitives pour traiter les distracteurs auditifs. Ces résultats sont en accord avec l'hypothèse que la capture attentionnelle des stimuli non pertinents est altérée par l'augmentation de la charge cognitive.

Conclusion

Contrairement aux composantes N100 et P300, le diamètre pupillaire a montré une sensibilité au phénomène d'interférence, et est donc préconisé pour de futures études sur la distraction due aux alarmes auditives.

S'intéresser à la distraction, phénomène inverse de la surdité inattentionnelle, fait partie des perspectives de recherche du laboratoire. Sa complémentarité et son antagonisme avec la surdité inattentionnelle en font un moyen d'étudier cette dernière indirectement. Et bien entendu, la distraction, en particulier l'interférence avec la tâche d'intérêt, constitue en elle-même un enjeu pour la sécurité aérienne.

6.2 Contre-mesures cognitives exploitant les propriétés des neurones miroirs

Dans le cadre de cette thèse, ayant pour objet la surdité inattentionnelle, nous avons en tête l'objectif essentiel que constitue, au-delà de la prévention et de la détection du phénomène, la recherche de solution en temps réel pour récupérer un opérateur en état de surdité.

Contres mesures cognitives

Les contre-mesures cognitives affichées directement dans l'interface des opérateurs (dans le cockpit ou sur l'écran de contrôle des contrôleurs) sont un moyen de «remettre dans la boucle» un opérateur en état de tunnellation, par exemple en utilisant des contre-mesures visuelles lorsque la modalité auditive est inopérante, comme en cas de surdité inattentionnelle. Des contre-mesures actuellement explorées au DCAS consistent à retirer l'information faisant l'objet de toute l'attention de l'opérateur puis d'afficher, à cet emplacement, un message présentant les actions à entreprendre [108]. Ainsi, c'est l'interface qui assure le désengagement de l'attention (retrait ciblé d'informations) et l'accrochage attentionnel (envoi d'informations dans le champ visuel). Cependant, le principe du retrait d'information et des contre-mesures envahissantes est encore mal accepté par les pilotes et les contrôleurs, qui craignent de perdre des informations cruciales qu'ils ont appris à surveiller en continu. Le gain en performance ou en temps de

réaction à ces contre-mesures doit donc être vraiment important pour contrebalancer cette gêne des opérateurs.

Nous avons envisagé, dans le cadre de recherches préliminaires sur des contre-mesures possibles pour le cas de la surdité inattentionnelle en situation de pilotage, une approche qui consiste à suggérer le plus rapidement et le plus clairement possible l'action à entreprendre, sans forcément masquer pour autant une information déjà existante. Le principe fondateur repose sur l'hypothèse que montrer l'action va venir activer les neurones miroirs [227, 228], dont l'existence chez l'homme semble de plus en plus plausible [229-231]. En cas d'urgence, les contremesures se matérialisent par l'affichage d'une action, sous forme d'une animation projetée directement sous le regard de l'opérateur. Le principe est de suggérer efficacement la procédure d'urgence en affichant, par exemple, une main tirant sur le manche dans le cas d'une remise des gaz pour éviter un obstacle ou un atterrissage dangereux. De nombreuses collisions avec le terrain ou décrochages pourraient être évités simplement par une action appropriée du pilote à cabrer ou à piquer. Il est envisageable que la perception d'une telle action pourrait suggérer très rapidement au pilote le comportement approprié. En effet, selon la théorie des neurones miroirs, la perception d'une action et son exécution implique des populations de neurones communes. Ces contre-mesures pourraient donc entraîner la pré-activation de ces neurones via la perception de l'action [232], contrairement aux alarmes existantes en cas de collision avec le terrain, tel que des travaux précédents menés au DCAS en 2009 l'ont suggéré [233].

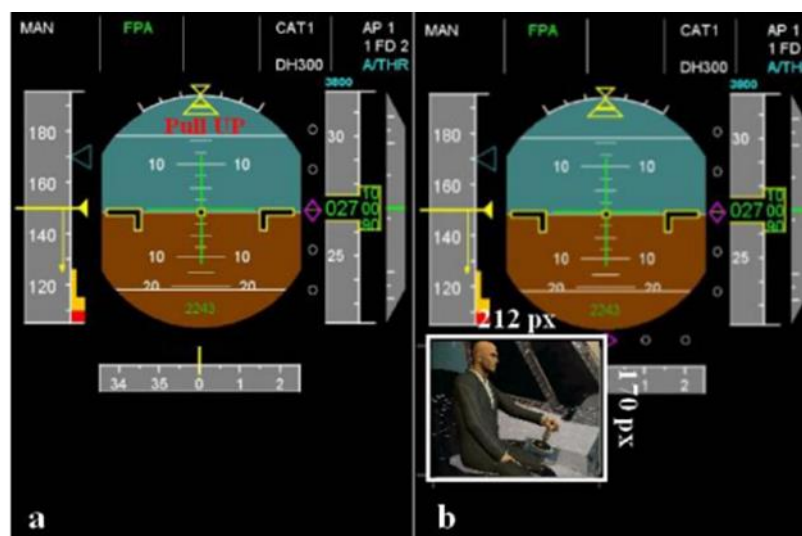


Figure 35. GPWS warning sur simulateur. (a) alerte classique « Pull Up ». (b) contremesure pour l'activation des neurones miroir.

Protocole

Avec l'aide d'étudiants de l'ISAE (Florient Chouteau et Jérémy Galliot), nous avons (voir détails de l'étude annexe 6) effectué des pré-tests en simulation sur ordinateur avec cinq participants. Il s'agissait de comparer l'activation des neurones miroirs (se manifestant par une diminution de la puissance de la bande de fréquence « μ », 8-13Hz [227, 234]) pour trois types d'alarme : une alarme classique utilisée dans le cockpit avec un texte rouge « Pull Up » incrusté dans le PFD, une contre-mesure vidéo montrant un pilote réalisant une remise des gaz avec les mêmes joysticks que les participants, et une vidéo « contrôle » montrant un pilote effectuer les gestes de la remise de gaz en l'absence des joysticks.

Résultats préliminaires

Les résultats, bien que très succincts, indiquent que la contre-mesure – l’animation présentée simultanément à l’alarme – diminue la puissance de la bande μ chez pilotes. En effet, l’alarme classique « Pull Up » et la vidéo « neurones miroirs avec joystick » ont causé une diminution significative (resp. $p = .039$ et $p = 0.053$) de la fréquence μ par rapport à la vidéo sans joysticks. Le manque de contexte dans cette dernière vidéo ne permet pas d’associer de façon évidente cette image à l’action de remise des gaz. Le fait que l’alarme classique semble stimuler autant les neurones miroirs que la contre-mesure vidéo avec joysticks peut provenir de l’habitude d’utilisation des participants envers cette alarme, dont l’objectif et l’action associée sont bien connus des pilotes.

Ces résultats préliminaires sont encourageants. Ils semblent indiquer que l’introduction d’une animation (contre-mesure) en plus de l’alarme sonore améliore la performance et la réactivité des pilotes, potentiellement grâce à l’activation des neurones miroirs. Des mesures et analyses statistiques doivent être réalisées sur une population plus grande afin de confirmer ces résultats, et de tester l’efficacité de la vidéo « neurones miroirs » sur des participants non-habitués à l’alarme classique. Il pourra ensuite être envisageable d’importer ces contre-mesures directement dans le cockpit du simulateur de vol afin de tester leurs efficacité en condition écologiques.

CHAPITRE 7

Discussion générale et perspectives

Nous l'avons vu, dans le domaine aéronautique, les alarmes auditives sont omniprésentes. Bien que leur utilité soit indéniable pour la sécurité, leur usage semble avoir certaines limites. En effet, un certain nombre d'accidents est dû à l'absence de réaction au déclenchement d'une alarme [133]. Une des causes possibles de cette omission est le phénomène de surdité inattentionnelle [16]. Dans un environnement comportant un grand nombre d'informations variées et provenant de sources différentes, comme cela peut être le cas pour le pilotage et le contrôle aérien, un individu peut se retrouver en situation de charge perceptuelle et cognitive élevée [20, 209]. Certaines informations auditives peuvent alors ne pas être perçues ou ne pas être traitées, lorsque les ressources attentionnelles sont allouées à une ou plusieurs autres tâches. Il est donc primordial de définir des métriques comportementales et physiologiques permettant de détecter ce phénomène. Cela a été le but principal de cette thèse. Pour cela, nous avons reproduit la surdité inattentionnelle en laboratoire grâce des protocoles expérimentaux contrôlés, testé la validité de différentes métriques comportementales et physiologiques traduisant ce phénomène, mis en évidence certaines de ses causes dans le cas du pilotage et du contrôle aérien, et donné des pistes permettant de la détecter pour pouvoir finalement en limiter ses conséquences.

Cette thèse se compose de trois expériences. Dans la première expérience que nous avons réalisée, nous nous sommes intéressés à la surdité attentionnelle chez le pilote, et plus particulièrement à l'impact de la charge cognitive sur les probabilité de son apparition [218]. Elle consistait en une tâche d'atterrissage sur ordinateur, de niveau de difficulté variable, durant laquelle des sons standards et des sons rares simulant les alarmes étaient joués. Les participants devaient signaler uniquement les alarmes et ignorer les sons standards. Ils étaient équipés d'un casque EEG permettant l'enregistrement de leur activité cérébrale tout au long de l'expérience. Nous avons examiné la proportion d'alarmes manquées en fonction de la difficulté de la tâche d'atterrissage. Les résultats ont mis en évidence une diminution de la performance dans la tâche (c.à.d. la détection des alarmes) lorsque la difficulté de celle-ci augmentait. Cela suggère que la majorité des ressources attentionnelles des sujets étaient mobilisées par la tâche principale et n'étaient donc plus disponibles pour le traitement des informations auditives. Cela amenait les sujets à manquer des alarmes. De plus, nous avons mis en évidence une corrélation entre le nombre d'alarmes manquées et l'amplitude de la P300 générée en réponse aux alarmes. L'amplitude de la P300 diminuait avec la détection des alarmes des participants, constituant ainsi un bon candidat pour évaluer au niveau physiologique l'efficacité de nouveaux designs d'alarmes ou détecter à posteriori la surdité inattentionnelle.

Lors de la deuxième expérience réalisée cette fois avec une simulation réaliste de contrôle aérien, nous avons testé l'effet de la libération de ressources attentionnelles, préalablement allouées au traitement de l'information visuelle, sur le traitement de l'information auditive [217]. Nous avons fait varier séparément la charge perceptuelle et la charge cognitive au cours d'une simulation de contrôle aérien en micro-monde réaliste. Ces deux types de charges sont très élevés dans un cockpit comme dans une salle de contrôle aérien. Il est donc primordial de comprendre à quel point et comment chaque type de charge mentale influence le phénomène de surdité inattentionnelle. Nous avons également testé l'effet de deux notifications visuelles différentes, une saillante et une plus discrète (semblable à celle actuellement utilisée), donc plus difficile à repérer sur l'écran. L'analyse des résultats a montré que les notifications plus saillantes permettaient une augmentation des performances au guidage de l'avion (temps de réaction et pourcentage

de bonnes réponses). De plus, les résultats ont révélé l'utilisation de ce type de notification amenait à une augmentation de l'amplitude de la P300 générée en réponse aux alarmes auditives. La diminution de l'effort nécessaire à la réalisation de la tâche visuelle permise par ces notifications plus saillantes accompagnée d'une augmentation de l'amplitude de la P300 en réponse aux alarmes auditives, démontre que la libération de ressources attentionnelles précédemment allouées au traitement de l'information visuelle, facilite et améliore le traitement de l'information auditive. Cette observation de l'effet physiologique du design de la notification ne se retrouve pas sur les mesures comportementales du taux de détection des alarmes auditives. Ainsi, les mesures EEG procure une vision plus approfondie des capacités de traitement des individus, avant même que leur saturation se manifeste sur leur performance apparente. Ces résultats constituent une piste prometteuse dans la lutte contre la surdité inattentionnelle en contextes visuellement chargés. En revanche, le taux de surdité inattentionnelle est resté relativement bas au cours de cette étude, et nous n'avons pu étudier les rôles distincts de la charge perceptuelle et de la charge cognitive.

Dans une troisième expérience, nous avons cherché à comprendre les faiblesses du protocole précédent afin d'augmenter le taux de surdité inattentionnelle de nos participants, en focalisant nos investigations sur ce phénomène cette fois-ci à l'aide de métriques oculaires. Nous avons repris le protocole précédent en accentuant l'engagement des participants en augmentant la complexité de la tâche de contrôle aérien et en mesurant cette fois l'activité oculaire des sujets. Le meilleur engagement de la nouvelle tâche a permis d'augmenter considérablement le taux de surdité inattentionnelle des sujets (de 5% dans l'expérience n°2 à 46% dans l'expérience n°3). Nous avons également observé que la durée des fixations oculaires lors de l'apparition d'une alarme variait selon que l'alarme était détectée ou non. En charge modérée, si l'alarme intervenait pendant une fixation longue, l'opérateur, focalisé sur la réalisation de la tâche visuelle, entendait moins fréquemment l'alarme auditive. De même, en charge plus élevée, si une alarme intervenait lorsque l'opérateur présentait un comportement d'exploration (fixations courtes), elle avait moins de chance d'être perçue. Ainsi, la mesure de l'activité oculaire (plus simple, acquise en temps réel et moins invasive que l'EEG) pourrait s'avérer être un marqueur de la probabilité de détection des alarmes auditives par les opérateurs.

Nous présentons dans les paragraphes suivants les conclusions de ce travail de thèse sur la surdité inattentionnelle, et discutons les aspects méthodologiques, les mesures physiologiques et facteurs caractéristiques, ainsi que les implications de ces résultats dans la détection et la prévention de la surdité inattentionnelle. Enfin nous présenterons les perspectives de travail sur ce sujet.

7.1 Méthodologie

Le premier défi de ce travail de recherche a été de concevoir des protocoles expérimentaux permettant de recréer le phénomène de surdité inattentionnelle à une fréquence suffisante pour réaliser des mesures physiologiques.

