



Open Archive TOULOUSE Archive Ouverte (OATAO)

OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in : <http://oatao.univ-toulouse.fr/>
Eprints ID : 14608

To cite this version : Durantin, Gautier *Mesure et analyse de l'activité cérébrale par des techniques d'imagerie en proche infrarouge.* (2012) [Mémoire]

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator: staff-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr



Facteurs Humains

Mesure et analyse de l'activité cérébrale par des techniques d'imagerie en proche infrarouge

Rapport de Projet de Fin d'Etudes
CAS – ISAE (Campus Supaero)

Sous la direction de Frédéric DEHAIS

Remerciements

Ce stage n'aurait pas été possible sans le soutien et l'implication de Frédéric Dehais, responsable de l'approfondissement d'automatique à Supaéro, et maître de conférences en facteurs humains. C'est grâce à son intervention que j'ai pu découvrir le domaine des facteurs humains et des neurosciences, vers lequel je compte désormais m'orienter. Sa bonne humeur, ses conseils toujours pertinents, et présentés de manière brillante, m'ont aidé tout au long de ce stage, mais aussi dans la recherche de mon projet professionnel. Je suis heureux que cette collaboration fructueuse se poursuive encore pendant trois ans, après que Frédéric Dehais m'ait accompagné dans mon inscription en doctorat, sous sa direction.

Merci à Jean-François, pour ses conseils précieux et son implication dans la mise en place de ce stage.

Merci également à l'ensemble du service du Centre Aéronautique et Spatial de Supaéro, pour leur contribution à un environnement de travail stimulant et sympathique.

Enfin, merci à l'équipe des professeurs de la formation Supaéro, dont le dévouement et l'implication auprès des élèves rendent possible les projets qui nous animent. A ce titre, je remercie tout particulièrement Caroline Bérard et Stéphanie Lizy-Destrez, pour leur soutien et leur patience.

ABSTRACT

La mesure de charge attentionnelle est un enjeu d'avenir dans la mise en place d'interfaces adaptatives dans le milieu aéronautique, pour améliorer les conditions d'utilisation et la sécurité (en particulier dans la détection de phénomènes attentionnels extrêmes tels que la tunnélisation ou la divagation attentionnelles). Les mesures physiologiques, par leur utilisabilité en temps réel et leur estimation objective du niveau de charge attentionnelle, sont d'un intérêt croissant pour les chercheurs. Dans ce rapport, nous étudions les différentes métriques associées à la mesure de charge attentionnelle, et expérimentons l'utilisabilité de l'imagerie par spectroscopie en proche infrarouge (une méthode d'imagerie récente) dans la détection de niveaux de charge attentionnelle en situation de pilotage. Dans ce cadre, nous avons mis en place une expérience faisant intervenir les effets de la mémoire et de la difficulté de la tâche sur la charge attentionnelle. Les résultats prometteurs de cette méthode d'imagerie sur cette expérience nous permettent d'envisager son utilisation dans le cadre d'une interface adaptative.

To improve security and usability conditions in the aeronautic field, being able of monitoring user's attentional load and using its measure in an adaptive interface is becoming a widely considered solution (especially concerning the detection of extreme attentional states such as attentional tunneling or low alertness). In this regard, physiological measures bring a real-time and objective measure of attentional load. In this report, we consider different metrics of the attentional load, and study more specifically (through experimentation) the usability of functional Near Infrared Spectroscopy (NIRS) as an assessment of pilot's attentional workload. An experiment was settled to look at the effect of memory and task difficulty on attentional workload. The promising results of NIRS on this experiment encourage us in using it in an adaptive interface.

Table des matières

Partie 1 :

Présentation de l'environnement de travail

I/L'INSTITUT SUPERIEUR DE L'AERONAUTIQUE ET DE L'ESPACE (ISAE).....	8
1 Composition.....	8
2 Missions.....	8
2.1 Formation.....	8
2.2 Recherche.....	8
2.3 Formation Continue.....	9
3 Partenaires.....	9
3.1 Industriels.....	9
3.2 Académiques.....	9
II/LE CENTRE AERONAUTIQUE ET SPATIAL (CAS).....	9
1 Missions.....	9
2 Organisation.....	10
III/OBJECTIFS DU PFE.....	10
1 Contexte de recherche du PFE.....	10
2 Equipe de travail et partage des tâches.....	11

Partie 2 :

Problématique et état de l'art de la mesure de la charge attentionnelle

I/PROBLEMATIQUE.....	12
II/DEFINITION DE LA CHARGE ATTENTIONNELLE.....	13
III/LES MESURES SUBJECTIVES DE CHARGE ATTENTIONNELLE.....	14
IV/LES MESURES OBJECTIVES DE CHARGE ATTENTIONNELLE : APPROCHE COMPORTEMENTALE... 	15
1 La mesure comportementale.....	15
2 La mesure par une performance à une tâche secondaire.....	15
V/LES MESURES OBJECTIVES DE CHARGE ATTENTIONNELLE : APPROCHE PSYCHO-PHYSIOLOGIQUE	17
.....	

1 Les effets de la charge attentionnelle sur le système nerveux autonome.....	17
2 La mesure du rythme cardiaque.....	19
3 La mesure de la conductance électrodermale (Galvanic Skin Response)	20
4 L'oculométrie.....	20
VI/ LES MESURES OBJECTIVES DE CHARGE ATTENTIONNELLE : APPROCHE NEUROPHYSIOLOGIQUE	21
1 Les effets de la charge attentionnelle sur le système nerveux central	21
2 La mesure par électroencéphalographie.....	22
3 La Spectroscopie en Proche Infrarouge (NIRS).....	23
3.1 Principe de la mesure.....	23
3.2 La NIRS comme prédicteur de la charge attentionnelle	27

Partie 3 :

Description de l'environnement d'expérimentation

I/DESIGN DE LA TACHE	30
II/PROGRAMMATION DE LA TACHE	32
1 Choix techniques.....	32
2 Interface de l'expérimentateur	33

Partie 4 :

Expérimentation

I/MATERIEL ET METHODES	35
1 Participants.....	35
2 Mesures objectives et subjectives.....	35
3 Matériel	35
4 Protocole.....	36
II/RESULTATS COMPORTEMENTAUX	36
1 Performance à la tâche secondaire	36
2 Résultats du NASA TLX.....	37
III/RESULTATS DES MESURES NIRS	39
1 Niveaux d'oxygénation moyens par session.....	40
2 Niveaux d'oxygénation en fonction de la production	42
IV/DISCUSSION	44

Annexes	47
Annexe 1 : NASA Task Load Index	48
Annexe 2 : Instructions à destination des sujets	49
Annexe 3 : Présentation de l'interface utilisateur	52
Annexe 4 : Première étude comportementale	53
1 Matériel et méthodes	53
2 Résultats	53
3 Discussion	54
Annexe 5 : Questionnaire pré-expérimental	56
Annexe 6 : Questionnaire post-expérimental	57
Annexe 7 : Tableaux des tests post-hoc	58
Annexe 8 : Localisation des voxels de la NIRS Biopac sur une vue du cerveau (source : AYAZ 2011).....	62
Bibliographie.....	63

Partie 1 :

Présentation de l'environnement de travail

I/L'INSTITUT SUPERIEUR DE L'AERONAUTIQUE ET DE L'ESPACE (ISAE)

1 Composition

L'institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace, est issu du rapprochement de SUPAERO, créée en 1909 et de l'ENSICA créée en 1945. SUPAERO fût d'abord implantée à Paris puis a déménagé à Toulouse, à Rangueil. L'ENSICA est implantée à Jolimont. Suite au rapprochement, les deux formations seront amenées à cohabiter sur le campus SUPAERO à l'horizon 2015, mais resteront néanmoins deux formations séparées.

2 Missions

L'ISAE assure plusieurs missions, que l'on peut séparer selon les secteurs suivants

2.1 Formation

La formation est très complète :

- 2 formations ingénieurs (SUPAERO et ENSICA)
- 2 diplômes d'études supérieures : DESIA et DESII
- 2 Diplômes Nationaux Mastères
- 19 Mastères Spécialisés
- 5 Mastères Recherche
- Participe à 6 écoles doctorales

2.2 Recherche

La recherche est un levier important de la formation à l'ISAE. Elle s'organise autour de 6 départements :

- Aérodynamique, énergétique et propulsion (DAEP)
- Mécanique des structures et matériaux (DMSM)
- Electronique, optronique et signal (DEOS)
- Mathématiques, informatique, automatique (DMIA)
- Langue, arts, cultures et sociétés (LACS)
- Centre Aéronautique et Spatial (CAS)

2.3 Formation Continue

Trois structures au sein de l'ISAE assurent la formation continue pour les personnes déjà en activité dans le monde du travail qui complètent leur formation :

- EUROSAT
- ECATA : European Consortium for Advanced Training in Aerospace
- ITSA : International Training center for Space Applications

3 Partenaires

3.1 Industriels

L'ISAE entretient des relations très étroites avec les entreprises, au niveau national, européen et mondial. Le partenariat se concrétise par l'intervention de nombreux professionnels au sein des formations, par de nombreuses offres de stage et autres projets en entreprise (brillamment relayées par le service stage et carrière), par des études et recherche hébergées à l'ISAE au service des entreprises (Thèses CIFRE, SUPAERO Junior Conseil,...), par la formation continue qui regroupe nouveaux ingénieurs et cadres expérimentés dans les mêmes salles de classes, et par de nombreuses rencontres entre étudiants et entreprises lors de conférences et autres déjeuners débat, toujours orchestrés par le service stage et carrière. Par ailleurs, la présence de ces industriels au conseil d'administration, au conseil de la formation, et au conseil de la recherche garantissent une bonne adéquation entre la formation et les besoins des entreprises.

3.2 Académiques

L'ISAE est membre de 3 réseaux d'universités, pour le Cours Supaero :

- Le GEA : Groupe des Grandes Ecoles Aéronautiques et Spatiales de France
- PEGASUS : Partnership of a European Group of Aeronautics and Space Universities
- TIME : Top Industrial Managers for Europe
- ECATA : European Consortium for Advanced Training in Aerospace
- Amicale ISAE-SUPAERO-ENSICA

Faire partie de ces réseaux permet aux étudiants de l'école de participer à des échanges académiques et des stages de manière simplifiée.

II/LE CENTRE AERONAUTIQUE ET SPATIAL (CAS)

1 Missions

Le CAS assure principalement deux activités : la formation des élèves de l'ISAE et la recherche et développement des systèmes aéronautiques et spatiaux pluridisciplinaires. La recherche en facteurs humains nécessite en effet une bonne connaissance de l'avion (dynamique de vol, pilotage, système embarqués) et de l'homme (marqueurs physiologiques liées à l'activité de pilotage, comportement en vol, réactions aux différentes sollicitations). De même, la conception de drones requiert des compétences en automatique, propulsion, aérodynamique, télécommunications, traitement du signal,...). Par ailleurs, la conception de logiciels de simulation spatiale et la salle satellite permettent l'accueil de projets spatiaux divers.

2 Organisation

Le CAS est séparé en deux pôles : un dédié aux activités aéronautiques et l'autre dédié aux activités spatiales.

- Les activités aéronautiques :
 - Une flotte de 5 Robin DR400, 4 Aquila, 1 Socata TB20 permet la formation au pilotage d'une vingtaine d'élèves par an et de nombreuses séances en vol à des fins pédagogiques. Cette antenne du CAS est située à Lasbordes où travaillent à plein temps 3 mécaniciens et 3 pilotes instructeurs.
 - Un simulateur de vol 3 axes sur vérins est accessible, avec un moteur de simulation 3D et des ambiances sonores réalistes. Les lois de pilotage et l'ensemble des affichages sont calculés de front sur 8 ordinateurs et assurent un rendu très immersif des scénarios pour le pilote. Deux personnels participent activement au développement des moyens de simulation et maîtrisent tous les étages du simulateur. Ce simulateur permet entre autres l'implantation et le test de lois de pilote automatique, et des expériences en facteurs humains.
 - Une collaboration forte avec les laboratoires mitoyens du CAS permet l'utilisation de moyens importants en termes d'électronique, de structures composites, d'intégration système, de calcul aérodynamique, de dimensionnement des propulsions pour le développement de drones d'observation. Une personne du CAS travaille à plein temps sur ce sujet, appuyée par ses collègues en fonction des besoins. Là encore les facteurs humains profitent de ce support pour étudier les téléopérateurs pendant la supervision et le suivi de mission.

- Les activités spatiales :
 - La station sol STELA, station d'émission/réception a permis la mise à poste et le maintien à poste du satellite Arsène. Après 4 mois, le satellite Arsène a cessé d'émettre. La station a alors trouvé une nouvelle mission, suivre le satellite HETE, réalisé par le MIT, et assure encore aujourd'hui 5000 visibilités par an.
 - Une maquette fonctionnelle de microsatellite reproduisant les conditions d'éclairement solaire, libre en attitude grâce à la liaison sphérique à air, servant au design des lois de contrôle d'attitude.
 - De nombreux logiciels sont codés en tant qu'outils pour la formation, Satorb, Simusat, Simulaunch.

III/OBJECTIFS DU PFE

1 Contexte de recherche du PFE

L'ISAE développe depuis 2004 une activité dans le domaine des interactions hommes-systèmes. Cette activité de recherche, menée par l'équipe Facteurs Humains du CAS, est transdisciplinaire : neurosciences, neuropsychologie, ergonomie et intelligence artificielle. Elle vise à élaborer des modèles formels des mécanismes cognitifs pour concevoir de nouveaux systèmes interactifs adaptés à l'homme. Une caractéristique importante de cette activité est de s'appuyer sur une approche expérimentale forte : de nombreux moyens d'expérimentation sont conçus et mis en œuvre (simulateur de vol, avions réels, plateforme robotique..). Des techniques de mesures récentes sont utilisées (ex : imagerie médicale) ou mises au point (ex : capteurs physiologiques et comportementaux) grâce à des collaborations de recherche. Cette activité trouve de multiples

champs applicatifs à travers l'assistance au pilotage (aéronef, automobile), aux interactions hommes robots ou encore à l'aide aux patients.

Des expérimentations récentes menées au CAS ont confirmé que l'apparition d'un fort stress pouvait générer des comportements de « **tunnélisation attentionnelle** » où les opérateurs se focalisent excessivement sur la réalisation d'une tâche au détriment des autres, et ne sont plus sensibles aux alarmes visuelles et auditives. Des phénomènes antagonistes de « **divagation attentionnelle** », caractérisés par une baisse du niveau attentionnel, existent également. Dès lors, il devient important de définir des moyens pour détecter en temps réel ce type de comportement, à l'origine de nombreux accidents en aéronautique. L'enjeu de ce stage est de définir des métriques comportementales et physiologiques, précurseurs de la dégradation de la charge attentionnelle, en insistant particulièrement sur un outil de neuroimagerie prometteur : l'imagerie par spectroscopie en proche infrarouge.

2 Equipe de travail et partage des tâches

Ce travail de recherche a été réalisé sous la direction de Frédéric Dehais au sein du CAS. Au cours de ce travail, j'ai été amené à collaborer avec Jean-François Gagnon, doctorant à l'université Laval de Québec (Canada), en stage d'échange dans l'équipe de facteurs humains de l'ISAE, et qui a participé à la définition du protocole expérimental.

Partie 2 :

Problématique et état de l'art de la mesure de la charge attentionnelle

I/PROBLEMATIQUE

La recherche montre que la charge attentionnelle d'un opérateur (un pilote, en particulier) affecte directement sa performance (YOUNG/STANTON 2001). En particulier, la saturation des ressources attentionnelles peut conduire à des phénomènes dits de « *tunnélisation attentionnelle* » où des alarmes visuelles voir auditives sont négligées (DEHAIS/CAUSSE 2011). De façon similaire, des phénomènes dits de « *divagation attentionnelle* » ont été démontrés (BRABOSZCZ/DELORME 2011), et peuvent conduire les opérateurs à n'être pas suffisamment engagés dans leur tâche.

En effet, dans le domaine aéronautique, l'analyse d'événements aériens montre que de nombreux accidents ont eu pour origine une absence de réaction appropriée à des alarmes sonores. Pourtant ces types de signaux sont connus pour leur efficacité à faire réagir les pilotes en situation d'urgence (EDWORTHY 1991). En outre, pour ce qui est de l'intervention humaine dans la boucle de pilotage et de décision des engins dits « sans pilote », sa responsabilité dans les accidents est également élevée, de l'ordre de 21 à 67% (WILLIAMS 2004). L'explication principalement avancée est que l'interaction avec ces engins, opérés dans un contexte très dynamique et incertain, induit une charge attentionnelle excessive pour leur pilote (CHEN 2007, CUMMINGS 2007, RUFF 2002)

Aussi de nombreux travaux de recherche se sont portés sur l'assistance à l'opérateur en visant à contrôler sa charge attentionnelle à travers les concepts d'initiative mixte (i.e. la coopération homme machine est optimisée selon des critères de disponibilité et de compétence de chaque « agent » humain et artificiels) et d'interfaces adaptatives (l'interface trie et présente dans le champ visuel de l'opérateur humain les informations critiques) (DEHAIS/CAUSSE 2011). Néanmoins le principal problème de ces études est de réussir à fournir une aide appropriée au moment opportun (VISSER 2011). En effet le déclenchement inopiné de l'aide peut se révéler tout aussi délétère pour l'opérateur humain que l'absence de son déclenchement lorsque celui-ci est nécessaire (PARASURAMAN 1997, HANCOCK 1997).

Dès lors un enjeu est disposer d'une mesure précise de la charge attentionnelle pour envisager une intervention pertinente des systèmes d'aides (HANCOCK 1995 et 1997, PARASURAMAN 1997, 2007 et 2008). Une première tentative pourrait être de faire l'hypothèse que la charge attentionnelle est proportionnelle à la charge de travail (ex : nombre de drones à superviser, ou difficulté de pilotage) (POPE 1995, KRAMER 1995, CANNON 2010, MILLER 2011) Or il apparaît rapidement que la charge attentionnelle ne peut pas être estimée avec précision à partir des seules propriétés de la tâche, car les facteurs individuels tels que l'expertise (AYAZ/SHEWOKIS 2011) et les facteurs environnementaux (par exemple, le moment de la journée) auront un impact sur l'effort mental (PARASURAMAN 2007). Une approche alternative est d'adopter une démarche de *neuroergonomie* (PARASURAMAN 2007-2008) en réalisant directement des mesures de l'activité cognitive d'un opérateur en situation de travail à l'aide de moyens *d'imagerie cérébrale*.

Cette approche permet non seulement de mieux comprendre les effets de la charge attentionnelle sur la performance des opérateurs mais aussi de les mesurer en temps réel. Ainsi des études récentes en électrophysiologie en situation de pilotage semblent confirmer que l'augmentation de la charge attentionnelle peut se traduire par un mécanisme de sélectivité qui favorise les informations visuelles au détriment d'information sonores (SINGHAL 2002). Ce type de mesure cérébrale se révèle également très prometteur pour étudier la dynamique neuronale des processus attentionnels en appliquant des techniques statistiques avancées à ces signaux électro-encéphalographiques (BRABOSZCZ/DELORME 2011). Dans cette perspective, des auteurs avancent que *l'imagerie cérébrale par spectroscopie en proche infrarouge* serait également adaptée pour inférer le niveau de charge attentionnelle visuelle (TAKAHASHI 2000) des pilotes d'avion (TAKEUCHI 2000) des opérateurs de drones (MENDA 2011) ou des contrôleurs aériens (AYAZ/WILLEMS 2011). Aussi cette technique semble-t-elle particulièrement adaptée pour les études en ergonomie : elle est **portable**, son signal est utilisable en **temps réel** et il peut permettre de distinguer différentes activités cognitives (par exemple, attention vs. mémoire de travail). De plus, des études comparatives ont montré que les activations cérébrales frontales mesurées à l'aide de cette technique sont similaires à celles observées qui peuvent être observées en IRM fonctionnelle (AYAZ/SHEWOKIS 2011).

II/DEFINITION DE LA CHARGE ATTENTIONNELLE

Le concept de charge attentionnelle est complexe, et sa définition ne fait pas encore à ce jour l'objet d'un consensus.

Dans de nombreuses théories (KAHNEMAN 1973, POSNER 1978), l'accent est mis sur le concept de **capacité de traitement limitée** du cerveau. De cette capacité de traitement limitée sont extraites des **ressources**, disponibles pour le traitement d'une tâche en particulier.

Dans certaines théories (O'DONNELL/EGGEMEIER 1986), aucune distinction n'est faite entre « capacité » et « ressources », ce qui laisserait supposer qu'à tout instant le cerveau disposerait de la totalité de sa capacité pour traiter une tâche. Dans d'autres études (KAHNEMAN 1973), une distinction est proposée: le terme de **capacité** se rapporte à une limite haute des capacités de traitement du cerveau, alors que le terme de **ressources** se rapporte à l'effort mental mis en œuvre pour mener à bien le traitement. En particulier, une mobilisation croissante des ressources attentionnelles définirait donc un état de **charge attentionnelle** supérieur.

