

# Évaluation du dispositif PiGaT (PilotGazeTrainer) pour l'éducation/rééducation des stratégies visuelles

**Dubois Emilien**

ENAC

31055, Toulouse, France

Emilien.dubois@enac.fr

**Blättler Colin**

CRéA

13300, Salon-de-Provence, France

Colin.Blattler@defense.gouv.fr

**Camachon Cyril**

CRéA

13300, Salon-de-Provence, France

Cyril.Camachon@defense.gouv.fr

**Hurter Christophe**

ENAC

31055, Toulouse, France

Christophe.Hurter@enac.fr

## RÉSUMÉ

Les *Glass cockpits* favorisent le développement de certaines mauvaises habitudes oculaires, comme de trop regarder à l'intérieur du cockpit [16]. Ce comportement nuit à la sécurité des vols à vue (VFR) puisqu'il réduit la surveillance du ciel. Afin d'éliminer au plus tôt cette mauvaise habitude, nous avons développé un nouveau dispositif d'éducation/rééducation des stratégies visuelles, PilotGazeTrainer (PiGaT). Ce dispositif est basé sur l'utilisation d'un *eye-tracker* et repose sur deux principes : (i) l'analyse en temps-réel du comportement oculaire d'une personne et (ii) le déclenchement automatique de notifications (audio ou visuelle). Cet article présente en détail le dispositif PiGaT ainsi que la tâche de pilotage abstraite (Abstract Flying Task, AFT) qui a servi à réaliser une validation expérimentale. Les résultats de cette expérimentation ad-hoc, réalisée avec 81 étudiants, montrent que ce dispositif permet de modifier durablement le comportement oculaire sans dégrader la performance sur l'AFT. Les utilisations plus larges rendues possibles par le PiGaT sont finalement discutées.

## Mots Clés

Apprentissage ; Eye Tracker ; Temps Réel ; Micromonde ; Pilotage ; Notifications ;

## ABSTRACT

Glass cockpits promote the development of some incorrect gaze habits, e.g. to spend too much time looking at in-board instruments [16]. This wrong behavior affects the flight safety in visual flight rule (VFR) because it reduces the time spend scanning the outside world. To correct this incorrect habit as earlier as possible, we have developed a

new system of education / rehabilitation of visual strategies, PilotGazeTrainer (PiGaT). This system is based on the use of an eye-tracker and on two main principles: (i) real-time analysis of gaze behavior and (ii) the automatic trigger of notifications (visual or audio). This article details the PiGaT system and an abstract task (Abstract Flying Task, AFT) which was used to realise an experimental validation. Results of this ad-hoc experimentation, with 81 students, show that the PiGaT system can permanently change eye behavior without degrading the performance of AFT. Finally we discuss potential uses offered by the PiGaT.

## Author Keywords

Learning ; Eye Tracker ; Real time ; Microworld ; Piloting ; Notifications.

## ACM Classification Keywords

Experimentation ; Human Factors ;

## INTRODUCTION

En 2012, l'école de pilotage de l'Armée de l'air, basée à Salon-de-Provence, s'est dotée de Cirrus SR20/22 qui sont des avions légers équipés de *Glass cockpits*. Ces « cockpits numériques » - présents dans de nombreux types d'appareils de l'aviation civile générale ou commerciale - sont connus pour attirer d'avantage le regard du pilote à l'intérieur de l'habitacle que les cockpits classiques [16, 25]. Ce phénomène, nommé « *Too much head-down time* » par Rudisill [25], représente un risque important en termes de sécurité des vols, notamment lors des vols à vue (en VFR). A ce titre, les autorités préconisent de passer environ 70% du temps à regarder à l'extérieur du cockpit afin de Voir et Eviter les différents dangers extérieurs [1,14,15]. Malgré ces recommandations, de nombreuses études mettent en évidence que les pilotes continuent de passer trop de temps à regarder à l'intérieur du cockpit [8,20]. Afin de limiter ce comportement chez les élèves-pilotes durant les premières heures de formation, les pilotes-instructeurs – civils comme militaires – usent parfois de stratagèmes. Par exemple ils réduisent la luminosité des écrans ou occultent, le temps d'une manœuvre, tout ou partie des écrans avec la carte de navigation ou bien des « post-it ». En faisant cela, l'objectif des instructeurs est de faire prendre conscience aux élèves-

pilotes quel est le bon comportement visuel à adopter dans les différentes phases de vol.

Tout comme la formation en vol, la formation au sol en simulateur doit également permettre d'acquérir et de renforcer les comportements visuels adaptés. Dans un environnement d'apprentissage davantage contrôlé, les instructeurs simulation doivent s'assurer que ces bons comportements sont bien appris et répétés. Malheureusement, en vol comme au sol, l'analyse du cheminement visuel de l'élève-pilote par les instructeurs ne se fait pas de manière directe. En effet, ces derniers soupçonnent un mauvais cheminement oculaire de leur élève uniquement à travers l'observation de la dérive de certains paramètres et/ou de l'attitude de l'avion. En 1998, Wetzal et al. [33] ont utilisé un dispositif d'eye-tracking permettant aux instructeurs d'avoir accès à une mesure objective de la position du regard de leurs élèves. Les instructeurs interrogés dans cette étude ont trouvé l'outil particulièrement utile pour les assister dans la détection en direct de mauvais comportements oculaires. Cela leur permettait de donner oralement et immédiatement des consignes aux élèves-pilotes sans devoir attendre l'étape de débriefing. Les instructeurs ont été unanimes quant à la pertinence de l'utilisation d'un tel dispositif dès la phase initiale du programme de formation. En effet, à ce stade, il est encore possible d'intervenir pour ne pas laisser de « mauvaises habitudes » s'installer chez les élèves. Plus généralement, l'utilisation d'un eye-tracker au sein de dispositifs permettant l'éducation ou la rééducation du cheminement visuel, de personnes saines [2, 27], d'enfants sains [32] ou atteints de troubles autistiques [30], semble tout à fait pertinente et montre une certaine efficacité.