Pour la première expérience que nous avons réalisée, étant donnée la grande variabilité inter-individuelle de perception des alarmes auditives rares observée grâce à des pré-tests, nous avons privilégié une tâche présentant une quantité d'alarmes la plus importante possible (le protocole oddball dans lequel les sons rares, 20%, représentaient des alarmes) dans un temps raisonnable pour un participant équipé d'un casque EEG, soit 1h. Ainsi, le principal effet que nous cherchions à mettre en évidence était l'effet de la

charge cognitive sur le nombre d'alarmes manquées et les ERPs générés par l'ensemble des alarmes. Pour cela, nous avons créé des situations d'atterrissage sous la forme de courtes vidéos, de difficulté variable et induisant une charge cognitive et une pression temporelle suffisamment élevées pour provoquer de le phénomène de surdité inattentionnelle. Ce protocole a permis au final d'obtenir une proportion suffisante d'alarmes manquées, 21.7% en charge faible et 31.9% en charge élevée, qui a permis l'observation d'un effet significatif de la charge cognitive sur la P300, et a permis de réaliser une analyse de corrélation entre le nombre d'alarmes manquées et la diminution de la P300 qui s'est avérée statistiquement significative.

L'objectif principal de la seconde expérience était d'observer les bénéfices d'un changement de notification visuelle, se traduisant par la limitation du phénomène de surdité inattentionnelle. La tâche prédéfinie de contrôle ATC simplifié mais réaliste impliquait une manipulation des paramètres plus contraignante que pour la tâche conçue pour la première expérience. Au final, ce protocole nous a permis d'observer un taux moyen de surdité aux alarmes auditives de 5%. Malgré ce taux relativement faible, qui explique au moins partiellement que le design des notifications n'ait pas eu d'effet sur les performances des opérateurs, nous obtenons un effet significatif de la charge cognitive sur l'amplitude de la P300 élicitée par les alarmes. Nous avons recueilli les retours des participants concernant la tâche pour trouver les moyens de l'adapter pour provoquer plus de surdité inattentionnelle. Il en est ressorti que le contrôle des avions par consignes ponctuelles réduisait l'engagement des participants dans la tâche principale de guidage de l'avion dans son couloir aérien.

C'est pourquoi nous avons introduit un contrôle manuel continu de la trajectoire des avions dans la troisième expérience, qui reprenait le même contexte ATC dans le but d'évaluer l'intérêt de métriques oculaires dans la détection de la surdité inattentionnelle. L'objectif était donc d'atteindre un taux de surdité important (se rapprochant au maximum des 50%) offrant un nombre de mesures du phénomène de surdité suffisant pour permettre des analyses statistiques comparant les alarmes signalées et manquées. Nous avons réussi à obtenir des taux d'alarmes manquées de 28.8% en charge faible et 46.2% en charge élevée. Les modifications dans le contrôle des avions et dans la manipulation de la charge cognitive en introduisant un deuxième avion à gérer a permis dans le même temps de se rapprocher des conditions de travail réelles des contrôleurs.

Ainsi, nous avons réussi à créer des protocoles adaptés aux effets que nous souhaitons étudier, en trouvant un compromis entre simplification, difficulté, répétitions et réalisme. Etant donné les applications spécifiques différentes (pilotage et ATC), la variabilité interindividuelle et l'impact de l'expertise sur les performances des participants, il s'est révélé essentiel de valider les protocoles par des pré-tests approfondis. Les tâches conçues dans le cadre de cette thèse se sont révélées pertinentes et donnent lieu à de nouvelles expériences au DCAS.

7.2 Caractéristiques de la surdité inattentionnelle

La reproduction de la surdité inattentionnelle en laboratoire nous a permis d'étudier ses caractéristiques, de déterminer plus précisément ses conditions d'apparitions et ses manifestations sur le plan neurophysiologique.

7.2.1 Facteurs de sensibilité

Les résultats des expériences 1 et 2 ont confirmé que la charge perceptuelle comme la charge cognitive favorisent l'apparition du phénomène de surdité inattentionnelle [217, 218].

Il a été démontré que la charge perceptuelle ne diminuait pas forcément la performance de détection des alarmes au niveau comportemental, tout en réduisant visiblement les ressources cognitives allouées au traitement de l'information auditive [217], venant ainsi renforcer l'hypothèse d'un bassin de ressources commun partagé entre les modalités visuelle et auditive. Ces résultats constituent donc une première piste pour la prévention de la surdité inattentionnelle : des progrès sur l'ergonomie de l'interface visuelle, notamment sur le critère de la saillance, bénéficieront aux capacités attentionnelles auditives des opérateurs.

La charge cognitive des opérateurs varie suivant l'ergonomie de l'interface utilisée [53]. Cependant, elle dépend essentiellement de la nature même des tâches étudiées qui peuvent être plus ou moins complexes, dynamiques et/ou stressantes. Si la charge cognitive ne peut donc pas être facilement réduite, elle peut néanmoins être surveillée. Une solution plus systématique consisterait à détecter en temps réel de la surdité inattentionnelle.

7.2.2 Les marqueurs physiologiques

Nous avons mis en évidence la validité de l'amplitude de la P300 en tant que marqueur physiologique du traitement cognitif des alarmes auditives. Elle apparaît directement corrélée au nombre d'alarmes signalées. Une diminution de son amplitude témoigne d'un manque de ressources attentionnelles pour le traitement auditif, qui peuvent être accaparées par une tâche visuelle sans que cela se ressente au niveau comportemental (cf. deuxième expérience). Ce manque de ressources poussé à l'extrême peut mener au non-traitement de certaines alarmes (expérience 3).

La P300, déjà connue pour être un indicateur de la charge cognitive, constitue donc à la fois un marqueur caractéristique du traitement d'une alarme (quand elle est ample), mais aussi un indicateur de la surdité inattentionnelle (quand elle diminue) [218]. Une diminution de son amplitude traduit un manque de ressources cognitives sans même que celui-ci ne se manifeste par des alarmes manquées sur le plan comportemental [235].

L'analyse de l'amplitude de la P300 nécessite un certain nombre de répétitions de alarmes (une vingtaine minimum) et un traitement à posteriori des données. Si elle ne permet pas encore la détection online de la surdité inattentionnelle, la P300 est un marqueur tout à fait adapté pour mettre en évidence des facteurs favorisant ou prévenant son apparition. Elle permet par exemple la comparaison de design de notifications visuelles et de détecter des situations indétectables avec les seules mesures comportementales, comme dans l'expérience 2. On peut également envisager des applications à la conception ou à l'amélioration des alarmes auditives, et plus généralement au design d'interface pour les pilotes et les contrôleurs.

L'autre métrique d'intérêt que nous avons étudiée est la mesure du comportement oculaire. Le comportement oculaire est également connu pour refléter la charge de travail d'un opérateur [101]. La troisième expérience nous a permis de montrer que la durée de fixation au moment de l'apparition d'une alarme auditive reflétait la perception de cette alarme par l'opérateur. De nombreuses analyses sont possibles (AOI, durée et nombre de

fixations, de saccades, diamètre pupillaire etc.) et peuvent être réalisées quasiment en temps réel. De plus, le matériel impliqué est moins invasif pour l'opérateur et son installation plus simple que l'EEG.

L'oculométrie apparaît donc comme étant une technique très prometteuse, qui permettrait d'embarquer des capteurs au sein des cockpits ou de les installer dans les salles de contrôle aérien. Cela permettrait aux opérateurs d'obtenir des informations en temps réel sur leur état attentionnel ainsi que sur la qualité de leur traitement cognitif des alarmes, et donc la probabilité d'avoir manqué une alarme critique.

7.3 Prévention

L'amélioration de la sécurité aérienne peut être au moins partiellement améliorée en adressant le problème de la surdité inattentionnelle. Deux solutions s'offrent à nous : prévenir la surdité, ou détecter son apparition en temps réel.

Concernant l'aspect préventif, nous pouvons nous appuyer sur les facteurs que nous avons mis en évidence comme favorisant la surdité inattentionnelle : la charge perceptuelle et la charge cognitive. Des études peuvent être menées sur les tâches réalistes spécifiques, afin de déterminer les situations ou les configurations particulièrement dangereuses favorisant l'apparition du phénomène de surdité inattentionnelle. Des travaux en amont permettent également d'évaluer les bénéfices et l'efficacité d'un changement dans l'interface (cf. expérience 2, CHAPITRE 4). Ces études en amont permettent la conception et la validation de designs d'interface plus utilisables, de notifications visuelles et d'alarmes auditives plus efficaces. Une approche neuro-ergonomique nous permet d'évaluer les bénéfices de performance sur les différentes sous-tâches au niveau physiologique ainsi que l'utilisabilité et l'acceptation par les opérateurs.

Ces méthodes de prévention offrent une marge d'amélioration certaine, mais elles ne permettent pas de prendre en compte des variations imprévues de la charge, l'état de fatigue d'un opérateur, ou des capacités qui peuvent varier d'un individu à l'autre (comme le stress ressenti). Pour aller encore plus loin, nous nous intéressons pour finir à la détection *online* de la surdité.

7.4 Détection en contexte de pilotage et de contrôle aérien

L'objectif le plus lointain, et le plus ambitieux, de ce travail de recherche est la détection de la surdité chez un pilote ou un contrôleur aérien en activité. Si les avancées techniques permettent depuis très récemment la détection d'un événement isolé [68], c'est dans le cadre d'une tâche simple, n'impliquant pas de mouvement, de communication, de commandes, ou de tâche parallèle critique. Un traitement online du signal EEG dans ces conditions n'est pas encore chose acquise. Mais la perspective d'une interface Cerveau-Machine (ICM ou BCI en anglais) se fait de plus en plus concrète. Nous disposons d'un certain nombre d'indicateurs de l'état cognitif des pilotes (EEG [235], comportement oculaire, mais aussi fNIRS [207] et activité cardiaque [206]). Ces différents indicateurs peuvent être mis en commun, et permettre ainsi de fournir à un système automatique (pilote automatique, ordinateur) un retour sur l'état attentionnel du pilote ou du contrôleur. Il serait ainsi possible d'estimer en temps réel dans un premier temps la charge cognitive ressentie par les opérateurs, et donc la probabilité d'apparition de la surdité inattentionnelle. Des BCI basées sur des mesures EEG ont déjà vu le jour, mais elles sont principalement basées sur une méthode d'analyse fréquentielle [236], ne

permettant pas de déterminer un état de surdité inattentionnelle, caractérisé par une P300 faible.

L'ultime étape serait d'obtenir une mesure certaine de la détection d'une alarme par un opérateur avec une résolution temporelle suffisante (quelques secondes) pour permettre, en cas de surdité, de renvoyer à l'opérateur une contre-mesure adéquate pour s'assurer de la perception de l'information sous une autre forme.

7.5 Perspectives de travail envisagées

7.5.1 Reproductibilité des résultats et variations des protocoles

Les diverses expériences présentées dans cette thèse sont un pas de plus dans la compréhension du phénomène de surdité inattentionnelle chez les pilotes. Ces travaux pourront être approfondis dans un futur proche en suivant différentes logiques d'investigation.

La première étude que nous avons entreprise dans la continuité de cette thèse est de reprendre le protocole de la première expérience (CHAPITRE 3) en mesurant l'activité électrique cérébrale avec un nouvel EEG de la marque BIOSEMI, comprenant cette fois 128 électrodes. Elle a pour but de permettre une analyse des ERP d'alarmes manquées par rapport aux alarmes signalées. Le début de la phase de passation de l'expérience est prévu en octobre 2015, dans le cadre du stage de Marie Kisselenko, encadrée par Mickaël Causse (les impératifs de calendrier ne permettent pas de faire figurer les résultats dans ce manuscrit).

En plus de tester la reproductibilité de nos résultats, il est important d'approfondir la recherche sur la surdité inattentionnelle et faisant évoluer les protocoles expérimentaux utilisés durant cette thèse. Une évolution à la fois simple et évidente de nos protocoles concerne les sons déviants simulant les alarmes sonores devant être détectés par les opérateurs. Pour nos premiers travaux sur la surdité inattentionnelle, nous avons préféré utiliser des tonalités « classiques » que l'on retrouve dans la littérature sur la P300, un marqueur de la perception des alarmes [163]. Nous avons donc défini la durée, la fréquence, le volume et le nombre de sons en accord avec les protocoles oddball éprouvés pour l'étude de la P300 [75, 76].

En poursuivant l'objectif de se rapprocher toujours plus de conditions écologiques, nous envisageons de reproduire les expériences 1 et 2 toujours en utilisant un son standard et un son déviant, mais aussi un ou plusieurs son(s) distracteur(s) rare(s) mais non cibles. Ainsi, nous pourrions nous assurer que les participants analysent le son et l'identifient précisément, et ne se contentent pas de détecter un simple changement dans la série de sons standards. Ce traitement plus approfondi nécessite probablement le recrutement de plus de ressources cognitives, et ce d'autant plus si les alarmes utilisées présentent une composante sémantique. En effet, dans les cockpits, les alarmes peuvent prendre la forme de mots.

Selon la même idée, afin de se rapprocher des conditions réelles d'apparition des alarmes, nous avons pour projet de reprendre nos protocoles avec uniquement les sons déviants, en supprimant les sons standards. De cette façon, la surdité est évaluée de façon réaliste, et non plus par une tâche de détection continue et supplémentaire que doit effectuer l'opérateur.

Nous avons pour objectif de disposer, à long terme, d'une plate-forme d'évaluation des alarmes auditives opérationnelles, permettant de moduler les caractéristiques des sons et

7.5 Perspectives de travail envisagées

de vérifier lesquelles sont mieux signalées et provoquent une meilleure réponse cérébrale, même sous forte charge.

Mais ces évolutions nécessiteront dans le même temps une avancée dans le réalisme de la tâche principale à effectuer, en passant en simulateur par exemple.

7.5.2 Vers les essais en simulateur, puis en conditions réelles

EEG

En matière de sécurité aérienne, il est essentiel de valider l'utilisabilité d'une nouvelle interface homme-machine en conditions réelles, en la testant sur les opérateurs experts du système. La continuité logique des expérimentations menées dans le cadre de cette thèse, sur ordinateur et en micro-monde, est donc de l'exporter dans le simulateur (de vol ou d'ATC), un environnement plus réaliste mais toujours contrôlé, puis en vol réel ou dans la tour de contrôle, en environnement écologique.

Cependant, un environnement plus réaliste implique plus de mouvements, du bruit électromagnétique généré par le système, éventuellement des communications verbales avec des partenaires. Dans ces conditions, c'est un véritable défi de réaliser des mesures électrophysiologiques (EEG). Difficile, mais pas impossible. Les protocoles devront être aménagés pour garantir un nombre d'occurrences des alarmes suffisant pour l'observation de la P300 auditive par exemple. Benoit Valéry, doctorant au DCAS, a réalisé des mesures de N100 et P300 auditives dans le simulateur de vol de l'ISAE [237] (voir Figure 36). Il a réussi à mettre en évidence une diminution de la N100 en conditions de vol difficiles par rapport à la condition nominale.