On parle aussi souvent de **charge mentale**, représentant non seulement les ressources attentionnelles mais également les ressources purement exécutives. Le lien entre charge attentionnelle et charge mentale est très étroit, et la distinction difficile.

Il existe un **lien** direct entre la charge mentale, la capacité attentionnelle et la performance (YOUNG/STANTON 2001), ainsi que le montre la figure 1, présentée en page suivante.

De cette manière, une optimisation de l'allocation des ressources mentales permettrait de réduire les erreurs humaines, mais aussi d'augmenter la performance et la satisfaction de l'opérateur (MORAY 1988).

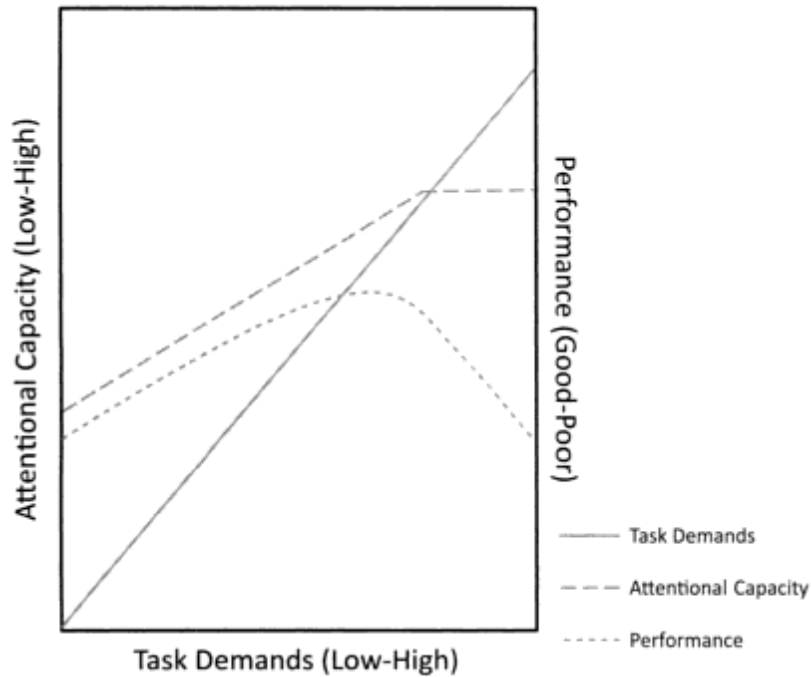


Figure 1 représentation des liens entre demande de la tâche (liée à la charge mentale), performance et capacité attentionnelle (YOUNG/STANTON 2001)

III/LES MESURES SUBJECTIVES DE CHARGE ATTENTIONNELLE

Le moyen le plus communément utilisé pour évaluer la charge attentionnelle est de demander à l'opérateur, après coup, de décrire son ressenti vis-à-vis de la tâche qu'il vient d'effectuer. Cette méthode est l'*évaluation subjective* de la charge attentionnelle.

Trois méthodes sont principalement utilisées pour cette évaluation subjective : la Subjective Workload Assessment Technique ou **SWAT** (POTTER/BRESSLER 1989), le **Workload Profile**, ou encore le NASA Task Load Index ou **NASA TLX** (HART/STAVELAND 1988).

Cette dernière technique nous intéresse particulièrement, par sa facilité de mise en œuvre. De plus, il s'agit d'une mesure relativement standardisée dans le domaine des facteurs humains en aéronautique. Son principe repose sur une évaluation subjective selon 6 critères : la demande mentale, la demande physique, la demande temporelle, la performance, l'effort et la frustration (voir ANNEXE 1). Ces six paramètres sont ensuite agrégés de manière à estimer le niveau de charge. Ces outils de mesure de charge mentale restent les plus précis (CHEN 2011).

Toutefois, l'impossibilité d'utiliser ces mesures en temps réel rend impossible leur utilisation dans une interface adaptative. En outre, de par leur design (POTTER/BRESSLER 1989, HART/STAVELAND 1988), les données subjectives ne reflètent pas directement la charge attentionnelle, mais plutôt la charge mentale, plus globale.

Un intérêt de ces mesures subjectives est de permettre de réaliser des corrélations avec des mesures dites « objectives », telles que les performances comportementales et les mesures psychophysologiques. Ces dernières mesures complémentaires présentent également l'intérêt d'estimer la charge attentionnelle en temps réel (GIROUARD 2009, HIRSHFIELD 2011, SOLOVEY 2011).

IV/LES MESURES OBJECTIVES DE CHARGE ATTENTIONNELLE : APPROCHE COMPORTEMENTALE

1 La mesure comportementale

La mesure de la performance d'une tâche pour la relier à la charge attentionnelle est un moyen couramment utilisé (e.g. CUMMINGS 2008, YOUNG/STANTON 2001).

Le principal problème lié à cette mesure est la difficulté d'interprétation : comme on peut le voir sur la figure 1 (cf. partie « définition de la mesure de charge attentionnelle »), une baisse de performance peut être associée à la fois à une baisse de charge attentionnelle, mais aussi à une hausse de celle-ci. Pour cette raison, la mesure par la performance à une tâche secondaire est souvent préférée.

2 La mesure par une performance à une tâche secondaire

Une méthode alternative pour l'évaluation de la charge attentionnelle est de mesurer la performance à une tâche secondaire (e.g. BRUNKEN/PLASS 2004, KABER/RILEY 1999, KABER 2007). Le sujet doit effectuer, en même temps que la tâche qui lui est donnée, une seconde tâche. La mesure de la performance à cette seconde tâche est ensuite reliée à la charge attentionnelle.

En particulier, une tâche **d'estimation temporelle** fait souvent office de seconde tâche, où les personnes doivent reconnaître la durée d'un signal (par exemple un son)

Il existe deux paradigmes du jugement temporel (cf. ZAKAY/BLOCK 1997) :

-le paradigme du **jugement prospectif**, dans lequel une partie des ressources cognitives du sujet est attribuée à la perception du temps qui s'écoule.

-le paradigme du **jugement rétrospectif**, dans lequel aucune ressource cognitive n'est réservée à la perception du temps. Le sujet détermine donc après coup, en considérant la tâche effectuée, la durée qui s'est écoulée.

Dans les deux cas, de nombreux auteurs démontrent que la perception du temps est affectée par la charge attentionnelle (ZAKAY 1998, BLOCK 2010).

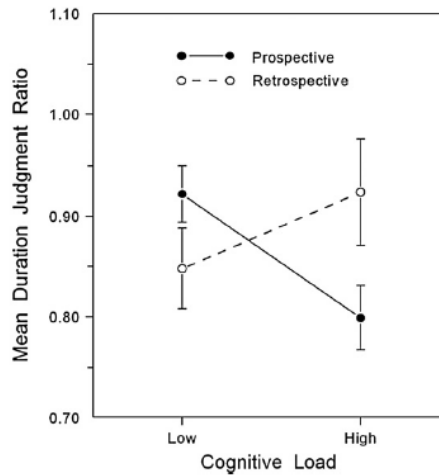


Figure 2 Effet de la charge attentionnelle sur la perception temporelle dans les paradigmes prospectif et rétrospectif (ZAKAY 1998)

En particulier, dans le cadre du **jugement prospectif**, une augmentation de charge attentionnelle donne une sensation « d'accélération du temps » (et affecte donc le jugement temporel de manière positive).

Si on demande à une personne de reconnaître une durée donnée, on « force » son jugement prospectif à s'exprimer (elle devra allouer des ressources cognitives à la perception du temps qui passe pour reconnaître effectivement la durée). On s'attend alors, d'après ce qui a été dit plus haut, à une élongation de ses estimations avec la charge attentionnelle.

Un autre type de tâche parfois utilisé est une tâche de mémoire (AYAZ/SHEWOKIS 2011). Le paramètre de la **mémoire de travail** est étudié à travers **une tâche de N-back** : Les participants voient défiler des stimuli visuels (lettres de l'alphabet). Un niveau de N-back **N** est défini : les participants doivent signaler (en appuyant sur un bouton) chaque fois qu'un stimulus est identique à celui qui leur a été présenté **N** images avant. En pratique, cela revient, pour l'utilisateur, à constamment garder en mémoire **N** items (ce qui a un impact positif sur le niveau de charge attentionnelle, mais peut amener un désengagement de la tâche si le paramètre **N** est trop élevé). La performance à ce type de tâche est aussi un bon indicateur du niveau de charge attentionnelle, puisque son exécution nécessite également des ressources attentionnelles (pour l'identification des stimuli).

Ces mesures, en plus de l'avantage d'être objectives (puisque'elles ne relèvent pas d'une évaluation consciente de la part de l'opérateur de son niveau de charge attentionnelle), ne nécessitent aucun capteur particulier (contrairement aux mesures physiologiques dont nous parlerons plus tard). Toutefois, elles présentent un caractère intrusif, puisqu'elles nécessitent l'exécution d'une seconde tâche (ce qui nécessite plus de ressources attentionnelles).

V/LES MESURES OBJECTIVES DE CHARGE ATTENTIONNELLE : APPROCHE PSYCHO- PHYSIOLOGIQUE

Le niveau de charge attentionnel peut être établi à partir de la mesure objective de l'activité du système nerveux autonome (SNA) et du système nerveux central (SNC). De nombreux capteurs psycho-physiologiques sont utilisés pour réaliser de telles mesures.

1 Les effets de la charge attentionnelle sur le système nerveux autonome

Le **système nerveux autonome** est la partie du système nerveux intervenant dans les fonctions automatiques (non soumises au contrôle volontaire). Egalement appelé système nerveux végétatif, il est constitué de nerfs qui interviennent dans la régulation des fonctions vitales internes. Ils contribuent à l'équilibre de notre milieu intérieur en coordonnant des activités comme la digestion, la respiration, la circulation sanguine, l'excrétion ou la sécrétion d'hormones.

Il est structuré en deux systèmes antagonistes : le **système sympathique** et le **système parasympathique**. Ces deux systèmes exercent un contrôle sur les organes.

Le système sympathique est dit **ergotrope** : c'est lui qui intervient de manière importante en période de stress et de forte activité, et est associé à la mobilisation de l'énergie (augmentation de la sudation, du rythme cardiaque, dilatation des pupilles...)

Le système parasympathique est dit **trophotrope** : très actifs dans les phases de repos, il économise l'énergie et assure le fonctionnement « normal » des organes.

Il apparaît alors qu'une variation de charge attentionnelle aura des effets sur le fonctionnement des systèmes nerveux parasympathique et sympathique, entraînant ainsi des modifications physiologiques caractéristiques. Cet argument va dans le sens d'une utilisation de mesures physiologiques et comportementales comme prédicteur de la charge attentionnelle (e.g. CAUSSE 2010, CANNON 2010, JOHN 2004).

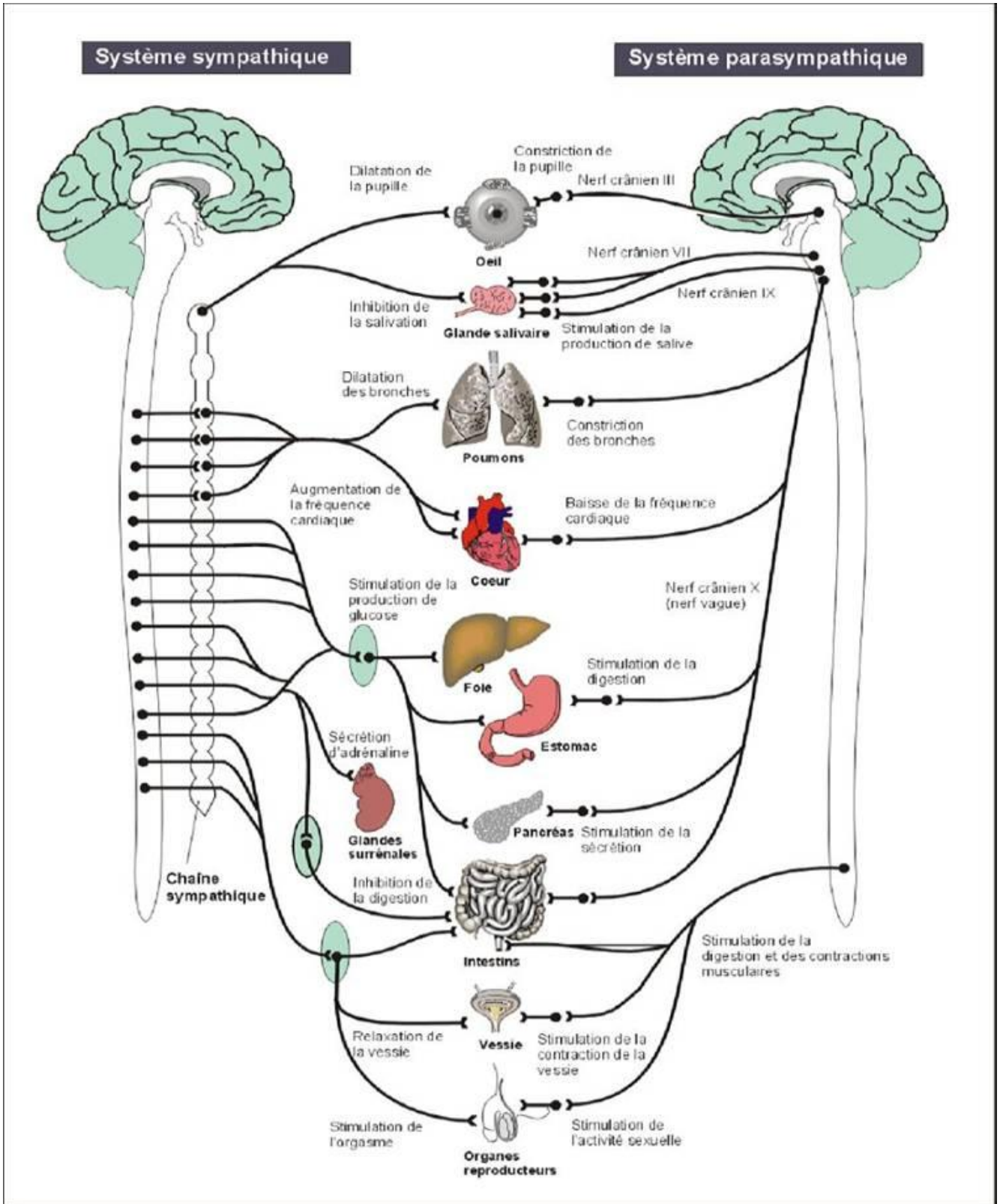


Figure 3 Effets de l'action sympathique et parasympathique sur les organes

2 La mesure du rythme cardiaque

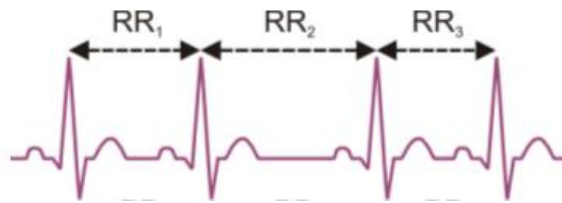


Figure 4 Exemple de réponse d'un électrocardiogramme (ECG), sur lequel sont marqués les écarts interbattements.

L'activité du système nerveux autonome peut être dérivée de la mesure du **rythme cardiaque** à l'aide d'un électrocardiogramme. Ce dernier représente le potentiel électrique qui commande l'activité musculaire du cœur. Ce potentiel est récupéré par des électrodes placées à la surface de la peau.

Lors du fonctionnement normal de l'électrocardiogramme, on observe un intervalle interbattements (ou IBI) qui varie au cours du temps. Cette variation naturelle est appelée **variabilité du rythme cardiaque** (Heart Rate Variability, ou **HRV**)

On obtient le rythme cardiaque (HR, en *battements/seconde*) à partir de l'Inter-Beat Interval (IBI, en *secondes*), correspondant à l'écart temporel entre deux battements (cf. Figure 4) :

$$IBI = \frac{1}{HR}$$

La variabilité du rythme cardiaque, elle, s'obtient en appliquant une transformée de Fourier à la série des intervalles interbattements, qui permet donc d'exprimer la quantité de variations pour plusieurs bandes de fréquences.

- **ULF** (Ultra Low Frequency) : La bande de fréquence ultra faible (<0.003 Hz) correspond à une variation très lente du rythme cardiaque. Ces variations sont principalement dues au rythme circadien et à l'alternance jour/nuit.
- **VLF** (Very Low Frequency) : La bande de fréquence très faible (de 0.003 Hz à 0.04 Hz) correspond à une variation relativement lente du rythme cardiaque, correspondant probablement à l'activité physique.
- **LF** (Low Frequency) : La bande de fréquence faible (de 0.04 Hz à 0.15Hz) correspond à l'activité du **système nerveux sympathique** (intervenant en particulier dans les activités involontaires des organes, mises en jeu en situation de stress, par exemple)
- **HF** (High Frequency) : La bande de fréquence haute (de 0.15Hz à 0.4Hz) correspond à l'activité du **système nerveux parasympathique** (intervenant en particulier dans la régulation inconsciente du fonctionnement du corps) ainsi qu'à l'activité respiratoire.

Le rythme cardiaque, ainsi que la variabilité de ce rythme, sont de bons indicateurs de la charge mentale. Un rythme cardiaque plus ou moins élevé permet de distinguer différents niveaux de charge mentale (HAAPALAINEN 2010). En outre, lorsque la charge mentale augmente, la variabilité du rythme cardiaque diminue (MULDER 1988).

L'avantage de l'utilisation d'une mesure du rythme cardiaque est son caractère pratique à mettre en place et peu invasif.

3 La mesure de la conductance électrodermale (Galvanic Skin Response)

On mesure souvent la **conductance électrodermale**, ou Galvanic Skin Response, pour l'utiliser comme indicateur de la charge mentale. Celle-ci reflète une activité électrique enregistrée par des électrodes à la surface de la peau. Cette activité est liée à la moiteur de la peau, et donc à l'activité des glandes de sudation, contrôlées par le **systeme nerveux autonome**.

Ces mesures, faciles à mettre en place (usuellement il s'agit de deux électrodes placées contre l'index et le majeur de la main du sujet), présentent le désavantage d'être cumulatives (lorsque la peau devient moite, ce changement est durable). Pour prendre en compte ceci, les techniques de mesure GSR étudient en général l'impact d'un événement donné (apparition d'un stimulus, par exemple) sur le signal, comme décrit dans l'exemple de la figure 5.

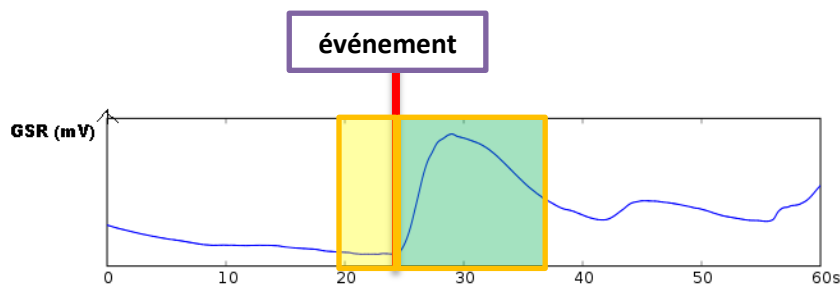


Figure 5 Exemple de mesure GSR : on calcule la différence de potentiel créée suite à un événement : pour cela on moyenne le signal sur une durée donnée (en général 2 sec) avant l'événement d'intérêt, et on la compare avec la moyenne du signal après l'événement (généralement calculée sur 5 secondes). On a alors une idée de l'impact de l'événement sur la conductance électrodermale

De même que le rythme cardiaque, la conductance électrodermale augmente notablement avec la charge mentale (MEHLER 2012)

4 L'oculométrie

Les données oculométriques sont mesurées par un Eye Tracker. Ce dernier, pouvant être fixe (posé sur un support), ou directement attaché sur la tête du sujet (auquel cas on le qualifie d'Eye Tracker « à tête portée »), est constituée de capteurs (infrarouges, le plus souvent) qui mesurent l'activité oculaire.

Les augmentations de charge de travail s'accompagnent de :

- une augmentation de la vitesse de clignement (TSAI 2005)
- une diminution de la durée des fixations oculaires (DE RIVECOURT 2008)
- une variation du diamètre pupillaire et de la vergence horizontale (TSAI 2005), qui sont toutefois probablement liées plutôt au stress qu'à la charge mentale.

L'Eye Tracker est un outil simple d'utilisation et précis, qui a déjà fait ses preuves dans le domaine des interfaces homme-machine (dans le domaine médical en particulier).



Figure 6 : Vue de l'Eye Tracker SMI RED250, utilisé dans les expériences du CAS (source: smivision.com)

VI/ LES MESURES OBJECTIVES DE CHARGE ATTENTIONNELLE : APPROCHE NEUROPHYSIOLOGIQUE

1 Les effets de la charge attentionnelle sur le système nerveux central

Le **système nerveux central** se compose, chez l'homme, de l'encéphale, de la moelle épinière et du nerf optique. Les modifications du fonctionnement de ce système qui nous intéressent ici sont celles qui sont explorables par **l'imagerie cérébrale**, à savoir les modifications du fonctionnement du **cortex cérébral**.