Pour les jeunes élèves-pilotes de l'armée de l'air, l'acquisition d'un cheminement visuel pertinent, efficace et rapide est un prérequis indispensable pour prétendre à la poursuite d'une formation longue et exigeante de pilote de combat. Nous avons engagé, dès 2013, un programme de recherche visant à comprendre l'impact de l'introduction précoce de cockpits numériques dans la formation initiale du pilote de combat. Plus particulièrement, notre effort se porte sur deux aspects : le premier concerne les modifications comportementales induites par ces cockpits modernes et notamment le comportement/cheminement visuel. Le second concerne l'amélioration des outils à disposition des cadres de formation afin de les aider à détecter et corriger le plus tôt possible un mauvais cheminement visuel.

Dans cet article, nous décrivons le dispositif complet (voir Figure 1) que nous avons créé dans le but d'étudier la capacité à modifier les stratégies oculaires. Ce dispositif est basé sur l'utilisation combinée d'un *eye-tracker*, d'un environnement d'apprentissage en micromonde et d'une technique innovante (PiGaT). Cette technique repose sur deux principes : (i) **l'analyse en temps-réel** du comportement oculaire d'une personne et (ii) le

**déclenchement automatique** de notifications (visuelles et/ou auditives). L'analyse en temps-réel permet de détecter des stratégies visuelles en cours de réalisation d'une tâche. Le déclenchement automatique de notifications permet de pouvoir donner immédiatement un feedback au participant permettant ainsi le renforcement ou l'inhibition d'une stratégie. PiGaT intègre une solution de création de règles qui sont à la base des principes d'analyse des stratégies et de déclenchement de notifications. Le niveau de complexité des règles ainsi que la nature des notifications sont entièrement paramétrables afin de pouvoir répondre au plus



**Figure 1. Dispositif mis en œuvre pour permettre la modification des stratégies visuelles.**

près aux besoins pédagogiques les plus divers.

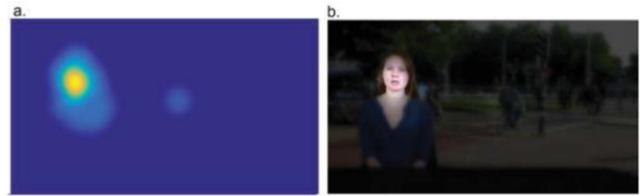
Nous examinerons dans un premier temps des travaux dont l'objectif était l'amélioration du circuit/cheminement visuel ou la modification de stratégies visuelles. Puis, nous présenterons les caractéristiques de notre dispositif en détaillant les principes de fonctionnement et les éléments sur lesquels il s'appuie. Nous démontrerons ensuite la validité de ce dispositif grâce à la réalisation d'une expérimentation ad hoc. Enfin, nous discuterons des avantages et limites de notre dispositif et des perspectives plus larges d'utilisation.

#### **ÉTAT DE L'ART**

Pour la réalisation de certaines activités ou tâches, le prélèvement efficace d'informations pertinentes suppose de savoir où, quand et quoi regarder, mais également comment regarder. Shapiro & Raymond [27] ont démontré qu'il était possible d'éduquer un comportement oculaire efficace ou inefficace chez des participants grâce à de petits exercices réalisés sur ordinateur. Ils ont également montré que le comportement appris durant ces exercices simples avait un effet sur la performance obtenue à une tâche bien plus complexe (jeu vidéo *Space Fortress*). Les participants ayant reçu un entraînement spécifique afin de développer la bonne stratégie oculaire sont ceux qui ont obtenu les meilleurs résultats au jeu vidéo. De manière similaire, Becic et al. [2] ont montré qu'il était possible de modifier la stratégie naturelle de recherche visuelle chez des personnes

âgées. Dans cette étude les participants devaient détecter sur un écran, l'apparition d'un point supplémentaire au milieu d'un nuage de points de couleur qui bougeaient aléatoirement. Pour ce type de tâche, deux stratégies de recherche visuelle ont été caractérisées dans la littérature [6] : une stratégie de recherche dite active où la personne parcourt l'écran avec de nombreux mouvements oculaires, et une stratégie de recherche dite passive où la personne fait peu de mouvements oculaires et attend de percevoir l'apparition du point. Cette dernière est considérée comme étant la bonne stratégie à adopter pour ce type de tâche. Lors d'un premier test, les auteurs ont pu caractériser le comportement oculaire (passif vs. actif) adopté naturellement par les personnes grâce à un dispositif d'eye-tracking. A l'issue de cette observation, les auteurs ont demandé à chaque participant de réaliser à nouveau la tâche de détection mais cette fois-ci en adoptant le comportement inverse de leur comportement naturel. Les résultats montrent que les personnes à qui il a été demandé d'adopter la bonne stratégie ont amélioré leurs performances de détection visuelle. Inversement, les personnes à qui il a été demandé d'adopter délibérément une mauvaise stratégie de recherche visuelle ont vu leurs performances diminuer. Ces travaux suggèrent donc qu'il est tout à fait envisageable d'améliorer les performances à une tâche, ou bien de modifier une stratégie de recherche visuelle, dès lors que l'on connaît à la fois le comportement oculaire courant d'une personne et le comportement efficient à adopter.

