



HAL
open science

Analyse d'indicateur d'attitude pour l'instruction au pilotage d'avion

Hélène Gaspard-Boulinç, Denis Louviot, Thomas Paques, Stéphane Conversy

► **To cite this version:**

Hélène Gaspard-Boulinç, Denis Louviot, Thomas Paques, Stéphane Conversy. Analyse d'indicateur d'attitude pour l'instruction au pilotage d'avion. Actes de la 28ième conférence francophone sur l'Interaction Homme-Machine, Oct 2016, Fribourg, Suisse. pp.252-258, 10.1145/3004107.3004135 . hal-01384299

HAL Id: hal-01384299

<https://hal.science/hal-01384299>

Submitted on 19 Oct 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Figure 1: Dans un cockpit d'avion léger type TB20 (en haut), les jauges analogiques (au milieu) sont remplacées par le Primary Flight Display (en bas)

Analyse d'indicateur d'attitude pour l'instruction au pilotage d'avion

Hélène Gaspard-Boulinc

Université de Toulouse - ENAC
31055, Toulouse, France
helene.gaspard-boulinc@enac.fr

Denis Louviot

Université de Toulouse - ENAC
31055, Toulouse, France
denis.louviot@enac.fr

Thomas Paques

Université de Toulouse - ENAC
31055, Toulouse, France
thomas.paques@alumni.enac.fr

Stéphane Conversy

Université de Toulouse - ENAC
31055, Toulouse, France
stephane.conversy@enac.fr

Résumé

L'indicateur d'attitude est utilisé en formation initiale au pilotage d'avion pour quantifier les valeurs d'assiette et d'inclinaison requises ou limites acceptables. Une version numérique de cet instrument, le *Primary Flight Display* (PFD), devient accessible à tous les pilotes, apprentis et amateurs, volant à vue. A l'aide de modèles de description des interfaces, nous analysons différents types de représentation pour une tâche de mise en virage et de maintien d'une inclinaison. Nous constatons que le parcours visuel des PFDs actuels ne facilite pas cette tâche.

Mots Clés

Indicateur d'attitude; instruction ; pilotage d'avion ; parcours visuel.

Abstract

The attitude indicator is used during the ab-initio aircraft pilot training to quantify the angles of pitch and bank with a required precision or acceptable limits. An electronic version of this instrument, the *Primary Flight display* (PFD), is becoming available to any pilot, trainee or amateur, in visual flight conditions. With the help of descriptive models of interfaces, we analyse different types of representation for a task of turn maneuver and constant pitch. We find that the current PFDs do not ease this task.

© ACM, 2016. This is the author's version of the work. It is posted here by permission of ACM for your personal use. Not for redistribution. The definitive version was published in Actes de la 28ème conférence francophone sur l'Interaction Homme-Machine, 2016.
<http://dx.doi.org/10.1145/3004107.3004135>



Figure 2: indicateur d'attitude horizon-mobile

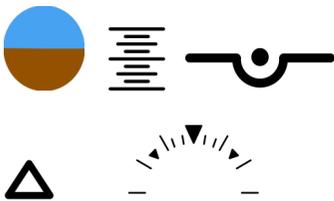


Figure 3: éléments graphiques

L'usage combiné de l'horizon, de la maquette avion et de l'échelle d'assiette fournit l'information d'assiette. Quand l'avion cabre, la couche inférieure contenant l'horizon s'abaisse pour refléter la position apparente de l'horizon réel vu par le pilote (passage de  à ). La lecture de l'assiette se fait sur l'échelle linéaire d'assiette, par le point matérialisant le milieu de la maquette avion .

Author Keywords

Attitude indicator; training; aircraft flying ; visual scanning.

ACM Classification Keywords

H.5.m. Information interfaces and presentation (e.g., HCI): Miscellaneous;

Introduction

Les cockpits des avions sont équipés d'instruments pour le pilotage. En particulier, l'indicateur d'attitude fournit au pilote les informations sur l'attitude de l'avion dans l'espace selon les 3 axes (inclinaison « droite-gauche », assiette « cabré-piqué », symétrie « flanc gauche-flanc droit »). L'indicateur d'attitude est considéré comme primordial pour garder le contrôle de l'avion dans des conditions de faible visibilité, mais il est aussi utilisé en formation initiale au pilotage pour quantifier, durant certaines phases de vol, les valeurs d'assiette et d'inclinaison requises ou limites acceptables.