Au sein du cortex cérébral, les **neurones** assurent la transmission d'un signal bioélectrique (appelé **influx nerveux**). Ce signal traduit donc une activité cognitive plus ou moins intense.

On adopte généralement, pour séparer les différentes zones d'intérêt du cortex cérébral, la classification des **Aires de Brodmann** (BRODMANN 1909). Cette classification découpe le cortex en 52 aires, chacune étant associée à une fonction particulière. Deux aires en particulier nous intéressent, puisqu'elles sont situées à l'endroit où la NIRS sera appliquée, sur le cortex préfrontal : les aires 9 et 10.

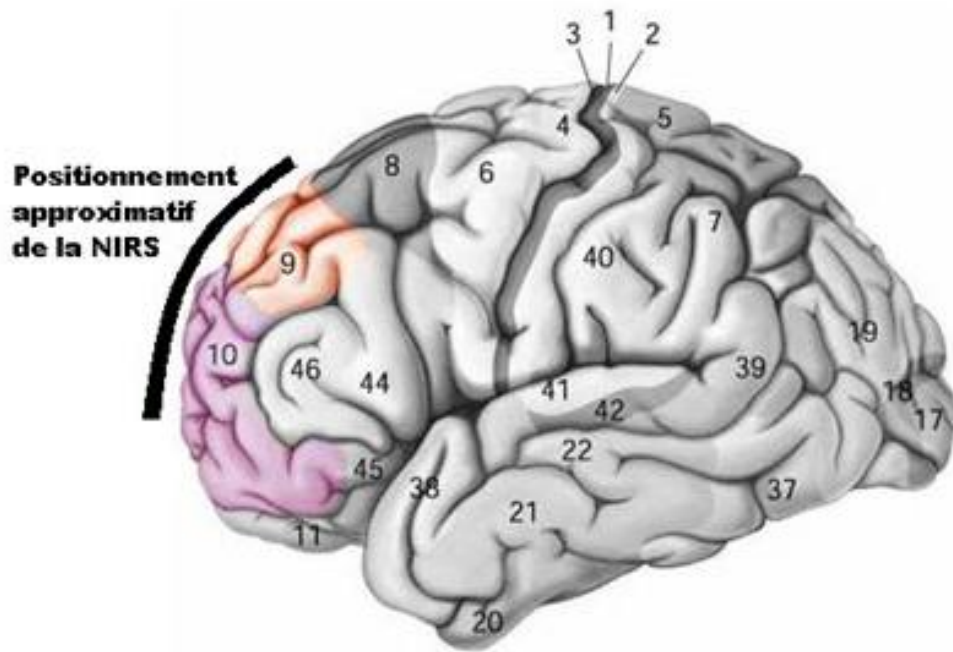


Figure 7 Localisation des aires 9 et 10 de Brodmann

L'aire 9 de Brodmann, correspondant au cortex préfrontal dorso-latéral, est impliquée dans la planification, la mémoire de travail, la régulation de l'action et des fonctions intellectuelles supérieures.

L'aire 10 de Brodmann, correspondant à la région frontale polaire du lobe préfrontal antérieur, est impliquée dans les fonctions exécutives (le contrôle et l'action des fonctions mentales) et joue également un rôle dans la récupération dans la mémoire.

L'activation des différentes zones du cerveau permet donc de mettre en évidence l'appel à des fonctions cognitives précises, avec plus ou moins d'intensités. Cet argument va dans le sens d'une utilisation des mesures neurophysiologiques comme prédicteur de la charge attentionnelle (e.g. ANTONENKO 2010, CANNON 2010, BUNCE 2011).

2 La mesure par électroencéphalographie

L'activité corticale mesurée par électroencéphalographie est utilisée comme prédicteur de la charge mentale.

Des électrodes placées sur le cuir chevelu permettent de mesurer l'activité électrique du cerveau. Lorsqu'ils fonctionnent, les neurones ont une activité électrique qui génère des potentiels électriques qui peuvent être captés par les électrodes à proximité. Chaque électrode somme alors les potentiels récupérés, et on obtient un signal caractéristique de l'activité neurophysiologique locale.



Figure 8 Casque d'électroencéphalographie

L'augmentation de la charge mentale se traduit par (ANTONENKO 2010):

-un blocage des **ondes alpha** (dans la bande de fréquence 8-13Hz), dans les aires pariétales du cerveau plus particulièrement (sur l'arrière du crâne). Les ondes alpha étant caractéristiques de l'état de relaxation, leur blocage est cohérent avec l'augmentation de la charge mentale.

-une augmentation des **ondes thêta** (dans la bande de fréquence 4-7Hz), dans les aires frontales en particulier.

Le principal avantage d'une mesure par électroencéphalographie est son excellente résolution temporelle. Toutefois, sa résolution spatiale est quant à elle beaucoup moins bonne, et les problèmes liés à la qualité du signal récupéré est une limite pour mesurer l'activité d'un opérateur en situation « écologique » (il faut habituellement sommer le signal mesuré sur plusieurs sujets, ce qui rend difficile l'exploitation en temps réel)

3 La Spectroscopie en Proche Infrarouge (NIRS)

La spectroscopie en proche infrarouge (NIRS) est une technique de mesure de l'activité cérébrale relativement récente (BARBOUR 1992). Toutefois, sa facilité d'utilisation, son caractère non invasif, et les résultats qu'elle apporte (proches de ceux que l'on pourrait obtenir en IRM), en font un outil prometteur. **L'imagerie par spectroscopie en proche infrarouge** mesure le volume sanguin et l'oxygénation du cerveau.

3.1 Principe de la mesure

3.1.1 Aspect physiologique

Le système nerveux central (constitué de l'encéphale, de la moelle épinière et des nerfs optiques) n'est pas uniquement le siège des neurones. De nombreuses cellules, nommées **cellules**

gliales, constituent l'environnement des neurones. Elles veillent au bon fonctionnement de ces derniers, et participent à la protection du tissu nerveux.



Figure 9 Les astrocytes de type I entourant les capillaires sanguins (vue d'artiste - source : wikipedia)

Parmi les **cellules gliales**, celles qui nous intéressent ici sont les **astrocytes de type I**. Ces cellules, devant leur nom à leur forme étoilée, construisent une barrière entre la circulation sanguine et le système nerveux central (SNC). Cette barrière physiologique, nécessaire à la régulation du milieu dans le cerveau, est appelée **barrière hémato-encéphalique**.

Mais l'action des astrocytes ne consiste pas seulement à maintenir l'homéostasie de la barrière hémato-encéphalique. Ces dernières jouent en rôle essentiel dans la régulation de l'activité neuronale, et dans l'approvisionnement des neurones en énergie.

Lors de leur fonctionnement, les neurones libèrent des **neurotransmetteurs**. Ces neurotransmetteurs permettent l'action d'un neurone sur un autre au niveau des **synapses**, par exemple avec un rôle excitateur (on parle alors de **neurotransmetteur excitateur**). Le glutamate est le neurotransmetteur excitateur le plus répandu du système nerveux central. Il serait le médiateur de près de 50% des neurones dans le système nerveux central (LANDRY/GIES 2009).

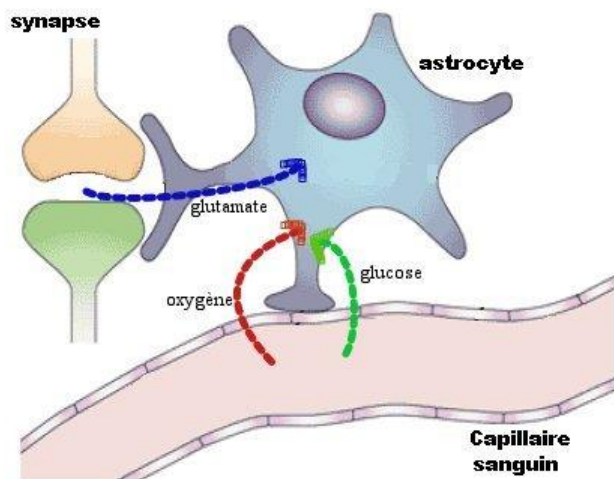


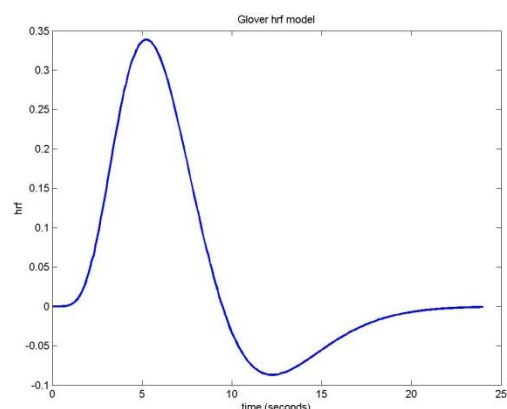
Figure 10 Schéma d'un astrocyte de type I et de son action dans l'alimentation en nutriments des neurones

Le glutamate libéré au niveau des synapses est partiellement capté par les astrocytes de type I. Au sein de l'astrocyte, le glutamate stimule la capture de **glucose** (puisque le glutamate reflète l'activité neuronale, il exprime un besoin d'énergie, et donc de glucose). Le glucose est capturé au niveau de la liaison entre les capillaires sanguins et l'astrocyte, et son métabolisme (dans l'astrocyte), nécessite également la consommation de **dioxygène**. Ce dernier est donc également capté depuis les capillaires sanguins.

Ainsi, l'activité neuronale se traduira, localement, par une capture d'oxygène dans les capillaires sanguins, et donc par une désoxygénation de l'hémoglobine.

Pour subvenir aux besoins exprimés localement, l'organisme répond par un mécanisme physiologique de **Réponse hémodynamique** : la **perfusion cérébrale**. Avec un délai de quelques secondes, le débit sanguin dans la zone va donc augmenter.

Figure 11 Réponse hémodynamique perçue sur un signal BOLD (Bold Oxygen Level Dependent), le signal qui reflète les niveaux d'oxygénation dans le sang, dans la technique fMRI (Imagerie par résonance magnétique)



Généralement, on modélise la réponse hémodynamique par une différence entre deux fonctions de densité de loi Gamma (GLOVER 1999), avec un pic positif à environ 5 ou 6 secondes (la réponse hémodynamique est différente d'un individu à un autre). Ainsi, environ 5 à 6 secondes après l'activation des neurones, l'oxygénation de l'hémoglobine atteindra localement un maximum.

Par voie de conséquence, mesurer l'oxygénation localement permet de déduire quelles sont les zones qui ont été activées (avec un délai de quelques secondes). La concentration en hémoglobine oxygénée constitue donc un corrélat de l'activité cérébrale locale.

3.1.2 Aspect technique

Un appareil de mesure par spectroscopie en proche infrarouge est constitué de deux éléments principaux, disposés dans un même plan : une série de **sources** (*émetteurs*) et une série de **photodétecteurs** (*capteurs*). La combinaison d'un photorécepteur avec une source proche permet de définir un point de mesure, qu'on appellera **voxel**, par analogie avec l'IRM (*voxel* est la contraction de *volumetric element*. C'est l'équivalent d'un pixel en trois dimensions)

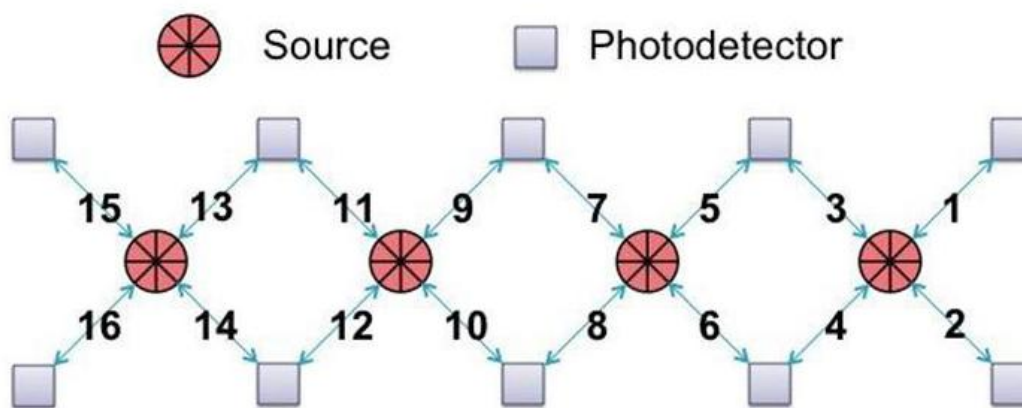


Figure 12 Disposition des sources et photodétecteurs sur la Biopac fNIR100

Selon la disposition des émetteurs et des capteurs, le nombre total de voxels peut varier. Les appareils les plus courants comptent 16 à 24 voxels. L'appareil utilisé au CAS, la *Biopac fNIR100*, dispose de 4 émetteurs et 10 capteurs, si bien que 16 voxels sont disponibles (cf. Figure 12).

Les composants sont plaqués contre la peau du sujet.

Les sources lumineuses émettent un signal sur deux longueurs d'ondes distinctes, dans le proche infrarouge. Dans le cas de la NIRS Biopac, utilisée durant l'expérience, les longueurs d'ondes utilisées sont 730nm et 850nm.

En traversant les tissus, la lumière émise subit deux interactions : la **dispersion** (due aux membranes cellulaires, qui n'est pas prise en compte ici), mais surtout l'**absorption** (par l'hémoglobine oxygénée, l'hémoglobine désoxygénée et l'eau)

La Figure 13 (page suivante) donne les coefficients d'absorption de ces trois espèces en fonction de la longueur d'onde. On comprend alors le choix des longueurs d'onde 730nm et 850nm, qui sont associées à une absorption d'un niveau correct par l'hémoglobine (oxygénée ou désoxygénée), et une absorption très faible par l'eau.

L'intensité lumineuse récupérée au niveau du capteur est obtenue par application de la loi de Beer-Lambert :

$$I_{out} = I_{in} 10^{-\epsilon_{HbO_2} C_{HbO_2} + \epsilon_{Hb} C_{Hb}} L$$

Où :

- ϵ_{HbO_2} et ϵ_{Hb} sont les **coefficients d'extinction molaire** (en $L \cdot mol^{-1} \cdot cm^{-1}$) de l'hémoglobine oxygénée (ou, respectivement, desoxygénée), dépendant de la nature chimique de l'entité et de la longueur d'onde (ici, ce sont donc des constantes, si on considère les équations pour chacune des deux longueurs d'onde d'intérêt)
- C_{HbO_2} et C_{Hb} sont les concentrations du milieu traversé en hémoglobine oxygénée et desoxygénée (en $mol \cdot L^{-1}$)
- I_{in} et I_{out} sont respectivement les intensités lumineuses émise par la source et captée au niveau du photodétecteur.
- L est la longueur du trajet optique parcouru (en cm)

L'application de la loi de Beer-Lambert aux deux longueurs d'ondes caractéristiques de l'appareil (730nm et 850nm) nous permet donc de déterminer les concentrations en hémoglobine oxygénée et desoxygénée, sur chacun des voxels.

En pratique, le signal brut (intensités lumineuses mesurées) est envoyé vers le logiciel de traitement **COBI Studio**. C'est ce logiciel qui calcule en temps réel les concentrations en hémoglobine oxygénée et desoxygénée. Pour cela, une phase de 10 secondes sert de référence (ou **baseline**) : le logiciel mesure pendant 10 secondes le signal lumineux

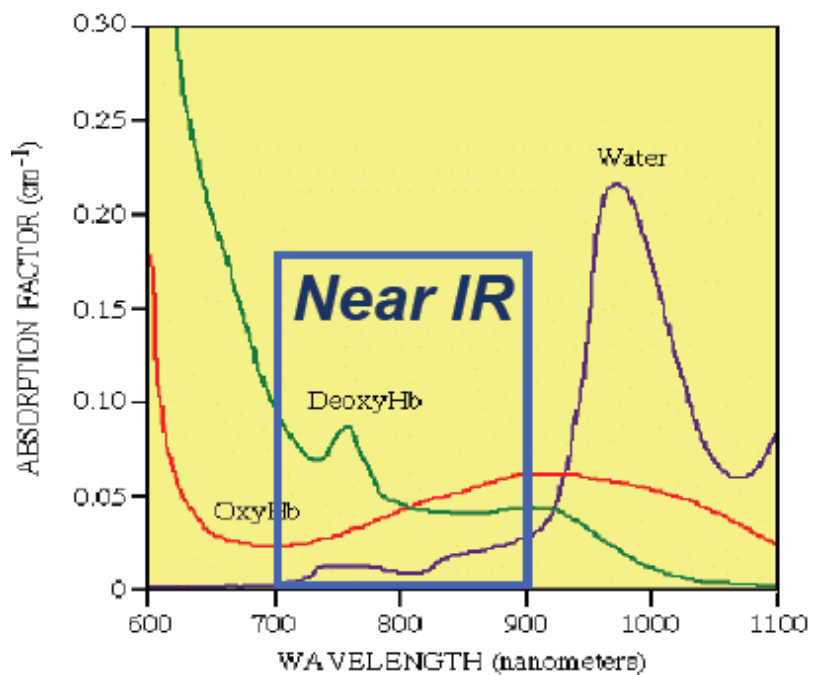


Figure 13 Coefficients d'absorption de l'hémoglobine oxygénée, desoxygénée et de l'eau en fonction de la longueur d'onde (Source : Biopac)

récupéré au niveau des capteurs pour les deux longueurs d'onde. Ce niveau de signal est alors pris comme référence (et les concentrations calculées à partir de ce niveau de luminosité sont marquées comme nulles). Toutes les mesures prises après la baseline ne donneront donc pas des concentrations absolues, mais plutôt des **variations de concentration** par rapport à la baseline.

3.2 La NIRS comme prédicteur de la charge attentionnelle

La NIRS est un moyen de mesure récent, et encore peu utilisé dans le domaine des interfaces homme-machine. Toutefois, elle a déjà apporté des résultats prometteurs en tant que prédicteur de la charge attentionnelle. Elle a été également utilisée pour détecter le niveau de charge attentionnelle visuelle (TAKAHASHI 2000), ou bien encore par exemple pour détecter la multiplicité des tâches cognitives (SOLOVEY 2011) ou la difficulté de la tâche (GIROUARD 2009). Quatre

expériences seront détaillées dans cette partie, pour l'intérêt qu'elles apportent dans la construction de notre manipulation et pour leur proximité avec notre domaine d'application (l'aéronautique).

Dans les expériences présentées ci-après, la NIRS a été placée sur la zone préfrontale, et les variations d'oxygénation ont été mesurées alors que les participants participaient à des expériences mettant en œuvre différents niveaux de charge attentionnelle.

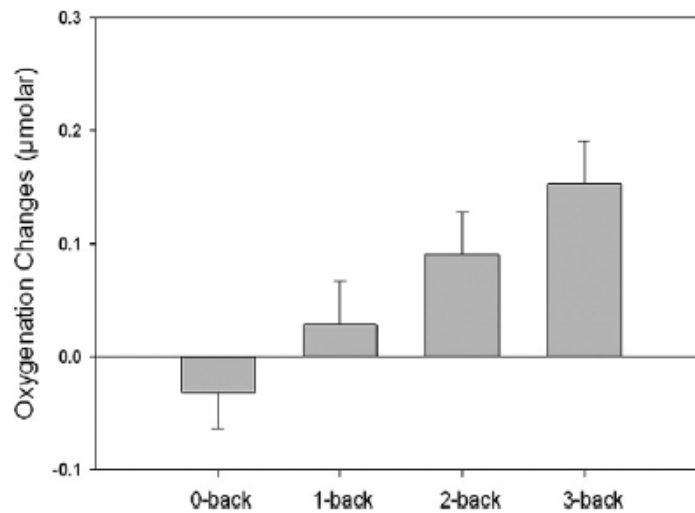


Figure 14 Niveaux d'oxygénation en fonction du niveau de N-back (AYAZ 2011)

Dans son expérience (AYAZ/SHEWOKIS 2011), Ayaz utilise le paramètre de mémoire de travail, étudié à travers une tâche de N-back, pour calibrer un modèle de charge attentionnelle. A cet effet, la NIRS permet de détecter un niveau d'oxygénation croissant avec la difficulté du N-back, impliquant ainsi une augmentation de l'activation des zones préfrontales avec l'augmentation de la tâche de mémoire de travail.

Ces variations sont surtout perceptibles au niveau du voxel 2, où elles atteignent un niveau significatif. Le **voxel 2**, situé dans l'hémisphère gauche du cortex préfrontal, a déjà été associé à la mémoire de travail dans des études menées par des méthodes de tomographie à émission de positrons (SCHREPPPEL 2008, REUTER-LORENZ 2000).

La tâche primaire utilisée dans l'expérience suivante est une **tâche de contrôle aérien** (Air Traffic Control Task). Le participant doit surveiller un certain nombre d'avions simultanément sur l'écran. La charge attentionnelle augmente avec le nombre d'avions à surveiller (AYAZ/WILLEMS 2011, AYAZ/SHEWOKIS 2011), et cette variation est visible avec la NIRS.