C'est dans ce cadre que, pour les besoins de leur recherche, Wang et al. [30] ont développé un dispositif innovant permettant de rediriger en temps réel l'attention visuelle d'un individu vers des zones pertinentes d'une vidéo. Ces auteurs s'intéressent en effet à la problématique des interactions sociales des enfants atteints de troubles du spectre autistique. Ces enfants ont des difficultés à entrer en interaction sociale avec autrui notamment car ils ne regardent pas forcément les endroits où se trouvent les signes précurseurs de prise de contact (i.e., gestes, expression du visage). La mise en œuvre de leur technique nécessite dans un premier temps, la caractérisation du comportement dit « de référence ». Pour ce faire, les auteurs ont proposé à des enfants sains de visionner des séquences vidéo dans lesquelles des acteurs exécutaient des activités de la vie courante comme composer un numéro de téléphone, parler directement à la caméra (engagement dyadique) ou engager un échange avec un autre acteur. Les traces oculaires des enfants sains ont été enregistrées et converties sous forme de cartes de chaleur (voir Figure 2a).



**Figure 2. Carte de chaleur des enfants sains (a) et vidéo avec le voile de redirection du regard (b) (Wang et al., 2015).**

Les auteurs ont ensuite créé des vidéos spécifiques de « redirection du regard » en appliquant un filtre de flou gaussien et un filtre d'assombrissement à chaque image de la vidéo d'origine en fonction de la densité spatiotemporelle de la carte de chaleur obtenue (voir Figure 2b). Enfin, au cours d'une expérimentation, ces vidéos ont été utilisées dans une phase d'entraînement pour rediriger l'attention des participants chaque fois que ces derniers s'éloignaient du comportement de référence d'une certaine valeur seuil. Les résultats obtenus sont prometteurs et montrent que la technique utilisée permet bien une modification durable du comportement oculaire. Néanmoins, cette technique souffre de certains écueils pour pouvoir envisager de l'utiliser dans des situations dynamiques complexes réelles telles qu'on peut les trouver par exemple dans les jeux vidéo ou les simulateurs d'entraînement. En effet, le voile de redirection du regard n'était pas généré à proprement dit en temps réel ou à la volée sur la vidéo originale. C'est une version singulière de la vidéo (i.e., avec ce voile de redirection), préalablement créée, qui est présentée. L'artifice consistait donc dans cette technique à diffuser sur écran la vidéo adéquate (i.e., normale ou voilée) en fonction du comportement courant du participant capturé à l'aide d'un *eye-tracker*.

La technique que nous avons développée, et qui est présentée ci-après, dépasse un certain nombre de ces écueils. Nous proposons notamment la capacité de faire réagir automatiquement, et en temps-réel, l'environnement d'apprentissage en fonction du comportement oculaire courant d'un individu. Nous avons également cherché à rendre notre technique à la fois générique et modulaire (voir Figure 5) tout en offrant le maximum de souplesse dans la caractérisation des comportements déclencheurs et dans la génération de notifications.

#### **PRESENTATION DU 'PILOT GAZE TRAINER' (PIGAT)**

PiGaT a été conçu sous forme de logiciel tournant en tâche de fond sur un PC. Ce logiciel prend comme donnée d'entrée la position du regard obtenue à partir de n'importe quel système d'*eye-tracking* (via le bus IVY [7,12,19]) et fourni en sortie différents types de notifications, visuelles et/ou auditives, sur l'écran du PC. L'animation de ces notifications est commandée à travers un scénario qui définit l'ensemble des paramètres de détection du comportement oculaire et de notifications grâce notamment à une structure de règles.

### Préparation d'un scénario d'apprentissage

La préparation d'un scénario d'apprentissage se fait en deux étapes. La première étape permet de définir les différentes zones statiques d'intérêt et/ou de notifications dans l'environnement d'apprentissage (voir Figure 3). La seconde étape permet d'associer un ou des comportement(s) oculaire(s) (i.e., comportements déclencheurs) avec une ou des réaction(s) du logiciel (i.e., notifications) afin de former des règles d'interaction.

### Définition des Zones d'intérêt et/ou de notification

Définir des zones d'intérêt (AOIs) est une étape essentielle dans notre dispositif. Nos AOIs ont la particularité de pouvoir remplir deux fonctions principales. Elles servent d'une part à analyser simplement le comportement oculaire d'une personne en temps réel. D'autre part, elles sont une composante essentielle de l'affichage de notifications. Pour servir ces deux fonctions, il est indispensable de connaître précisément la position de chaque AOI. Ce positionnement est défini au préalable au moment de la création du scénario. Cette technique est donc particulièrement adaptée aux environnements informatiques où il est possible de définir des AOIs statiques en 2 dimensions.



Figure 3. Exemple de définition de zones d'intérêt et/ou de notification. A noter qu'une même zone peut servir au deux.

### Définition des règles d'interaction

Les règles d'interaction permettent d'associer un ou des comportement(s) déclencheur(s) à une ou plusieurs notification(s). Les comportements déclencheurs sont des comportements oculaires à détecter de manière automatique par notre logiciel. Afin de permettre à ce dernier d'analyser en temps-réel et en continu le comportement oculaire et de déceler ces comportements, nous avons dû définir quelles étaient des caractéristiques pertinentes du comportement oculaire et comment les enregistrer. Nous avons ainsi sélectionné 4 types de variables qui rendent compte du comportement oculaire actuel (ce qui est fait) et passé (ce qui a été fait depuis le début de l'expérimentation) du participant.

