



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: 16203

To cite this version: Causse, Mickael and Dehais, Frédéric and Pastor, Josette
Marqueurs physiologiques du stress et modélisation de la persévération chez les pilotes. (2008) In: RJC-IHM'08, 13 May 2008 - 15 May 2008 (Cap d'Agde, France).

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

Marqueurs physiologiques du stress et modélisation de la persévération chez les pilotes

Mickaël Causse

Centre Aéronautique et Spatial
ISAE-SUPAERO; INSERM, U825,
Université de Toulouse. Toulouse,
F-31000 France
Mickael.causse@isae.fr

Frédéric Dehais

Centre Aéronautique et Spatial
ISAE-SUPAERO, Université de
Toulouse
Toulouse, France
Frederic.dehais@isae.fr

Josette Pastor

INSERM, U825, Toulouse, F-31000
France;
Université Paul Sabatier, Université de
Toulouse, Toulouse, F-31000 France.
josette.pastor@toulouse.inserm.fr

RESUME

Cet article est une présentation générale du contexte de la thèse et décrit brièvement les travaux en cours ou déjà réalisés.

70 à 80% des incidents aéronautiques trouvent leur explication dans l'erreur humaine. Parmi les causes d'erreur, le stress ressenti par l'équipage au cours de phases de vols très dégradées est facteur de « persévération », état dans lequel le pilote s'enferme dans des stratégies erronées. Un premier objectif est d'obtenir une meilleure compréhension de la dynamique des processus neuronaux sous-tendant la persévération au cours du pilotage grâce à une expérimentation en imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf). Un second objectif est de disposer de marqueurs physiologiques pertinents pour constituer un vecteur d'état en vue de détecter précocement le basculement du pilote vers cette situation, afin de réagir très tôt par des contremesures cognitives. Ces contremesures cognitives constituent l'objectif final.

MOTS CLES : Pilotage, Interaction Homme-Machine, Stress, Facteur humain.

INTRODUCTION

Les analyses révèlent que les responsabilités en cas d'accidents aériens sont attribuables à l'opérateur humain (pilote, contrôleur aérien etc.) dans 70 à 80 % des cas [1]. Des travaux expérimentaux menés en simulateur [2] ont permis de montrer que lorsque des pilotes sont confrontés à des situations difficiles et conflictuelles, ces derniers montrent une tendance à s'attacher à la résolution du problème initial, au détriment de la surveillance des paramètres vitaux de l'appareil et ce, en dépit des alarmes auditives et visuelles présentes dans le cockpit. Ce comportement, qui consiste à s'enfermer dans une stratégie erronée et à répéter de façon stéréotypées des réponses non pertinentes, en étant incapable d'aller chercher les indices externes qui permettraient de corriger l'erreur et ramener la situation à la normale, est connu par les spécialistes de l'aviation sous le terme de « fascination pour l'objectif » [3]. Un comportement très analogue observé notamment chez des patients cérébrolésés est désigné en neuropsychologie par le terme de « persévération », un des troubles observés dans le

« syndrome dysexécutif » qui touche un ensemble assez hétérogène de processus cognitifs de haut niveau permettant un comportement flexible et adapté au contexte.

STRESS, PRISE DE DECISION ET PERSEVERATION

La conduite d'un avion requiert des capacités de raisonnement qui sont assurées notamment par le cortex préfrontal pour traiter rationnellement les informations de pilotage, orienter l'attention du pilote ou mémoriser les données importantes. Le système limbique (siège des émotions) peut venir stimuler ce système « rationnel » préfrontal afin d'aider la prise de décision, le passage à l'action, la prise en compte d'information prioritaire (ex : alarme). Pourtant, le stress et l'émotion, facteurs utiles à l'adaptation [4], voire essentiel à la survie, devient rapidement, lors de situations critiques ou dégradées, un stress « de haut niveau » (i.e. non créé par une menace physique), facteur de dégradation des mécanismes attentionnels (effet tunnel), mais également de dégradation temporaire des fonctions exécutives (FE). L'observation de l'altération temporaire des FE sous l'effet du facteur stress [5] permettent d'avancer l'hypothèse d'un continuum cognitif entre le sujet sain aux performances optimales et le patient ou l'opérateur stressé [6]. Dans l'état actuel ce modèle reste avant tout très macroscopique : une description plus fine des mécanismes mis en jeu par les systèmes limbique et préfrontal constitue un socle théorique indispensable pour permettre de mettre au point des contremesures cognitives dans l'IHM adaptées au niveau de stress du pilote. Le stress ou l'émotion génèrent des modifications importantes du système nerveux autonome (SNA) et vont avoir des effets sur la pression artérielle, le rythme cardiaque ou le diamètre pupillaire [7, 8] La prise en compte du vecteur de l'état émotionnel du pilote issu des différentes mesures physiologique viendra alimenter un système déjà existant (formalisme de Pétri) de détection automatique de conflits (ex : mauvaise compréhension par l'équipage de l'état du pilote automatique) [2]. Une situation de vol particulièrement critique est l'atterrissage, les raisons en sont décrites dans la partie suivante.

