



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: 17295

To cite this version: Dehais, Frédéric and Fabre, Eve F. and Roy, Raphaëlle N. *Cockpit intelligent et interfaces cerveau-machine passives*. (2016) In: Digital Intelligence 2016, 4 April 2016 - 6 April 2016 (Laval, Canada). (Unpublished)

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

Cockpit intelligent et interfaces cerveau-machine passives

Dehais, F.; Fabre, E. and Roy, R.

Abstract. La complexité croissante des cockpits et la pression opérationnelle peuvent amener les pilotes à être dépassés en situation critique. Dès lors, un enjeu est de développer des outils pour estimer l'état de l'équipage et adapter dynamiquement l'interaction avec le cockpit. Dans cette perspective, de nombreux travaux se focalisent sur la mesure en temps réel de la charge de travail comme indicateur de la performance d'un opérateur humain. Nous postulons que cette approche présente de nombreuses limites et avançons que la mesure de l'état d'engagement d'un opérateur est d'avantage représentative de sa performance. Nous concluons cet article par une présentation des principales techniques et de leurs enjeux pour mettre en œuvre des interfaces machines dites « passives » destinées à évaluer le niveau d'engagement d'un pilote pour permettre le développement d'un cockpit intelligent.

1 Introduction

Le progrès technique et les efforts considérables en vue d'améliorer la sécurité ont conduit les appareils à être extrêmement fiables au point que l'aviation commerciale est devenue le moyen de transport le plus sûr en termes de passagers tués. Il faut cependant tempérer ces chiffres, même si la proportion d'accidents par vol continue de décroître légèrement, leur nombre absolu stagne quasiment, en raison de l'augmentation du trafic. En particulier, l'analyse d'événements aériens récents révèle que la complexité des cockpits modernes et la pression opérationnelle peuvent amener les pilotes à être totalement dépassés en situation de stress. Ainsi, au cours de ces dernières années, les pertes de contrôle en vol sont devenues la catégorie d'accident la plus meurtrière en aviation commerciale. Une étude révèle par exemple que 18 pertes de contrôle seraient responsables de près de 1493 décès entre 2002 et 2011 (Source Boeing, 2012). Dans la plupart de ces situations très stressantes mais souvent récupérables, il apparaît que les équipages n'ont pas réussi à identifier les problèmes et ont persisté dans des prises de décisions irrationnelles malgré la présence d'alarmes visuelles et sonores. Cette persistance dans des comportements et prises de décisions inadaptées est également connue pour être un facteur contributif de la deuxième catégorie importante d'accidents appelée « collision avec le sol en vol contrôlé ». Dans ce type d'évènement, un aéronef en parfait état de vol est amené involontairement en collision avec le sol ou la mer par l'équipage à la suite d'une erreur de navigation ou par méconnaissance de la hauteur du terrain ou des obstacles.

« Le 2 août 2005, un très fort orage se déclenche au-dessus de l'aéroport de Toronto, où le vol 358 d'Air France est censé se poser (BST, 2005). Le danger est tel qu'une alerte rouge a été déclarée, ce qui interdit au personnel de travailler au sol, dû au risque que représente la foudre. L'A340 d'Air France est donc dérouté vers un circuit d'attente proche de l'aéroport d'Ottawa. Puis, quelques dizaines de minutes plus tard la tour autorise l'A340 à commencer la procédure d'approche malgré le fait que l'orage se déchaîne toujours à proximité de l'aéroport de Toronto. La tour informe les pilotes que les avions le précédant ont déclaré que le freinage était difficile et que les vents qui balayent la piste sont de l'ordre de 15 à 20 nœuds. L'atterrissage est très difficile et quelques secondes plus tard, l'avion qui roule à plus de 140 km/h arrive en bout de piste, puis fait une sortie de piste. Miraculeusement, tous les passagers et membres d'équipage réussissent à évacuer l'avion. Quelques minutes plus tard l'avion explose. L'enquête révéla qu'arrivé au niveau de la piste, l'avion était deux fois trop haut. L'avion s'est par conséquent posé à mi-piste, ce qui vu les conditions météo rendait l'atterrissage impossible. Les pilotes auraient dû remettre les gaz pour réaliser un go-around et retenter un second atterrissage dans de meilleures conditions. Ils ont persévéré dans leur atterrissage. »

Une approche intéressante pour améliorer la sécurité aérienne consisterait à développer des technologies de monitoring afin de surveiller le pilote et identifier des états dégradés. Aussi de nombreux travaux de recherche se sont portés sur l'assistance à l'opérateur humain 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 (i.e. l'interface trie et présente dans le champ visuel de l'opérateur humain les informations critiques) (Dehais et al., 2011). Néanmoins le principal problème de ces études est de réussir à fournir une aide appropriée au moment opportun (Parasuraman, Mouloua, & Hilburn, 1999). 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, Hancock, & Olofinboba, 1997).