Il est donc possible, à l'heure actuelle, avec le matériel à notre disposition et en utilisant des scénarios relativement contrôlés, de réaliser des mesures ERP en simulateur suffisamment précises pour observer les effets de la charge cognitive sur ces ERP. Il reste à déterminer s'il est également possible d'observer les effets de la perception ou non des alarmes auditives dans un protocole provoquant la surdité inattentionnelle (objet du paragraphe 7.4).

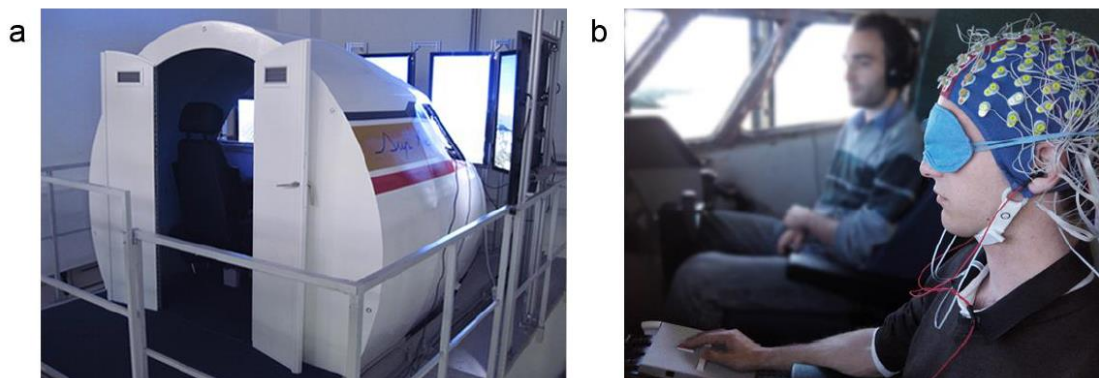


Figure 36. (image tirée de Valéry et al., 2015) (a) le simulateur de vol de l'ISAE. (b) un participant équipé d'un EEG BIOSEMI 128 électrodes.

Oculométrie

Il semble pertinent de considérer l'oculométrie comme une méthode plus adaptée aux mesures dans des conditions écologiques, avec un oculomètre intégré dans le cockpit notamment. Elle restera cependant sensible aux variations de luminosité, plus importantes en raison de l'interface beaucoup plus large, du nombre d'écrans et de stimuli différents des simulateurs, impactant la dilatation pupillaire.

Concernant l'étude des notifications visuelles pour le contrôle aérien, J-P. Imbert a, à partir des résultats obtenus avec le système Laby, défini les notifications les plus saillantes et les a testées en situation réaliste de contrôle aérien en les intégrant au système de signalement des événements critiques [179]. Ces notifications se sont révélées efficaces. Pendant les passations expérimentales, qui étaient parfaitement réalistes du point de vue de l'activité de contrôle, le choix a été fait de n'étudier que des situations qui ne se produisent que très rarement dans la réalité. Ce biais limite le réalisme des simulations, mais les résultats obtenus montrent un gain très important sur la détection des alertes critiques par les contrôleurs lorsque le système présentant les notifications est actif.

De façon générale, plus l'environnement expérimental est réaliste plus il sera difficilement contrôlable. De nombreux paramètres extérieurs peuvent perturber des mesures physiologiques déjà sensibles. Le passage d'un environnement contrôlé à un environnement écologique se fera donc progressivement, au fur et à mesure des progrès matériels et des techniques de traitement.

7.6 Contributions

Articles de journaux publiés :

- Giraudet L, Imbert J-P, Bérenger M, Tremblay S, Causse M. The neuroergonomic evaluation of human machine interface design in air traffic control using behavioral and EEG/ERP measures. *Behavioural brain research*. 2015.
- Giraudet L, St-Louis M-E, Scannella S, Causse M. P300 event-related potential as an indicator of inattentive deafness? *PLoS One*. 2015.

Articles de journaux soumis :

- Giraudet, L., Imbert, J-P., Jouffrais, C., Tremblay, S., Causse, M. Inattentive Deafness in Simulated Air Traffic Control Tasks: What The Eyes Can Reveal About What You Hear. (soumis) *Frontiers in Human Neuroscience*.

Papiers de conférence :

- Giraudet, L., Imbert, J-P., Tremblay, S., Causse M. Auditory Alarms in Simulated Air Traffic Control: What the Eyes can Reveal about Inattentive Deafness. AHFE 2015. Las Vegas, USA.
- Causse, M., Fabre, E., Giraudet, L., Gonzalez, M., Peysakhovich, V. EEG/ERP as a measure of mental workload in a simple piloting task. AHFE 2015. Las Vegas, USA.
- Giraudet, L., Bérenger, Imbert, J-P., M., Tremblay, S., Causse, M. Inattentive Deafness in Simulated Air Traffic Control Tasks: A behavioural and P300 Analysis. AHFE 2014. Krakow, Poland.
- Giraudet L, Saint-Louis M, Causse M. Electrophysiological correlates of inattentive deafness: No hearing without listening. Human Factors and Ergonomics Society Europe Chapter Conference 2012. Toulouse, France.

Encadrement

- Avril-septembre 2014, 1 étudiante en stage de M2R Neuropsychologie et Neurosciences Cliniques. Mesures physiologiques et comportementales de la capacité à traiter des instructions visuo-auditives pendant une tâche de pilotage.
- mai-juin 2014, 2 élèves ingénieurs, 2^{ème} année ISAE-Supaéro, projet d'initiation à la recherche. Surdité inattentionnelle chez les pilotes :  tude de l'efficacité de contre-mesures visuelles faisant appel aux neurones miroirs.
- mai-juin 2013, 2 élèves ingénieurs, 2^{ème} année ISAE-Supaéro, projet d'initiation à la recherche. Mesures relatives aux capacités attentionnelles.

Références

- [1] O'HARE D, Wiggins M, Batt R, Morrison D. Cognitive failure analysis for aircraft accident investigation. *Ergonomics*. 1994;37:1855-69.
- [2] Wiegmann DA, Shappell SA. Human error and crew resource management failures in Naval aviation mishaps: a review of US Naval Safety Center data, 1990-96. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*. 1999;70:1147-51.
- [3] Dehais F, Tessier C, Christophe L, Reuzeau F. The perseveration syndrome in the pilot's activity: guidelines and cognitive countermeasures. *Human Error, Safety and Systems Development*: Springer; 2010. p. 68-80.
- [4] Breznitz S. *Cry wolf: The psychology of false alarms*: Lawrence Erlbaum Associates Hillsdale, NJ; 1984.
- [5] Parasuraman R, Rizzo M. *Neuroergonomics: The brain at work*: Oxford University Press, USA; 2007.
- [6] Sarter N, Sarter M. Neuroergonomics: Opportunities and challenges of merging cognitive neuroscience with cognitive ergonomics. *Theoretical issues in ergonomics science*. 2003;4:142-50.
- [7] Régis N, Dehais F, Rachelson E, Thooris C, Pizziol S, Causse M, et al. Formal Detection of Attentional Tunneling in Human Operator–Automation Interactions. *Human-Machine Systems, IEEE Transactions on*. 2014;44:326-36.
- [8] Wickens CD, Alexander AL. Attentional tunneling and task management in synthetic vision displays. *The International Journal of Aviation Psychology*. 2009;19:182-99.
- [9] Wickens CD. Attentional tunneling and task management. *Proceedings of the 13th International Symposium on Aviation Psychology 2005*. p. 620-5.
- [10] Brockner J. The escalation of commitment to a failing course of action: Toward theoretical progress. *Academy of Management Review*. 1992;17:39-61.
- [11] Staw BM. The escalation of commitment to a course of action. *Academy of management Review*. 1981;6:577-87.
- [12] Mack A, Rock I. *Inattention blindness*: MIT press Cambridge, MA; 1998.
- [13] Simons DJ, Levin DT. Change blindness. *Trends in cognitive sciences*. 1997;1:261-7.
- [14] Cartwright-Finch U, Lavie N. The role of perceptual load in inattention blindness. *Cognition*. 2007;102:321-40.
- [15] Sinnott S, Costa A, Soto-Faraco S. Manipulating inattention blindness within and across sensory modalities. *The quarterly journal of experimental psychology*. 2006;59:1425-42.
- [16] Macdonald JS, Lavie N. Visual perceptual load induces inattention blindness. *Attention, Perception, & Psychophysics*. 2011;73:1780-9.
- [17] Dehais F, Causse M, Vachon F, Régis N, Menant E, Tremblay S. Failure to Detect Critical Auditory Alerts in the Cockpit Evidence for Inattention Blindness. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*. 2014;56:631–44.
- [18] Vitevitch MS. Change deafness: The inability to detect changes between two voices. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*. 2003;29:333.
- [19] Sexton JB, Helmreich RL. Analyzing cockpit communications: the links between language, performance, error, and workload. *Journal of Human Performance in Extreme Environments*. 2000;5:6.
- [20] Wilson GF. An analysis of mental workload in pilots during flight using multiple psychophysiological measures. *The International Journal of Aviation Psychology*. 2002;12:3-18.
- [21] Friedman-Berg F, Allendoerfer K, Pai S. Nuisance Alerts in Operational ATC Environments: Classification and Frequencies. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*: Sage Publications; 2008. p. 104-8.
- [22] Danaher JW. Human error in ATC system operations. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*. 1980;22:535-45.

- [23] Endsley M, Rodgers M. Attention distribution and situation awareness in air traffic control. *Air Traffic Control Quarterly*. 1998;6:21-44.
- [24] Sarter NB. Graded and multimodal interruption cueing in support of preattentive reference and attention management. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*: SAGE Publications; 2005. p. 478-81.
- [25] Stokes AF, Wickens CD. Aviation displays. In: Wiener EL, Nagel DC, editors. *Human factors in aviation* San Diego, CA, USA: Academic Press; 1988. p. 387-431.
- [26] Watson M, Sanderson P, Anderson J. Designing auditory displays for team environments. *Proceedings of the 5th Australian Aviation Psychology Symposium (AAvPA 2000)* Manly, Australia CD-ROM2000.
- [27] Wheale JL. The speed of response to synthesized voice messages. *British Journal of Audiology*. 1981;15:205-12.
- [28] Edworthy J, Loxley S, Dennis I. Improving auditory warning design: Relationship between warning sound parameters and perceived urgency. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*. 1991;33:205-31.
- [29] Peryer G, Noyes J, Pleydell-Pearce K, Lieven N. Auditory alert characteristics: a survey of pilot views. *The International Journal of Aviation Psychology*. 2005;15:233-50.
- [30] Bliss JP, Dunn MC. Behavioural implications of alarm mistrust as a function of task workload. *Ergonomics*. 2000;43:1283-300.
- [31] Wickens CD, Rice S, Keller D, Hutchins S, Hughes J, Clayton K. False alerts in air traffic control conflict alerting system: Is there a “cry wolf” effect? *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*. 2009;51:446-62.
- [32] Broadbent D. *Perception and Communication* (Pergammon, Oxford). 1958.
- [33] Posner MI. *Cognitive neuroscience of attention*: Guilford Press; 2011.
- [34] Wickens C. Noticing events in the visual workplace: The SEEV and NSEEV models. *Handbook of applied perception*. 2014.
- [35] Itti L, Koch C, Niebur E. A model of saliency-based visual attention for rapid scene analysis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*. 1998:1254-9.
- [36] Most SB, Simons DJ, Scholl BJ, Chabris CF. Sustained inattention blindness. *Psyche*. 2000;6:14.
- [37] Newby EA, Rock I. Inattention blindness as a function of proximity to the focus of attention. *PERCEPTION-LONDON*. 1998;27:1025-40.
- [38] Simons DJ, Chabris CF. Gorillas in our midst: Sustained inattention blindness for dynamic events. *Perception-London*. 1999;28:1059-74.
- [39] Pashler HE, Sutherland S. *The psychology of attention*: MIT press Cambridge, MA; 1998.
- [40] Heinze H, Luck SJ, Mangun G, Hillyard SA. Visual event-related potentials index focused attention within bilateral stimulus arrays. I. Evidence for early selection. *Electroencephalography and clinical neurophysiology*. 1990;75:511-27.
- [41] Hart SG, Wickens CD. *Workload assessment and prediction*. Manprint: Springer; 1990. p. 257-96.
- [42] Fowler B. P300 as a measure of workload during a simulated aircraft landing task. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*. 1994;36:670-83.
- [43] Paas FG, Van Merriënboer JJ, Adam JJ. Measurement of cognitive load in instructional research. *Perceptual and motor skills*. 1994;79:419-30.
- [44] Sweller J. Cognitive load during problem solving: Effects on learning. *Cognitive science*. 1988;12:257-85.
- [45] Cao A, Chintamani KK, Pandya AK, Ellis RD. NASA TLX: Software for assessing subjective mental workload. *Behavior research methods*. 2009;41:113-7.
- [46] Kramer AF, Trejo LJ, Humphrey D. Assessment of mental workload with task-irrelevant auditory probes. *Biological Psychology*. 1995;40:83-100.
- [47] Lavie N. Perceptual load as a necessary condition for selective attention. *Journal of Experimental Psychology-Human Perception and Performance*. 1995;21:451-68.