L'ATTERRISSEMENT : SITUATION « PERSEVEROGENE »

C'est lorsque l'avion est près du sol que les occurrences d'accidents sont les plus nombreuses : la charge de travail et

le stress de l'équipage sont élevées et la marge de manœuvre pour compenser une erreur est extrêmement faible. Les études statistiques menées par le bureau d'études (BEA) montrent que plus de la moitié des accidents surviennent lors de l'atterrissage, phase parmi les plus sensibles et extrêmement coûteuse en ressources cognitives et attentionnelles. Ces assertions sont largement corroborées par les observations de la modification de certains paramètres physiologiques tels que le rythme cardiaque [9].

La cause de nombreux crashes au cours de l'atterrissage réside dans la persistance de l'équipage dans une décision d'atterrir alors qu'une remise de gaz est nécessaire, afin de tenter à nouveau une approche mieux stabilisée ou de se détourner sur un aéroport aux conditions météorologiques plus favorables. Une hypothèse permettant d'expliquer ces faits réside dans l'effet du stress et/ou de l'émotion sur les FE. Indéniablement, la situation d'atterrissage, potentiellement dangereuse, génère une émotion ou un stress rendant très difficile l'inversion de la stratégie en cours, c'est à dire l'inhibition pure et simple de l'action d'atterrir. En effet, comme le souligne Berthoz [10], décider, c'est inhiber les solutions inadaptées, or le stress peut venir perturber notre capacité à inhiber une action.

Une étude de Rhoda et Pawlak [11] portant sur 2000 approches apporte un éclairage complémentaire. Cette recherche montre que 2/3 des équipages persévèrent dans leur décision d'atterrir alors que plusieurs paramètres de sécurité minimums ne sont pas respectés (météo, état de l'aéronef etc.), ce qui nécessite selon la législation une remise des gaz pour soit effectuer une nouvelle approche, soit se détourner vers un aérodrome plus sûr. Parmi les facteurs rentrant en jeu dans la persévération on peut noter l'engagement : plus l'incident (panne, météo dégradée) se produit à proximité de l'aérodrome, plus il est difficile de renoncer à atterrir ; la pression économique : une remise des gaz coûte extrêmement cher aux compagnies (logistique et kérosène) ; la soumission : le copilote n'ose pas contredire le chef pilote qui prend une mauvaise décision ; le facteur psychologique : la remise des gaz est vécue comme une défaite et une honte [12]. Le spectre des différentes situations négatives/aversives pouvant émaner de la remise des gaz conjugué au stress de l'atterrissage conduit les pilotes à bien souvent trancher en faveur de la décision de poursuivre l'atterrissage, parfois au prix d'un risque important. Ces différents facteurs émotionnels intervenant au cours de l'atterrissage constituent l'objet d'étude d'une future expérimentation en IRMf, elle est détaillée ci-dessous.

METHODE

Etude en IRM fonctionnelle : nature aversive de la remise des gaz

Une étude en IRMf impliquant une douzaine de participant sera très prochainement réalisée. Elle vise à mieux comprendre les mécanismes cérébraux (émotionnels et cognitifs notamment) sous tendant les prises de décision lors de la phase d'atterrissage.

La décision de s'en tenir à un atterrissage extrêmement risqué, en contradiction totale avec les différents indicateurs

prévenant d'un danger potentiel est un exemple édifiant de comportement non rationnel. La faible probabilité d'un crash, la pression temporelle ainsi que les conséquences négatives immédiates d'une remise des gaz, pousse bien des pilotes à prendre un très gros risque.