#### Variables de description d'un comportement oculaire

- $GD_{Z(i)}$  : la durée du regard dans une AOI en ms (Gaze Duration)
- $DwT_{Z(i)}$  : le temps total passé à regarder dans une AOI en ms (Dwell Time)

- $PDwT_{Z(i)}$  : la proportion du temps total passé à regarder dans une AOI en % (Proportional Dwell Time)
- **Time** : la durée depuis le début de la session d'entraînement (ms)

$GD_{Z(i)}$ : la durée du regard dans une AOI est une variable en millisecondes (ms), elle est calculée en continu pour toutes les AOIs définies. Elle permet d'analyser le comportement courant de l'opérateur. De manière assez binaire, une AOI est soit regardée, soit elle ne l'est pas. C'est pourquoi chaque AOI a un compteur qui compte depuis combien de temps elle est regardée ou depuis combien de temps elle n'est plus regardée. Le temps d'une AOI regardée est donné par une valeur positive qui s'incrémente tant que le regard reste à l'intérieur. Dès lors que cette AOI n'est plus regardée le compteur retombe à 0. En parallèle, pour chacune des AOIs non regardées, le temps est donné en valeur négative qui décroît tant que le regard ne revient pas dans l'AOI considérée. Dans ce cas, la durée du regard dans cette AOI repasse à 0 avant d'être incrémenté comme décrit précédemment.

$DwT_{Z(i)}$  : le temps total passé à regarder indépendamment dans chaque AOI (ms) est également une variable calculée en continu. Elle permet d'analyser le comportement oculaire sur toute la durée de l'expérimentation. Elle correspond au temps cumulé dans chaque AOI. Pour une AOI en particulier, cette variable s'incrémente uniquement lorsque la durée du regard  $GD_{Z(i)}$  est en positif pour cette même AOI.

$PDwT_{Z(i)}$  : La proportion du temps total passé à regarder dans une AOI est calculée en pourcentage. Pour une AOI, c'est la proportion de son temps total passé à être regardée ( $DwT_{Z(i)}$ ) par rapport à la somme des  $DwT_{Z(i)}$  de toutes les AOIs. Le calcul de cette variable est donné par la formule :

$$PDwT_{Z1} = 100 * \left( \frac{DwTZ1}{\sum_{i=1}^3 (DwTZi)} \right)$$

**Time** : La dernière variable correspond simplement au calcul du temps écoulé depuis le début de la session de l'expérimentation.

Lors de l'expérimentation, ces variables permettront au logiciel de détecter les comportements déclencheurs et de produire, en temps réel, les notifications associées. Le principe de ces règles d'interaction pourrait être comparé à la structure de contrôle <SI>/<ALORS>.

**SI** un comportement déclencheur est détecté, **ALORS** le logiciel produit les notifications associées.

#### Comportements déclencheurs

Pour identifier un comportement déclencheur il faut donc en définir les caractéristiques à l'aide des 4 variables définies précédemment et de valeurs-seuil autorisant le déclenchement automatique. Dans notre cas, il est par exemple possible d'associer la durée du regard dans la zone 1 [i.e.,  $GD_{Z1}$ ] et la valeur-seuil de 2000 millisecondes

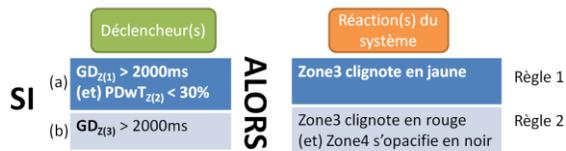
(voir Figure 4). Cela signifie que dès lors qu'une personne regardera cette zone plus de 2 secondes, le logiciel saura l'identifier et sera en mesure de déclencher des notifications. La règle ainsi définie se présente sous la forme :

SI ( $GD_{Z1} > 2000ms$ ) ALORS {action(s)}.

La caractérisation de comportements plus complexes est possible grâce à la combinaison de plusieurs comportements simples liés entre eux par les opérateurs logiques ET/OU (voir Figure 4).

#### Notifications

L'identification de comportements déclencheurs permet au logiciel de produire un feedback immédiat. Ces feedback correspondent ici à des notifications. Plusieurs types de notifications visuelles et/ou sonores [18] peuvent être produites. En ce qui concerne les notifications visuelles, notre outil permet, au moment de la rédaction du présent article, de programmer la coloration d'une zone ou de son contour de manière statique, ou dynamique. Les animations dynamiques comprennent l'opacification, le remplissage ou le clignotement d'une zone. Concernant les notifications auditives, il est possible de produire des sons de différentes natures.



**Figure 4. Exemple d'un scénario comprenant 2 règles d'interaction. La première règle (a) consiste à faire clignoter la zone 3 en jaune à chaque fois que la durée du regard dans la zone 1 est supérieure à 2000ms ET que la proportion de temps à regarder la zone 2 est inférieure à 30%.**

#### Présentation synoptique des composants de l'architecture PiGaT

La figure 5 montre les sept composants logiciels interconnectés. Les trois premiers (i.e., création de scénario, définition de zones d'intérêts, définition de règles d'interaction) ont été détaillés précédemment.

Ci-après sont brièvement décrit les quatre autres composants permettant de jouer des scénari dans PiGaT :

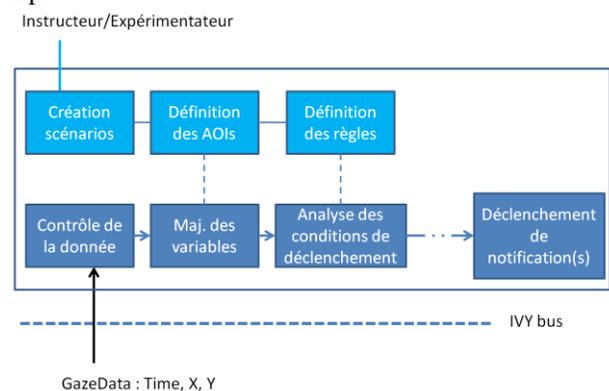
- **Le contrôleur des données oculaires** : il permet de vérifier la cohérence des données reçues et de chercher à identifier où se situe la direction du regard dans la scène visuelle et dans les différentes AOIs.
- **Le modificateur des variables** : il met à jour toutes les variables de description d'un comportement oculaire ( $GD_{Z(i)}$  ;  $DwT_{Z(i)}$  ;  $PDwT_{Z(i)}$  ; Time)
- **L'analyseur des conditions de déclenchement** : il étudie chaque règle au regard des valeurs des différentes variables.