L'augmentation de charge attentionnelle (cf figure ci-après) s'accompagne d'une augmentation du niveau d'oxygénation mesuré au niveau du **voxel 8** (cortex fronto-polaire).

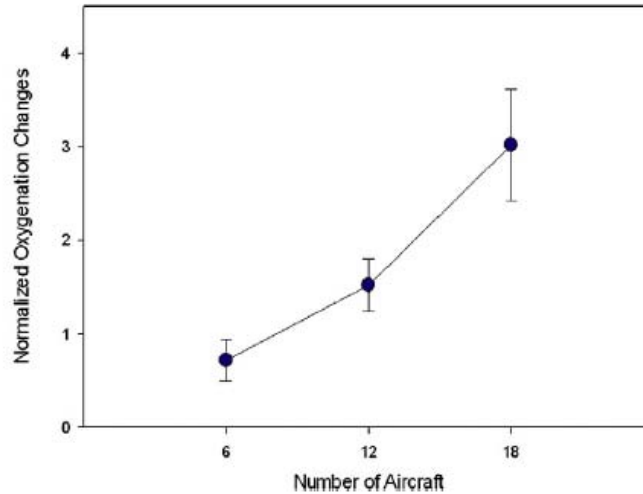


Figure 15 Niveaux d'oxygénation en fonction du nombre d'avions à surveiller durant la tâche de contrôle aérien (AYAZ 2011)

L'augmentation de l'activation de la zone médiane du cortex préfrontal lors de cette tâche de planification et de décision, à mettre en relation avec le rôle du cortex préfrontal latéral dans la mémoire de travail (cf. expérience précédente) est en accord avec des résultats précédents en IRM quant à la dissociation fonctionnelle des aires latérales et médianes du cortex préfrontal (BECHARA 1998, KOECHLIN 2000, SIMONS 2005).

Dans une autre expérience, réalisée en simulateur de vol, Takeuchi (2000) module la charge attentionnelle au cours de l'atterrissage en variant l'intensité du vent de travers que subit l'avion.

La mesure NIRS montre une augmentation du niveau d'oxygénation moyen dans le cortex préfrontal gauche avec la difficulté (cf Figure). Cette prédominance de l'hémisphère gauche est en accord avec des résultats précédemment trouvés (HOSHI 1993, VILLINGER 1997)

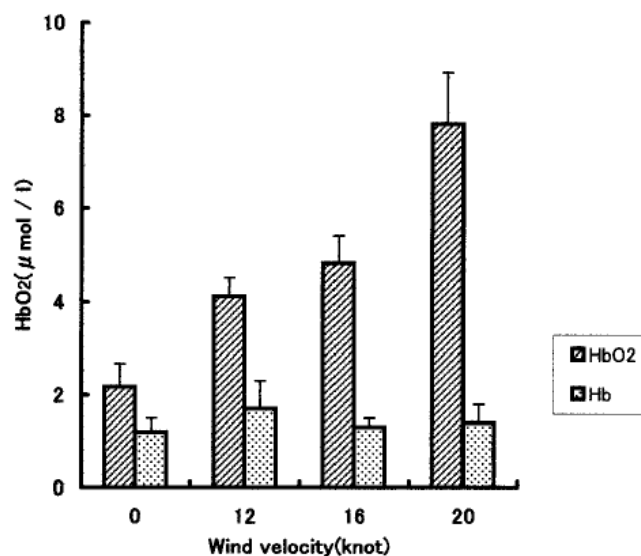


Figure 16 Niveaux moyens d'hémoglobine oxygénée et desoxygénée dans le préfrontal gauche en fonction de la difficulté de pilotage, modulée par la vitesse du vent (TAKEUCHI 2000)

Partie 3 :

Description de l'environnement d'expérimentation

I/DESIGN DE LA TACHE

Le design de la tâche utilisée dans le protocole mené durant ce stage a été principalement proposé par Jean-François Gagnon.

Le développement de la tâche primaire s'inscrit dans l'approche des micromondes, ou « simulations fonctionnelles », qui visent à reproduire les propriétés essentielles et représentatives d'une tâche écologique dans un contexte contrôlé de laboratoire. Autrement dit, on cherche à se rapprocher le plus possible des conditions réellement endurées par le pilote.

La mesure de la charge cognitive des participants est réalisée grâce à une tâche secondaire. Cette tâche secondaire est inspirée du paradigme de production temporelle. Les processus en jeu lors de l'estimation temporelle sont majoritairement des processus attentionnels, ce qui concorde avec les objectifs du projet. La performance à la **tâche secondaire d'estimation temporelle** est affectée à la baisse par un déplacement attentionnel vers la tâche primaire. Plus l'attention du participant sera dirigée vers la tâche primaire, moins elle sera disponible pour la tâche secondaire et, par conséquent, la performance à cette dernière sera diminuée. La performance à la tâche secondaire est donc un indicatif de la quantité d'attention requise pour réaliser la tâche primaire.

Dans la tâche primaire (de pilotage), le participant contrôle la position verticale d'un avion à l'aide d'un joystick. L'avion du sujet est positionné environ au centre de l'écran. A gauche de l'écran, cinq avions cibles se déplacent continuellement sur l'axe horizontal et vertical. Le déplacement est aléatoire à l'intérieur de certaines bornes de façon à ce que leur position soit imprévisible à moyen et long terme pour les sujets.

Chacun de ces avions sauf un est identifiable par le nom d'une couleur inscrite à la place des ailes (soit jaune, rouge, vert et bleu). Le cinquième avion n'est pas associé à une couleur particulière. La tâche du participant consiste à minimiser l'écart entre le centre de son avion et le centre d'un des avions cibles. L'avion cible à suivre est explicité par un indice représenté dans un encadré noir au bas de l'écran. L'indice est indiqué au participant pendant une seconde et demi toutes les 8.6 secondes. Chaque nouvelle présentation d'indice correspond à une nouvelle **phase de suivi**. Au cours d'une phase de suivi, le sujet ne doit suivre qu'un seul avion cible. La performance correspond à la somme de la différence absolue en pixels entre l'avion cible et l'avion du sujet pour l'ensemble des pas de temps de la phase de suivi (soit 215 pas de temps, au vu de la fréquence de rafraîchissement de la page adoptée dans l'implémentation). La présentation de l'indice est inspirée de l'effet Stroop (STROOP 1935) et vise à solliciter davantage de ressources cognitives aux sujets réalisant la tâche. L'indice présenté dans l'encadré est le nom d'une couleur (jaune, rouge, vert et bleu) écrit dans une de ces mêmes quatre couleurs. L'indice est la couleur du texte et non pas le texte en soi. Par exemple, le sujet doit suivre l'avion sur lequel il est inscrit « rouge » dans le cas où la *couleur* de l'indice est rouge et ce même s'il est *écrit* « jaune ». Pour sélectionner le bon avion, le participant doit ainsi gérer le conflit entre la couleur écrite et la couleur du texte, puis il doit « traduire » une

couleur en texte puisque les avions ne sont pas colorés. Pour éviter un traitement en vision périphérique, la couleur de l'indice a été déterminée pour être difficilement discriminable et pour nécessiter une fixation directe. En outre, le placement de l'écran (comme montré sur la figure 17) a été choisi de manière à encourager les saccades oculaires. En plus des quatre couleurs mentionnées plus haut, quatre mots sont présentés dans 20% des cas. Les sujets ont pour consigne de tenir compte de la couleur de l'encre lorsque les mots présentés sont des couleurs (et donc de suivre l'avion de la couleur correspondante), mais de suivre l'avion sans couleur dans le cas où le mot présenté n'est pas une couleur. Cette manipulation force les participants à traiter la sémantique du mot présenté. Pour prendre leur décision, ils doivent nécessairement traiter la sémantique, puis, sur cette base, traiter la couleur de l'encre ou non.



Figure 17 Capture d'écran de l'interface : à gauche, les cibles dynamiques ; au centre, l'avion piloté ; et à droite, les instructions.

On fait varier deux paramètres de manière à « charger » plus ou moins le participant. Le premier paramètre est la **difficulté du pilotage** (un pilotage difficile implique des rafales de vent qui viennent déplacer l'avion aléatoirement, et une inertie de l'avion plus forte). Le second paramètre est un **paramètre de mémoire** : à la manière d'une tâche de N-back, on demande aux participants de garder soit aucune, soit une instruction en mémoire. Ils devront donc en pratique appliquer les instructions qu'ils voient s'afficher soit dès l'apparition de l'instruction (paramètre de mémoire 0), soit uniquement lorsque la prochaine instruction s'affichera (paramètre de mémoire 1)

L'utilisation d'une telle charge nous permet de s'attendre aux niveaux de charge attentionnelle récapitulés dans le tableau présenté en page suivante.

Tableau 1 Niveaux de charge attentionnelle attendus selon les paramètres de la tâche :

		Navigation	
		Facile	Difficile
N back	0-back	+	++
	1-back	++	+++

II/PROGRAMMATION DE LA TACHE

La programmation de la tâche a été faite en **Java**, sous l'environnement de développement **Eclipse**. L'interface graphique a été réalisée en utilisant la bibliothèque graphique de Java : **Swing**.

Le contrôle du joystick a été implémenté en utilisant la bibliothèque *Jystick* de G.Rhoten.

1 Choix techniques

Une session de l'expérience est définie par deux paramètres principaux : la **difficulté du pilotage** (« facile » ou « difficile ») et le **critère de mémoire** (0 ou 1). La durée de la session est déterminée par le **nombre de phases de suivi** (correspondant au nombre d'instructions qui seront envoyées au cours de la session).

La fenêtre graphique (cf. Figure 16) est un rectangle de 1000*1600 pixels. La fréquence de rafraîchissement de l'interface est de 25 Hz (ce qui signifie que l'interface est redessinée toutes les 40ms).

La durée qui s'écoule entre deux instructions affichées (qui correspond donc à la durée d'une phase de suivi) est de 8,6 secondes. L'instruction s'affiche durant 1,6 secondes, puis disparaît.

A chaque instant, la position du joystick ainsi que les paramètres du vent (nuls en cas de pilotage facile, variables aléatoirement en cas de pilotage difficile) définissent une vitesse cible de l'avion :





$$VitesseCible = \text{sgn } Inclinaison_{Joystick} * Inclinaison_{Joystick}^2 + Vent$$

Où **Inclinaison_{Joystick}** est un nombre de -5 à 5, indexant la position du joystick sur son axe vertical, et **Vent** est un entier (valant 0 si le paramètre de pilotage est fixé à « facile », et variable entre 0, -15, -10, 10 et 15 si le paramètre de pilotage est fixé à « difficile »). La Vitesse cible correspond donc à un nombre de pixels de déplacement.

La vitesse de l'avion, recalculée à chaque rafraîchissement, répond à ce critère de Vitesse cible comme un système d'ordre 1 et de constante de temps 5 en pilotage facile, 10 en pilotage difficile (en nombre de rafraîchissements). Cela signifie que si la Vitesse cible ne varie pas (donc si le joystick ne bouge pas, et les paramètres de vent restent constants), alors l'avion atteindra cette vitesse cible au bout d'environ 15 rafraîchissements (30 en pilotage difficile). En pratique, cela revient à considérer qu'en pilotage facile, l'avion répond plus rapidement aux commandes de son pilote.

Pour la présentation des instructions, les couleurs utilisées sont présentées (avec leurs coordonnées dans le domaine RVB) dans le tableau récapitulatif ci-dessous :

Tableau 2 Couleurs utilisées pour la présentation des instructions :

Couleur	Rouge	Bleu	Jaune	Vert
Aperçu				
Code RVB	[255 ; 166 ; 166]	[159 ; 167 ; 255]	[255 ; 251 ; 159]	[166 ; 255 ; 166]

En outre, pour forcer le mouvement de l'œil (et pour éviter que l'identification des avions cibles soit faite en vision périphérique), on a écrit sur les ailes d'avion le nom des couleurs servant à les identifier (plutôt que de peindre l'avion dans ladite couleur).

En ce qui concerne la tâche secondaire d'estimation temporelle, l'alarme sonore se déclenche toutes les 6 à 10 secondes (après extinction de la dernière alarme). Le son envoyé est un « la » continu de fréquence 440Hz. L'utilisateur peut presser la gâchette pour éteindre ce son.

Enfin, de manière à exclure les éventuels moments de divagation des participants (pendant lesquels ils auraient complètement « perdu le fil » des instructions), un bouton du joystick leur est réservé, pour qu'ils appuient dessus en cas de divagation. La date (en temps système) de l'appui sur le bouton est alors enregistrée dans un fichier texte.

A la fin de chaque session, un fichier texte est produit par le programme, écrivant les paramètres expérimentaux (difficulté de pilotage, niveau de mémoire, nombre de phases de suivi), les références du participant (numéro de participant, numéro de session), ainsi que toutes les productions temporelles réalisées par le participant et leur date d'occurrence (en temps système). Sont également écrites dans le fichier les dates (en temps système) du début de chacune des phases de suivi.

Une fois ces choix techniques faits, la rédaction des instructions expérimentales à l'intention des participants ont pu être rédigées (elles sont présentées en annexe 2).

2 Interface de l'expérimentateur

Afin de veiller au bon déroulement de l'expérience tout en évitant de gêner le participant dans l'exécution de la tâche, une interface a été développée pour l'expérimentateur, permettant de contrôler à distance l'enchaînement des sessions.

Cette interface, codée en Java, est présentée en annexe 3.

La communication entre le programme d'interface de l'expérimentateur et le programme de l'expérience est réalisée grâce au **Bus Ivy**, un bus logiciel qui permet d'envoyer des messages texte entre applications. Ce bus a été développé depuis 1996 par le Centre d'études de la navigation aérienne (rattaché à la DGAC). L'avantage de ce bus est de pouvoir créer une application par « briques » concevables et testables indépendamment.

L'interface créée permet de lancer à distance :

- La session d'entraînement à la production temporelle (tâche secondaire seule)
- Les sessions expérimentales (avec tâche primaire et secondaire)

En outre, elle permet de voir s'afficher en temps réel les productions temporelles du participant, ainsi que l'avancement de ce dernier dans la session en cours (sous la forme d'une barre de progression).

Partie 4 :

Expérimentation

Une première étude comportementale a été menée, sans instruments de mesure. Ses résultats sont présentés en annexe 4. L'étude principale, combinant mesures comportementales et psychophysiologicals, est présentée ci-après.

I/MATERIEL ET METHODES

1 Participants

Seize participants ont passé cette étude, parmi lesquels trois femmes et treize hommes, âgés de 21 à 38 ans (25 ans de moyenne, écart type de 4.78 ans). Treize d'entre eux étaient droitiers, et six d'entre eux avaient une expérience du pilotage.

2 Mesures objectives et subjectives

Les participants étaient équipés, pendant les sessions, d'une *NIRS Biopac* (pour la mesure des variations d'oxygénation dans le cortex préfrontal), d'un Eye Tracker *SMI RED250*, d'un électrocardiogramme et de deux électrodes GSR (*Biopac*).

Les électrodes GSR (pour la mesure électrodermale) étaient placées sur les deux phalanges distales de l'index et du majeur gauches du participant. Les électrodes de mesure de l'électrocardiogramme étaient placées en position sous-pectorale droite et gauche. L'électrode de référence de l'électrocardiogramme était placée sur le sternum. L'acquisition des deux signaux (ECG et GSR) était réalisée à l'aide du logiciel *AcqKnowledge*.

L'Eye Tracker était recalibré (à l'aide du logiciel *iViewX*) juste avant chaque session. L'acquisition du signal était réalisée à l'aide du logiciel *iViewX*.

La NIRS était positionnée à l'aide des repères anatomiques conseillés par le fabricant (centre du bandeau dans l'axe du nez, bas du bandeau au dessus des sourcils). Elle était calibrée au début de l'expérience. La calibration et l'acquisition étaient réalisées à l'aide du logiciel *COBI Studio*

Entre chacune des sessions, un questionnaire de type NASA TLX était proposé aux participants, afin d'estimer leur charge mentale au cours de la session réalisée.

3 Matériel

L'écran utilisé pour présenter la tâche aux participants était un écran *DELL 22" TFT*. Le joystick utilisé pour le pilotage de l'avion ainsi que l'extinction des alarmes (tâche secondaire) était un joystick *Logitech X3D*.

4 Protocole

Préalablement à l'expérience, un questionnaire (présenté en annexe 5) était posé aux participants, de manière à prédire les situations qui pourraient influencer sur leur performance à l'une ou l'autre des tâches (consommation de caféine, alcool, tabac, ou troubles neuropsychologiques, pour les effets « négatifs » ; expérience du pilotage ou de la musique pour les effets « positifs »).

Le protocole suivi se composait de 4 sessions (correspondant à la variation des deux paramètres d'étude –la difficulté du pilotage et le niveau de mémoire-) constituées de 40 phases de suivi chacune, **contrebalancées** (l'ordre des sessions d'un participant à l'autre était différent, de manière à ce que chaque type de session se retrouve à chacune des positions autant de fois si on considère l'ensemble des participants). Ainsi, la durée totale d'une session représentait un peu moins de 6 minutes.

Ces sessions étaient précédées d'une session d'entraînement à chacune des deux tâches (primaire et secondaire). L'entraînement à la tâche primaire se composait de dix phases de suivi, pour chacun des niveaux de mémoire, et était réalisé en mode de pilotage facile (il était toutefois précisé que la difficulté du pilotage pourrait être accrue pendant l'expérience). Durant l'entraînement à la tâche secondaire, le participant devait réaliser 110 estimations temporelles avec feedback (trop court, trop long ou correct), face à un écran noir, suivies immédiatement de 20 estimations temporelles sans feedback. Le feedback « correct » était donné pour un écart de $\pm 5\%$ avec le critère (soit pour une production entre 1900 et 2100 ms). Au début de l'entraînement à la tâche secondaire, les participants ne connaissaient pas la valeur du critère temporel cible (2sec). Les instruments de mesures n'étaient mis en place et calibrés qu'une fois cet entraînement terminé.

A la fin de l'expérience, les participants devaient remplir un questionnaire (présenté en annexe 6), qui avait pour but de recueillir leurs impressions sur l'ensemble des sessions, et sur les stratégies qu'ils avaient adopté pour répondre à la tâche qui leur était demandée.

II/RESULTATS COMPORTEMENTAUX

L'exploitation des mesures comportementales, réalisée à l'aide des logiciels Matlab et STATISTICA, visait à démontrer que la tâche choisie pour l'expérience impliquait des niveaux de charge attentionnelle, et donc que les participant subissaient bien une variation de charge attentionnelle au long de l'expérience.

1 Performance à la tâche secondaire

L'**analyse de variance (ANOVA)** est une technique qui permet d'estimer la probabilité d'obtenir les échantillons mesurés, si ces dernières suivaient une même loi normale, quel que soit le type de session. On considère que si cette probabilité (nommée p) est inférieure à 0,05, alors on peut raisonnablement considérer que les échantillons ne suivent pas une même loi normale, et donc qu'il y a un effet significatif du type de session sur les mesures réalisées.

L'ANOVA réalisée sur les productions temporelles des participants à chaque session montre un effet significatif du niveau de mémoire ($p=0.018$) sur ces productions. Il n'y a pas d'effet significatif du pilotage sur la production temporelle.