Nous concevons actuellement une tâche reproduisant de façon simplifiée la phase d'atterrissage, sans aucune visibilité extérieure, où l'un des uniques moyens supportant la décision d'atterrir ou non est l'ILS (instrument landing system). L'ILS comprend 2 éléments : un *localizer* qui fournit l'écart de l'avion par rapport à l'axe de la piste ; un *glide path* qui fournit l'écart de l'avion par rapport à la pente nominale d'approche. Ces deux informations sont fournies sous forme de losanges sur 2 échelles, l'une horizontale, l'autre verticale, situées de part et d'autre de l'horizon artificiel.

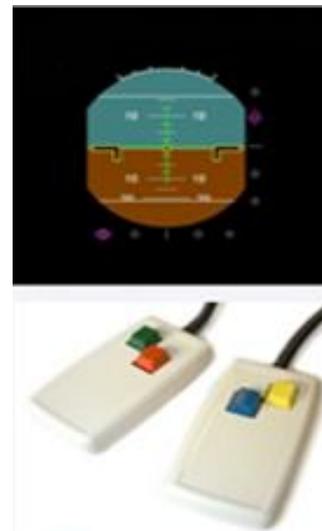


Figure 1 : Le PFD (primary flight display) avec l'ILS version simplifiée utilisé pour l'expérimentation IRMf. Les 2 boîtiers de commande permettent de choisir d'atterrir ou non

Les sujets se voient présentés les stimuli visuels dans l'IRM au moyen d'un miroir angulaire et ils effectuent la tâche pendant que leurs activations cérébrales sont enregistrées. Différentes positions de losanges, plus ou moins ambiguës sont présentées (cf. fig. 1). Précisément, la tâche consiste à décider pour chaque situation, si l'atterrissage est possible (go) ou si au contraire une remise des gaz s'impose (no-go) car elle est jugée trop risquée au vue de la position des losanges. Il existe des situations plus ou moins ambiguës: évidence de la nécessité de remettre les gaz ou d'atterrir vs. ambiguïté de la situation. Le stress de la situation est recréé par la pression temporelle exercée par la rapidité dans laquelle doivent s'effectuer les décisions. Un système monétaire vient également ponctuellement perturber la prise de décision par des incitations à atterrir et des punitions monétaires en cas de remise des gaz. Les situations aversives rencontrées au cours d'une remise des gaz sont reproduites par une punition financière systématiquement administrée, en effet, même une remise des gaz justifiée est vécue très négativement par l'équipage, mais aussi par toute la chaîne de production et la compagnie. En re-

vanche, un atterrissage réussi est récompensé par une somme d'argent.

Mesures du système nerveux végétatif

Actuellement, nous menons d'autres études pour déterminer les indices physiologiques pertinents afin de constituer un vecteur d'état physiologique représentatif du niveau de stress du pilote. Les précurseurs fiables (en termes de sensibilité et de spécificité) de la persévérance sont en cours de détermination. Des données préliminaires ont d'ores et déjà été recueillies au travers de deux études. 1) Une étude en laboratoire portant sur le stress suscité par des avatars et leur impact sur les performances cognitives à des tests neuropsychologiques a montré la bonne sensibilité au stress « psychologique » de la pression artérielle et du diamètre pupillaire [13]. Dans cette étude, lors de certaines émotions exprimées par les avatars (par la prosodie du discours et les expressions faciales) qui commentaient les décisions prises par les participants, les performances de ces derniers se voyaient modifiées en cooccurrence avec la variation de paramètres physiologiques montrant ainsi le lien entre émotion et cognition mais aussi entre émotion et système nerveux végétatif. 2) Nous avons également réalisé à l'aérodrome de Lasbordes une étude In Situ, grâce à un eye-tracker embarqué à bord d'un Aquila AT01 (cf. fig. 2).

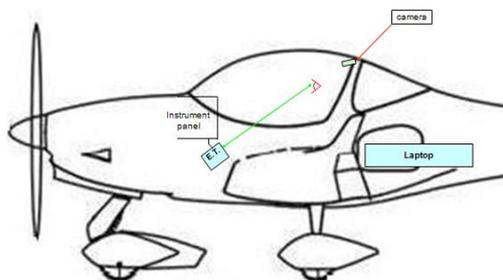


Figure 2 : L'eye tracker est fixé sous le cockpit. Les données oculométriques et vidéo sont enregistrées en temps réel.