- **Le déclencheur de notification(s)** : il envoie ou enlève une ou des notification(s) en fonction de l'activation ou de la désactivation de règles.

#### EVALUATION EXPERIMENTALE

Nous avons réalisé une expérimentation afin de tester la capacité de cette technique à modifier le comportement oculaire. La méthode n'ayant pas encore accumulé suffisamment de preuves empiriques, nous ne pouvions pas l'expérimenter directement sur une population de pilotes militaires. Cette population d'opérationnels est difficile d'accès et la modification du comportement oculaire doit avoir été testée pour exclure la présence de toute conséquence néfaste à l'activité quotidienne de ces derniers.

D'autre part, dans la perspective d'intégrer PiGaT dans les simulateurs de vol, notre besoin était ici de reproduire au mieux l'activité du pilotage de manière abstraite (i.e., un micromonde) afin de pouvoir tester notre technique sur une population de non pilote. L'activité de pilotage peut, de manière simpliste, se décomposer en deux tâches distinctes. D'une part, une tâche de recherche visuelle où le pilote essaie de distinguer, par la surveillance du ciel, si des dangers sont à proximité, et d'autre part, une tâche de monitoring et de maintien des paramètres affichés dans le cockpit.



**Figure 5. Architecture en composants de l'outil permettant de produire des notifications en temps réel sur la base de l'analyse du comportement oculaire. Les flèches symbolisent le parcours des données oculaires lors de la mise en place d'un scénario.**

#### Définition des micromondes

Les micromondes [17] sont des sortes de simulateurs simplifiés où l'habillage contextuel et le réalisme importent moins que le fort contrôle expérimental qu'ils permettent [13,29]. Nous avons étudié, dans un premier temps, les deux micromondes de pilotage que nous considérons les plus aboutis au regard de nos besoins. Il s'agit du NASA MATB[9,26] et de Space Fortress [22]. Nous souhaitions examiner si les caractéristiques des tâches proposées par ces micromondes étaient en mesure de convenir pour tester notre technique. Malheureusement, aucun des deux ne propose de tâche spécifique de recherche visuelle nécessitant de mettre en place des stratégies visuelles

adaptées à l’instar des tâches utilisées dans Becic et al. [2] ou Wang et al. [30]. Nous avons donc conçu un nouveau micromonde dont les caractéristiques sont présentées ci-après.

**Présentation du micromonde ‘Abstract Flying Task’ (AFT)**

AFT est un micromonde dans lequel une tâche de maintien de paramètres et une tâche de recherche visuelle doivent être effectuées en simultanément (voir Figure 6) et dans lequel notre technique PiGaT est utilisée.

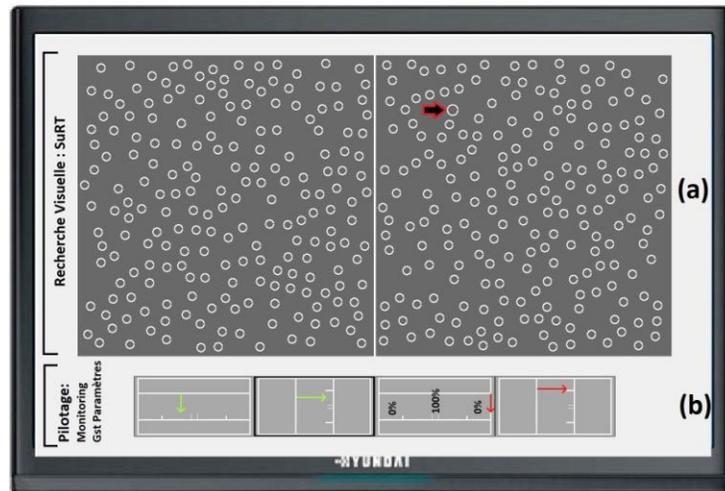
*Tâche de maintien des paramètres*

Cette tâche (voir Figure 6b) symbolise l’activité de monitoring et de gestion de paramètres au sein d’un cockpit. Elle s’inspire d’une tâche du test de sélection des pilotes de ligne de l’ENAC. Elle se compose de quatre jauges avec une flèche positionnée à l’intérieur de chacune d’entre elles. Au début de chaque session, toutes les flèches se trouvent au centre de leur jauge. Puis de manière aléatoire les flèches se mettent à dériver du centre vers une des extrémités. Le but de la tâche est de réussir à garder toutes les flèches au centre de leur jauge respective en utilisant un joystick et un bouton. Sans entraînement particulier, cette tâche est très consommatrice en ressource attentionnelle. La tendance naturelle d’une personne naïve à la tâche est de focaliser son regard dans cette zone une grande partie du temps.

*Tâche de recherche visuelle*

Cette tâche (voir Figure 6a) est la réplique de la Surrogate Reference Task (SuRT) [23]. SuRT est une tâche dont le but est de trouver un cercle plus large (cible) parmi d’autres cercles plus petits (distracteurs). La cible peut apparaître sur l’une ou l’autre des deux parties de l’écran ou peut être totalement absente de la scène. Le participant doit répondre le plus rapidement possible en appuyant sur le bouton ad hoc du joystick. Lorsque le participant donne une réponse, ou que le temps autorisé est écoulé, un feedback jaune ou rouge respectivement est affiché et une nouvelle scène est proposée au participant. SuRT convenait parfaitement à nos besoins car la nature de la tâche de recherche visuelle demande au participant de porter volontairement leur attention sur différentes zones de l’écran. Contrairement à Boot et al. [6] et Becic et al. [2], il est impossible ici de percevoir la cible de manière pré-attentive car cible et distracteurs ont la même forme et la même couleur[5,10].