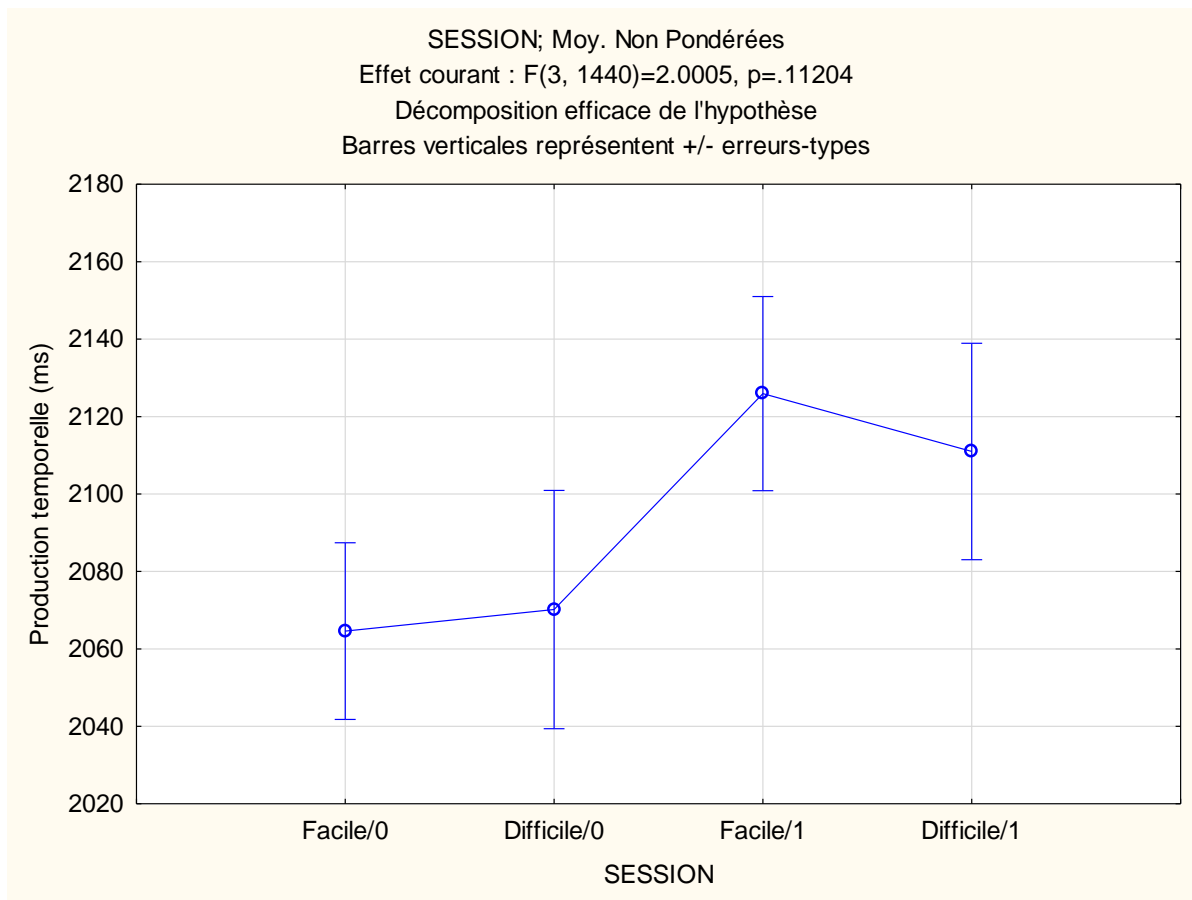


Figure 18 : Productions temporelles réalisées en fonction du type de session

2 Résultats du NASA TLX

L'analyse de variance (ANOVA) révèle un effet significatif du type de session sur le niveau de charge mesuré par le NASA TLX ($p<0.0007$), ainsi que le montre la figure 19 (page suivante).

Elle révèle également un effet significatif du type de session sur les critères de demande mentale ($p<0.0005$), de demande temporelle ($p<0.007$), d'effort ($p<0.02$) et de frustration ($p<0.03$), comme le montre la figure 20 (page suivante)

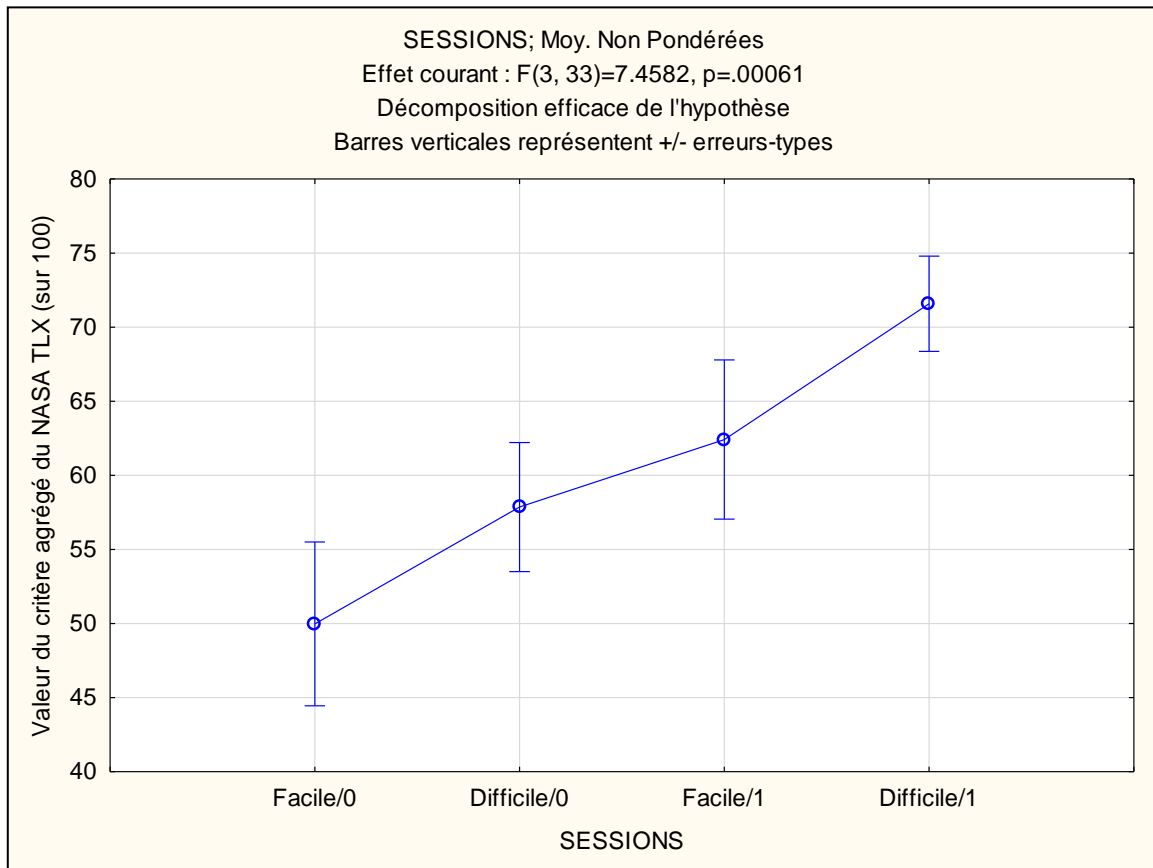


Figure 19 : Effet significatif du type de session sur le NASA TLX

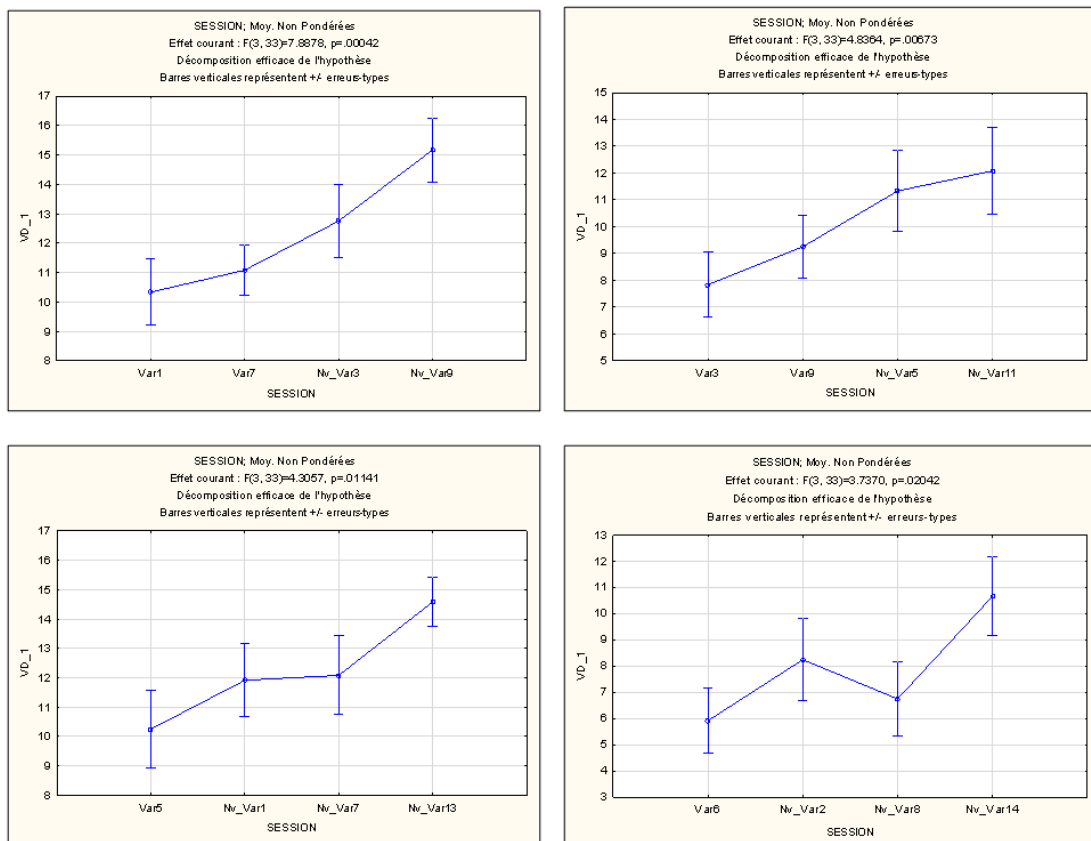


Figure 20 : Effets significatifs du type de session sur quatre critères du NASA TLX (critères, de gauche à droite et de haut en bas : demande mentale, demande temporelle, effort, frustration)

Les deux autres critères (demande physique et performance) ne font état d'aucun effet significatif du type de session.

Les **tests post-hoc de Tukey** (qui permettent de tester quelles sont les paires de groupes pour lesquels les différences sont significatives) réalisés sur le critère global du NASA TLX, montrent que ce critère permet de distinguer de manière significative les deux niveaux de N-back 0 avec le niveau de N-back 1 et de pilotage difficile.

Tableau 3 : Résultats des tests post-hoc de Tukey pour la distinction des types de session avec le critère de charge mentale (critère agrégé du NASA TLX) :

	Facile / 0	Difficile / 0	Facile / 1	Difficile / 1
Facile / 0		0.345989	0.055063	0.000451
Difficile / 0	0.345989		0.764626	0.029255
Facile / 1	0.055063	0.764626		0.223102
Difficile / 1	0.000451	0.029255	0.223102	

En ce qui concerne les autres critères du NASA TLX, les seuls niveaux significatifs apparaissent à la distinction entre le niveau *Pilotage Difficile/N-back 1*, et tous les autres niveaux. Ces effets sont décrits dans le tableau 1 en annexe 7.

III/RESULTATS DES MESURES NIRS

Les mesures NIRS réalisées ont été dans un premier temps centrées et normalisées. Le traitement et l'analyse des données ont été réalisés avec les logiciels Matlab et STATISTICA.

Suite au passage des premiers participants, il a été constaté que le signal infrarouge envoyé par l'Eye Tracker (pour réaliser la mesure) interférait avec le signal NIRS, si bien que ce dernier était inexploitable. Aussi l'arrêt des mesures Eye Tracker a-t-il été décidé pour la suite de l'expérimentation.

A cet effet, les participants dont la mesure NIRS était inexploitable (à cause de l'interférence due à l'Eye Tracker) ont été retirés de l'étude. On considère de plus que chaque voxel évolue de façon indépendante, puisque ces derniers sont associés à une zone précise du cortex préfrontal. Les oxygénations de chacun des voxels seront donc considérées comme des variables indépendantes deux à deux. A cet effet, les tests réalisés ont donc impliqué des tests post-hoc **Least Significant Difference (LSD) de Fisher**. L'avantage de ces tests, qui fonctionnent sur le même principe que les **tests post-hoc de Tukey**, à savoir l'estimation de quelles sont les paires de variables pour lesquels les différences sont significative, est de ne pas considérer les comparaisons entre deux variables qui ne sont pas cohérentes (à savoir, par exemple, la comparaison de deux sessions différentes sur deux voxels différents).

1 Niveaux d'oxygénation moyens par session

Le premier objectif du traitement des mesures a été la mise en relation des niveaux moyens d'oxygénation mesurés au cours d'une session avec les paramètres expérimentaux associés. Les tests post-hoc de Fisher révèlent un effet significatif du paramètre de mémoire (niveau de N-back) sur l'oxygénation mesurée au cours de la session au voxel 15 ($p=0.0267$; résultats présentés sur la figure 21).

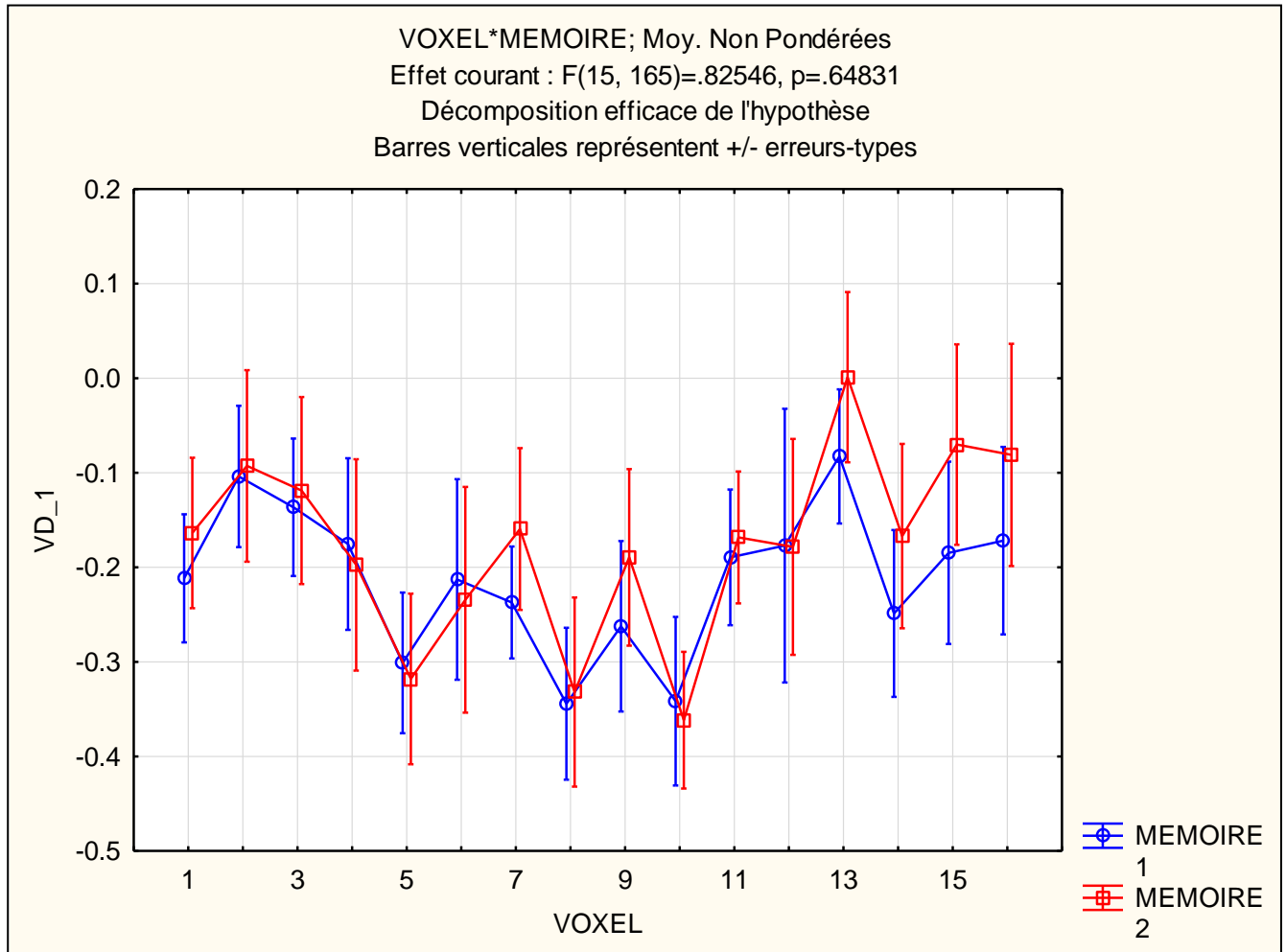


Figure 21 : Effet du paramètre de mémoire (0 en bleu, 1 en rouge) sur les niveaux moyens d'oxygénation, par voxel

Toutefois, bien que cette différence ne soit pas significative (sauf dans le cas du voxel 15), on remarque que les sessions de N-back 1 sont associées à des niveaux d'oxygénation plus élevés que les sessions de N-back 0 dans les voxels situés dans la partie haute du cortex préfrontal (voxels impairs). En effet, sur les 8 voxels « hauts », 7 présentent une oxygénation supérieure en N-back 1 (en particulier les voxels 7,9, 13 et 15), alors que ce n'est le cas que pour 4 des 8 voxels « bas » (numéros pairs).

Les test post-hoc de Fisher réalisés révèlent en outre un effet significatif de la difficulté du pilotage sur l'oxygénation mesurée dans les voxels 6, 7 et 8 (résultats de tous les voxels présentés sur la figure 22, en page suivante).

VOXELS*PIL; Moy. Non Pondérées
 Effet courant : $F(15, 165)=1.1688, p=.30085$
 Décomposition efficace de l'hypothèse
 Barres verticales représentent +/- erreurs-types

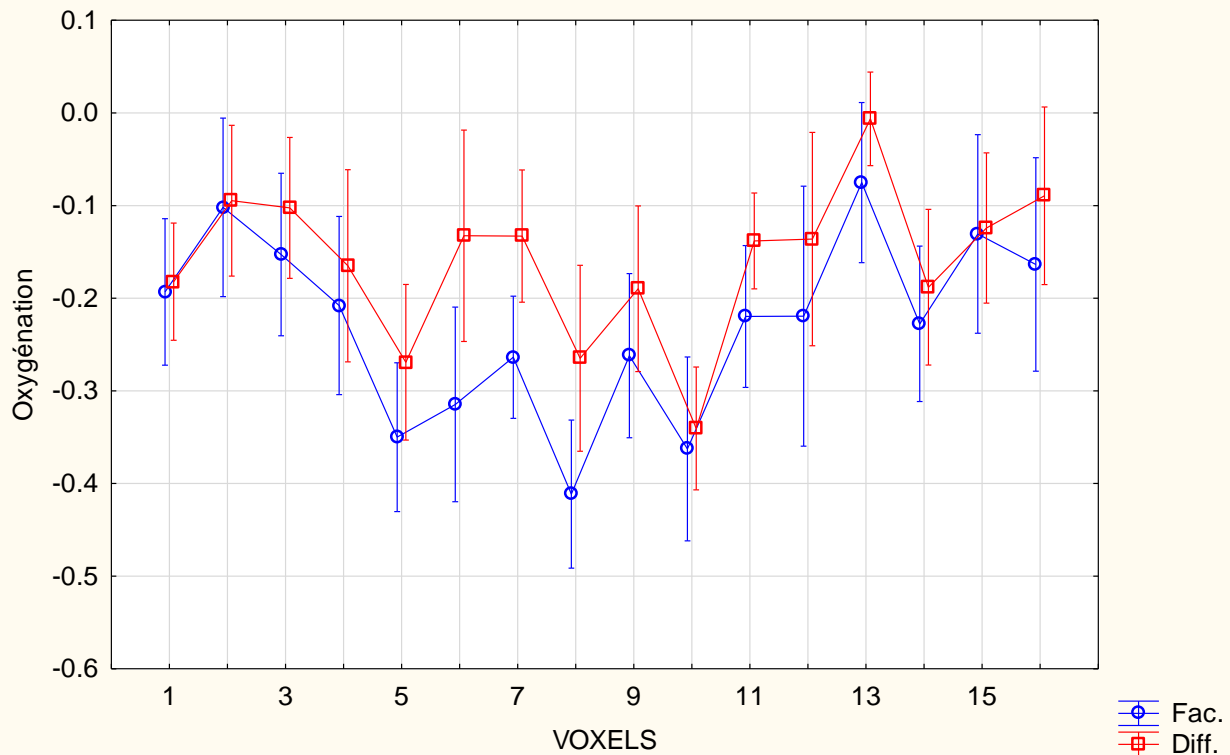


Figure 22 Effet du paramètre de difficulté de pilotage (facile en bleu, difficile en rouge) sur les niveaux moyens d'oxygénation, par voxel

Pour les voxels 6, 7, et 8, les tests post-hoc révèlent des niveaux de significativité respectifs de $p=0.00014$; $p=0.0058$; $p=0.002$. Le détail des tests post-hoc est présenté dans le tableau 2 de l'annexe 7.

Comme le montrent les tests post-hoc, lorsque le pilotage devient difficile, l'effet de mémoire semble disparaître. En effet, lorsque le pilotage est facile, un effet significatif de la mémoire intervient sur les voxels 3 ($p=0.03$), 13 ($p=0.00039$), 14 ($p=0.037$), 15 ($p=0.0046$) et 16 ($p=0.03$). En revanche, lorsque le pilotage est difficile, plus aucun voxel ne fait état d'un effet significatif de la mémoire. Ces résultats peuvent se résumer par le graphique 23, présenté ci-après, qui expose les variations d'oxygénation moyenne lorsqu'on fait varier la difficulté du pilotage et/ou le paramètre de mémoire.