Dès lors, un enjeu est de disposer d'une mesure précise de la charge de travail pour envisager une intervention pertinente des systèmes d'aides (Hancock & Verwey, 1997; Parasuraman & Wilson, 2008). Or ce concept, bien qu'intéressant théoriquement, reste mal défini et se révèle difficile à calibrer pour en dériver une mesure opérationnelle. Une approche alternative est de considérer le concept de niveau d'engagement attentionnel qui découle du modèle triangulaire de Posner et Dehaene (Posner & Dehaene, 1994) (réseaux d'alerte, de contrôle exécutif et d'orientation). Différents travaux (Dehais et al., 2011; Pecher, Quaireau, Lemerrier, & Cellier, 2010; Tracy et al., 2000) ont montré que les stressés opérationnels (fatigue, incertitude, pression temporelle) peuvent conduire à dégrader ces réseaux et provoquer des états de désengagement attentionnel, de sur-engagement attentionnel ou d'in-engagement attentionnel. Le désengagement attentionnel peut être soit le reflet d'une saturation mentale et conduire l'opérateur à ne plus être capable de faire face à une tâche trop

exigeante, soit la manifestation d'une *divagation attentionnelle* où l'opérateur « n'est plus » dans sa tâche qui ne le stimule pas suffisamment. Il est intéressant de constater que ces deux états délétères se caractérisent par un désengagement du réseau exécutif, sous-tendu entre autre par le cortex préfrontal dorsolatéral (Durantin, Gagnon, Tremblay & Dehais, 2014; Harrivel, Weissman, Noll & Peltier, 2013). Des travaux ont également montré que des épisodes de *divagation attentionnelle* seraient précédés de l'activation d'un réseau dit « par défaut », sous-tendu par des aires médianes du cortex préfrontal (Durantin, Dehais & Delorme, 2015). A l'opposé, le sur-engagement attentionnel ou *tunnélisation attentionnelle* peut conduire un opérateur se focaliser de manière excessive sur un ensemble d'informations non pertinentes au détriment d'informations critiques (ex : alarmes). Certains auteurs postulent que cet état résulterait d'un déficit de désengagement du réseau d'orientation sous-tendu par le thalamus (LaBerge, Carter & Brown, 1992). Si une telle mesure reste difficilement accessible en condition opérationnelle – elle nécessite une IRM - des études ont montré que cet état se manifesterait par une réduction du champ attentionnel et une fixité du regard (Dehais et al., 2011). Enfin, des travaux récemment menés ont montré l'existence d'un état d'in-engagement attentionnel où l'opérateur est incapable d'engager son attention et de traiter une information particulière en situation critique. Il est possible que cet état résulte d'un défaut du mode tonique du thalamus pour maintenir l'attention focalisée. Ce comportement est l'inverse de la tunnélisation attentionnelle et se traduirait par un état confusion associé à une activité saccadique frénétique et une absence de fixations du regard (Dehais, Peysakhovich, Scannella, Fongue & Gateau, 2015). Aussi, l'étude du niveau d'engagement attentionnel se révèle plus riche que le concept de charge de travail : il rend compte de phénomènes neurophysiologiques comportementaux et démontre qu'il est possible de les caractériser avec des outils de mesure portables. Cette approche permet également d'entrevoir un cadre pour définir des solutions adaptées pour assister les opérateurs.

2 Interfaces cerveaux machines passives

La section précédente montre que l'estimation de l'état de l'opérateur nécessite d'adopter une approche de Neuroergonomie (Parasuraman & Wilson, 2008). La Neuroergonomie consiste à utiliser les outils théoriques et les moyens d'imagerie cérébrale des neurosciences cognitives afin d'explorer les mécanismes neuronaux sollicités lors d'activités complexes en situation naturelle. Un important défi pour la Neuroergonomie est de développer des systèmes permettant d'estimer l'état mental (e.g. état attentionnel) d'un opérateur en situation de travail et de proposer des contre-mesures pour améliorer les niveaux de performances humaines. Lorsque ce type d'estimation est réalisé grâce à des méthodes de statistique avancée et via des mesures de l'activité cérébrale (directes ou indirectes), on parle d'interface cerveau machine (ICM) passive. Les ICMs ont d'abord été développées dans le but d'apporter à des personnes handicapées motrices la capacité de contrôler des effecteurs, tel qu'un fau-

teuil roulant, ou de pouvoir communiquer, par exemple grâce au fameux P300 speller (Wolpaw et al., 2002). Dans le cas des ICMs passives, le but n'est alors plus de contrôler volontairement un effecteur mais d'utiliser l'activité cérébrale de la personne pour enrichir l'interaction homme-machine de manière implicite (George & Lécuyer, 2010).