En combinant PiGaT et AFT, nous pensons qu’il est possible, avec de l’entraînement, d’éduquer des participants à adopter une stratégie visuelle qui privilégie le temps passé à regarder la tâche de recherche visuelle (SuRT) au détriment du temps passé à monitorer et maintenir les paramètres, et ce, sans dégradation de la performance aux tâches.



**Figure 6.** Capture d’écran du Micromonde AFT annoté. Sur cet image, la cible de la tâche de recherche visuelle (a) est indiquée par une flèche rouge et noir dans la partie supérieure droite de l’écran. La tâche de maintien de paramètres (b) est dans une configuration où les deux jauges de droite ont un score nul comme en témoigne la couleur rouge de leur flèche et les deux flèches de gauches sont en train de dériver vers les bords extérieurs de leur jauge respective.

**METHODE**

**Participants**

Quatre-vingt-un étudiants de l’Université de psychologie d’Aix-en-Provence ont participé à notre étude. L’échantillon comprend 14 hommes et 67 femmes dont l’âge variait de 17 à 29 ans (moyenne = 19, SD = 2.2). Aucun participant n’avait déjà piloté d’aéronef auparavant et tous avaient une vision et une audition normale ou corrigée

**Matériel**

*Équipement*

L’expérimentation a été réalisée sur un écran Hyundai W220D 22 pouces avec une résolution de 1680x1050 pixels. L’interaction avec le micromonde était réalisée avec le joystick Logitech Extrême 3d Pro. Les participants étaient assis à 60 cm de l’écran (voir Figure 1). Les données oculaires ont été recueillies grâce à l’EyeTribe® cadencé à

30Hz [11]. Ce dernier était placé entre l'écran et le participant à environ 50cm du participant.

#### Configuration du micromonde AFT

Concernant les caractéristiques de la tâche de recherche visuelle, nous avons utilisé une configuration pour la tâche de recherche visuelle avec 400 cercles au total (dont la cible). Cette densité représente le niveau le plus difficile de la tâche SuRT utilisée dans l'étude de Benedetto et al. [4]. Les cercles étaient tracés avec un trait de 3px d'épaisseur et avaient respectivement un diamètre de 20 et 26px pour les distracteurs et la cible. Cela correspond à 35' d'arc pour les distracteurs et à 44' d'arc pour la cible. Ces tailles de cercle correspondent au scénario le plus difficile de l'étude de Wynn & Richardson [34]. Nous avons également ajouté une contrainte supplémentaire en imposant au participant un temps de réponse limité à 9 secondes. Concernant les caractéristiques de la tâche de maintien des paramètres, nous avons utilisé une configuration où, aléatoirement, une flèche sur les quatre se mettait à dériver toutes les 3,5 secondes. Cette flèche mettait 4 secondes pour dériver du centre à l'extrémité de la jauge. Lorsque le participant manipulait une flèche avec le joystick, la vitesse de déplacement était deux fois plus élevée que la vitesse de la dérive des flèches.

#### Configuration du scénario du PiGaT

Nous avons créé une règle simple permettant de faire apparaître un voile opaque sur toute la zone de l'écran couverte par la tâche de maintien des paramètres (Zone « Bas ») dès lors que le regard d'un participant passe plus de 2 secondes dans cette zone. Cette règle est définie comme suit :

« SI ( $GD_{ZBas} \geq 2000ms$ ) ALORS  
ZBas se colore en orange avec 100% d'opacité »

Cette règle a pour but de limiter le comportement oculaire naturel de certains participants qui maintiendraient leur regard trop longtemps sur les instruments de bord à l'instar de la problématique « *Too much head-down time* » [25] évoquée en introduction.

#### Procédure

##### Tâche

Les participants devaient réaliser en simultanée la tâche de recherche visuelle et la tâche de monitoring/maintien de paramètres.

##### Design expérimental

Les participants ont été répartis en deux groupes expérimentaux : le groupe Contrôle (N = 44) et le groupe Full (N = 37). L'expérimentation s'est déroulée en 5 phases : (i) une familiarisation aux tâches, (ii) les pré-tests, (iii) la phase d'entraînement, (iv) les post-tests, et (v) 24h plus tard les tests de rétention.

Lors de la phase de familiarisation (i), les participants réalisaient, dans l'ordre, la tâche de maintien des paramètres, la tâche de recherche visuelle et les deux tâches

simultanément. Les sessions étaient de 30secondes. Cette phase permettait aux participants de comprendre le mode de fonctionnement du joystick pour réaliser les différentes tâches.

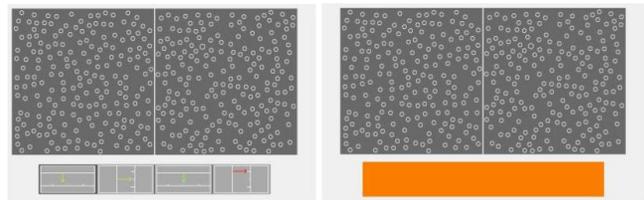
Lors des phases de pré-test (ii), post-test (iv) et rétention (v), les participants réalisaient ces trois tâches dans un ordre randomisé. Les sessions étaient de 2 minutes.

La phase d'entraînement (iii) comprenait uniquement la double tâche et les sessions étaient de 2 minutes. Durant ces sessions, les participants du groupe Full étaient les seuls à recevoir la notification (i.e., voile opaque à 100%) à chaque identification de violation de la règle des 2 secondes. Le groupe Contrôle ne recevait aucune notification (voir Figure 7).