- [48] Lavie N, Beck DM, Konstantinou N. Blinded by the load: attention, awareness and the role of perceptual load. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2014;369:20130205.
- [49] Hughes RW, Hurlstone MJ, Marsh JE, Vachon F, Jones DM. Cognitive Control of Auditory Distraction: Impact of Task Difficulty, Foreknowledge, and Working Memory Capacity Supports Duplex-Mechanism Account. 2012.
- [50] Lavie N, Tsal Y. Perceptual load as a major determinant of the locus of selection in visual attention. *Perception & Psychophysics*. 1994;56:183-97.
- [51] Lavie N, De Fockert JW. Contrasting effects of sensory limits and capacity limits in visual selective attention. *Perception & Psychophysics*. 2003;65:202-12.
- [52] Lavie N, Hirst A, de Fockert JW, Viding E. Load theory of selective attention and cognitive control. *Journal of Experimental Psychology: General*. 2004;133:339.
- [53] Sweller J. Cognitive load theory, learning difficulty, and instructional design. *Learning and instruction*. 1994;4:295-312.
- [54] Tellinghuisen DJ, Nowak EJ. The inability to ignore auditory distractors as a function of visual task perceptual load. *Perception & Psychophysics*. 2003;65:817-28.
- [55] Lazarus RS. Thoughts on the relations between emotion and cognition. *American psychologist*. 1982;37:1019.
- [56] Seyle H, Horava A. Second annual report on stress: Acta; 1952.
- [57] Porcelli AJ, Cruz D, Wenberg K, Patterson MD, Biswal BB, Rypma B. The effects of acute stress on human prefrontal working memory systems. *Physiology & behavior*. 2008;95:282-9.
- [58] Qin S, Hermans EJ, van Marle HJ, Luo J, Fernández G. Acute psychological stress reduces working memory-related activity in the dorsolateral prefrontal cortex. *Biological psychiatry*. 2009;66:25-32.
- [59] Waldstein SR, Katzel LI. Stress-induced blood pressure reactivity and cognitive function. *Neurology*. 2005;64:1746-9.
- [60] Scholz U, La Marca R, Nater UM, Aberle I, Ehlert U, Hornung R, et al. Go no-go performance under psychosocial stress: Beneficial effects of implementation intentions. *Neurobiology of learning and memory*. 2009;91:89-92.
- [61] Bahrick HP, Fitts PM, Rankin RE. Effect of incentives upon reactions to peripheral stimuli. *Journal of Experimental Psychology*. 1952;44:400.
- [62] Dehais F, Causse M, Régis N, Menant E, Labedan P, Vachon F, et al. Missing Critical Auditory Alarms in Aeronautics: Evidence for Inattentive Deafness? : SAGE Publications; 2012. p. 1639-43.
- [63] Thomas LC, Wickens CD. Eye-tracking and individual differences in off-normal event detection when flying with a synthetic vision system display. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*: SAGE Publications; 2004. p. 223-7.
- [64] Dehais F, Tessier C, Chaudron L. Ghost: experimenting countermeasures for conflicts in the pilot's activity. 2003.
- [65] Escera C, Alho K, Schröger E, Winkler I. Involuntary attention and distractibility as evaluated with event-related brain potentials. *Audiology and Neurotology*. 2000;5:151-66.
- [66] Santangelo V, Olivetti Belardinelli M, Spence C. The suppression of reflexive visual and auditory orienting when attention is otherwise engaged. *Journal of experimental psychology Human perception and performance*. 2007;33:137.
- [67] Koreimann S, Strauß S, Vitouch O. Inattentive deafness under dynamic musical conditions. 2009.
- [68] Puschmann S, Sandmann P, Ahrens J, Thorne J, Weerden R, Klump G, et al. Electrophysiological correlates of auditory change detection and change deafness in complex auditory scenes. *Neuroimage*. 2013;75:155-64.
- [69] Eramudugolla R, Irvine DR, McAnally KI, Martin RL, Mattingley JB. Directed attention eliminates 'change deafness' in complex auditory scenes. *Current Biology*. 2005;15:1108-13.
- [70] Brand-D'Abrescia M, Lavie N. Task coordination between and within sensory modalities: Effects on distraction. *Perception & psychophysics*. 2008;70:508-15.

- [71] Niedermeyer E, da Silva FL. *Electroencephalography: basic principles, clinical applications, and related fields*: Lippincott Williams & Wilkins; 2005.
- [72] Teplan M. Fundamentals of EEG measurement. *Measurement science review*. 2002;2:1-11.
- [73] Klimesch W. EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: a review and analysis. *Brain research reviews*. 1999;29:169-95.
- [74] Dussault C, Jouanin J-C, Philippe M, Guezennec C-Y. EEG and ECG changes during simulator operation reflect mental workload and vigilance. *Aviation, space, and environmental medicine*. 2005;76:344-51.
- [75] García-Larrea L, Lukaszewicz A-C, Mauguière F. Revisiting the oddball paradigm. Non-target vs neutral stimuli and the evaluation of ERP attentional effects. *Neuropsychologia*. 1992;30:723-41.
- [76] Segalowitz SJ, Barnes KL. The reliability of ERP components in the auditory oddball paradigm. *Psychophysiology*. 1993;30:451-9.
- [77] Goodwin GC, Sin KS. *Adaptive filtering prediction and control*: Courier Corporation; 2014.
- [78] Ahirwal MK, Kumar A, Singh GK. Analysis and testing of PSO variants through application in EEG/ERP adaptive filtering approach. *Biomedical Engineering Letters*. 2012;2:186-97.
- [79] Turnip A, Hong K-S. Classifying mental activities from EEG-P300 signals using adaptive neural network. *Int J Innovat Comput Inform Control*. 2012;8:6429-43.
- [80] He P, Wilson G, Russell C, Gerschutz M. Removal of ocular artifacts from the EEG: a comparison between time-domain regression method and adaptive filtering method using simulated data. *Medical & biological engineering & computing*. 2007;45:495-503.
- [81] Näätänen R, Picton T. The N1 wave of the human electric and magnetic response to sound: a review and an analysis of the component structure. *Psychophysiology*. 1987;24:375-425.
- [82] Holcomb PJ, Coffey SA, Neville HJ. Visual and auditory sentence processing: A developmental analysis using event-related brain potentials. *Developmental Neuropsychology*. 1992;8:203-41.
- [83] Greffrath W, Baumgärtner U, Treede R-D. Peripheral and central components of habituation of heat pain perception and evoked potentials in humans. *Pain*. 2007;132:301-11.
- [84] Keidel WD, Spreng M. Audiometric aspects and multisensory power-functions of electronically averaged slow evoked cortical responses in man. *Acta Oto-Laryngologica*. 1965;59:201-10.
- [85] Anderer P, Semlitsch HV, Saletu B. Multichannel auditory event-related brain potentials: effects of normal aging on the scalp distribution of N1, P2, N2 and P300 latencies and amplitudes. *Electroencephalography and clinical neurophysiology*. 1996;99:458-72.
- [86] Verkindt C, Bertrand O, Perrin F, Echallier J-F, Pernier J. Tonal organization of the human auditory cortex: N100 topography and multiple dipole model analysis. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology/Evoked Potentials Section*. 1995;96:143-56.
- [87] Davis H, Zerlin S. Acoustic relations of the human vertex potential. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1966;39:109-16.
- [88] Qu J, Rizak JD, Zhao L, Li M, Ma Y. Effects of Visual Working Memory on Brain Information Processing of Irrelevant Auditory Stimuli. *PloS one*. 2014;9:e89989.
- [89] Näätänen R, Paavilainen P, Rinne T, Alho K. The mismatch negativity (MMN) in basic research of central auditory processing: a review. *Clinical Neurophysiology*. 2007;118:2544-90.
- [90] Polich J. Updating P300: an integrative theory of P3a and P3b. *Clinical neurophysiology: official journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology*. 2007;118:2128.

- [91] van Mourik R, Oosterlaan J, Heslenfeld DJ, Konig CE, Sergeant JA. When distraction is not distracting: A behavioral and ERP study on distraction in ADHD. *Clinical Neurophysiology*. 2007;118:1855-65.
- [92] Knight RT. Contribution of human hippocampal region to novelty detection. *Nature*. 1996;383:256-9.
- [93] Brázdil M, Rektor I, Daniel P, Dufek M, Jurák P. Intracerebral event-related potentials to subthreshold target stimuli. *Clinical neurophysiology*. 2001;112:650-61.
- [94] Armstrong GA, Singhal A. Neural markers of automatic and controlled attention during immediate and delayed action. *Experimental brain research*. 2011;213:35-48.
- [95] Wester AE, Böcker KBE, Volkerts ER, Verster JC, Kenemans JL. Event-related potentials and secondary task performance during simulated driving. *Accident Analysis & Prevention*. 2008;40:1-7.
- [96] Ramirez J, Bomba M, Singhal A, Fowler B. Influence of a visual spatial attention task on auditory early and late Nd and P300. *Biological psychology*. 2005;68:121-34.
- [97] Singhal A, Doerfling P, Fowler B. Effects of a dual task on the N100-P200 complex and the early and late Nd attention waveforms. *Psychophysiology*. 2002;39:236-45.
- [98] Munka L, Berti S. Examining task-dependencies of different attentional processes as reflected in the P3a and reorienting negativity components of the human event-related brain potential. *Neuroscience letters*. 2006;396:177-81.
- [99] Berti S. The role of auditory transient and deviance processing in distraction of task performance: a combined behavioral and event-related brain potential study. *Frontiers in human neuroscience*. 2013;7.
- [100] Rayner K. Eye movements and attention in reading, scene perception, and visual search. *The quarterly journal of experimental psychology*. 2009;62:1457-506.
- [101] Theeuwes J, Belopolsky A, Olivers CN. Interactions between working memory, attention and eye movements. *Acta psychologica*. 2009;132:106-14.
- [102] Goldberg JH, Kotval XP. Computer interface evaluation using eye movements: methods and constructs. *International Journal of Industrial Ergonomics*. 1999;24:631-45.
- [103] Zelinsky GJ. A theory of eye movements during target acquisition. *Psychological review*. 2008;115:787.
- [104] Pearson D, Sahaie A. Oculomotor control and the maintenance of spatially and temporally distributed events in visuo-spatial working memory. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology: Section A*. 2003;56:1089-111.
- [105] Anderson JR, Bothell D, Douglass S. Eye Movements Do Not Reflect Retrieval Processes Limits of the Eye-Mind Hypothesis. *Psychological Science*. 2004;15:225-31.
- [106] Privitera CM. The scanpath theory: its definitions and later developments. *Electronic Imaging 2006: International Society for Optics and Photonics*; 2006. p. 60570A-A-5.
- [107] Just MA, Carpenter PA. Eye fixations and cognitive processes. *Cognitive psychology*. 1976;8:441-80.
- [108] Dehais F, Causse M, Tremblay S. Mitigation of conflicts with automation use of cognitive countermeasures. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*. 2011;53:448-60.
- [109] Hess EH. Attitude and pupil size. *Scientific american*. 1965.
- [110] Partala T, Jokiniemi M, Surakka V. Pupillary responses to emotionally provocative stimuli. *Proceedings of the 2000 symposium on Eye tracking research & applications: ACM*; 2000. p. 123-9.
- [111] Pomplun M, Sunkara S. Pupil dilation as an indicator of cognitive workload in human-computer interaction. *Proceedings of the International Conference on HCI2003*.
- [112] Beatty J. Task-evoked pupillary responses, processing load, and the structure of processing resources. *Psychological bulletin*. 1982;91:276.
- [113] Murphy PR, Robertson IH, Balsters JH, O'Connell RG. Pupillometry and P3 index the locus coeruleus-noradrenergic arousal function in humans. *Psychophysiology*. 2011;48:1532-43.
- [114] Beatty J, Lucero-Wagoner B. The pupillary system. *Handbook of psychophysiology*. 2000;2:142-62.

- [115] Peysakhovich V, Causse M, Scannella S, Dehais F. Frequency analysis of a task-evoked pupillary response: Luminance-independent measure of mental effort. *International Journal of Psychophysiology*. 2015;97:30-7.
- [116] Causse M, Sénard J-M, Démonet JF, Pastor J. Monitoring cognitive and emotional processes through pupil and cardiac response during dynamic versus logical task. *Applied psychophysiology and biofeedback*. 2010;35:115-23.
- [117] Laeng B, Ørbo M, Holmlund T, Miozzo M. Pupillary stroop effects. *Cognitive processing*. 2011;12:13-21.
- [118] Fowles DC, Christie MJ, Edelberg R, Grings WW, Lykken DT, Venables PH. Publication recommendations for electrodermal measurements. *Psychophysiology*. 1981;18:232-9.
- [119] Causse M, Hurter C. The physiological user's response as a clue to assess visual variables effectiveness. *Human Centered Design: Springer*; 2009. p. 167-76.
- [120] Kramer AF. Physiological metrics of mental workload: A review of recent progress. *Multiple-task performance*. 1991:279-328.
- [121] Bechara A, Damasio H, Damasio AR. Emotion, decision making and the orbitofrontal cortex. *Cerebral cortex*. 2000;10:295-307.
- [122] Venables PH. Autonomic activity. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 1991;620:191-207.
- [123] Brosschot JF, Thayer JF. Heart rate response is longer after negative emotions than after positive emotions. *International Journal of Psychophysiology*. 2003;50:181-7.
- [124] Warner RM, Strowman SR. Cardiovascular reactivity and positive/negative affect during conversations. *Journal of behavioral medicine*. 1995;18:141-59.
- [125] Sinha R, Lovallo WR, Parsons OA. Cardiovascular differentiation of emotions. *Psychosomatic Medicine*. 1992;54:422-35.
- [126] Boutcher YN, Boutcher SH. Cardiovascular response to Stroop: effect of verbal response and task difficulty. *Biological psychology*. 2006;73:235-41.
- [127] Sosnowski T, Krzywosz-Rynkiewicz B, Roguska J. Program running versus problem solving: Mental task effect on tonic heart rate. *Psychophysiology*. 2004;41:467-75.
- [128] Strait M, Scheutz M. What we can and cannot (yet) do with functional near infrared spectroscopy. *Frontiers in neuroscience*. 2014;8.
- [129] Harrivel AR, Weissman DH, Noll DC, Peltier SJ. Monitoring attentional state with fNIRS. *Frontiers in human neuroscience*. 2013;7.
- [130] Warm JS, Matthews G, Parasuraman R. Cerebral hemodynamics and vigilance performance. *Military Psychology*. 2009;21:S75.
- [131] Helton WS, Ossowski U, Malinen S. Post-disaster depression and vigilance: a functional near-infrared spectroscopy study. *Experimental brain research*. 2013;226:357-62.
- [132] Durantin G, Dehais F, Delorme A. Characterization of mind wandering using fNIRS. *Frontiers in systems neuroscience*. 2015;9.
- [133] Bliss JP. Investigation of alarm-related accidents and incidents in aviation. *The International Journal of Aviation Psychology*. 2003;13:249-68.
- [134] Shapiro N. NBC Dateline. New York: National Broadcasting Corporation. 1994.
- [135] Song L, Kuchar JK. Describing, predicting, and mitigating dissonance between alerting systems. *Human Error, Safety, and System Development*, Linköping, Sweden. 2001.
- [136] Sorkin RD. FORUM: Why are people turning off our alarms? *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1988;84:1107.
- [137] Doll TJ, Folds DJ, Leiker LA. Auditory information systems in military aircraft: Current configurations versus the state of the art. Final Report, 1 May-30 Sep 1983 Georgia Inst of Tech, Atlanta Systems Engineering Lab. 1984;1.
- [138] Peryer G, Noyes J, Pleydell-Pearce K, Lieven N. Auditory alert characteristics: a survey of pilot views. *The International Journal of Aviation Psychology*. 2005;15:233-50.
- [139] Analyse BE. Technical report a40-ek000823a. Accident investigation report GF0721993.
- [140] Charron S, Koechlin E. Divided representation of concurrent goals in the human frontal lobes. *Science*. 2010;328:360-3.