Auparavant gyroskopique, une version numérique de cet instrument, le *Primary Flight Display* (PFD), a été conçue pour les avions commerciaux dans les années 80. Avec la diminution du coût, du poids et de la consommation des instruments numériques, les PFD se généralisent dans l'aviation légère. Ainsi, le PFD jusqu'ici réservé aux pilotes professionnels volant aux instruments, devient accessible à tous les pilotes, apprentis et amateurs, volant à vue (Figure 1).

Dans ce contexte de généralisation du PFD, notre problématique est de reconsidérer sa conception, afin de sécuriser la prise d'informations par des apprentis pilotes de l'attitude de l'avion, en évolutions normales et surtout en récupération de positions inusuelles tout en limitant la charge mentale de travail. En effet, des études et enquêtes ont

montré que certaines pertes de contrôle sont liées à une mauvaise interprétation des informations fournies par le modèle dominant d'Horizon Artificiel ou de PFD et conduisent trop souvent à des issues catastrophiques [11]. L'étude est donc pertinente pour l'amélioration de la sécurité aérienne, dans le contexte de la campagne LOCI (Lost Of Control In flight) de l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale.

Dans cet article, nous présentons une analyse des interfaces existantes, réalisée à l'aide de deux cadres théoriques, le cycle de l'action de Norman [10] et l'analyse du parcours visuel ScanVis [2]. Ces cadres théoriques ainsi qu'un état de l'art sur la conception de l'indicateur d'attitude dans les cockpits nous permettent d'identifier les points forts et les points faibles des interfaces existantes dans un contexte d'apprentissage. Cette analyse nous permet de formuler des exigences d'utilisabilité pour une nouvelle interface d'affichage des informations primaires de vol.

Description des indicateurs d'attitude

Les types d'indicateurs diffèrent par les informations effectivement fournies, les éléments graphiques utilisés, ainsi que la disposition et la mobilité de ces éléments.

Horizon mobile : inclinaison et assiette

La première génération d'instrument physique d'indicateur d'attitude a été conçue comme une copie réduite (« comme à travers un hublot ») de ce que le pilote aurait vu de l'extérieur si la visibilité était suffisante (Figure 2). L'affichage de l'inclinaison et de l'assiette se fait à l'aide de 3 couches et de 5 éléments graphiques (Figure 3). Une couche contient l'« horizon artificiel » , l'échelle d'assiette linéaire  et un pointeur  au-dessus de cette échelle (ce qui donne ). La couche immédiatement au-dessus (translucide) contient la



Figure 4 : indicateur d'attitude maquette-avion mobile



Figure 5 : indicateur de symétrie

Ce petit élément discret se déplace de gauche à droite exactement comme la bille dans son tube.

« maquette avion » . Elle représente les deux ailes de l'avion. Enfin la couche supérieure contient un cadran circulaire contenant l'échelle d'inclinaison radiale autour du cadran . Seule la couche du fond est mobile. Comme cette couche contient l'horizon, nous qualifions ce type d'indicateur « d'horizon mobile ». La couche de la maquette avion est fixe . L'usage combiné de l'horizon artificiel, du pointeur et de l'échelle d'inclinaison fournit l'information d'inclinaison. Quand l'avion s'incline à gauche, la couche inférieure contenant l'horizon bascule à droite de manière à refléter l'inclinaison apparente de l'horizon réel vu par le

pilote (passage de  à ). La lecture de l'inclinaison se fait sur l'échelle radiale d'inclinaison, dans le prolongement du pointeur au-dessus de l'échelle d'assiette .

Un autre indicateur d'attitude utilise une philosophie différente (Figure 4), que nous qualifions « de maquette-avion mobile ». Les représentations (Figure 3) et les couches sont similaires. La mobilité des couches est différente. La couche du fond subit une seule rotation autour de l'axe des ailes, la couche intermédiaire contenant la maquette avion subit une rotation autour de l'axe de la carlingue, alors que la couche supérieure contenant l'échelle d'inclinaison est fixe. Ainsi, quand l'avion s'incline à gauche, la couche inférieure contenant l'horizon reste fixe . La couche de la maquette avion s'incline à gauche de manière à refléter l'inclinaison de l'avion par rapport à un horizon fixe, comme si le pilote

voyait l'avion de derrière (passage de  à ). La couche supérieure contenant le cadran est fixe . La lecture de l'inclinaison se fait sur l'échelle radiale d'inclinaison, dans le prolongement de l'aile de la maquette avion .