##### Mesures de la performance aux tâches

La performance à la tâche de recherche visuelle (voir Figure 6a) est calculée en pourcentage de bonnes réponses par rapport au nombre de scènes visualisées.

La performance à la tâche de maintien des paramètres (voir Figure 6b) est un score donné sur 100 (25 par jauge). Il correspond au score moyen obtenu sur l'ensemble de la session. Le score d'une jauge est maximum lorsque la flèche est au centre et diminue de manière linéaire proportionnellement à l'éloignement de la flèche, jusqu'à atteindre 0 au niveau de la dernière graduation.



**Figure 7. Notification reçue par le groupe Full (à droite) lorsque la règle est activée par un participant. Le groupe contrôle (à gauche) ne recevait pas de notification même si un participant passait plus de 2s dans la zone « Bas ».**

#### RESULTATS

Des ANOVA à mesures répétées ont été conduites avec le facteur "groupe" (Contrôle ; Full) comme facteur inter-groupe et le facteur "test" (pré-test ; post-test ; rétention) comme facteur intra-groupe. Ces ANOVA ont été réalisées sur les mesures de performance aux tâches et sur le comportement oculaire.

##### Mesures de performance

###### Performance à la tâche de maintien des paramètres

Les résultats de l'ANOVA à mesures répétées sur la performance à la tâche de maintien des paramètres, montrent un effet simple significatif du facteur "test",  $F(2,158) = 162.1522$  ;  $MSE = 17802.1$  ;  $p < .05$ . Les résultats ne montrent pas de différence pour le facteur "groupe",  $F(1,79) = 0.0988$  ;  $MSE = 71.8$  ;  $p > .05$ , et il n'y a pas d'interaction Groupe x Test,  $F(2,158) = 0.3652$  ;  $MSE = 40.1$  ;  $p > .05$ .

Des tests à postériori (*Bonferroni*) montrent que la performance lors du post-test (moyenne = 60.38, SD = 19.84) est significativement supérieure à celle lors du pré-test (moyenne = 34.64, SD = 12.69),  $p < .05$ . La performance lors du test de rétention (moyenne = 60.45, SD = 19.52) est également significativement supérieure à celle lors en pré-test,  $p < .05$ . Les performances en post-test et en test de rétention ne sont pas différentes,  $p > .05$ .

#### Performance à la tâche de recherche visuelle

Les résultats de l'ANOVA à mesures répétées sur la performance à la tâche de recherche visuelle, montrent uniquement un effet simple significatif du facteur "test",  $F(2, 158) = 68.412$  ;  $MSE = 11042.1$  ;  $p < .05$ . Les résultats ne montrent pas de différence pour le facteur "groupe",  $F(1,79) = 0.331$  ;  $MSE = 160.8$  ;  $p > .05$ , et il n'y a pas d'interaction Groupe x Test,  $F(2, 158) = 1.304$  ;  $MSE = 210.4$  ;  $p > .05$ .

Des tests à postériori (*Bonferroni*) montrent que la performance lors du post-test (moyenne = 67.66, SD = 16.25) est significativement supérieure à celle lors du pré-test (moyenne = 46.53, SD = 18.73),  $p < .05$ . La performance lors du test de rétention (moyenne = 66.52, SD = 13.82) est également significativement supérieure à celle lors du pré-test,  $p < .05$ . Les performances lors du post-test et lors du test de rétention ne sont pas différentes,  $p > .05$ .

#### Mesure comportementale

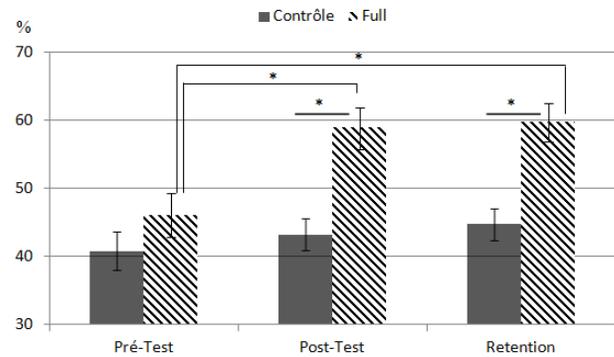
##### Temps passé à regarder la tâche de recherche visuelle (%)

Les résultats de l'analyse de la proportion du temps passé à regarder la tâche de recherche visuelle montrent un effet significatif des facteurs "groupe",  $F(1,79) = 13.7313$  ;  $MSE = 8564,2$  ;  $p < .05$ , et "test",  $F(2,158) = 13.0535$  ;  $MSE = 1822,6$  ;  $p < .05$ , avec un effet d'interaction,  $F(2,158) = 4.86$  ;  $MSE = 678.6$  ;  $p < .05$ .

Des tests à postériori (*Bonferroni*) ne montrent aucune différence, pour le groupe contrôle, entre le pré-test (moyenne = 40.83, SD = 18.39) et le post-test (moyenne = 43.25, SD = 15.92),  $p > .05$  ; aucune différence entre le pré-test et le test de rétention (moyenne = 44.72, SD = 15.17),  $p > .05$  ; et aucune différence entre le post-test et le test de rétention,  $p > .05$ .

Pour le groupe Full, ces tests montrent que le temps passé à regarder la tâche de recherche visuelle est significativement inférieur lors du pré-test (moyenne = 46.04, SD = 19.13) comparé à celui lors du post-test (moyenne = 58.83, SD = 18.43),  $p < .05$ , et lors du test de rétention (moyenne = 59.68, SD = 17.12),  $p < .05$ . Aucune différence n'a été montrée entre les sessions de post-test et de test de rétention,  $p > .05$ .