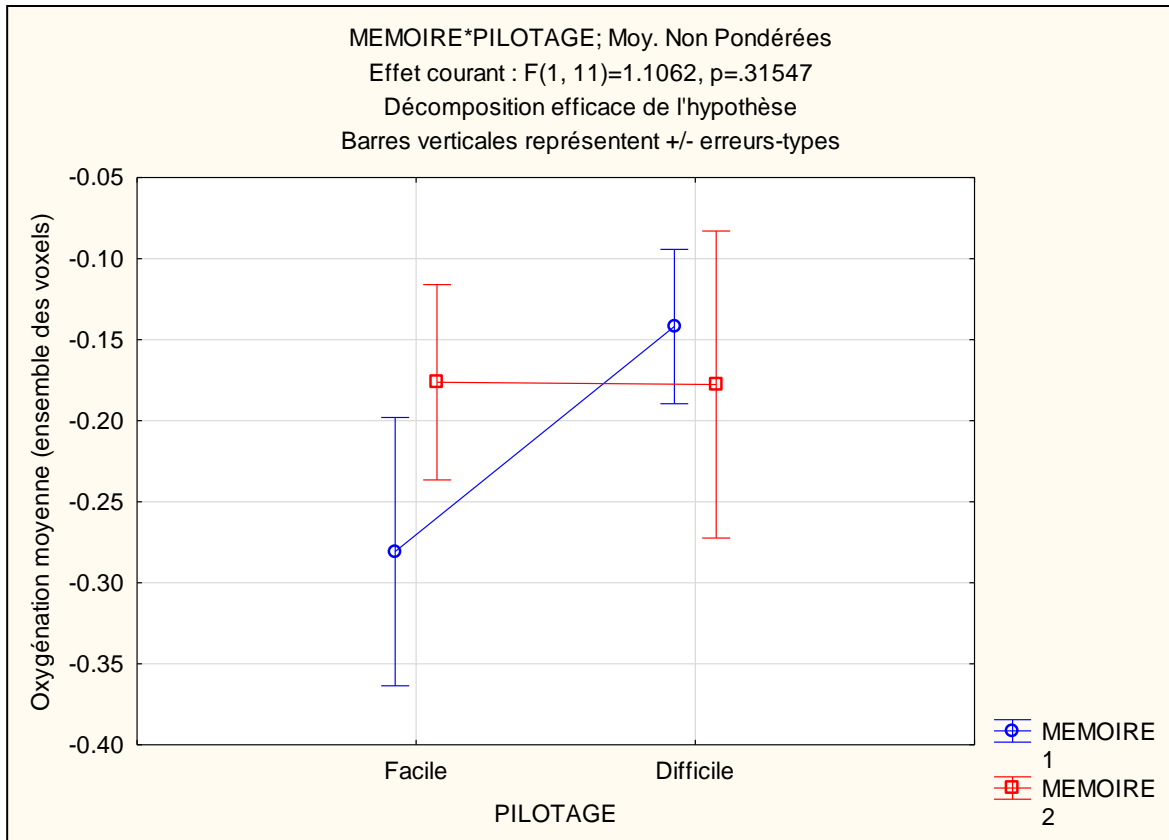


Figure 23 : Variations d'oxygénation sur les voxels lorsqu'on fait varier le paramètre de pilotage et/ou de mémoire

2 Niveaux d'oxygénation en fonction de la production

Le second objectif de notre étude a été la mise en relation des niveaux d'oxygénation mesurés à un instant donné avec les productions temporelles (révélatrices de la charge attentionnelle) réalisées.

On classe les productions temporelles (réalisées à la tâche secondaire) en trois catégories :

- Les productions **courtes** (de 0 à 1700 ms)
- Les productions **normales** (de 1700 à 2300 ms)
- Les productions **longues** (supérieures à 2300 ms)

Pour chacune des productions, on considère la moyenne d'oxygénation dans les 6 secondes (correspondant à la durée de la réponse hémodynamique) précédant l'estimation. L'idée est de voir si l'oxygénation à un moment donné peut expliquer les productions temporelles réalisées.

La figure 24 présente les oxygénations moyennes, par voxel, selon les productions temporelles réalisées (courtes en bleu, normales en rouge et longues en vert). De manière générale, on constate que plus les productions sont longues, plus l'oxygénation est élevée. L'analyse de variance (ANOVA) révèle un effet significatif des productions temporelles sur le niveau d'oxygénation moyen sur l'ensemble du cortex préfrontal ($p=0.015$), ainsi que le montre la figure 25.

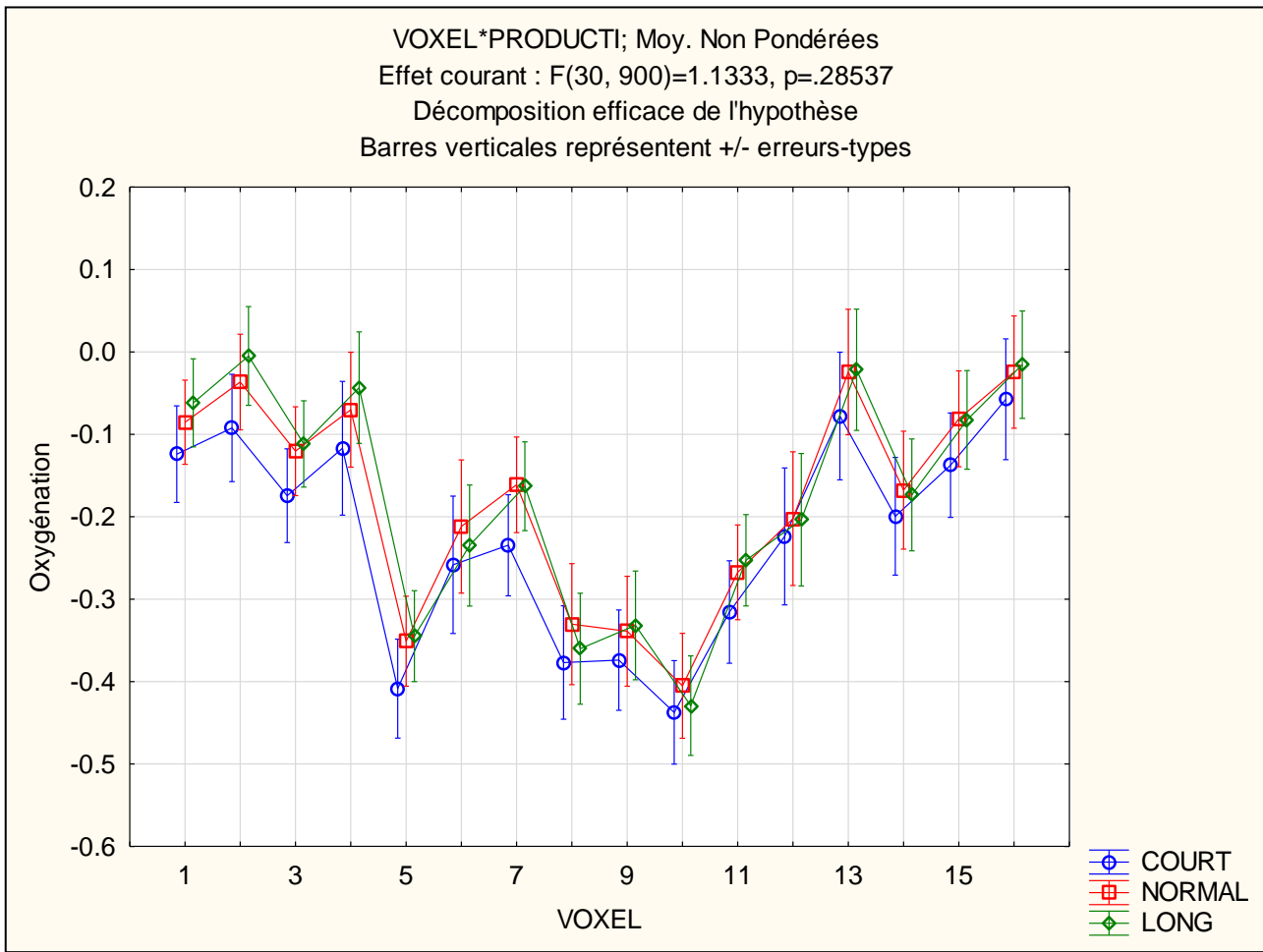


Figure 24 : Variations d'oxygénation, par voxel, selon les productions temporelles réalisées

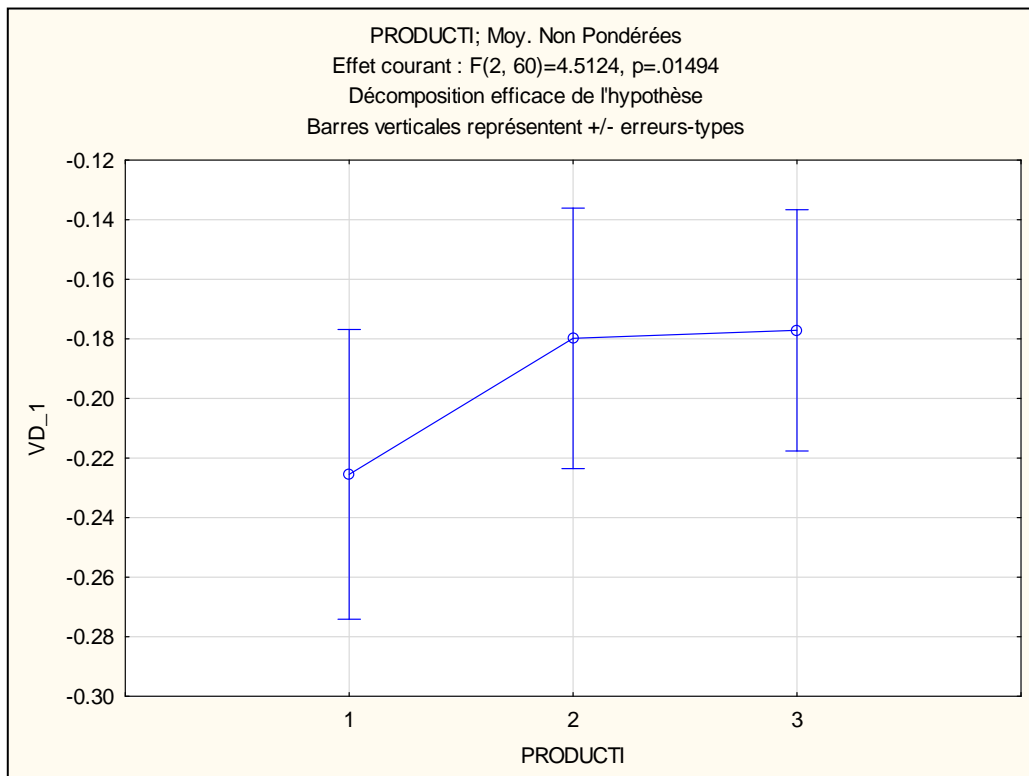


Figure 25 : Effet significatif de la production temporelle sur les variations d'oxygénation en moyenne dans le cortex préfrontal

Si on regarde chaque voxel de manière indépendante, tous les voxels (sauf 10, 12 et 14) présentent un effet significatif du type de production temporelle sur les variations d'oxygénation. Les tableaux des tests post-hoc de Fisher qui justifient ces résultats sont présentés dans le tableau 3 de l'annexe 7.

Le voxel donnant la meilleure significativité est le voxel 2 ($p=0.022$), dont les variations d'oxygénation en fonction des productions temporelles sont affichées dans la figure 26.

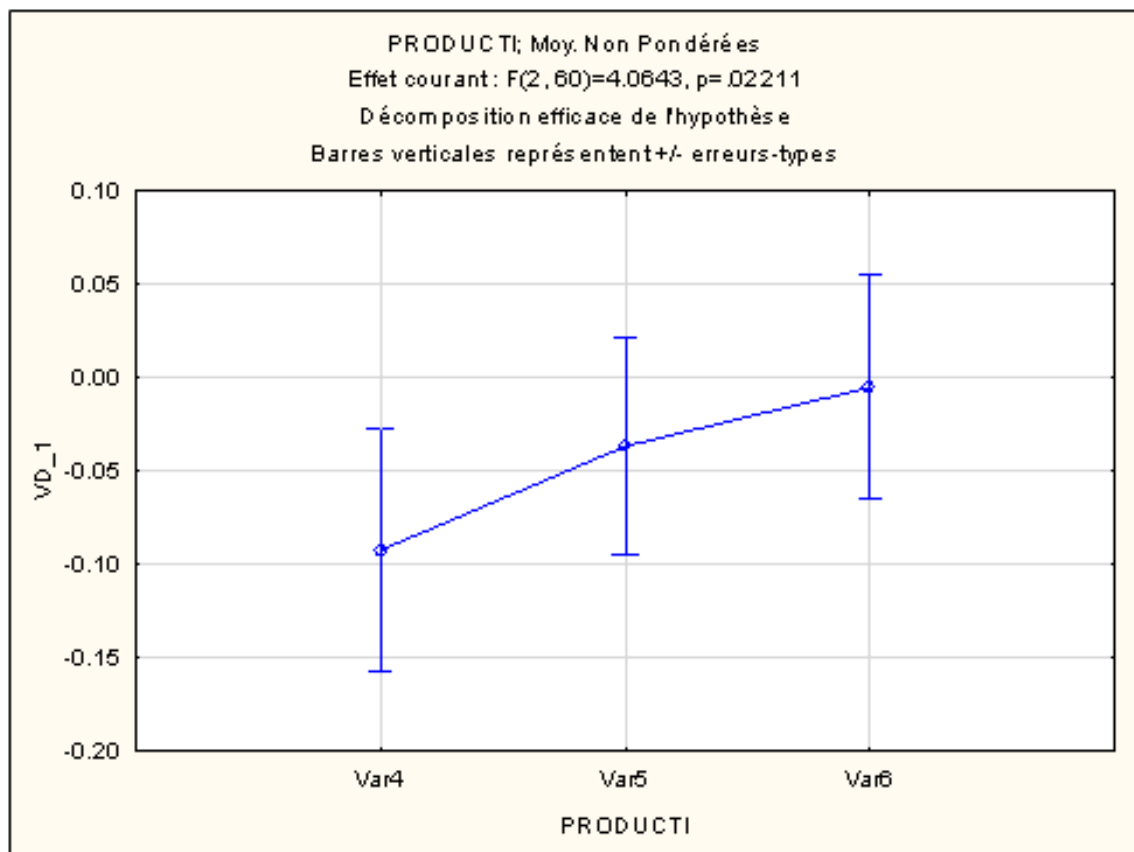


Figure 26 : Effets significatifs de la production (courte, normale ou longue) sur les variations d'oxygénation mesurées au voxel 2.

IV/DISCUSSION

L'objectif de cette expérience était de démontrer la pertinence de la NIRS pour évaluer le niveau de charge attentionnelle d'un opérateur. Pour cela, il a fallu mettre au point une expérience, se basant sur l'approche des micromondes, faisant entrer en jeu des niveaux de charge attentionnels variables.

Les résultats comportementaux de cette expérience vont dans le sens d'un niveau de charge mentale croissant au fil des sessions, ainsi que le suggère la mesure subjective par le NASA TLX. La performance à la tâche secondaire (figure 18) témoigne elle aussi d'un niveau de charge attentionnel

croissant (avec un effet significatif de la mémoire) avec les sessions. Ces résultats sont en accord avec les réponses des participants aux questionnaires

Ces variations de charge attentionnelle mesurées conjointement par des mesures objectives (performance à une tâche secondaire) et subjectives (NASA TLX) s'accompagnent de variations dans les niveaux d'oxygénation mesurés dans le cortex préfrontal, comme le montrent les figures 21 et 22. En particulier, on distingue un effet de mémoire qui s'accompagne d'une augmentation des niveaux d'oxygénation dans le cortex préfrontal, et plus particulièrement dans les voxels situés le plus en haut, et qui correspondent bien à l'aire de Brodmann 9, associée à la mémoire de travail. L'effet de pilotage se distingue également de manière significative sur les oxygénations mesurées dans les voxels du centre (6, 7 et 8), témoignant de la suractivation du cortex ventro-médian, associé aux tâches de planification (AYAZ/SHEWOKIS 2011)

Toutefois, la performance à la tâche secondaire (figure 18) semble indiquer une influence forte de la mémoire sur la mesure réalisée. Lorsque le paramètre de mémoire est absent (N-back 0), on constate que le pilotage n'a que peu d'influence sur les estimations temporelles réalisées. Le maintien d'une performance équivalente à l'estimation temporelle lorsque la difficulté de pilotage varie, en l'absence du paramètre de mémoire, a un coût élevé en ressources attentionnelles comme peut le laisser penser la forte variation du niveau d'oxygénation (qu'on peut voir sur la figure 23). En revanche, lorsque le paramètre de mémoire est présent (N-back 1), la performance à l'estimation temporelle se dégrade fortement (figure 18), mais elle n'est que peu influencée par la difficulté de pilotage (alors qu'on pourrait s'attendre à une dégradation de la performance encore plus forte lorsque le paramètre de mémoire est présent et que le pilotage est difficile).

Ce constat, associé à l'absence d'effet du pilotage sur les mesures lorsque le paramètre de mémoire est présent (figure 23, en rouge), ainsi qu'au fait que les zones du cortex préfrontal ventro-latéral gauche (mesurées au voxel 2), connues pour leur implication dans les tâches de N-back (AYAZ/SHEWOKIS 2011) ont une activation plus faible alors que la difficulté de pilotage augmente, nous conduit à l'hypothèse que l'augmentation de la difficulté de pilotage s'accompagne d'un désengagement vis-à-vis de la tâche de mémoire.

En pratique, la tâche de pilotage nécessite une quantité soutenue de ressources attentionnelles, là où la tâche de mémoire semble intervenir de façon plus épisodique. De plus, les candidats étaient informés que la tâche de pilotage était la plus importante (comme il en est fait mention dans les instructions présentées en annexe 2). C'est sans doute ceci qui a amené la priorisation de la tâche de pilotage dans l'esprit des participants, et donc le désengagement de la tâche de mémoire lorsque le niveau de charge attentionnelle augmente trop. Ce résultat est en accord avec le ressenti des participants, qui ont la plupart du temps fait mention des difficultés ressenties (visibles sur le critère de frustration, en bas à droite de la figure 20) à l'exécution de la tâche « Pilotage difficile / N-back 1 ». En outre, on retrouve le désengagement constaté par Ayaz (2011) lors de l'augmentation trop importante du niveau de mémoire dans une tâche de N-back.

Ces résultats prometteurs s'accompagnent d'une autre perspective, concernant la prédiction de la charge attentionnelle. L'expérience a montré que le niveau d'oxygénation mesuré dans un intervalle de 6 secondes permet de prédire (comme le montrent les figures 25 et 26) les productions temporelles réalisées, révélatrices de la charge attentionnelle. Les voxels caractéristiques de ces variations sont en accord avec ceux trouvés dans l'étude d'Ayaz (2011) sur l'effet du paramètre de mémoire et de difficulté sur la charge attentionnelle. Ces variations relativement rapides et ces résultats prometteurs nous permettent d'envisager l'utilisation de la NIRS dans une interface adaptative, en conditions réelles (dans un cockpit, par exemple), puisqu'elle est capable de prédire les situations à charge attentionnelle élevée.

Les résultats de cette expérience peuvent donner lieu à de nouvelles analyses. L'augmentation de la puissance statistique (en faisant passer de nouveaux participants sur l'expérience) pourrait faire apparaître des conclusions encore plus fortes. On envisage aussi de visualiser la réponse hémodynamique en moyennant et en filtrant les données mesurées au début d'une nouvelle phase de suivi. On s'attendrait ainsi à ce que le pic d'oxygénation consécutif au traitement cognitif nécessité par l'apparition d'une nouvelle instruction soit croissant avec la charge attentionnelle mesurée à ce moment. En outre, en accord avec l'hypothèse du désengagement de la tâche de mémoire avec la difficulté de pilotage, on s'attend à mesurer l'effet de la difficulté du pilotage sur les pics d'oxygénation mesurés. De plus, ces hypothèses sont à compléter par les mesures complémentaires de cette expérience, afin de mettre en corrélation le rythme cardiaque et la conductance électrodermale avec les niveaux de charge attentionnelle mis en évidence dans l'expérience. Les données d'oculométrie permettront également de valider l'hypothèse du désengagement de la tâche de mémoire avec la difficulté de pilotage (où on s'attend à une diminution de la durée des fixations dans la zone où sont présentées les instructions).

L'intérêt des résultats apportés par cette étude, à compléter avec les autres signaux physiologiques (ECG, GSR) mesurés dans cette expérience, ouvrent la porte d'une interface adaptative qui pourrait être mise en place pour les pilotes. Le projet de réaliser un casque de pilote utilisant plusieurs métriques (dont la NIRS) pour estimer en temps réel la charge attentionnelle (par des méthodes de neuro-flous) en vue de son utilisation dans une interface homme-machine a donné lieu à un sujet de thèse en neurosciences, proposé par Frédéric Dehais (ISAE) et Arnaud Delorme (UPS-CERCO), qui débutera au mois d'octobre 2012, avec un cofinancement par le PRES et la région Midi-Pyrénées, et pour lequel j'ai été retenu comme candidat.

Annexes

Annexe 1 : NASA Task Load Index

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?