- [141] Dux PE, Ivanoff J, Asplund CL, Marois R. Isolation of a central bottleneck of information processing with time-resolved fMRI. *Neuron*. 2006;52:1109-20.
- [142] Hughes RW, Hurlstone MJ, Marsh JE, Vachon F, Jones DM. Cognitive control of auditory distraction: Impact of task difficulty, foreknowledge, and working memory capacity supports duplex-mechanism account. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*. 2013;39:539.
- [143] Plack J. The Oxford handbook of auditory science: The ear, The auditory brain, Hearing (3 volumes), edited by D Moore, P Fuchs, A Palmer and A Rees, C Plack; Oxford University Press, 2010, 1496 pages,» 130.00 (US \$255.00) ISBN 978 019 9581412 The Oxford Handbook of Auditory Science, the overall editor of which is David R Moore undertakes the perilous responsibility of offering a comprehensive and updated account of auditory neuroscience. *Perception*. 2010;39:1009–10.
- [144] Spence C, Read L. Speech shadowing while driving on the difficulty of splitting attention between eye and ear. *Psychological science*. 2003;14:251-6.
- [145] Wood NL, Cowan N. The cocktail party phenomenon revisited: Attention and memory in the classic selective listening procedure of Cherry (1953). *Journal of Experimental Psychology: General*. 1995;124:243.
- [146] Berti S, Schröger E. Working memory controls involuntary attention switching: evidence from an auditory distraction paradigm. *European Journal of Neuroscience*. 2003;17:1119–22.
- [147] SanMiguel I, Corral M-J, Escera C. When loading working memory reduces distraction: behavioral and electrophysiological evidence from an auditory-visual distraction paradigm. *Journal of Cognitive Neuroscience*. 2008;20:1131–45.
- [148] Fowler B. P300 as a measure of workload during a simulated aircraft landing task. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*. 1994;36:670–83.
- [149] Kramer AF, Sirevaag EJ, Braune R. A psychophysiological assessment of operator workload during simulated flight missions. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*. 1987;29:145–60.
- [150] Scannella S, Causse M, Chauveau N, Pastor J, Dehais F. Effects of the audiovisual conflict on auditory early processes. *International Journal of Psychophysiology*. 2013;89:115–22.
- [151] Wickens CD, Kramer AF, Donchin E. The Event-Related Potential as an Index of the Processing Demands of a Complex Target Acquisition Task. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 1984;425:295–9.
- [152] Hansenne M. Le potentiel évoqué cognitif P300 (I): aspects théorique et psychobiologique. *Neurophysiologie Clinique/Clinical Neurophysiology*. 2000;30:191-210.
- [153] Friedman D, Simpson GV. ERP amplitude and scalp distribution to target and novel events: effects of temporal order in young, middle-aged and older adults. *Cognitive Brain Research*. 1994;2:49-63.
- [154] Spencer KM, Dien J, Donchin E. A componential analysis of the ERP elicited by novel events using a dense electrode array. *Psychophysiology*. 1999;36:409-14.
- [155] Squires NK, Squires KC, Hillyard SA. Two varieties of long-latency positive waves evoked by unpredictable auditory stimuli in man. *Electroencephalography and clinical neurophysiology*. 1975;38:387–401.
- [156] Donchin E, Kramer A, Wickens C. Applications of event-related brain potentials to problems in engineering psychology. *Psychophysiology: Systems, Processes, and Applications* New York: Guilford Press. 1986.
- [157] Singhal A, Fowler B. The differential effects of Sternberg short-and long-term memory scanning on the late Nd and P300 in a dual-task paradigm. *Cognitive brain research*. 2004;21:124-32.
- [158] Picton TW, Hillyard SA. Human auditory evoked potentials. II: Effects of attention. *Electroencephalography and clinical neurophysiology*. 1974;36:191–200.
- [159] Pichot P, Brun J-P. Questionnaire bref d'auto-évaluation des dimensions dépressive, asthénique et anxieuse.: Elsevier Science; 1984.

- [160] Tombaugh TN. A comprehensive review of the Paced Auditory Serial Addition Test (PASAT). *Archives of Clinical Neuropsychology*. 2006;21:53–76.
- [161] Oldfield RC. The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*. 1971;9:97–113.
- [162] Murphy S, Fraenkel N, Dalton P. Perceptual load does not modulate auditory distractor processing. *Cognition*. 2013;129:345–55.
- [163] Kolev V, Demiralp T, Yordanova J, Ademoglu A, Isoglu-Alkaç Ü. Time–frequency analysis reveals multiple functional components during oddball P300. *NeuroReport*. 1997;8:2061–5.
- [164] Leber AB, Egeth HE. It’s under control: Top-down search strategies can override attentional capture. *Psychonomic Bulletin & Review*. 2006;13:132–8.
- [165] Arnott SR, Pratt J. www. redalyc. org. *Psicológica*. 2002;23:311–69.
- [166] Delorme A, Makeig S. EEGLAB: an open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including independent component analysis. *Journal of neuroscience methods*. 2004;134:9–21.
- [167] Woods DL, Knight RT, Scabini D. Anatomical substrates of auditory selective attention: behavioral and electrophysiological effects of posterior association cortex lesions. *Cognitive Brain Research*. 1993;1:227–40.
- [168] Mccarthy G, Luby M, Gore J, Goldman-Rakic P. Infrequent events transiently activate human prefrontal and parietal cortex as measured by functional MRI. *Journal of Neurophysiology*. 1997;77:1630–4.
- [169] Bledowski C, Prvulovic D, Hoechstetter K, Scherg M, Wibral M, Goebel R, et al. Localizing P300 generators in visual target and distractor processing: a combined event-related potential and functional magnetic resonance imaging study. *The Journal of neuroscience*. 2004;24:9353–60.
- [170] Mulert C, Pogarell O, Juckel G, Rujescu D, Giegling I, Rupp D, et al. The neural basis of the P300 potential. Focus on the time-course of the underlying cortical generators. *European archives of psychiatry and clinical neuroscience*. 2004;254:190–8.
- [171] Mulert C, Jager L, Schmitt R, Bussfeld P, Pogarell O, Moller HJ, et al. Integration of fMRI and simultaneous EEG: towards a comprehensive understanding of localization and time-course of brain activity in target detection. *Neuroimage*. 2004;22:83–94.
- [172] Menon V, Ford JM, Lim KO, Glover GH, Pfefferbaum A. Combined event-related fMRI and EEG evidence for temporal-parietal cortex activation during target detection. *Neuroreport*. 1997;8:3029–37.
- [173] Kok A. On the utility of P3 amplitude as a measure of processing capacity. *Psychophysiology*. 2001;38:557–77.
- [174] Troche S, Houlihan M, Connolly J, Dick B, McGrath P, Finley G, et al. The effect of pain on involuntary and voluntary capture of attention. *European Journal of Pain*. 2014.
- [175] Friedman D, Trott C. An event-related potential study of encoding in young and older adults. *Neuropsychologia*. 2000;38:542–57.
- [176] Yantis S, Jonides J. Abrupt visual onsets and selective attention: voluntary versus automatic allocation. *Journal of Experimental Psychology: Human perception and performance*. 1990;16:121.
- [177] Imbert J-P, Hodgetts HM, Parise R, Vachon F, Tremblay S. The LABY Microworld A Platform for Research, Training and System Engineering. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting: SAGE Publications*; 2014. p. 1038–42.
- [178] Parise R, Imbert J-P, Marais F, Alonso R. LABY: Un support d'aide à l'évaluation de choix de conception d'IHM pour le contrôle aérien. *Proceedings of the 2012 Conference on Ergonomie et Interaction homme-machine: ACM*; 2012. p. 185.
- [179] Imbert J-P. Adaptation du design des visualisations de type supervisions pour optimiser la transmission des notifications classées par niveau d'intérêt: Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace (ISAE); 2014.
- [180] Gianazza D, Guittet K. Selection and evaluation of air traffic complexity metrics. *25th Digital Avionics Systems Conference, 2006 IEEE/AIAA: IEEE*; 2006. p. 1–12.

- [181] Brehmer B, Schifflett S, Elliott L, Salas E, Covert M. Some reflections on microworld research. *Scaled Worlds: Development, Validation and Applications*, Ashgate Cornwall. 2004.
- [182] Vachon F, Lafond D, Vallières BR, Rousseau R, Tremblay S. Supporting situation awareness: A tradeoff between benefits and overhead. *Cognitive Methods in Situation Awareness and Decision Support (CogSIMA)*, 2011 IEEE First International Multi-Disciplinary Conference on: IEEE; 2011. p. 284-91.
- [183] Hodgetts H, Farmer E, Joose M, Parmentier F, Schaefer D, Hoogeboom P, et al. The effects of party line communication on flight task performance. *Human factors in design, safety, and management*. 2005:327-38.
- [184] Prabhakaran V, Narayanan K, Zhao Z, Gabrieli J. Integration of diverse information in working memory within the frontal lobe. *Nature neuroscience*. 2000;3:85-90.
- [185] Simons DJ. Current approaches to change blindness. *Visual cognition*. 2000;7:1-15.
- [186] Vachon F, Vallières BR, Jones DM, Tremblay S. Nonexplicit Change Detection in Complex Dynamic Settings What Eye Movements Reveal. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*. 2012;54:996-1007.
- [187] Boot WR, Becic E, Kramer AF. Temporal limitations in multiple target detection in a dynamic monitoring task. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*. 2007;49:897-906.
- [188] Zelinsky G, Neider M, Todor A. Multi-object tracking in a realistic dR environment. *Journal of Vision*. 2007;7:895-.
- [189] Molloy R, Parasuraman R. Monitoring an automated system for a single failure: Vigilance and task complexity effects. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*. 1996;38:311-22.
- [190] Hughes RW, Vachon F, Jones DM. Auditory attentional capture during serial recall: Violations at encoding of an algorithm-based neural model? *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*. 2005;31:736.
- [191] Endsley MR, Rodgers MD. Situation awareness information requirements analysis for en route air traffic control. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting: SAGE Publications; 1994*. p. 71-5.
- [192] Wickens CD. Situation awareness and workload in aviation. *Current directions in psychological science*. 2002;11:128-33.
- [193] Tremblay S, Parmentier FB, Hodgetts HM, Hughes RW, Jones DM. Disruption of verbal-spatial serial memory by extraneous air-traffic speech. *Journal of Applied Research in Memory and Cognition*. 2012;1:73-9.
- [194] Buchner A. Basic topics and approaches to the study of complex problem solving. *Complex problem solving: The European perspective*. 1995:27-63.
- [195] Frensch PA, Funke J. *Complex problem solving: The European perspective*: Psychology Press; 2014.
- [196] Moore DR, Fuchs PA, Rees A, Palmer A, Plack CJ. *The Oxford Handbook of Auditory Science: The Auditory Brain*: Oxford University Press; 2010.
- [197] Santangelo V. Forced to remember: When memory is biased by salient information. *Behavioural brain research*. 2015.
- [198] Thompson KG, Bichot NP. A visual salience map in the primate frontal eye field. *Progress in brain research*. 2005;147:249-62.
- [199] Nardo D, Santangelo V, Macaluso E. Stimulus-driven orienting of visuo-spatial attention in complex dynamic environments. *Neuron*. 2011;69:1015-28.
- [200] Ullsperger P, Freude G, Erdmann U. Auditory probe sensitivity to mental workload changes—an event-related potential study. *International Journal of Psychophysiology*. 2001;40:201-9.
- [201] Allison BZ, Polich J. Workload assessment of computer gaming using a single-stimulus event-related potential paradigm. *Biological psychology*. 2008;77:277-83.
- [202] Polich J, Kok A. Cognitive and biological determinants of P300: an integrative review. *Biological psychology*. 1995;41:103-46.