Parmi les différentes mesures d'activité cérébrale existantes, l'électro-encéphalographie (EEG) se prête particulièrement bien aux applications vie réelle de par son faible coût, sa très bonne résolution temporelle ainsi que sa portabilité et son caractère non-intrusif (Nicolas-Alonso & Gomez-Gil, 2012). De plus, des études démontrent que l'EEG se révèle très prometteuse pour étudier la dynamique des processus attentionnels à l'aide des ICMs passives basées sur des marqueurs fréquentiels (i.e. rythmes cérébraux). (George & Lécuyer, 2010). Récemment, Roy et collaborateurs ont aussi démontré la possibilité d'estimer efficacement les états de fatigue mentale grâce aux marqueurs fréquentiels (Roy et al., 2013), et des états de charge mentale grâce aux marqueurs temporels que sont les potentiels évoqués (Roy et al., 2015).

De plus, les progrès récents réalisés dans le domaine des capteurs et du traitement du signal EEG permettent de déployer ces moyens de mesure en situation réelle de pilotage d'avion (Callan, Durantin & Terzibas, 2015). Parallèlement, des auteurs avancent que l'imagerie cérébrale par spectroscopie en proche infrarouge, bien qu'étant une mesure indirecte de l'activité cérébrale, serait également adaptée pour inférer le niveau de charge attentionnelle (Takahashi et al., 2000) des opérateurs de drones ou des contrôleurs aériens (Ayaz et al., 2012). Cette technique présente l'avantage d'être peu intrusive et d'offrir une précision spatiale de l'ordre du cm^2 ce qui peut permettre de distinguer différents niveaux d'engagement attentionnel (Durantin et al., 2015). De plus, des travaux ont prouvé que la fNIRS est une technique adaptée pour la réalisation d'ICM passives temps réel en situation écologique (Gatteau, Durantin, Lancelot, Scannella & Dehais, 2015). Une perspective particulièrement intéressante est d'hybrider les deux techniques pour combiner les avantages de la bonne précision spatiale de la fNIRS et de définition temporelle de l'EEG tout en augmentant la précision de l'ICM. Enfin, l'utilisation de techniques d'oculométrie est également pertinente pour caractériser les états attentionnels de désengagement, de sur-engagement ou de in-engagement attentionnel en étudiant la balistique de l'œil (Dehais et al., 2015). Ainsi l'agrégation de l'ensemble de ces signaux en utilisant des techniques de classification formelle est une voie d'avenir pour mesurer le niveau d'engagement attentionnel d'un opérateur.

3 Conclusion

La recherche en Neuroergonomie est en pleine expansion. La littérature rapporte des performances prometteuses d'estimation d'états mentaux aussi bien en laboratoire qu'en situation de pilotage. Toutefois, il faut noter que Roy et collaborateurs ont mis en évidence des phénomènes d'interaction entre états mentaux pouvant rendre obso-

lètes certains marqueurs de charge mentale lorsque la fatigue des opérateurs augmente (Roy et al., 2013). Il semble donc primordial de concevoir des systèmes prenant en compte une grande quantité de marqueurs, mais aussi de développer des méthodes statistiques qui soient robustes à ces effets de non-stationnarité du signal physiologique. Enfin, bien que la plupart des études récentes rapportent des taux de classification d'états mentaux assez élevés, ces études se sont pour l'instant centrées sur des systèmes calibrés pour un individu seul et pour une session donnée. Il reste donc à déterminer comment rendre ces systèmes indépendants du sujet et de la session. Enfin un dernier point important réside dans le développement de techniques robustes pour éliminer les nombreux artefacts recueillis dans le signal neurophysiologique induits par le bruit électromagnétique du cockpit, l'infra-rouge ambiant ou le déplacement des capteurs sur la tête des pilotes. Une fois ces limites dépassées, il sera envisageable d'introduire ces technologies dans le cockpit à condition de les rendre acceptables pour les équipages. Aussi, l'intégration de ces technologies relève d'une approche pluridisciplinaire en neurosciences, traitement du signal, intelligence artificielle et ergonomie cognitive. C'est dans cet esprit qu'il sera possible de penser le cockpit intelligent.