Annexe 2 : Instructions à destination des sujets

Tache primaire

Au cours de l'expérience, on vous demande de piloter l'avion qui se trouve au centre de l'écran (voir capture d'écran ci-dessous) en vol latéral. Le pilotage s'effectue à l'aide du joystick, et sera perturbé par des conditions de vent ou d'inertie de l'avion pouvant varier.



Capture d'écran de l'interface

A chaque instant, votre mission est de suivre en vol latéral l'un des cinq avions qui se déplacent en haut de l'écran. L'indication vous permettant de savoir quel avion doit être suivi apparaîtra régulièrement en bas de l'écran. Au *moment précis* où l'indication apparaît, vous devez démarrer la poursuite de l'avion indiqué (en vous plaçant à la même position latérale que lui).

Les ordres correspondants aux indications sont les suivants : chaque indication est constituée d'un mot écrit dans une certaine couleur (sur l'exemple de la capture d'écran, le mot « Jaune » est écrit en vert, par exemple). Vous devez :

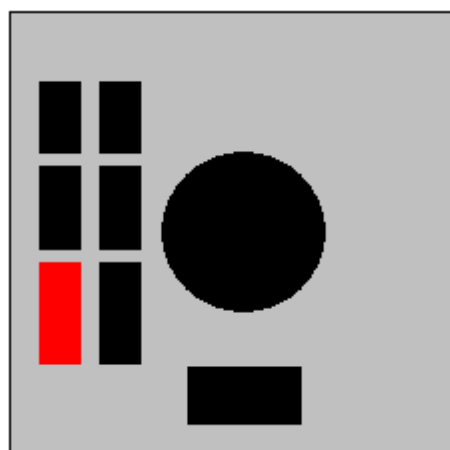
- Si le mot qui est écrit **est** un nom de couleur (*Bleu, Rouge, Jaune* ou *Vert*), vous devez suivre l'avion correspondant à **la couleur** dans lequel le mot est écrit (par exemple, dans l'exemple de la figure 1, il vous est demandé de suivre l'avion vert, puisque le mot « Jaune » est écrit en vert). Le nom de couleur qui est écrit n'a aucune importance.
- Si le mot qui est écrit **n'est pas** un nom de couleur, il vous est demandé de suivre le cinquième avion, ne correspondant à aucune couleur. La couleur dans laquelle est écrit le mot n'a alors aucune importance. Par exemple, si le mot « Oiseau » s'affiche, vous devrez suivre le cinquième avion, et ce quelle que soit la couleur dans laquelle est écrit le mot.

Attention, toutefois : cette tâche primaire comporte également une tâche de mémoire. Selon l'indice de mémoire (0 ou 1) qui dépendra de la session expérimentale, ces règles changent légèrement :

A l'ordre 0, les instructions qui s'affichent doivent être suivies immédiatement. A l'ordre 1, en revanche, les instructions qui s'affichent ne doivent commencer à être suivies que lorsque la prochaine instruction s'affichera (cf exemple ci-dessous).

Instructions affichées (dans l'ordre chronologique)	Mission à effectuer, à l'ordre 0	Mission à effectuer, à l'ordre 1
Début de la mission, le mot « Bleu » est écrit en rouge.	Poursuivre l'avion Rouge	Aucune mission, le pilote est libre de piloter comme il veut
Le mot « Vert » est écrit en Bleu	Poursuivre l'avion Bleu	Poursuivre l'avion Rouge
Le mot « Jaune » est écrit en Jaune	Poursuivre l'avion Jaune	Poursuivre l'avion Bleu
Le mot « Bonjour » est écrit en Rouge	Poursuivre le cinquième avion	Poursuivre l'avion Jaune

Si, à un instant donné, vous vous sentez perdu(e) dans la tâche, et n'arrivez pas à suivre, il vous est demandé d'appuyer sur le bouton numéro 11, sur le joystick (affiché en rouge sur le schéma ci-dessous)



Tâche secondaire

Préliminairement à l'expérience, vous serez entraînés à reconnaître une durée : Pour cela, vous serez placé(e), avec le joystick, face à un écran noir. De manière aléatoire, un son se déclenchera. Il vous est demandé d'arrêter le son, en appuyant sur n'importe quel bouton du joystick

(à l'exception du bouton 11, déjà utilisé pour la tâche primaire). Une indication s'affichera alors, vous indiquant si vous avez arrêté le son trop tôt, trop tard ou au bon moment par rapport à la durée visée (bien entendu, la durée cible reste la même tout au long du protocole). Après plusieurs essais de reconnaissance de la durée cible, vous réaliserez les mêmes estimations, mais cette fois ci sans retour sur votre performance à l'évaluation temporelle (pas d'affichage de « Trop court », « Trop long » ou « correct »).

Durant l'expérience, pendant que vous piloterez l'avion, le même son se déclenchera à plusieurs reprises. Il vous est demandé d'arrêter le son (en appuyant sur n'importe quel bouton du joystick, à l'exception du bouton 11) au bout de la durée que vous aurez appris à reconnaître.

NOTA BENE : il vous est rappelé que la tâche primaire (de pilotage de l'avion) est prioritaire sur la seconde tâche. Votre performance à l'expérience sera basée uniquement sur l'exécution de la tâche primaire.

Annexe 3 : Présentation de l'interface utilisateur

The image shows three screenshots of a user interface for session control, arranged horizontally. Each screenshot is enclosed in a red border. The first screenshot on the left shows a form with the following fields: 'numero de Participant' (input), 'numero de Session' (input), 'nombre de phases' (input), 'ordre du N-back' (two buttons labeled '0' and '1'), and 'difficulte de pilotage' (two buttons labeled 'facile' and 'difficile'). Below these fields are three buttons: 'Application pas prête' (red), 'debut de l'experience' (blue), and 'arret' (grey). The middle screenshot shows a progress bar at the top, a 'derniere duree estimee' field, a 'moyenne des estimations' field, and a 'Reinitialiser' button. The third screenshot on the right shows 'numero de Participant' (input), 'nombre d'essais avec feedback' (input), and 'nombre d'essais total' (input). Below these are two buttons: 'Application pas prête' (red) and 'debut de l'experience' (blue). Red arrows point from each screenshot to its corresponding description below.

CONTROLE DES SESSIONS EXPERIMENTALES

Saisie du numéro de participant, de session, du nombre de phases de suivi.

Entrée des paramètres de la session (paramètre de mémoire et de difficulté)

Lancement des sessions

SUIVI EN DIRECT DE LA SESSION EXPERIMENTALE EN COURS

Affichage (barre de progression en haut) de l'avancement de la session.

Affichage de la dernière production temporelle effectuée, et de la moyenne de toutes les estimations temporelles depuis le début de la session.

CONTROLE DES SESSIONS DE PRODUCTION TEMPORIELLE SEULE

Saisie du numéro de participant.

Saisie du nombre d'essais de production temporelle pour lequel un feedback sera donné (trop long, trop court, correct)

Saisie du nombre d'essais de production temporelle total.

Lancement des sessions

Annexe 4 : Première étude comportementale

Une étude comportementale a été menée, aux mois de Mai/Juin. L'objectif était de valider l'hypothèse selon laquelle l'évaluation par une tâche de production temporelle nous permet bien de distinguer différents niveaux de charge attentionnelle sur la tâche conçue précédemment.

1 Matériel et méthodes

Cinq participants ont passé cette étude, parmi lesquels 4 hommes et une femme, âgés de 20 à 22 ans. Le protocole suivi est présenté en annexe 4, et se composait de 4 sessions de tâche primaire couplée à la tâche secondaire, précédées d'une session d'entraînement à la tâche secondaire (reconnaissance du critère de temps de 2 secondes) de 20 minutes. Durant l'entraînement à la tâche secondaire, le feedback « correct » était donné pour un écart de $\pm 5\%$ avec le critère (soit pour une production entre 1900 et 2100 ms)

L'écran utilisé pour présenter la tâche aux participants était un écran *DELL 22" TFT*. Le joystick utilisé pour le pilotage de l'avion ainsi que l'extinction des alarmes (tâche secondaire) était un joystick *Logitech X3D*.

Les niveaux de charge attentionnelle produits par cette tâche n'étaient estimés que par la performance à la tâche secondaire de production temporelle, si bien qu'aucun appareil de mesure n'a été utilisé. L'effet de chacune des sessions sur les productions temporelles a ensuite été estimé par une analyse de variance (ANOVA), réalisée à l'aide du logiciel *STATISTICA*, en classant pour chaque participant les sessions par ordre croissant de niveau de charge attentionnelle attendu, soit dans l'ordre suivant :

- Pilotage facile et N-back 0.
- Pilotage difficile et N-back 0.
- Pilotage facile et N-back 1.
- Pilotage difficile et N-back 1.

Le questionnaire rempli en début d'expérience avait pour but de vérifier que les participants étaient dans un état mental (niveau de stress, fatigue...) équivalent ; celui rempli en fin d'expérience avait pour objectif de recueillir leurs impressions sur l'expérience, ainsi que les éventuelles stratégies utilisées (pour le pilotage ou l'estimation temporelle).

2 Résultats

Suite à l'entraînement, pour les dix essais sans feedback, la production temporelle moyenne des participants variait entre 1970 et 2169 ms. L'écart-type maximal par participant était de 237ms. Lors de chacune des validations, la moyenne de production temporelle variait au plus de 6,1%. L'écart-type augmentait de moins 50ms à chaque pas.



Figure 19 Le joystick Logitech X3D utilisé dans les expériences

L'analyse de variance (ANOVA), nous permet d'estimer la probabilité d'obtenir de tels échantillons si les données mesurées quel que soit le type de session suivaient à une même loi normale). On considère que si cette probabilité (nommée p) est inférieure à 0,05, alors on peut raisonnablement considérer que les échantillons ne suivent pas une même loi normale, et donc qu'il y a un effet significatif du type de session sur les mesures réalisées.

Ici, l'ANOVA révèle un effet significatif du type de session sur les productions temporelles ($p < 0.0001$), ainsi que le montre la figure 18.

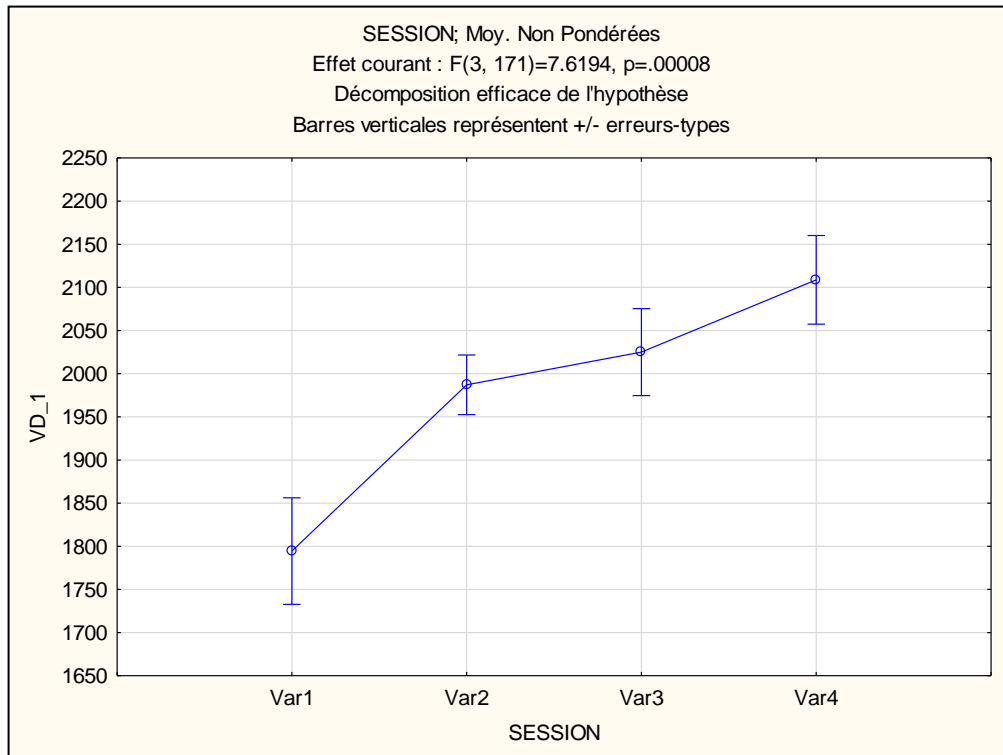


Figure 20 Effet du type de session sur la production temporelle (ordre : facile/ordre 0 - difficile/ordre 0 - facile/ordre 1 - difficile/ordre 1)

Les **tests post-hoc de Tukey** (qui permettent de tester quelles sont les paires de groupes pour lesquels les différences sont significatives) réalisés montrent que pour l'effet du type de session (voir tableau 3), la session *pilotage facile / ordre 0* entraîne des productions temporelles significativement plus courtes que toutes les autres sessions ($p < 0.03$ quelle que soit la session de comparaison)

3 Discussion

L'avancée dans l'expérience est caractérisée par la hausse de la variabilité des estimations, en accord avec des expériences de psychologie antérieures (GUAY/BOURGEOIS 1981). Cependant, les différences d'estimations temporelles entre les différents types de session vont bien dans le sens d'une augmentation de la charge attentionnelle entre chaque session, si on classe les sessions ainsi :

- Pilotage facile et N-back 0.
- Pilotage difficile et N-back 0.
- Pilotage facile et N-back 1.

- Pilotage difficile et N-back 1.

Les deux sessions « croisées » (pilotage facile/N-back 1 et pilotage difficile/N-back 0) présentent des niveaux de production temporelle comparables, et semblent donc charger attentionnellement les participants de manière équivalente.

Ces résultats, mis en relation avec les études antérieures vont dans le sens de la mise en évidence par les différentes sessions de niveaux de charge attentionnelle croissants (BLOCK 2010, ZAKAY/BLOCK 1998)

Annexe 5 : Questionnaire pré-expérimental

Date	.../.../...	Heure h min
INFORMATIONS GENERALES			
Participant		Sexe	<input type="checkbox"/> Homme <input type="checkbox"/> Femme
Age ans	Dominance manuelle	<input type="checkbox"/> Droite <input type="checkbox"/> Gauche
Taille cm	Œil de visée	<input type="checkbox"/> Droite <input type="checkbox"/> Gauche
Poids kg	Nationalité	
Activité professionnelle			
Domaine d'activité ou d'études			
EXPERIENCE			
Musique	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non	Années d'expérience	
Pilotage	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non	Heures d'expérience	
INFORMATIONS MEDICALES			
Combien de cigarettes avez-vous fumé dans les dernières 24h ?			
Combien de cafés (ou boissons riches en caféine) avez-vous consommé ces dernières 24h ?			
Combien de verres de boissons alcoolisées avez-vous consommé ces dernières 24h ?			
Avez-vous des troubles visuels non corrigés ? (si oui, lesquels ?)			
Suivez-vous un traitement médical ? (sur ordonnance ou par automédication) Si oui, quels médicaments prenez-vous ?			
Souffrez-vous de troubles ou d'atteintes neuropsychologiques connus ? (si oui, lesquels ?)			

Annexe 6 : Questionnaire post-expérimental

Participant : _____

Estimez votre niveau de motivation au cours de l'expérience :

Peu motivé Très motivé

Étiez-vous engagé(e) dans la tâche à un niveau similaire tout au long de la tâche? Expliquez.

Avez-vous utilisé une/des stratégie(s) pour ces tâches. Si oui, pouvez-vous la/les décrire?

Pilotage

Estimation du temps

Est-ce que certaines choses vous ont paru plus difficiles que d'autres? Pourquoi?

Autres commentaires

Annexe 7 : Tableaux des tests post-hoc

TABLEAU 1 : Tests post-hoc réalisés sur les critères du NASA-TLX.

Les effets significatifs sont surlignés en jaune, et concernent les critères de demande mentale, temporelle, d'effort et de frustration, pour la distinction entre la session « Difficile/1 » avec les autres.

Distinction Facile/0 – Difficile/1						
critère	Dem. mentale	Dem. physique	Dem. temporelle	Performance	Effort	Frustration
	0.001032	1.000000	0.993825	1.000000	0.011054	1.000000
	0.000017	0.858257	0.000722	0.858257	0.000017	0.126056
	0.000017	0.996842	0.011054	0.996842	0.000018	0.514980
	0.000017	0.988695	0.005810	0.988695	0.000017	0.391003
	0.000722	1.000000	0.988695	1.000000	0.008060	1.000000
	0.000017	0.100165	0.000018	0.100165	0.000017	0.001473
Distinction Difficile/0 – Difficile/1						
critère	Dem. mentale	Dem. physique	Dem. temporelle	Performance	Effort	Frustration
	0.020288	0.998498	0.999999	0.998498	0.126056	1.000000
	0.000018	1.000000	0.126056	1.000000	0.000020	0.950674
	0.000021	1.000000	0.514980	1.000000	0.000109	0.999734
	0.000018	1.000000	0.281696	1.000000	0.000033	0.993825
	0.234594	0.813095	1.000000	0.813095	0.642903	0.999968
	0.000017	0.999968	0.047139	0.999968	0.000018	0.813095
Distinction Facile/1 – Difficile/1						
critere	Dem. mentale	Dem. physique	Dem. temporelle	Performance	Effort	Frustration
	0.813095	0.234594	1.000000	0.234594	0.988695	0.950674
	0.000017	0.988695	0.005810	0.988695	0.000017	0.391003
	0.047139	0.988695	1.000000	0.988695	0.234594	1.000000
	0.000358	1.000000	0.968204	1.000000	0.004164	1.000000
	0.334024	0.704162	1.000000	0.704162	0.761371	0.999734
	0.000017	0.579261	0.000109	0.579261	0.000017	0.035938

En page suivante : TABLEAU 2 : Tests post-hoc réalisés sur les oxygénations moyennes de chaque session par voxel. En rouge apparaissent les différences significatives.

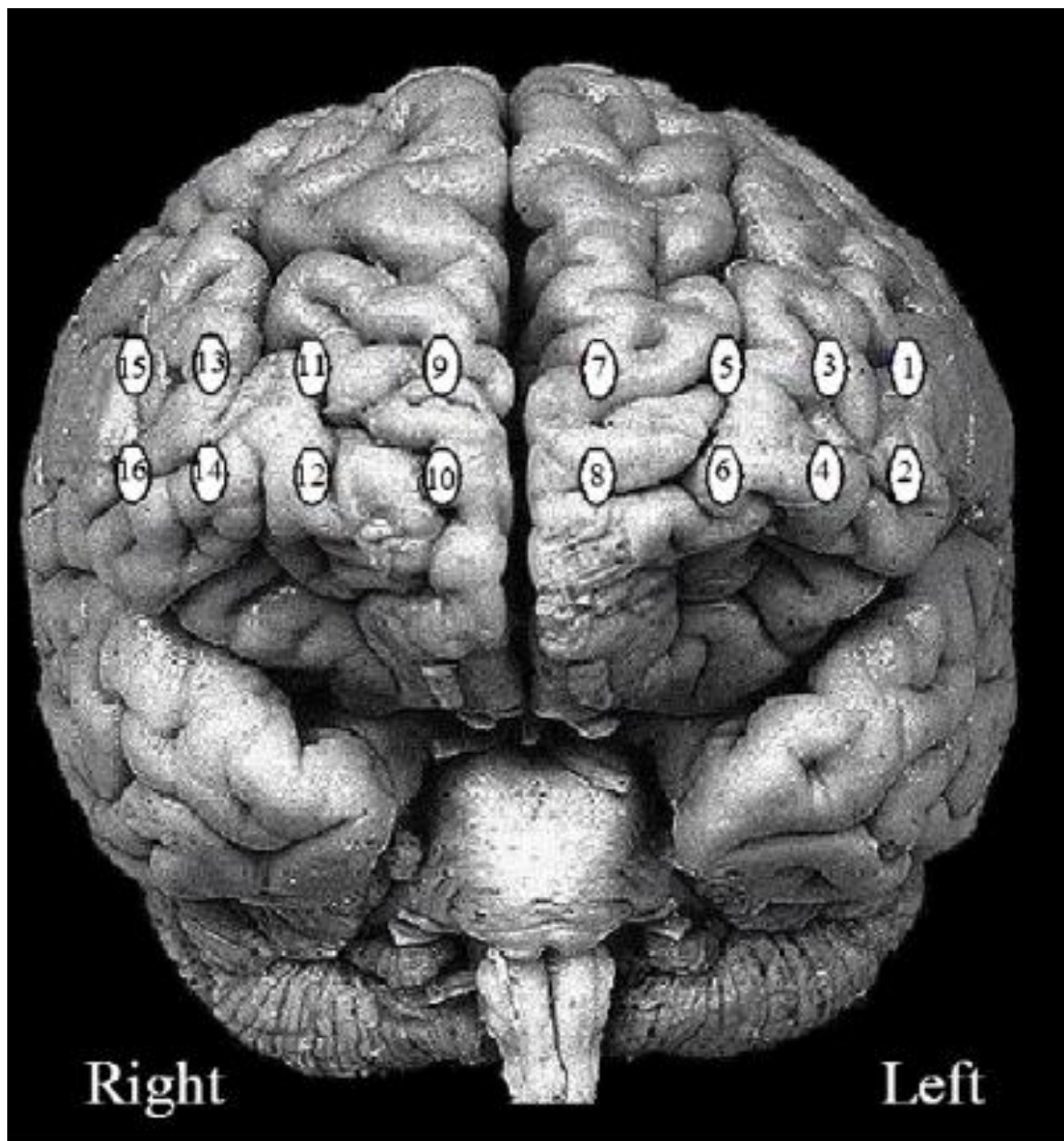
VOXEL 1					VOXEL 2			
Facile/0	Difficile/0	Facile/1	Difficile/1		Facile/0	Difficile/0	Facile/1	Difficile/1
	0.271260	0.100587	0.382268			0.103828	0.092280	0.785830
0.271260		0.584845	0.820085		0.103828		0.954041	0.174602
0.100587	0.584845		0.439334		0.092280	0.954041		0.157158
0.382268	0.820085	0.439334			0.785830	0.174602	0.157158	
VOXEL 3					VOXEL 4			
Facile/0	Difficile/0	Facile/1	Difficile/1		Facile/0	Difficile/0	Facile/1	Difficile/1
	0.008413	0.030371	0.314784			0.128942	0.574611	0.757958
0.008413		0.629702	0.099059		0.128942		0.336688	0.225245
0.030371	0.629702		0.241395		0.574611	0.336688		0.800029
0.314784	0.099059	0.241395			0.757958	0.225245	0.800029	
VOXEL 5					VOXEL 6			
Facile/0	Difficile/0	Facile/1	Difficile/1		Facile/0	Difficile/0	Facile/1	Difficile/1
	0.017021	0.338328	0.344715			0.000190	0.425491	0.018397
0.017021		0.148838	0.145347		0.000190		0.002937	0.152623
0.338328	0.148838		0.989917		0.425491	0.002937		0.115501
0.344715	0.145347	0.989917			0.018397	0.152623	0.115501	
VOXEL 7					VOXEL 8			
Facile/0	Difficile/0	Facile/1	Difficile/1		Facile/0	Difficile/0	Facile/1	Difficile/1
	0.007861	0.058658	0.002349			0.016560	0.667538	0.019564
0.007861		0.432480	0.690248		0.016560		0.048158	0.949506
0.058658	0.432480		0.237288		0.667538	0.048158		0.055655
0.002349	0.690248	0.237288			0.019564	0.949506	0.055655	
VOXEL 9					VOXEL 10			
Facile/0	Difficile/0	Facile/1	Difficile/1		Facile/0	Difficile/0	Facile/1	Difficile/1
	0.090087	0.088359	0.032845			0.748001	0.344340	0.976441
0.090087		0.992581	0.655365		0.748001		0.531832	0.725744
0.088359	0.992581		0.662089		0.344340	0.531832		0.329545
0.032845	0.655365	0.662089			0.976441	0.725744	0.329545	
VOXEL 11					VOXEL 12			
Facile/0	Difficile/0	Facile/1	Difficile/1		Facile/0	Difficile/0	Facile/1	Difficile/1