- [203] Wijers AA, Otten LJ, Feenstra S, Mulder G, Mulder LJ. Brain potentials during selective attention, memory search, and mental rotation. *Psychophysiology*. 1989;26:452-67.
- [204] Nieuwenhuis S, Aston-Jones G, Cohen JD. Decision making, the P3, and the locus coeruleus--norepinephrine system. *Psychological bulletin*. 2005;131:510.
- [205] Causse M, Dehais F, Péran P, Sabatini U, Pastor J. The effects of emotion on pilot decision-making: A neuroergonomic approach to aviation safety. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2013;33:272-81.
- [206] Durantin G, Gagnon J-F, Tremblay S, Dehais F. Using near infrared spectroscopy and heart rate variability to detect mental overload. *Behavioural brain research*. 2014;259:16-23.
- [207] Gagnon J-F, Durantin G, Vachon F, Causse M, Tremblay S, Dehais F. Anticipating human error before it happens: Towards a psychophysiological model for online prediction of mental workload. *Human Factors and Ergonomics Society Chapter Europe Proceedings2012*.
- [208] Imbert J-P, Hodgetts H, Parise R, Vachon F, Tremblay S. *The LABY microworld: A Platform for Research, Training and System Engineering*. 2014.
- [209] Imbert J-P, Hodgetts HM, Parise R, Vachon F, Dehais F, Tremblay S. Attentional costs and failures in air traffic control notifications. *Ergonomics*. 2014;57:1817-32.
- [210] Spielberger CD. *State-Trait Anxiety Inventory: Wiley Online Library*; 2010.
- [211] Giraudet L, Saint-Louis M, Causse M. Electrophysiological correlates of inattentive deafness: No hearing without listening. *Human Factors and Ergonomics Society Europe Chapter Conference, Toulouse, France2012*.
- [212] Lafond D, Vachon F, Rousseau R, Tremblay S. A cognitive and holistic approach to developing metrics for decision support in command and control. *Advances in cognitive ergonomics*. 2010:65-73.
- [213] Steelman KS, McCarley JS, Wickens CD. Modeling the control of attention in visual workspaces. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*. 2011;53:142-53.
- [214] Itti L, Koch C. A saliency-based search mechanism for overt and covert shifts of visual attention. *Vision research*. 2000;40:1489-506.
- [215] Cabrera D, Ferguson S, Laing G. Development of auditory alerts for air traffic control consoles. *Audio Engineering Society*; 2005.
- [216] Meghanathan RN, van Leeuwen C, Nikolaev AR. Fixation duration surpasses pupil size as a measure of memory load in free viewing. *Frontiers in human neuroscience*. 2014;8.
- [217] Giraudet L, Imbert J-P, Bérenger M, Tremblay S, Causse M. The neuroergonomic evaluation of human machine interface design in air traffic control using behavioral and EEG/ERP measures. *Behavioural brain research*. 2015.
- [218] Giraudet L, St-Louis M-E, Scannella S, Causse M. P300 event-related potential as an indicator of inattentive deafness? *PLoS one*. 2015;10:e0118556-e.
- [219] Jacob R, Karn KS. Eye tracking in human-computer interaction and usability research: Ready to deliver the promises. *Mind*. 2003;2:4.
- [220] Findlay JM, Gilchrist ID. Visual selection, covert attention and eye movements. 2003.
- [221] De Rivecourt M, Kuperus M, Post W, Mulder L. Cardiovascular and eye activity measures as indices for momentary changes in mental effort during simulated flight. *Ergonomics*. 2008;51:1295-319.
- [222] Banbury S, Gauthier M, Scipione A, Hou M. *Intelligent adaptive systems: Literature research of design guidance for intelligent adaptive automation and interfaces. DTIC Document*; 2007.
- [223] Jaeggi SM, Buschkuhl M, Perrig WJ, Meier B. The concurrent validity of the N-back task as a working memory measure. *Memory*. 2010;18:394-412.
- [224] Andreassi JL. Pupillary response and behavior. *Psychophysiology: Human behavior and physiological response*. 2000:218-33.
- [225] Kahneman D, Beatty J. Pupil diameter and load on memory. *Science*. 1966;154:1583-5.

- [226] Peysakhovich V, Dehais F, Causse M. Pupil Diameter as a Measure of Cognitive Load during Auditory-visual Interference in a Simple Piloting Task. *Procedia Manufacturing*. 2015;3:5199-205.
- [227] Rizzolatti G, Craighero L. The mirror-neuron system. *Annu Rev Neurosci*. 2004;27:169-92.
- [228] Gallese V, Fadiga L, Fogassi L, Rizzolatti G. Action recognition in the premotor cortex. *Brain*. 1996;119:593-610.
- [229] Rizzolatti G, Sinigaglia C. The functional role of the parieto-frontal mirror circuit: interpretations and misinterpretations. *Nature reviews neuroscience*. 2010;11:264-74.
- [230] Molenberghs P, Cunnington R, Mattingley JB. Brain regions with mirror properties: a meta-analysis of 125 human fMRI studies. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*. 2012;36:341-9.
- [231] Molenberghs P, Hayward L, Mattingley JB, Cunnington R. Activation patterns during action observation are modulated by context in mirror system areas. *Neuroimage*. 2012;59:608-15.
- [232] Gazzola V, Rizzolatti G, Wicker B, Keysers C. The anthropomorphic brain: the mirror neuron system responds to human and robotic actions. *Neuroimage*. 2007;35:1674-84.
- [233] Daaboul A. Mise au point de contre-mesures IHM, rapport PIR: ISAE. 2009.
- [234] Oberman LM, McCleery JP, Ramachandran VS, Pineda JA. EEG evidence for mirror neuron activity during the observation of human and robot actions: Toward an analysis of the human qualities of interactive robots. *Neurocomputing*. 2007;70:2194-203.
- [235] Giraudet L, Berenger M, Imbert J-P, Tremblay S, Causse M. Inattentive Deafness in Simulated Air Traffic Control Tasks: A Behavioral and P300 Analysis. 2014.
- [236] Fazli S, Mehnert J, Steinbrink J, Curio G, Villringer A, Müller K-R, et al. Enhanced performance by a hybrid NIRS-EEG brain computer interface. *Neuroimage*. 2012;59:519-29.
- [237] Valéry B, Peysakhovich V, Causse M. Hear me flying! Does visual impairment improve auditory display usability during a simulated flight? 2015.
- [238] Oberman LM, Hubbard EM, McCleery JP, Altschuler EL, Ramachandran VS, Pineda JA. EEG evidence for mirror neuron dysfunction in autism spectrum disorders. *Cognitive Brain Research*. 2005;24:190-8.

Table des illustrations

Figure 1. Cockpit d'un A400M. On constate la taille et la complexité visuelle de l'interface homme-machine. Par ailleurs les pilotes doivent également prendre en compte les communications radios, les alertes visuo-auditives et tout ceci dans le bruit de fond généré par le vol.	19
Figure 2. Du contrôle en-route au contrôle d'aérodrome (source : thèse Imbert, 2014)	21
Figure 3 : Binôme de contrôleurs radariste et organique.....	22
Figure 4. Présentation de la tâche de Macdonald (Macdonald & Lavie, 2011).	31
Figure 5. Résultats de Macdonald & Lavie (2011) : comparaison du nombre de participants signalant le son selon la charge perceptuelle de la tâche qui leur était demandée	31
Figure 6. Résultats du groupe de non musiciens à gauche, de musiciens amateurs à droite, en jaune le groupe qui devait compter les coups de timbales, en bleu le groupe de contrôle. Issu de Koreimann (2009).....	32
Figure 7. A gauche, un sujet équipé d'un EEG <i>Biopac</i> à 19 électrodes. A droite, un sujet équipé d'un bonnet de 128 électrodes <i>Biosemi</i>	37
Figure 8. D'après Dussault (2005). Activité thêta (en haut) et Beta (en bas) lors des différentes phases de vol. En vers sont marquées les phases de repos, et en rouge les phases de vol VFR et IFR.....	38
Figure 9. Exemple de MMN provoquées par des changements de fréquence dans un flux de sons de fréquence standard.	40
Figure 10. P300 évoquée par des sons fréquents et des alarmes selon la tâche de oddball. ...	41
Figure 11. A gauche, un eye-tracker <i>Pertech</i> , avec une caméra frontale filmant le champ de vision, et une caméra qui vient filmer l'œil du sujet. A droite, un eye-tracker fixe <i>Tobii</i> , qui se place sous l'écran présentant la tâche.	42
Figure 12. Electrodes pour la mesure de la résistance électrodermale.....	44
Figure 13. Positionnement des électrodes pour la mesure d'un électrocardiogramme.	45
Figure 14. A gauche, un bandeau fNIRS porté. A droite le détail des 4 émetteurs infra-rouge et des 16 détecteurs.....	45
Figure 15. Diagram of the scenarios' process. First a 2 to 4.5-second video was displayed, during which a sound was played and a colored circle displayed, followed by a 2-second response time window. The 3 indicators are in the upper left corner, the score to the landing task in the upper right corner.	60
Figure 16. Illustration of the two landing task difficulty levels and the table of rules for landing. On top, a low load landing task video on the left, and a high load landing task video, on the right. In the high load condition, indicators appeared in red. Below, the rules for deciding whether it was possible or not to land in the landing task.	61

Figure 17. The procedure timeline.....	63
Figure 18. Mean inattentive deafness rate across the three levels of cognitive load. Error bars represent the standard error of the mean. *significant difference at $p < .05$. **significant difference at $p < .001$	66
Figure 19. Mean ERPs and mean P300 amplitudes for the three levels of load on the three midline electrodes. For each electrode, the horizontal axis denotes time in ms, with the N100 and P300 time-windows used for analysis indicated, and the vertical axis denotes amplitude in μ Volts.	67
Figure 20. Correlation between the mean inattentive deafness rate and the mean auditory P300 amplitude. On the horizontal axis, the mean P300 amplitude during the dual task scenario, in μ V. On the vertical axis, the mean inattentive deafness rate, during the dual task scenario ($p < .01$). Linear regression intercept: 23.57, slope: -2.30.....	68
Figure 21 : effet de la tâche et du son, moyennes des fréquences RED	74
Figure 22 : diagramme des moyennes pour l'interaction tâche*load. TACHE 1 : tâche de contrôle, TACHE 2 : tâche expérimentale.	74
Figure 23 : HSD de Tukey pour l'interaction tâche*load	74
Figure 24. Le micro-monde ATC Laby (source : thèse Imbert, 2014).	77
Figure 25. Un Labyrinthe minimaliste édité (source : thèse Imbert, 2014).....	78
Figure 26. Zoom on the Laby interface. Participants had to select the altitude of the central aircraft according to the instruction given on the black window above the aircraft.	89
Figure 27. Screenshot of the Laby microworld simulation. On the top, an example with 5 static peripheral aircraft positioned around the corridor. Below, an example with 21 peripheral aircraft. The radar labels of the peripheral aircraft are always displayed. In both images, the main aircraft navigates through the corridor. An altitude instruction is displayed on its left (the radar label of the main aircraft appears only in this case).	90
Figure 28. The two types of visual notifications inspired from the one triggered in ATC radar screen when minimum separation between aircraft is lost. In the Color-Blink notification, the text ALRT switches from white (1a) to red (1b) at a rate of 200 ms white on/800 ms red. In the Box-Animation notification, the text ALRT is displayed in red (2b) and four yellow chevrons placed around the label (2a) move outward from the label (2b) by 60 pixels following a slow in/slow out animation cycle of 1Hz.	91
Figure 29. ERPs for the BA (red) and CB (blue) and Control (black) conditions, for alarm tones, on the Pz electrode. The horizontal axis denotes time in ms, and the vertical axis denotes amplitude in μ V. P300 amplitude is significantly higher in BA group than in CB group.....	95
Figure 30. Screenshot of the Laby microworld simulation. An example with 21static peripheral aircraft positioned around the corridor. The main aircraft navigates through the corridor.....	104
Figure 31. Zoom on the Laby interface. On the left: The window used to select the heading of the plane, which appeared when clicking on the plane's label. On the right: the window used to select the altitude of the plane.....	105

Figure 32. The visual notification inspired from the one triggered in ATC radar screens when minimum separation between aircraft is lost. The text ALRT switches from white (a) to red (b) at a rate of 200 ms white/800 ms red.105

Figure 33. Eye fixation duration when alarms are missed or detected, in the low and high load condition. There is a significant detection x cognitive load interaction, $p < .001$. 108

Figure 34. Déroulement d'un essai de la tâche expérimentale.....117

Figure 35. GPWS warning sur simulateur. (a) alerte classique « Pull Up ». (b) contremesure pour l'activation des neurones miroir.119

Figure 36. (image tirée de Valéry et al., 2015) (a) le simulateur de vol de l'ISAE. (b) un participant équipé d'un EEG BIOSEMI 128 électrodes.....128

Figure 37. Description du n-back pour trois essais. Pour l'essai le plus à droite, en n-back 0, la consigne écrite « vert » doit être appliquée immédiatement. En n-back 1, la consigne à appliquer est celle de l'essai précédent, « jaune », tandis qu'en n-back 2, la consigne à appliquer est celle deux essais précédent, « bleu ».164

Figure 38. Les quatre contre-mesures utilisées.....165

Figure 39. Schéma du déroulement de l'expérience.....166

Annexes

I. Annexe 1 : Questionnaires subjectifs pour la première expérience

Questionnaire de latéralité d'Oldfield

Le score à ce test correspond à un coefficient de dominance manuelle. Un droitier « entier » aura un score de 100%, un ambidextre aura un score de 0. Il s'agit de vérifier que tous les participants ont bien une dominance manuelle droite (voir annexe)

Questionnaire et latéralité		
<u>Questionnaire :</u>		
Pseudo (3 premières lettres du nom et 2 premières lettres du prénom)		
Date de naissance		
Nombre total d'heures de vol		
Nombre d'heures de vol ces 2 dernières années		
Date d'obtention du brevet		
Niveau d'études (ex : bac + 2)		
Adresse mail (si vous souhaitez être informé des résultats)		
Ce questionnaire a pour objectif d'établir plus précisément votre coefficient de dominance manuelle.		
3 réponses sont possibles :		
** : indique que la main D ou G est exclusivement utilisée		
* : indique que la main D ou G est préférentiellement utilisée		
* et * indique que les deux mains, D ou G peuvent être utilisées indifféremment		
Questions :		
	G	D
1) pour écrire	--	--
2) Pour dessiner	--	--
3) Pour lancer une balle (avec une seule main)	--	--
4) Pour tenir des ciseaux	--	--
5) Pour tenir la brosse à dent	--	--
6) Pour tenir un couteau	--	--
7) Pour tenir une cuillère (e.g. soupe)	--	--
8) Pour tenir un balai (celle qui est en haut)	--	--
9) Pour allumer une allumette (celle qui tient l'allumette)	--	--
10) Pour ouvrir une boîte (ou un pot, celle qui tient le couvercle)	--	--
$[(d-g) / (d+g)] * 100 =$		

Questionnaire de fatigue de Pichot

Le Questionnaire de Pichot est un test d'évaluation de la fatigue, pour déterminer à quel point sa fatigue le handicape dans ses activités. Un total supérieur à 22 à ce test est considéré comme une fatigue excessive. Ce test et les suivants seront analysés pour vérifier leur lien éventuel avec la surdité inattentionnelle.

Échelle de fatigue de Pichot (pour l'évaluation de la Fatigue)

(Ref. « Echelles et outils d'évaluation en médecine générale » J. Gardenas et Coll. -Le Généraliste- Supplément du N° 2187; Mars 2002).

La fatigue est une sensation d'affaiblissement physique ou psychique qui survient normalement à la suite d'un effort soutenu, et qui impose la mise au repos.

On parle de fatigue pathologique lorsque la personne se sent handicapée par rapport à son niveau de forme habituel pour effectuer ses activités quotidiennes.

L'échelle subjective de Pichot a été proposée pour mesurer l'importance de ce handicap.