Symétrie

Dans les instruments analogiques, l'information de la symétrie ou dissymétrie du vol (rotation autour de l'axe de lacet) est fournie par un autre instrument, la « bille » (en bas de la Figure 2). La bille figure le déplacement du centre de gravité de l'appareil, montrant ainsi l'écart entre la trajectoire et l'axe du fuselage en cas de dérapage. Sur les PFD, l'indication de symétrie est représentée par un petit trapèze placé sous le pointeur triangulaire qui se trouve au sommet de l'échelle d'assiette et indique la valeur d'inclinaison (Figure 5).

Etat de l'art

Nous présentons un état de l'art sur la conception et l'évaluation des indicateurs d'attitude selon deux axes : la représentation de l'information et le coût d'accès à l'information.

Représentation de l'information : Horizon ou maquette mobile ?

De nombreuses études de psychologie expérimentale ont été menées entre les années 1940 et 1970 dans un but de comparaison entre les deux concepts d'indicateur d'attitude, afin de déterminer ce qui doit bouger : la maquette ou l'horizon [9]. Ces études sont motivées par le constat d'erreurs d'interprétation de l'attitude de l'avion par les pilotes utilisant le concept « horizon mobile », notamment sur le sens du virage (roll reversal error) [7]. Toutes les études [9] [12] discernent les pilotes novices des pilotes expérimentés, et se placent dans un contexte de vol aux instruments. Pour les pilotes novices, elles constatent que l'apprentissage est plus rapide avec l'indicateur « maquette-avion mobile » ainsi qu'une réduction des erreurs d'inversion allant de 17% à 80% selon les conditions expérimentales. Les pilotes expérimentés ont les mêmes performances sur le

contrôle de l'avion avec les deux types d'instruments. Cependant, ils montrent une grande facilité à passer de l'horizon mobile à la maquette mobile. Malgré ces résultats, la domination commerciale des constructeurs occidentaux et la crainte de difficultés liées au changement des habitudes des pilotes ont contribué à la généralisation de la logique « horizon mobile », reprise dans la version numérique, le Primary Flight Display.

Coût d'accès à l'information : quel compromis entre proximité spatiale et encombrement visuel ?

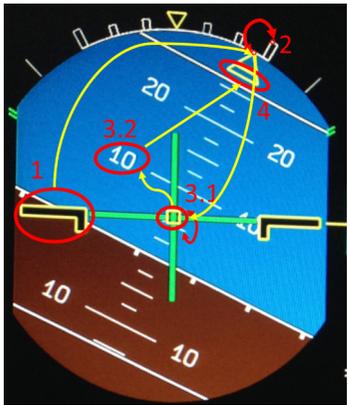
En plus des informations d'attitude, le Primary Flight Display intègre des informations d'altitude, de vitesse et de cap. Cette intégration sur un seul écran se justifie par le principe de proximité spatiale réduisant le coût d'accès à l'information pour l'utilisateur d'une interface [13]. Cependant, la proximité spatiale peut impliquer un encombrement visuel et avoir un effet négatif sur le coût d'accès à l'information. Par exemple, s'il y a superposition d'objets, ils peuvent être difficiles à discriminer. Ou si l'objet pertinent est noyé dans un environnement visuel chargé, sa localisation peut prendre plus de temps [13]. La conception des instruments de vol est guidée par un coût minimal d'accès à l'information par les pilotes. Par conséquent, la recherche d'un compromis entre proximité spatiale et encombrement visuel est centrale dans la conception des PFD [14]. La revue de littérature réalisée par [5] montre que de nombreuses études expérimentales ont été récemment menées aux Etats-Unis pour déterminer l'effet de l'encombrement visuel du PFD (classique ou en tête haute, c.-à-d. projection des informations primaires de vol sur un verre optique) sur la performance du contrôle de l'avion. Ces études montrent des résultats mixtes quant à l'effet de l'encombrement visuel sur la performance de pilotage, du fait d'une définition non homogène de l'encombrement visuel [5]. Cependant, plusieurs études