Dans cette expérimentation, les mesures, effectuées pendant la nuit aéronautique (pour éviter les perturbations dues à la luminosité) ont montré la faisabilité de reproduire en situation réelle des études classiquement accomplies sur simulateur. D'une part en obtenant des données sur la prise d'information du pilote au niveau du cockpit mais également en obtenant des informations sur le SNA au travers du diamètre pupillaire. En particulier, des patterns visuels différents ont été trouvés en fonction des phases de vol (décollage, check-list, vent arrière etc.), et un diamètre pupillaire moyen plus important (en rapport à l'état de base) a été observé au cours d'une simulation de panne, permise par une coupure moteur volontaire.

Ultérieurement, le choix des paramètres physiologiques à intégrer au modèle du vecteur d'état du pilote sera guidé par la fiabilité de la détection, mais aussi par l'acceptabilité de la méthode et la possibilité d'en faire une version embarquée [14].

CONTREMESURES IHM

Traditionnellement, c'est l'envoi d'alarmes visuelles ou sonores qui permet de prévenir ou d'attirer l'attention des pilotes sur une panne d'un système ou sur un événement important ; c'est-à-dire que l'on ajoute de l'information dans le cockpit. Or ce principe montre ses limites et n'est d'un effet que très limité lorsque les pilotes persévèrent. De nombreux rapports d'événements aériens confirment cette tendance et parmi des analyses du B.E.A. [15], on trouve de très nombreux cas de non compréhension ou de non prise en compte d'informations apportées par les systèmes automatiques, situations dues en partie au fait que les pilotes n'ont pas porté attention aux alarmes qui les prévenaient d'une évolution du mode de pilotage automatique. Différentes contremesures cognitives implémentées dans les IHM de cockpit ont été explorées dans le cadre des facteurs humains. Ainsi Previc [16] a mis au point des recommandations neuropsychologiques pour la conception de cockpit permettant une conscience de la situation améliorée, une meilleure flexibilité motrice et un stress cognitif réduit. Ces travaux visent notamment à rendre l'interface de l'aéronef compatible avec le fonctionnement du cerveau. D'autres études mettent l'accent sur la transmission d'informations ne nécessitant pas de traitement cognitif grâce à la multimodalité [17]. Récemment, des contremesures reposant sur l'idée d'un retrait d'information et l'affichage d'un stimulus textuel [9] ou visuel adapté au stress du pilote (i. e. pas de décodage complexe requis) a été testé. Son principe en est le suivant :

- il est ciblé, c'est-à-dire que l'information (ex : cadrans) sur laquelle le pilote persévère est enlevée ;
- il s'intercale avec l'envoi d'un stimulus visuel d'alerte ;
- il est momentané, puisque la suppression ne dure que quelques instants.

L'objectif suivi est de briser la persévérance en retirant l'objet de l'obnubilation du pilote, puis d'envoyer un message détaillant très simplement l'action à entreprendre pour rétablir la situation à la normale.

La localisation du champ visuel s'effectue par une connaissance experte sur les zones de prise d'information spécifique des pilotes en fonction des phases de vol (ex : modèle d'activité de pilotage) ; soit en utilisant un moyen en temps réel de détermination de la zone de vision fovéale (ex : eye tracker). Posner [18] propose que l'attention repose sur un mécanisme antagoniste d'accrochage et de décrochage. On peut postuler que les opérateurs qui persévèrent ne sont pas sensibles aux alarmes ou ont du mal à trouver de l'information pertinente puisqu'ils sont incapables de décrocher volontairement leur attention de la tâche qui les accapare pour accrocher de nouveaux stimuli. Le principe des contre-mesures par retrait d'information est de pallier cela en faisant décrocher l'interface à la place des pilotes : l'information sur laquelle se focalise le pilote est supprimée puis est remplacée par un message pertinent pour le pilotage. Différents types de contremesures seront testés afin de vérifier leur capacité à faire décrocher l'attention focalisée. Elles seront notamment inspirées d'études réalisées dans le cadre des IHM émotionnelles et également de théories portant sur les représentations de l'action. L'objectif final étant

l'utilisation de ces contremesures dans des IHM intelligentes, capables de réagir automatiquement en fonction du vecteur d'état du pilote.