Prénom :	Nom :	Date de naissance:.....
Date du test :	Traitement en cours	

Parmi les huit propositions suivantes, déterminez celles qui correspondent le mieux à votre état en affectant chaque item d'une note entre 0 et 4:

(0 = pas du tout; 1= un peu, 2 = moyennement, 3= beaucoup, 4 = extrêmement)

- Je manque d'énergie..... 0 1 2 3 4
- Tout demande un effort..... 0 1 2 3 4
- Je me sens faible à certains endroits du corps..... 0 1 2 3 4
- J'ai les bras ou les jambes lourdes 0 1 2 3 4
- Je me sens fatigué sans raison..... 0 1 2 3 4
- J'ai envie de m'allonger pour me reposer..... 0 1 2 3 4
- J'ai du mal à me concentrer 0 1 2 3 4
- Je me sens fatigué, lourd et raide 0 1 2 3 4

Total (sur 32) :.....

Un total supérieur à 22 est en faveur d'une fatigue excessive, vous souffrez peut être d'un sommeil inefficace.

NB. Ce questionnaire aide à mesurer votre niveau général de Fatigue et n'établit pas de diagnostic. Apportez le à votre médecin pour discuter des causes et des conséquences de cette fatigue dans votre vie.

NASA TLX

Le NASA TLX (Task Load Index, annexe) est un outil pour définir la charge perçue par un participant selon 6 échelles : la demande mentale, la demande physique, la demande temporelle, la performance, l'effort et la frustration. Le score est noté de 1 (demande faible) à 20 (demande élevée), avec le cas particulier de la performance, 20 correspondant à l'échec et 1 à la réussite.

Figure 8.6

NASA Task Load Index

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

Name	Task	Date

Mental Demand How mentally demanding was the task?

Physical Demand How physically demanding was the task?

Temporal Demand How hurried or rushed was the pace of the task?

Performance How successful were you in accomplishing what you were asked to do?

Effort How hard did you have to work to accomplish your level of performance?

Frustration How insecure, discouraged, irritated, stressed, and annoyed were you?

Test du PASAT

Le PASAT (Paced Auditory Serial Addition Test) est utilisé pour définir la capacité et le rythme de traitement de l'information et d'attention soutenue. Il consistait ici en 4 séries de chiffres : après chaque chiffre énoncé, le candidat devait donner la somme des deux derniers chiffres entendus. Entre chaque série, le temps entre chaque chiffre est diminué. Ce temps vaut 4 secondes pendant les 11 essais d'entraînement. Puis pour l'expérience elle-même, il vaut 3 secondes, puis 2, puis 1,5 et encore 1,5. Le participant était éliminé immédiatement s'il ne répondait pas à au moins 3 chiffres à la suite correctement pendant l'entraînement. Les personnes ayant un score inférieur au score au 5^{ème} quartile sont considérées comme ayant des difficultés d'attention, d'élocution ou d'audition et doivent également être écartées.

	PASAT 3"		PASAT 2"	
	≤ 12	> 12	≤ 12	>12
Yrs. of Education:				
Number of Subjects:	54	47	54	47
Total Mean Correct:	46.7	50.4	35.1	39.4
Standard Deviation:	9.1	9.7	9.6	10.2
5 th Percentile Cutoff:	< 32	< 35	< 20	< 23

Tableau des normes de performances au PASAT 3" et 2" [extrait de http://pasat.us/PDF/PASAT_Manual.pdf]

*Questionnaire alarmes auditives***Alarmes auditives**

1. À votre avis, quelle est la proportion d'essais (en %) qui contenaient une alarme auditive (son plus aigu)?

2. Sur l'ensemble des essais contenant une alarme auditive, quel est le pourcentage d'alarmes que vous estimez avoir réussi à détecter?

3. En ce qui concerne les alarmes auditives que vous avez manquées, pour quelles raisons croyez-vous que vous ne les avez pas signalées?
Indiquez la réponse qui décrit le mieux ces raisons en transcrivant dans la colonne de droite l'une des lettres suivantes :
R : Presque jamais
O : Parfois
S : Souvent
T : Presque toujours

Je n'ai pas entendu l'alarme.	
J'ai entendu l'alarme, mais j'ai oublié de signaler sa présence durant la fenêtre de réponse.	
J'ai remarqué qu'il y avait eu une alarme seulement à l'essai suivant lorsque j'ai perçu la différence avec le son normal.	
Autre (spécifiez) : _____ _____	

4. Avez-vous des commentaires à propos des alarmes auditives ou de la tâche de détection de ces alarmes?

Questionnaire alarmes visuelles

Alarmes visuelles

1. À votre avis, quelle est la proportion d'essais (en %) qui contenaient une alarme visuelle (cercle rouge)?

2. Sur l'ensemble des essais contenant une alarme visuelle, quel est le pourcentage d'alarmes que vous estimez avoir réussi à détecter?

3. En ce qui concerne les alarmes visuelles que vous avez manquées, pour quelles raisons croyez-vous que vous ne les avez pas signalées?
Indiquez la réponse qui décrit le mieux ces raisons en transcrivant dans la colonne de droite l'une des lettres suivantes :
R : Presque jamais
. O : Parfois
.. S : Souvent
... T : Presque toujours

Je n'ai pas vu l'alarme.	
J'ai vu l'alarme, mais j'ai oublié de signaler sa présence durant la fenêtre de réponse.	
J'ai remarqué qu'il y avait eu une alarme seulement à l'essai suivant lorsque j'ai perçu la différence avec le cercle normal.	
Autre (spécifiez) : _____ _____	

4. Avez-vous des commentaires à propos des alarmes visuelles ou de la tâche de détection de ces alarmes?

II. Annexe 2 : Détails de la procédure d'acquisition et de traitement des données BioPac

Les amplificateurs étaient reliés par un câble parallèle à l'ordinateur gérant les vidéos des tâches d'atterrissage, qui envoyait les triggers de synchronisations au moment où les sons étaient joués. Les fichiers étaient ensuite enregistrés dans Acqknowledge 4.0. Les consignes particulières données aux participants pour éviter les artefacts sur le signal cérébral étaient :

- éviter de bouger ;
- éviter les mouvements de tête ;
- éviter les mouvements oculaires ;
- limiter les clignements des yeux ;
- éviter de froncer les sourcils ;
- éviter de serrer les dents ;
- ne pas parler ;

Un premier filtrage online du signal EEG a été effectué : filtre passe-bas à 49Hz pour filtrer le bruit électrique produit par le secteur à 50Hz et tous les bruits haute fréquence.

Nous avons également réalisé une ICA est donc de séparer les données en 7 composantes les plus indépendantes possibles, car nous avons 7 mesures (= 7 électrodes). Nous avons réalisé l'ICA sur tous nos fichiers, et nous avons examiné les composantes trouvées pour chaque participant, afin d'identifier les éventuelles composantes. Le fait d'avoir nos 7 électrodes relativement réparties sur le crâne permet de situer la distribution spatiale de chaque composante sur un plan crânien à un instant donné. Ainsi, en moyenne temporelle, on s'attend à trouver une activité très frontale et symétrique à droite et à gauche pour les artefacts liés aux mouvements verticaux et aux clignements des yeux. A l'inverse, les mouvements latéraux des yeux auront une répartition antisymétrique sur le crâne, et moins frontale. En couplant l'observation des plans crâniens avec le signal de la composante, on peut ainsi identifier les composantes à soustraire du signal. Les signaux EEG ainsi purifiés améliorent grandement la mesure des ERPs.

Les fichiers finaux ont ainsi reçu les traitements suivants :

- **filtrage** passe-bas à 49Hz online,
- **rejection automatique des artefacts EOG** (avec le logiciel d'acquisition *Acqknowledge*) ;
- **époquage** des acquisitions autour des triggers des sons ;
- **ICA, rejection** de la composante artéfactuelle des mouvements oculaires de clignement ;
- **filtrage** passe-bas à 30Hz ;
- **recentrage** du signal autour de 0 ;
- **rejection des époques** dans lesquelles le signal dépasse le gabarit [-100 μ V, 100 μ V] ;
- **retrait des échecs de détection** des sons pour les fichiers de la condition contrôle.

Prétraitements pour le calcul de l'amplitude des ERP :

Les signaux obtenus étant fortement bruités, les potentiels évoqués n'émergeaient pas suffisamment du bruit. En effet, la salle de test n'était pas une cage de Faraday, de

nombreux appareils électriques fonctionnaient. Par ailleurs, l'appareil de mesure présentait des performances moyennes (électrodes non-amplifiées), ce qui accentuait le bruit habituellement retrouvé dans les mesures EEG.

L'analyse des données EEG a été réalisée avec EEGLAB 11.0.3.1b [166] fonctionnant sous MATLAB 7.1 (The MathWorks, Inc.). Les signaux EEG ont été segmentés pour chaque essai, pour obtenir des époques commençant 200 ms avant le début du stimulus auditif et allant jusqu'à 1000 ms après le stimulus (baseline -200 à 0 ms).

Les époques contenant des amplitudes dépassant la fenêtre [-100 mV, 100 mV] ont été rejetées. Pour la condition de charge faible en double tâche, 200 essais ERP ont été présentés à chaque participant, et une moyenne de 182.2 essais ont été retenus après le rejet d'artefact. Pour la condition de charge élevée, 200 essais ont été présentés et 183,4 retenus, et pour la condition contrôle, 200 essais ont été présentés et 183,8 retenus. ERP moyennes ont ensuite été calculées indépendamment pour chaque canal et l'état. La fenêtre de temps considérée pour l'amplitude moyenne de la P300 a été déterminée de 520 à 570 ms après stimulus, après inspection visuelle et analyses ANOVA significatives (facteur "type de son, standard vs déviant) sur des fenêtres successives de 50 ms de latence, résultant dans une fenêtre de temps. La même méthode a été appliquée pour la composante N100, mais aucune fenêtre de 50 ms n'a montré de résultats significatif à l'ANOVA selon le facteur de type de son. Pour les analyses ultérieures concernant la N100, nous avons considéré la fenêtre de 100 ms à 250 ms après stimulus (en accord avec la littérature et l'inspection visuelle).

III. Annexe 3 : L'ICA : Analyse en composantes indépendantes

L'analyse en composantes indépendantes est une méthode d'analyse des données qui relève des statistiques, des réseaux de neurones et du traitement du signal. Elle est notoirement et historiquement connue en tant que méthode de séparation aveugle de source mais est aujourd'hui appliquée à divers problèmes.

Voici pour commencer une brève présentation du principe de la séparation de sources.

Séparation de source : le « cocktail party » effect

L'illustration classique de la séparation de sources est le problème de la soirée cocktail. Lors d'une telle soirée, on dispose de microphones dans une salle dense, où des personnes discutent par groupes de tailles diverses. Chaque microphone enregistre la superposition des discours des personnes à ses alentours et le problème consiste à retrouver la voix de chaque personne (« débarrassée » des autres voix considérées comme parasites).

Lors d'une soirée en société (*cocktail party*), bien que les discussions soient multiples et mêlées, un humain est capable de distinguer le flux sonore qui l'intéresse (la voix de son interlocuteur) et d'ignorer les autres.

De la même façon, l'ICA permet de résoudre ce problème en considérant simplement que les personnes qui parlent à un instant donné ont des discours « indépendants ». Il ne s'agit pas de prendre en compte la sémantique de ces discours (on peut en effet imaginer que certaines voix soient concordantes à ce niveau) ni même l'acoustique (ce qui serait faux, ne serait-ce que lorsque les interlocuteurs ont des langues identiques...), mais de les considérer comme des signaux aléatoires statistiquement indépendants. Au contraire d'une chorale, les gens qui parlent en même temps à un instant donné émettent des sons indépendants.

La théorie assurant ce résultat pose néanmoins quelques hypothèses, en particulier que « le nombre de micros est supérieur ou égal au nombre de personnes ». Symétriquement, il reste aussi des indéterminations sur le résultat (les voix séparées identifiées) :

- on ne peut pas attribuer les voix aux personnes avec la seule connaissance des signaux retrouvés (mais un auditeur humain le pourrait). Autrement dit, on ne connaît pas l'ordre des signaux retrouvés.
- on ne connaît pas l'intensité de la voix des locuteurs. Celle-ci sera attribuée arbitrairement et un auditeur humain ne pourrait se fier qu'au ton de la voix et à la connaissance de la personne pour le déterminer.

IV. Annexe 4 : Questionnaires pour l'expérience 2

Questionnaire sur les alertes visuelles

Identifiant du participant : _____

1. A votre avis, combien y avait-il d'alertes (sur les avions périphériques) dans chaque scénario ? (Dans quel(s) scénario vous a-t-il semblé qu'il y en avait le plus ? le moins ?)

Numéro du scénario	Nombre d'alarmes
1	
2	
3	
4	

2. Il est possible que vous ayez manqué de signaler des alertes visuelles. Remplissez le tableau suivant de manière à décrire au mieux les situations que vous avez rencontrées, avec soit :

J : Presque jamais

P : Parfois

S : Souvent

T : Presque toujours

ainsi que le(s) numéro des scénario concernés.

	J, P, S ou T ?	N° scénario concerné(s)
Je n'ai pas traité l'alerte parce que je n'ai pas eu temps		
Je n'ai pas traité l'alerte parce que j'ai oublié		
Je n'ai pas traité l'alerte parce que je ne l'ai pas vue		
J'ai traité l'alerte		
Autre : (Spécifiez)		

3. Concernant les alertes visuelles, complétez le tableau suivant selon ce qui décrit le mieux votre situation :

- J : Presque jamais
- P : Parfois
- S : Souvent
- T : Presque toujours

	J, P, S ou T ?
Je remarquais immédiatement les alertes dès leur apparition	
Je les voyais au bout de quelques secondes	
J'étais obligé de faire attention aux avions périphériques pour voir ces alertes	
Autre : (Précisez)	

4. Avez-vous des remarques concernant les signaux visuels, leur détection ou leur traitement ? (Difficultés, rapidités, ou au contraire facilités...)

MERCI DE VOTRE PARTICIPATION

Questionnaire sur les alarmes sonores

Identifiant du participant : _____

1. A votre avis, combien y avait-il d'alarmes sonores (sons aigus) dans chaque scénario ? (Dans quel(s) scénario vous a-t-il semblé qu'il y en avait le plus ? le moins ?)

Numéro du scénario	Nombre d'alarmes
1	
2	
3	
4	

2. Il est possible que vous ayez manqué de signaler des alarmes sonores.

Remplissez le tableau suivant de manière à décrire au mieux les situations que vous avez rencontrées, avec soit :

J : Presque jamais

P : Parfois

S : Souvent

T : Presque toujours

ainsi que le(s) numéro des scénarii concernés.