expérimentales montrent qu'un écran ayant un encombrement faible manque d'informations de contexte utilisées pour anticiper le comportement de l'avion. Au contraire, un écran ayant beaucoup d'informations est visuellement chargé et complexifie le parcours visuel du pilote pour la recherche des groupes d'informations nécessaires pour la tâche. Le niveau de charge mentale de travail est minimale pour l'écran ayant un encombrement modéré comparativement aux écrans ayant un encombrement faible ou élevé [1] [6][8]. Les chercheurs étudiant les affichages en tête haute [14] définissent l'encombrement visuel comme l'interférence des symboles de l'affichage avec la vue extérieure. Dans cette étude, la performance de pilotage est améliorée grâce à une fonction de guidage proposée via l'affichage d'un tunnel à suivre, donc un écran plus encombré. Cependant, l'analyse du scanning visuel des pilotes montrent une attention visuelle focalisée sur l'affichage la moitié du temps, et rarement sur le monde extérieur.

A notre connaissance, les études expérimentales se centrent sur l'utilisation des indicateurs d'attitude dans des conditions de vol sans visibilité extérieure. Le contexte de l'apprentissage du vol à vue, avec lecture instrumentale, n'a pas été étudié. Nous proposons donc d'étudier ce contexte, dans l'objectif de concevoir un indicateur d'attitude ayant le juste encombrement pour les tâches à réaliser avec cet instrument, tout gain sur la charge mentale nécessaire à l'acquisition des informations d'attitude pouvant être alloué à d'autres tâches.

Méthode

Notre méthode s'appuie sur la combinaison d'expertises opérationnelles et de cadres théoriques de l'IHM.



0 : (non représentée sur la figure) : L'utilisateur passe de l'extérieur à l'instrument (*entrer dans la représentation*)

1- L'utilisateur veut vérifier le sens du virage : il regarde la position du bout de l'aile de la maquette avion (*chercher*) par rapport à l'horizon artificiel (*décoder et vérifier un prédicat*).

2- L'utilisateur veut lire la valeur de l'inclinaison : il cherche la position du curseur triangulaire et le situe par rapport à la graduation la plus proche ainsi que la taille de cette graduation (*chercher et naviguer parmi un sous-ensemble de marques*).

Figure 6: analyse ScanVis

Expertises opérationnelles

L'expertise d'un pilote instructeur et concepteur de la progression pédagogique de la formation de pilote a permis d'identifier un scénario pertinent à étudier : l'apprentissage de la mise en virage. En apprentissage initial du pilotage, cette séquence est exécutée de façon rigoureuse et scandée, de façon à ce que toutes les phases d'observation, d'action de pilotage et de lecture instrumentale soient effectuées correctement et dans le bon ordre. La maîtrise de la mise en virage est essentielle car elle intervient dans les phases de décollage et d'approche. De plus, les pertes de contrôle ont souvent lieu en virage. En complément des séances de travail avec l'expert, nous avons exploité des interviews réalisées auprès de 5 pilotes-instructeurs avion et 4 pilotes-instructeurs hélicoptère dans le contexte de projets sur l'aviation électrique.

Cadres d'analyse : cycle de l'action et ScanVis

Nous avons choisi d'utiliser le cycle de l'action de Norman [10] comme dans [3], car il constitue un cadre adéquat pour comprendre et décomposer les actions humaines dans un environnement évolutif. En complément, nous avons utilisé le cadre de description du parcours visuel ScanVis, afin de décomposer plus finement les actions de prise d'informations sur l'interface [2]. A l'instar de Keystroke-Level Model, ScanVis repose sur la décomposition du parcours visuel en opérations visuelles élémentaires [4] : mémoriser, naviguer, vérifier un prédicat, chercher et naviguer, décoder, entrer et sortir de la représentation.

Les deux cadres d'analyse ont servi de base pour conduire une dizaine de séances de travail avec le pilote-instructeur expert. Les décompositions présentées dans le paragraphe suivant sont le résultat de ces séances et ont été validées par le pilote expert.