	0.009325	0.084881	0.129877			0.010251	0.181212	0.226661
0.009325		0.370845	0.269208		0.010251		0.211472	0.168359
0.084881	0.370845		0.832931		0.181212	0.211472		0.897378
0.129877	0.269208	0.832931			0.226661	0.168359	0.897378	
VOXEL 13					VOXEL 14			
Facile/0	Difficile/0	Facile/1	Difficile/1	Facile/0	Difficile/0	Facile/1	Difficile/1	
	0.000864	0.000397	0.024961		0.143676	0.037591	0.073782	
0.000864		0.824285	0.259793	0.143676		0.531546	0.741683	
0.000397	0.824285		0.177855	0.037591	0.531546		0.767001	
0.024961	0.259793	0.177855		0.073782	0.741683	0.767001		
VOXEL 15				VOXEL 16				
Facile/0	Difficile/0	Facile/1	Difficile/1	Facile/0	Difficile/0	Facile/1	Difficile/1	
	0.205792	0.004600	0.074507		0.054180	0.030340	0.015538	
0.205792		0.110891	0.600544	0.054180		0.806585	0.613704	
0.004600	0.110891		0.282530	0.030340	0.806585		0.794782	
0.074507	0.600544	0.282530		0.015538	0.613704	0.794782		

En page suivante : TABLEAU 3 : Tests post-hoc réalisés sur les variations d'oxygénation en fonction des productions temporelles (courtes, normales ou longues). En rouge apparaissent les différences significatives.

VOXEL 1				VOXEL 2		
Courte	Normale	Longue		Courte	Normale	Longue
	0.026005	0.000361			0.001417	0.000001
0.026005		0.177013		0.001417		0.070123
0.000361	0.177013			0.000001	0.070123	
VOXEL 3				VOXEL 4		
Courte	Normale	Longue		Courte	Normale	Longue
	0.001979	0.000329			0.007340	0.000026
0.001979		0.615257		0.007340		0.124661
0.000329	0.615257			0.000026	0.124661	
VOXEL 5				VOXEL 6		
Courte	Normale	Longue		Courte	Normale	Longue
	0.000979	0.000270			0.007731	0.179214
0.000979		0.727134		0.007731		0.185382
0.000270	0.727134			0.179214	0.185382	
VOXEL 7				VOXEL 8		
Courte	Normale	Longue		Courte	Normale	Longue
	0.000027	0.000042			0.007542	0.333864
0.000027		0.917333		0.007542		0.087409
0.000042	0.917333			0.333864	0.087409	
VOXEL 9				VOXEL 10		
Courte	Normale	Longue		Courte	Normale	Longue
	0.044079	0.015453			0.063887	0.641393
0.044079		0.681879		0.063887		0.165073
0.015453	0.681879			0.641393	0.165073	
VOXEL 11				VOXEL 12		
Courte	Normale	Longue		Courte	Normale	Longue
	0.005798	0.000329			0.217055	0.246663
0.005798		0.401301		0.217055		0.939423
0.000329	0.401301			0.246663	0.939423	
VOXEL 13				VOXEL 14		
Courte	Normale	Longue		Courte	Normale	Longue
	0.002212	0.001294			0.068949	0.135988
0.002212		0.874037		0.068949		0.742460
0.001294	0.874037			0.135988	0.742460	
VOXEL 15				VOXEL 16		
Courte	Normale	Longue		Courte	Normale	Longue
	0.001266	0.001636			0.058253	0.015925
0.001266		0.940349		0.058253		0.603899
0.001636	0.940349			0.015925	0.603899	

**Annexe 8 : Localisation des voxels de la NIRS
Biopac sur une vue du cerveau (source : AYZAZ
2011)**



Bibliographie

- [ANTONENKO 2010] : P. Antonenko et al., *Using Electroencephalography to Measure Cognitive Load*, *Educ Psychol Rev* (2010) 22:425–438
- [AYAZ/SHEWOKIS 2011] : Ayaz, H., Shewokis, P. a, Bunce, S., Izzetoglu, K., Willems, B., & Onaral, B. (2011). Optical brain monitoring for operator training and mental workload assessment. *NeuroImage*, 59(1), 36-47. Elsevier Inc. doi:10.1016/j.neuroimage.2011.06.023
- [AYAZ/WILLEMS 2011] : Ayaz, H., Willems, B., Bunce, S., Shewokis, P., Izzetoglu, K., Hah, S., Deshmukh, A., et al. (2011). Estimation of cognitive workload during simulated air traffic control using optical brain imaging sensors. *Foundations of Augmented Cognition. Directing the Future of Adaptive Systems*, 549–558. Springer.
- [BARBOUR 1992] : US Patent #5,137,355, *A method of Imaging a Random Medium*, sub. 1988
- [BECHARA 1998] : A. Bechara, H. Damasio, D. Tranel, S. Anderson, *Dissociation of working memory from decision making within the human prefrontal cortex*, *Journal of Neuroscience*, 18 (1998), p. 428
- [BLOCK 2010] : Block, R. A., Hancock, P. A., & Zakay, D. (2010). *How cognitive load affects duration judgments : A meta-analytic review*. *Acta Psychologica*, 134(3), 330-343. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.actpsy.2010.03.006
- [BRABOSZCZ/DELORME 2011] : Braboszcz, C. and Delorme, A. (2011) *Lost in thoughts: neural markers of low alertness during mind wandering*. *Neuroimage*, 54(4):3040-7.
- [BRODMANN 1909] : Brodmann K. *Vergleichende Lokalisationslehre der Grosshirnrinde*. Leipzig : Johann Ambrosius Bart, 1909
- [BRUNKEN/PLASS 2004] : R. Brünken, J. Plass, D. Leutner, *Assessment of Cognitive Load in Multimedia Learning with Dual-Task Methodology: Auditory Load and Modality Effects*, *Instructional Science*, Volume 32, Numbers 1-2 (2004), 115-132
- [BUNCE 2011] : Bunce, S. C., Izzetoglu, K., Ayaz, H., Shewokis, P., Izzetoglu, M., Pourrezaei, K., & Onaral, B. (2011). Implementation of fNIRS for Monitoring Levels of Expertise and Mental Workload. In D. Schmorow & C. Fidopiastis (Eds.), *Foundations of Augmented Cognition. Directing the Future of Adaptive Systems* (pp. 13-22). Springer Berlin / Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-21852-1_2
- [CANNON 2010] : J. Cannon et al., *An algorithm for online detection of temporal changes in operator cognitive state using real-time psychophysiological data*, *Biomedical Signal Processing and Control* 5 (2010) 229–236
- [CAUSSE 2010] : Causse, M., J. M Sénard, J. F Démonet, et J. Pastor. 2010. « Monitoring cognitive and emotional processes through pupil and cardiac response during dynamic versus logical task ». *Applied psychophysiology and biofeedback* 35 (2): 115-123.
- [CHEN 2007] : J. Y. C. Chen, E. C. Haas, and M. J. Barnes, “Human performance issues and user interface design for teleoperated robots,” *Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on*, vol. 37, no. 6, pp. 1231–1245, 2007.
- [CHEN 2011] : Chen, S., Epps, J., & Chen, F. (2011). A comparison of four methods for cognitive load measurement. *Proceedings of the 23rd Australian Computer-Human Interaction Conference* (pp. 76–79). ACM.

- [CUMMINGS 2007] M. Cummings, C. Nehme, J. Crandall, and P. Mitchell, "Predicting operator capacity for supervisory control of multiple UAVs," *Studies in Computational Intelligence (SCI)*, vol. 70, pp. 11–37, 2007.
- [CUMMINGS 2008] : Cummings, M.L., & Mitchell, P. J. (2008). *Predicting controller capacity in supervisory control of multiple UAVs*. Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, *IEEE Transactions on*, 38(2), 451–460. IEEE. doi:10.1109/TSMCA.2007.914757
- [DE RIVECOURT 2008] : De Rivecourt, M., Kuperus, M. N., Post, W. J., & Mulder, L. J. M. (2008). Cardiovascular and eye activity measures as indices for momentary changes in mental effort during simulated flight. *Ergonomics*, 51(9), 1295-319.
- [DEHAIS/CAUSSE 2011] : F. Dehais, M. Causse, and S. Tremblay, "Mitigation of Conflicts with Automation: Use of Cognitive Countermeasures," *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, vol. 53, no. 5, pp. 448-460, Sep. 2011.
- [EDWORTHY 1991] : J. Edworthy, S. Loxley and I. Dennis. (1991) *Improving Auditory Warning Design: Relationship between Warning Sound Parameters and Perceived Urgency*, in Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society. April 1991 vol. 33 no. 2 205-231
- [GIROUARD 2009] : Girouard, A., Solovey, E., Hirshfield, L., Chauncey, K., Sassaroli, A., Fantini, S., & Jacob, R. (2009). Distinguishing difficulty levels with non-invasive brain activity measurements. *Human-Computer Interaction—INTERACT 2009*, (Figure 1), 440–452. Springer.
- [GLOVER 1999] : G. Glover, *Deconvolution of Impulse Response in Event-Related BOLD fMRI*, NeuroImage, Volume 9, Issue 4, April 1999, Pages 416–429
- [GUAY/BOURGEOIS 1981] : M. Guay and J. Bourgeois (1981) *Short term retention of temporal information*. Perceptual and Motor Skills: Volume 52, Issue , pp. 719-726.
- [HAAPALAINEN 2010] : Haapalainen, E., Kim, S., Forlizzi, J. F., & Dey, A. K. (2010). Psycho-Physiological Measures for Assessing Cognitive Load. *Human-Computer Interaction*, 301-310.
- [HANCOCK 1995] : Hancock, P. A., Rahimi, M., & Dawes, S. M. (1995). Techniques in mental workload assessment.
- [HANCOCK 1997] : Hancock, P. A., & Verwey, W. B. (1997). Fatigue, workload and adaptive driver systems. *Accident analysis & prevention*, 29(4), 495-506.
- [HART/STAVELAND 1988] : SG. Hart, LE. Staveland, *Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research*, Human mental workload, 1988
- [HIRSHFIELD 2009] : Hirshfield, L, Chauncey, K., & Gulotta, R. (2009). *Combining electroencephalograph and functional near infrared spectroscopy to explore users' mental workload*. In D. D. Schmorow, I. V. Estabrooke, & M. Grootjen (Eds.), *Foundations of Augmented Cognition*. (Vol. 5638/2009, pp. 239-247). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-02812-0_28
- [HIRSHFIELD 2011] : L. Hirshfield et al., *This is Your Brain on Interfaces: Enhancing Usability Testing with Functional Near-Infrared Spectroscopy*, CHI 2011, May 7–12, 2011, Vancouver, BC, Canada
- [HOSHI 1993] : Hoshi Y, Tamura M, *Dynamic multichannel nearinfrared optical imaging of human brain activity*. J Appl Physiol 1993; 75: 1842–1846.
- [JOHN 2004] : John, M. S, D. A Kobus, J. G Morrison, et D. Schmorow. 2004. « Overview of the DARPA augmented cognition technical integration experiment ». *International Journal of Human-Computer Interaction* 17 (2): 131-149.

- [KABER 2007] : Kaber, D. B., Perry, C. M., Segall, N., & Sheik-Nainar, M. A. (2007). *Workload state classification with automation during simulated air traffic control*. The International Journal of Aviation Psychology, 17(4), 371–390. Taylor & Francis.
- [KABER/RILEY 1999] : D. Kaber and J. Riley, *Adaptive Automation of a Dynamic Control Task Based on Secondary Task Workload Measurement*, International Journal of Cognitive Ergonomics, Volume 3, Issue 3 (1999), p. 169-187
- [KAHNEMAN 1973] : Kahneman, D. (1973). *Attention and effort*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- [KOECHLIN 2000] : E. Koechlin, G. Corrado, P. Pietrini, J. Grafman, *Dissociating the role of the medial and lateral anterior prefrontal cortex in human planning*, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 97 (2000), p. 7651
- [KRAMER 1995] F. Kramer, L. J. Trejo, and D. Humphrey, "Assessment of mental workload with task-irrelevant auditory probes.," *Biological psychology*, vol. 40, no. 1-2, pp. 83-100, May 1995.
- [LANDRY/GIES 2009] : Y.Landry, JP. Gies, *Pharmacologie: des cibles vers l'indication thérapeutique*, Dunod (2009)
- [MEHLER 2012] : B. Mehler, B. Reimer and J. Coughlin, *Sensitivity of Physiological Measures for Detecting Systematic Variations in Cognitive Demand From a Working Memory Task*, Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society (June 2012) vol. 54 no. 3, p. 396-412
- [MENDA 2011] : Menda, J., Hing, J. T., Ayaz, H., Shewokis, P. A., Izzetoglu, K., Onaral, B., & Oh, P. (2011). Optical Brain Imaging to Enhance UAV Operator Training, Evaluation, and Interface Development. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 61(1), 423-443.
- [MILLER 2011] M. W. Miller, J. C. Rietschel, C. G. McDonald, and B. D. Hatfield, "A novel approach to the physiological measurement of mental workload," *International Journal of Psychophysiology*, vol. 80, no. 1, pp. 75-78, 2011.
- [MORAY 1988] : N. Moray, *Mental workload since 1979*, International reviews of ergonomics, 1988 - Taylor & Francis London
- [MULDER 1988] : LJM. Mulder, *Assessment of cardiovascular reactivity by means of spectral analysis*, University of Groningen, 1988
- [O'DONNELL/EGGEMEIER 1986] : O'Donnell, R., Eggemeier, F. *Workload assessment methodology*, Handbook of perception and human performance. Volume 2 (A87-33501 14-53). New York, Wiley-Interscience, 1986, p. 42-1 to 42-49.
- [PARASURAMAN 1997] : Parasuraman, R., Hancock, P. A., & Olofinboba, O. (1997). Alarm effectiveness in driver-centred collision-warning systems. Ergonomics, 40(3), 390-399.
- [PARASURAMAN 2008] R. Parasuraman and G. F. Wilson, "Putting the Brain to Work: Neuroergonomics Past, Present, and Future," *Human Factors*, vol. 50, no. 3, pp. 468-474, Jun. 2008.
- [POPE 1995] : T. Pope, E. H. Bogart, and D. S. Bartolome, "Biocybernetic system evaluates indices of operator engagement in automated task.," *Biological psychology*, vol. 40, no. 1-2, pp. 187-95, May 1995.
- [POSNER 1978] : Posner, Michael I, *Chronometric explorations of mind.*, Oxford, England: Lawrence Erlbaum. (1978)
- [POTTER/BRESSLER 1989] : S. Potter, J. Bressler, G. Reid, *Subjective Workload Assessment Technique (SWAT): A user's guide* (Interim Report, Jun. 1986 - Oct. 1988)

- [PRASURAMAN 2007] Parasuraman, R., & Rizzo, M. (2007). *Neuroergonomics: The brain at work*. New York: Oxford University Press.
- [REUTER-LORENZ 2000] : P.A. Reuter-Lorenz, J. Jonides, E.E. Smith et al., *Age differences in the frontal lateralization of verbal and spatial working memory revealed by PET*, *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12 (2000), pp. 174–187
- [RUFF 2002] : H. A. Ruff, S. Narayanan, and M. H. Draper, “*Human Interaction with Levels of Automation and Decision-Aid Fidelity in the Supervisory Control of Multiple Simulated*,” *Technology*, vol. 11, no. 4, pp. 335-351, 2002.
- [SCHREPPPEL 2008] : T. Schreppel, J. Egetemeir, M. Schecklmann, et al., *Activation of the prefrontal cortex in working memory and interference resolution processes assessed with near-infrared spectroscopy*, *Neuropsychobiology*, 57 (2008), pp. 188–193
- [SIMONS 2005] : J. Simons, S. Gilbert, A. Owen et al., *Distinct roles for lateral and medial anterior prefrontal cortex in contextual recollection*, *Journal of Neurophysiology*, 94 (2005), p. 813
- [SINGHAL 2002] : Singhal, A., Doerfling, P., Fowler, B. (2002). Effects of a dual task on the N100–P200 complex and the early and late Nd attention waveforms. *Psychophysiology*, 39 : pp 236-245
- [STROOP 1935] : Stroop JR. (1935). *Studies of interference in serial verbal reactions*. *Journal of Experimental Psychology*.
- [TAKAHASHI 2000] : K. Takahashi et al., *Activation of the visual cortex imaged by 24-channel near-infrared spectroscopy*, *Journal of Biomedical Optics* 5(1), 93–96 (January 2000)
- [TAKEUCHI 2000] : Y. Takeuchi, *Change in Blood Volume in the Brain during a Simulated Aircraft Landing Task*, *J Occup Health* 2000; 42: 60–65
- [TSAI 2005] : Y. Tsai, E. Viirre, C. Strychacz, B. Chase, T. Jung, *Task performance and eye activity: predicting behavior relating to cognitive workload*, *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 78 (2007), pp. 176–185
- [VILLINGER 1997] : Villinger K, Minoshima S, Hock C et al., *Assessment of local brain activation. A simultaneous PET and near infrared spectroscopy study*. *Adv Exp Med Biol* 1997; 413: 149–153.
- [VISSER 2011] : E. D. Visser and R. Parasuraman, “*Adaptive Aiding of Human-Robot Teaming : Effects of Imperfect Automation on Performance , Trust , and Workload*,” *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, vol. 5, no. 2, pp. 209-231.
- [WILLIAMS 2004] : K. W. Williams, “*A Summary of Unmanned Aircraft Accident / Incident Data : Human Factors Implications*,” 2004.
- [YOUNG/STANTON 2001] : Young, M. S. & Stanton, N. A. (2001). *Mental workload: theory, measurement, and application*. In W. Karwowski (Ed.), *International encyclopedia of ergonomics and human factors: Volume 1* (pp. 507-509). London: Taylor & Francis.
- [ZAKAY 1998] : D. Zakay and J. Shub, *Concurrent duration production as a workload measure*, *Ergonomics*, Volume 41, Issue 8 (1998), p. 1115-1128
- [ZAKAY/BLOCK 1997] : Zakay, D., & Block, R. A. (1997). *Temporal Cognition. Current Directions in Psychological Science*, 6(1), 12-16.