	J, P, S ou T ?	N° scénario concerné(s)
Je n'ai pas signalé l'alarme parce que je n'ai pas eu temps		
Je n'ai pas signalé l'alarme parce que j'ai oublié		
Je n'ai pas signalé l'alarme parce que je ne l'ai pas entendue		
Je n'ai pas signalé l'alarme parce que je n'ai identifié le son comme étant une alarme qu'au son suivant		
J'ai signalé l'alarme		
Autre : (Spécifiez)		

3. Avez-vous des remarques concernant les alarmes sonores, leur détection ou leur traitement ? (Difficultés, rapidités, ou au contraire facilités...)

MERCI DE VOTRE PARTICIPATION

V. Annexe 5 : tâche de l'expérience de distraction

L'expérience se présente sous la forme d'une tâche de pilotage dans laquelle le participant doit contrôler un avion à l'aide d'un joystick. L'objectif est de suivre, en fonction d'instructions écrites (la couleur de l'avion à suivre), le bon avion parmi les trois présents sur l'écran (cf. Figure 37).

Les participants passaient chacun 3 blocs de 400 essais (i.e. 1200 changement de consigne pour l'avion à suivre au total) durant chacun 4.5s. Un bloc durait environ 20min. Au milieu et à la fin de chaque bloc étaient prévus de courtes pauses. À chaque début d'essai, une instruction écrite correspondant à la couleur de l'avion à suivre parmi les 3 avions potentiels apparaît pour une durée de 1s. Les essais sont pseudo-randomisés, de sorte que deux mêmes instructions ne pourront pas se suivre de manière directe, par exemple, si la consigne écrite « vert » apparaît, la consigne ne pourra pas être « vert » lors de l'essai suivant. Il en est de même pour les distracteurs auditifs. En fonction de l'instruction, le participant doit contrôler, selon l'axe vertical, son avion afin de le placer derrière l'avion de la couleur de la consigne écrite.

En même temps qu'apparaissait la consigne écrite, un son distracteur était joué. Il était demandé aux participants de ne pas en tenir compte. Nous avons utilisés 5 sons correspondants à des mots de couleurs, prononcés par une voix masculine et numériquement édités pour durer 280 ms. Les sons étaient présentés de manière binaurale grâce à des écouteurs disposés de part et d'autre de l'ordinateur. Parmi les sons, quatre étaient rares et un était fréquent. Le son fréquent était toujours le mot « gris » (aucun avion gris n'était présent à l'écran), et il représentait 70% des essais. Les sons rares étaient les mots « bleu », « rouge », « vert » et « jaune », ils étaient soit congruents avec la consigne écrite, soit non-congruents avec la consigne écrite, soit neutres (aucun avion de la couleur jouée par le son n'est présent à l'écran, et n'est donc jamais mentionné par la consigne écrite).

Chaque condition, congruent, non-congruent, neutre, était administré à hauteur de 10% des essais. De manière plus claire, on peut classer les sons distracteurs de la sorte :

- Congruent : couleur similaire à la couleur de la consigne écrite (10%) ;
- Non-congruent : couleur correspondant à un avion présent mais différente de la consigne écrite (10%) ;
- Neutre : couleur ne correspondant pas à celles des trois avions présents, randomisé entre les participants (10%) ;
- Fréquent : couleur ne correspondant pas à celles des trois avions présents (toujours « gris »), identique pour tous les participants (70%).

La couleur neutre est déterminée pour chaque participant dès le début d'une session expérimentale et le reste jusqu'à la fin de l'expérience. Par exemple, dans le modèle donné en figure XX, le distracteur auditif neutre est « rouge », les avions présents à l'écran pendant toute la durée de l'expérience étant bleu, vert et jaune.

Trois niveaux de charge de travail étaient manipulés via un n-back (400 essais par niveau de difficulté), l'ordre d'apparition des différents niveaux se faisait de manière aléatoire pour les participants au sein de chacun des trois blocs.

Plus précisément (voir figure 11) :

- N-back = 0 : application directe de la consigne
- N-back = 1 : application de la consigne de l'essai précédent
- N-back = 2 : application de la consigne apparue deux essais plus tôt

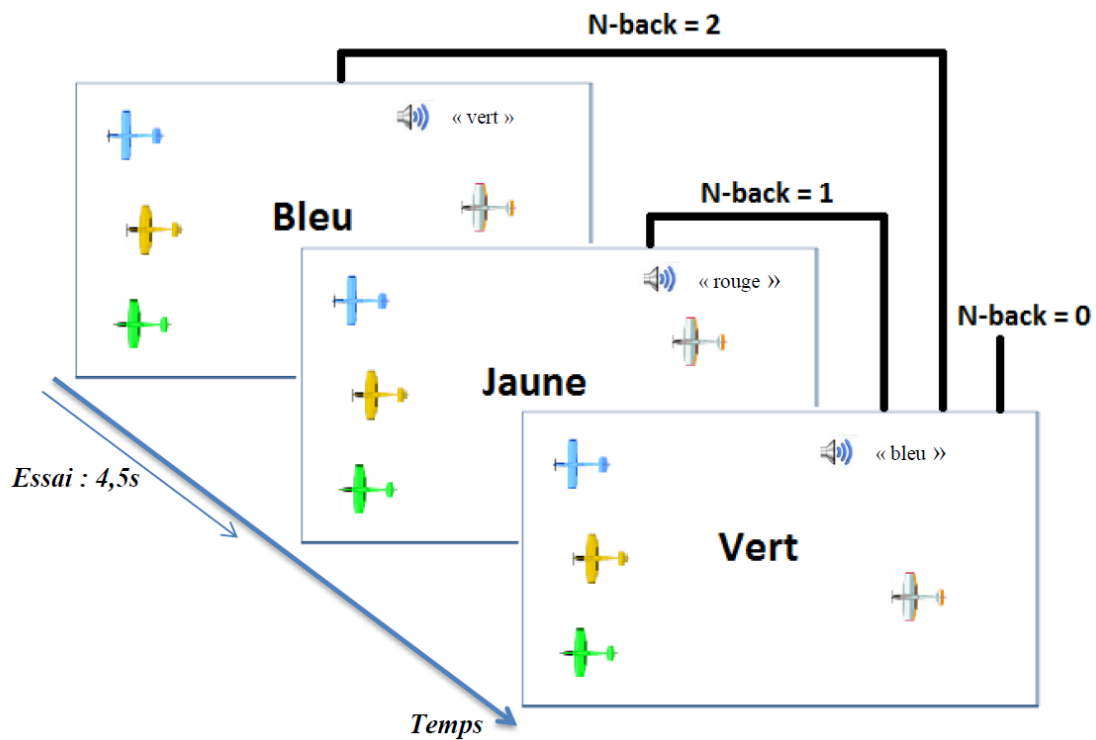


Figure 37. Description du n-back pour trois essais. Pour l'essai le plus à droite, en n-back 0, la consigne écrite « vert » doit être appliquée immédiatement. En n-back 1, la consigne à appliquer est celle de l'essai précédent, « jaune », tandis qu'en n-back 2, la consigne à appliquer est celle deux essais précédent, « bleu ».

Enfin, afin d'impliquer le participant dans la tâche, un score basé sur la précision et la rapidité de la réaction du participant était affiché en haut à gauche de l'écran lorsque la moitié d'un bloc était réalisé (environ 10min après chaque début de bloc).

VI. Annexe 6 : détails sur l'évaluation de contre-mesures « neurones miroirs »

Participants

Nos participants étaient 5 étudiants de l'ISAE-SUPAERO (3 femmes, 2 hommes) avec une expérience de vol d'au moins 20 heures sur un avion léger, âgés de 20 à 34 ans ($M = 23,8$ ans, $SD = 5.76$), droitiers. Les participants ont donné leur consentement écrit avant de commencer l'expérience.

Protocole

Après une brève présentation, il est demandé au participant de prendre en main un joystick HOTAS (avec manche et manette des gaz), posé sur une table entre lui et un écran d'ordinateur. Il devait ensuite effectuer la manoeuvre de remise des gaz une fois, puis regarder la vidéo d'un Aquila AT-01 effectuant un atterrissage à Toulouse Lasbordes (OACI LFCL) durant 7s, afin de se positionner dans un contexte de pilotage.

Il lui a ensuite été présenté quatre conditions différentes (cf. Figure 38) consistant en quatre vidéos:

- Un texte rouge « pull up », semblable à l'alarme actuellement affichée par le système d'alerte CFIT
- un enregistrement de bras humains effectuant une manoeuvre de remise des gaz avec le HOTAS, c'est-à-dire pousser la manette des gaz à fond en tirant le manche vers le haut.
- un enregistrement de bras humains effectuant une manoeuvre de remise des gaz, mais sans le joystick HOTAS
- Un bruit blanc visuel, qui a été utilisé comme condition contrôle.



Figure 38. Les quatre contre-mesures utilisées.

Nous avons formé quatre séries de 80s contenant chaque vidéo jouée à 1 Hz, et deux séquences de quatre séries étaient réalisées, comme ce fut le cas avec la vidéo-activation des neurones miroirs réalisés par Oberman et al. [234, 238] (Figure 39). Au cours de chaque séquence, le flux vidéo était arrêté entre 4 et 6 fois. Le sujet devait compter et signaler à la fin de chaque série combien de fois la vidéo avait été gelée, afin de maintenir l'attention des participants constante. L'ordre dans lequel les séquences sont apparues était contrebalancé pour chaque sujet.

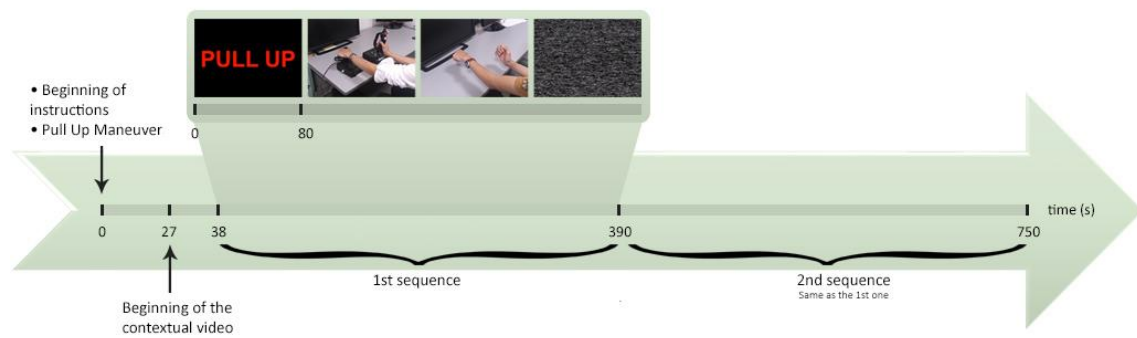


Figure 39. Schéma du déroulement de l'expérience.

Acquisition du signal EEG

Les données ont été recueillies avec un EEG *BIOSEMI*, avec 32 électrodes placées selon le système 10-20. Nous avons utilisé 5 électrodes externes, appliqué sur chaque mastoïde, le coin externe de chaque œil et en dessous de l'œil gauche. Les données ont été recueillies à une fréquence de 2048Hz.

Résumé

L'analyse des accidents aériens fait ressortir ces dernières années le rôle crucial des opérateurs humains, et leurs erreurs qui peuvent avoir des conséquences dramatiques. Un cas particulier d'erreur humaine reste cependant peu abordé : la surdité inattentionnelle, c'est-à-dire l'incapacité temporaire à entendre, à prendre conscience d'une information auditive. Dans le domaine de l'aéronautique, cette défaillance cognitive est évidemment critique, car elle signifie l'omission d'alarmes auditives. Le premier enjeu de ce projet de recherche est de définir des métriques comportementales et physiologiques caractéristiques de la surdité inattentionnelle. Pour cela, nous nous sommes intéressés en particulier à deux postes de travail fondamentaux de la sécurité aérienne et soumis à des alarmes auditives : le pilotage et le contrôle aérien. Nous avons cherché à mettre en évidence les conditions contextuelles favorisant l'apparition de la surdité inattentionnelle, notamment la charge de travail des opérateurs. Un second enjeu était d'identifier des pistes d'adaptation des interfaces avec les pilotes et les contrôleurs aériens, permettant de prévenir ou limiter la surdité inattentionnelle à ces postes spécifiques. Pour répondre à cette problématique, 3 expériences ont été menées. La première a étudié l'impact de la charge de travail sur le traitement des alarmes auditives lors d'une tâche d'atterrissage. Elle a permis de déterminer que la P300 était un indicateur de la surdité. La seconde expérimentation a porté sur l'impact du design des alarmes visuelles sur les capacités de traitement cognitif des alarmes auditives, dans le cadre du contrôle aérien. Les résultats nous ont montré une restauration de la P3b auditive avec le design visuel amélioré. Enfin la dernière expérience a testé la pertinence de mesures oculaires pour détecter les contextes favorisant la surdité inattentionnelle. Ces résultats ouvrent des pistes prometteuses de prévention et de détection de la surdité inattentionnelle aux postes critiques de la sécurité aérienne.

Mots-clés :

Sécurité aérienne ; facteurs humains ; neuroergonomie ; potentiels évoqués ; oculométrie.

Abstract

The analysis of airplane accidents has recently highlighted the crucial role of human operators, their mistakes having potential dramatic consequences. A specific type of human error remains little discussed: inattentive deafness, which is defined as the temporary inability to hear or to become aware of auditory information. In aeronautics, this cognitive failure is obviously critical because it can lead to the omission of auditory alarms. The first challenge of this research project is to define behavioral and physiological characteristics of inattentive deafness. For this purpose, we focused on the two fundamental jobs in aviation safety and subjected to auditory alarms: piloting and air traffic control. We planned to highlight the contextual conditions favoring the appearance of inattentive deafness, in particular the operators' workload. A second challenge was to identify potential adaptation in the interfaces with pilots and air traffic controllers to prevent or limit the apparition inattentive deafness. To address these issues, three experiments were conducted. The first experiment studied the impact of workload on the treatment of auditory alarms during a landing task. It was determined that P3b was an indicator of deafness. The second experiment focused on the impact of design visual alarms on cognitive processing abilities auditory alarms, as part of air traffic control. The results showed a restoration of auditory P300 with the enhanced visual design us. Finally, the last experiment tested the relevance of eye measurements to detect contexts favoring inattentive deafness. These results open promising possibilities for prevention and detection of inattentive deafness in critical positions of aviation safety.

Keywords:

Aviation safety ; human factor ; neuroergonomics ; evoked potentials ; eye-tracking.