Analyse du scénario d'apprentissage de la mise en virage

Nous avons identifié trois cycles d'action successifs pour atteindre l'objectif de la mise en virage avec une exécution automatique sécuritaire :

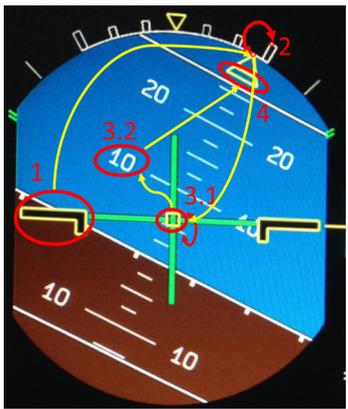
1^{er} cycle, le but est de **débuter** le virage à gauche ;

2^e cycle, le but est de **stabiliser** le virage ;

3^e cycle, le but est de **calibrer** l'inclinaison du virage.

Les deux premiers cycles se caractérisent par une consigne de l'instructeur de non utilisation de l'indicateur d'attitude pour l'évaluation des actions. Les conditions de vol à vue exigent que le pilote assure une vigilance constante sur l'extérieur, par rapport à des obstacles ou du trafic environnant. L'instructeur apprend à l'élève à d'abord utiliser d'autres signifiants pour contrôler l'avion que les symboles affichés sur le PFD. Cependant, lors des interviews réalisées, les instructeurs reportent la tendance des élèves à regarder l'écran pour l'évaluation de leurs actions plutôt que l'extérieur. L'écran occupe de fait une place centrale devant l'élève, et attire l'attention par plusieurs animations (l'horizon bascule, la vitesse défile, et potentiellement l'altitude aussi). Pour contrer cette tendance à regarder l'écran, la pratique des instructeurs est de le cacher avec une feuille ou des post-it.

L'utilisation de l'instrument n'est préconisée par l'instructeur que sur le 3^e cycle. L'instructeur donne une consigne de calibration du virage à 30°. Le cycle de l'action met en évidence une alternance d'observation extérieure et de lecture des valeurs instrumentales de la part du pilote, passant ainsi de la vision périphérique à la vision centralisée



3 - L'utilisateur veut lire la valeur de l'assiette :

3.1 il regarde la forme des deux graduations les plus proches du milieu de la croix (*chercher et naviguer parmi un sous-ensemble de marques*)

3.2 il regarde la position du milieu de la croix par rapport à la grande graduation la plus proche ainsi que la valeur de cette grande graduation (*deviner une position sans marque*)

4 - L'utilisateur veut lire l'écart de symétrie : il regarde le décalage entre le curseur triangulaire et le témoin trapézoïdale (*décoder une marque et vérifier un prédicat*).

d'une indication précise au sein d'un environnement instrumental chargé. Les opérations d'entrée-sortie de l'interface PFD vers l'extérieur sont continues et exigent une prise d'informations la plus performante possible.

En complément, la décomposition ScanVis (Figure 6) révèle qu'il ne s'agit pas seulement de lire la valeur de l'inclinaison, mais de vérifier également les autres éléments de l'attitude de l'avion dans l'espace, l'assiette et la symétrie. Pour passer de la tâche 1 (vérifier le sens du virage) à la tâche 2 (lire la valeur de l'inclinaison), le pilote doit parcourir la moitié de son écran pour revenir dans la zone de la tâche 3 (lire la valeur de l'assiette). La tâche 2 ne respecte pas le principe de compatibilité entre le contrôle et l'affichage : la quantité du virage à gauche se lit à droite. La tâche 3.1 demande de deviner la position du centre de la croix par rapport aux traits horizontaux, avec des chiffres orientés dans le sens inverse à la rotation de l'avion. La méthode de visualisation de la tâche 4, suffisante pour les avions lourds, est beaucoup trop discrète pour une information qui est essentielle dans le pilotage des avions légers. En effet, les écarts de symétrie, liés à une mauvaise coordination de pilotage ou à des turbulences extérieures auxquelles ils sont plus sensibles, peuvent conduire dans certaines phases de vol (notamment en vol lent, en montée ou en approche) au risque de perte de contrôle ou de départ en vrille dans les cas extrêmes. Enfin, nous observons que la plupart des tâches sont de type « chercher et naviguer parmi un sous-ensemble de marques », qui est consommatrice en temps et concentration.

Nous proposons de faire la synthèse des analyses réalisées sous la forme des exigences d'utilisabilité suivantes :

(1) Afin de vérifier grossièrement l'attitude de l'avion lors de la mise en virage, le PFD doit permettre à l'élève pilote de visualiser un horizon artificiel cohérent avec l'horizon réel visible à l'extérieur d'un simple coup d'oeil (performance 1 seconde).