CONCLUSION

L'apparition de très gros porteurs tels que l'airbus A380 pouvant emporter jusqu'à 800 passagers pose la question de l'ampleur du coût en terme de vie humaine, de futures catastrophes aériennes. Nous faisons l'hypothèse que l'état émotionnel du pilote peut être un bon indicateur du conflit du pilote avec son environnement humain ou matériel et que, parfois, il peut même précéder la mise en œuvre d'actions incohérentes avec l'état des systèmes embarqués. Les variations physiologiques du système nerveux autonome liées au stress pourraient constituer un véritable vecteur d'état du pilote. Les points essentiels de nos études s'articulent autour de :

- La production de données en neuro-imagerie pour observer en temps réel les interactions entre système limbique et cortex préfrontal au cours de situations avec facteur émotionnel simulé pour mieux cerner les mécanismes cérébraux sous tendant l'entrée dans l'état de persévération
- La définition d'un modèle physiologique de la persévération pour permettre la détection très précoce d'indices de l'état du pilote à l'aide d'outils de mesure du système nerveux végétatif installé au sein des aéronefs
- La définition de contre-mesures cognitives efficaces s'intégrant dans l'IHM, permettant d'outrepasser les limites bien connues des alarmes actuelles, incapables de transmettre de l'information aux pilotes en état de persévération.

BIBLIOGRAPHIE

1. Veillette, P. (2001). *Human error cited as major cause of U.S. commercial EMS helicopter accidents*. Flight Safety Digest, 2001.
2. Dehais, F., Tessier, C. L., Chaudron. "GHOST: experimenting conflicts countermeasures in the pilot's activity", in IJCAI, Acapulco, Mexique, 2003.
3. BEA. *Objectif : destination*. Technical report, Bureau Enquête Accident, 2000.
4. Selye, H. *The Physiology and Pathology of Exposure to Stress*. Acta Inc., Montreal, 1950.
5. Waldstein, S. R., Katzel, L. I. *Stress-induced blood pressure reactivity and cognitive function* *Neurology*, May 24, 2005; 64(10): 1746 - 1749.
6. Pastor, J. "Raisonnement et mécanismes cérébraux sous-jacents: une approche par l'Intelligence Artificielle". Habilitation à Diriger les Recherches, Université Rennes I, 1999.
7. R.J. Mumaw, N.B. Sarter, C.D. Wickens, *Analysis of pilots' monitoring and performance on an automated flight deck*. Proceedings of the 11th biennial meeting of the International Symposium on Aviation Psychology, Columbus, 2001.
8. P. Kasarskis, J. Stehwien, J. Hichox, A. Aretz, C. Wickens, "Comparison of expert and novice scan behaviors during VFR flight," 11th International Symposium on Aviation Psychology, 2001.
9. Lee, Y-H, Liu, B-S. *Inflight workload assessment: comparison of subjective and physiological measurements*. *Aviat Space Environ Med*; 74:1078-84, 2003.
10. Berthoz, A. *La Décision*, Odile Jacob, 2003
11. D. Rhoda et M. Pawlak. *An assessment of thunderstorm penetrations and deviations by commercial aircraft in the terminal area*. Technical report, M.I.T, 1999.
12. Beauvois, J., Joule, R. *A radical point of view on dissonance theory*. In E. Harmon-Jones et J. Mills, editors, *Cognitive Dissonance : Progress on a Pivotal Theory in Social Psychology*. Washington DC, A.P.A, 1999.
13. Causse, M., Pavard, B., Sénard, J-M., Démonet, J-F., Pastor, J. *Emotion Induction through Virtual Avatars and its Impact on Reasoning: Evidence from Autonomous Nervous System Measurements and Cognitive Assessment*. VRIC'06, Laval, France, 18-20 Avril, 2007.
14. Dehais F., Causse M., Pastor J. *Embedded eye tracker in a real aircraft: new perspectives on pilot/aircraft interaction monitoring*. 3rd International Conference on Research in Air Transportation. ICRAT 2008. Fairfax, Virginia, USA, 2008 (soumis).
15. BEA (2003). *Incidents et pilote automatique*. Technical report, Bureau Enquête Accident.
16. Previc, F.H. *Brain Res Rev* 28: 118-135. *Neuropsychological guidelines for aircraft control stations*. *IEEE Eng Med Biol Mag* 19, 2000.
17. Sarter, N.B. *Multimodal Information Presentation In Support of Human-Automation Communication and Coordination*. In Eduardo Salas (Ed.), *Advances in Human Performance and Cognitive Engineering Research* (pp. 13-36). New York, NY: JAI Press, 2002.
18. M. Posner. *Psychobiology of attention*. Editor, *Handbook of psychobiology*, New York, 1975