Références

- Ayaz, H., Shewokis, P. A., Bunce, S., Izzetoglu, K., Willems, B., & Onaral, B. (2012). Optical brain monitoring for operator training and mental workload assessment. *Neuroimage*, 59, 36-47.
- BST. (2005). Sortie en bout de piste et incendie de l'Airbus A340-313 F-GLZQ exploité par Air France à l'aéroport international de Toronto/Lester B. Pearson (Ontario) le 2 août 2005.
- Callan, D., Durantin, G., & Terzibas, C. (2015). Classification of Single-Trial Auditory Events Using Dry-Wireless EEG During Real and Motion Simulated Flight. *Frontiers in Systems Neuroscience*, 9, 11.
- Dehais, F., Causse, M., & Tremblay, S. (2011). Mitigation of Conflicts with Automation Use of Cognitive Countermeasures. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 53(5), 448-460.
- Dehais, F., Peysakhovich, V., Scannella, S., Fongue, J., & Gateau, T. (2015). Automation Surprise in Aviation: Real-Time Solutions. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems* (p. 2525-2534). ACM.
- Durantin, G., Dehais, F., & Delorme, A. (2015). Characterization of mind wandering using fNIRS. *Frontiers in systems neuroscience*, 9.
- Durantin, G., Gagnon, J.-F., Tremblay, S., & Dehais, F. (2014). Using near infrared spectroscopy and heart rate variability to detect mental overload. *Behavioural brain research*, 259, 16-23.
- Gateau, T., Durantin, G., Lancelot, F., Scannella, S., & Dehais, F. (2015). Real-Time State Estimation in a Flight Simulator Using fNIRS. *PloS one*, 10(3).
- George, L., & Lécuyer, A. (2010). An overview of research on 'passive' brain-computer interfaces for implicit human-computer interaction. In *International Conference on Applied Bionics and Biomechanics ICABB 2010-Workshop W1 'Brain-Computer Interfacing and Virtual Reality'*.
- Hancock, P. A., & Verwey, W. B. (1997). Fatigue, workload and adaptive driver systems. *Accident analysis & prevention*, 29(4), 495-506.

- Harrivel, A. R., Weissman, D. H., Noll, D. C., & Peltier, S. J. (2013). Monitoring attentional state with fNIRS. *Frontiers in human neuroscience*, 7.
- LaBerge, D., Carter, M., & Brown, V. (1992). A network simulation of thalamic circuit operations in selective attention. *Neural Computation*, 4, 318-331.
- Nicolas-Alonso, L. F. & Gomez-Gil, J. (2012) Brain computer interfaces, a review. *Sensors*, 12 (2), 1211-1279.
- Parasuraman, R., Hancock, P. A., & Olofinboba, O. (1997). Alarm effectiveness in driver-centred collision-warning systems. *Ergonomics*, 40(3), 390-399.
- Parasuraman, R., Mouloua, M., & Hilburn, B. (1999). Adaptive aiding and adaptive task allocation enhance human-machine interaction. *Automation technology and human performance: Current research and trends*, 119–123.
- Parasuraman, R., & Wilson, G. F. (2008). Putting the brain to work: neuroergonomics past, present, and future. *Hum Factors*, 50, 468-74.
- Pecher, C., Quaireau, C., Lemerrier, C., & Cellier, J. M. (2010). The effects of inattention on selective attention: How sadness and ruminations alter attention functions evaluated with the Attention Network Test. *European Review of Applied Psychology*.
- Posner, M. I., & Dehaene, S. (1994). Attentional networks. *Trends in Neurosciences*, 17, 75-79.
- Roy, R. N., Bonnet, S., Charbonnier, S. & Campagne, A. (2013) Mental fatigue and working memory load estimation: Interaction and implications for EEG based passive BCI. *Int. IEEE Conf. Eng. Med. Biol. Soc.*, Osaka, Japan, 2013, July.
- Roy, R. N., Bonnet, S., Charbonnier, S., P. Jallon & Campagne, A. (accepted) A Comparison of ERP Spatial Filtering Methods for Optimal Mental Workload Estimation. *Int. IEEE Conf. Eng. Med. Biol. Soc.*, Milano, Italy, 2015, Aug.
- Takahashi, K., Ogata, S., Atsumi, Y., Yamamoto, R., Shiotsuka, S., Maki, A., ... Hirasawa, H. (2000). Activation of the visual cortex imaged by 24-channel near-infrared spectroscopy. *Journal of biomedical optics*, 5(1), 93-96.
- Tracy, J. I., Mohamed, F., Faro, S., Tiver, R., Pinus, A., Bloomer, C., ... Harvan, J. (2000). The effect of autonomic arousal on attentional focus. *Neuroreport*, 11, 4037.
- Wolpaw, J., Birbaumer, N., McFarland, D., Pfurtscheller, G. & Vaughan, T. (2002) Brain-computer interfaces for communication and control. *Clinical neurophysiology*, 113 (6), 767-791.