(2) Afin de vérifier finement l'attitude de l'avion, tout en assurant la sécurité vis-à-vis de l'environnement extérieur, le PFD doit permettre à l'élève pilote de (2.1) lire la valeur de l'inclinaison du virage de façon cohérente avec le sens du virage (2.2) lire la valeur de l'assiette de façon lisible à n'importe quelle inclinaison (2.3) détecter un écart de symétrie le plus rapidement possible, cette séquence devant être réalisée le plus rapidement possible.

Perspectives

Notre analyse de l'apprentissage de la mise en virage montre que l'usage de l'indicateur d'attitude actuel en contexte d'apprentissage du vol à vue exige d'optimiser la prise d'informations, tout gain sur la charge mentale nécessaire à l'acquisition des informations pouvant être alloué à d'autres tâches. L'utilisation de l'indicateur d'attitude ne se résume pas à la mise en virage, mais c'est dans les virages à forte inclinaison que la lecture de l'instrument est la plus difficile. Le contrôle de l'inclinaison et de la symétrie est primordial pour éviter les situations de perte de contrôle liées à un décrochage. Nous allons concevoir une nouvelle représentation sur la base de nos exigences d'utilisabilité et mener une expérimentation pour évaluer cette nouvelle représentation.

Bibliographie

1. A.L. Alexander, D.B. Kaber, S.-H Kim, E.M., Stelzer, K Kaufmann and L.J. Prinzel. 2012. Measurement and Modeling of Display Clutter in Advanced Flight Deck Technologies. *The International Journal of Aviation Psychology* 22, 4, 299–318.
2. S. Conversy, C. Hurter, and S. Chatty. 2010. A descriptive model of visual scanning. In *Proceedings of the 3rd BELIV'10 Workshop: BEyond time and errors: novel evaluation methods for Information Visualization* (BELIV '10). ACM, New York, 35-42
3. S. Conversy, S. Chatty, H. Gaspard-Boulin, and J-L. Vinot. 2014. The accident of flight AF447 Rio-Paris: a case study for HCI research. In *Proceedings of the 26th Conference on l'Interaction Homme-Machine* (IHM '14). ACM, New York, 60-69.
4. S. Conversy. 2014. Unifying Textual and Visual: a Theoretical Account of the Visual Perception of Programming Languages. In *Proc. of the ACM SPLASH Onward!*, 201-212.
5. P. Doyon-Poulin, B. Ouellette and J.-M. Robert. 2012. Review of visual clutter and its effects on pilot performance: A new look at past research, Digital Avionics Systems Conference (DASC), IEEE/AIAA 31st , 2D1-1 –2D1-11.
6. P. Doyon-Poulin, B. Ouellette, and J-M. Robert. 2014. Effects of visual clutter on pilot workload, flight performance and gaze pattern. In *Proc of ACM HCI-Aero '14*.
7. P. M .Fitts & R. E. Jones. 1947. Psychological aspects of instrument display: 1. Analysis of 270 "pilot error" experiences in reading and interpreting aircraft instruments (Memo. Rep. No. TSEAA-694-12A). Wright-Patterson Air Force Base.
8. A.J Gannon. 2010. Flight Deck Aesthetics and Pilot Performance : New Uncharted Seas, ch. 16 in *Handbook of Aviation Human Factors*, 2nd ed, 1-22.
9. S.L Johnson, S.N Roscoe. 1972. What moves, the airplane or the world ? *Human Factors*, 14, 107-129.
10. D. A. Norman. 2002. *The Psychology of Everyday Things*. Basic Books, Inc., New York.
11. Organisation de l'Aviation Civile . 2014. Loss of Control In -flight <http://www.icao.int/meetings/loci>
12. F. H. Previc & W. R. Ercoline. 1999. The "outside-in" attitude indicator revisited. *International Journal of Aviation Psychology*, 9(4), 377–401.
13. C.D Wickens &C.M. Carswell, 1995. The proximity compatibility principle: Its psychological foundations and its relevance to display design. *Human Factors*, 37, 473-494.
14. C. D Wickens, A. L. Alexander, W. J. Horrey, A. Nunes & T. J. Hardy. 2004. Traffic and Flight Guidance Depiction on a Synthetic Vision System Display: The Effects of Clutter on Performance and Visual Attention Allocation. *Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting Proceedings*, 48, 218-222.