Entre les groupes, il n'y a pas de différence lors du pré-test,  $p > .05$ . Cependant, lors du post-test et du test de rétention, le temps passé à regarder la tâche de recherche visuelle est significativement supérieur pour le groupe Full (post-test :  $p < .05$  ; rétention :  $p < .05$ ).



**Figure 8. Graphique présentant la proportion de temps passé à regarder la tâche de recherche visuelle (%) avec les erreurs types, pour le groupe Contrôle en noir et le groupe Full en rayé, durant les sessions de pré-test, post-test et rétention.**

Afin de pouvoir comparer le micromonde AFT et la situation de pilotage d'un avion, nous avons réalisé des analyses complémentaires sur des mesures généralement étudiées dans la littérature.

#### Mesures complémentaires

##### Nombre de fixations

Les résultats de l'ANOVA à mesures répétées sur le nombre de fixations montrent un effet simple significatif du facteur "test",  $F(2,158) = 16.794$ ,  $MSE = 36965$ ,  $p < .05$ . Les résultats ne montrent pas de différence pour le facteur "groupe",  $F(1,79) = 2.305$  ;  $MSE = 13365$  ;  $p > .05$ , et il n'y a pas d'interaction Groupe x Test,  $F(2, 158) = 0.122$  ;  $MSE = 268$  ;  $p > .05$ .

Les tests réalisés à postériori (*Bonferroni*) montrent que le nombre de fixations lors du post-test (moyenne = 244.06, SD = 49.79) est significativement supérieur à celui lors du pré-test (moyenne = 217.19, SD = 54.92),  $p < .05$ . Les résultats montrent que le nombre de fixations lors du test de rétention (moyenne = 259.37, SD = 68.91) est significativement supérieur à celui lors du pré-test,  $p < .05$ . Le nombre de fixations n'est pas différent entre le post-test et le test de rétention,  $p > .05$ .

##### Durée moyenne des fixations

Les résultats de l'ANOVA à mesures répétées sur la durée moyenne des fixations montrent uniquement une différence significative entre les modalités du facteur "test",  $F(2,158) = 34.056$ ,  $MSE = 72136$ ,  $p < .05$ . Ces résultats ne montrent pas de différence pour le facteur "groupe",  $F(1,79) = 3.147$  ;  $MSE = 18264$  ;  $p > .05$ , et il n'y a pas d'interaction Groupe x Test,  $F(2, 158) = 0.183$  ;  $MSE = 389$  ;  $p > .05$ .

Les tests réalisés à postériori (*Bonferroni*) montrent que la durée des fixations lors du test de rétention (moyenne = 301.97 SD = 36.11) est significativement inférieure à celle lors du post-test (moyenne = 322.96 SD = 49.79),  $p < .05$ , elle-même significativement inférieure à celle lors du pré-test (moyenne = 361.33 SD = 79.80),  $p < .05$ .

## DISCUSSION

Le logiciel 'Pilot Gaze Trainer (PiGaT)' a permis de créer une situation d'apprentissage propice à l'éducation d'un comportement oculaire en adéquation avec les recommandations de sécurité des vols. Alors que le comportement naturel des participants lors du pré-test était de 60% du temps à regarder la tâche de maintien de paramètres et 40% la tâche de recherche visuelle, le groupe ayant bénéficié d'un entraînement adapté, de seulement 6 fois 2', a pu inverser cette tendance. Cette modification est durable dans le temps puisque 24h plus tard, lors du test de rétention, cette répartition reste stable. Il est également à noter que cette modification comportementale s'est accompagné d'un maintien du niveau de performance aux différentes tâches. Ce résultat est intéressant car il est assez fréquent dans le domaine de l'apprentissage d'observer une phase de régression des performances lors d'une modification comportementale profonde. Grâce à un scénario simple, cet outil nous a permis de modifier une stratégie visuelle. Compte tenu de sa capacité à pouvoir générer autant de règles que de nécessaire, il est possible d'imaginer des scénari bien plus complexes permettant d'éduquer, non plus une simple stratégie oculaire, mais un cheminement oculaire complet. Dans cette perspective et dans notre volonté de fournir aux instructeurs de l'armée de l'air des outils d'aide efficaces, le logiciel PiGaT pourrait permettre d'améliorer la formation initiale des élèves-pilotes en leur permettant d'accélérer le développement de l'expertise [3].

Un autre point concerne la pertinence du micromonde AFT pour étudier les situations simples de pilotage (à vue) dans lesquelles le pilote doit répartir son attention entre la surveillance du ciel et la surveillance des paramètres de vol. Afin de pouvoir étudier ces situations dans un environnement expérimental contrôlé, nous avons besoin de reproduire de manière abstraite certaines caractéristiques de l'activité de pilotage. Les analyses conduites sur les mesures complémentaires avaient pour but de vérifier si le comportement naturel de répartition de l'attention visuelle entre les différentes tâches dans ce micromonde était cohérent avec celui observé classiquement dans des simulateurs de vol ou à bord d'un aéronef moderne. Les résultats montrent en effet que la tâche de maintien des paramètres dans le micromonde attire davantage le regard des participants, et dans des proportions comparables à celles obtenues dans des environnements réels (i.e., 60% du temps). D'autre part, les caractéristiques des fixations oculaires (i.e., nombre et durée moyenne) évoluent au cours du temps, entre le pré-test et le post-test, de manière similaire à ce qui est classiquement observé. Le nombre de fixation augmente et la durée moyenne de ces fixations diminue[24,28]. Cela suggère que les participants ont adopté une stratégie visuelle qui les engage à balayer plus souvent mais moins longtemps leur environnement. Ce résultat corrobore ceux décrits dans la littérature concernant l'influence du niveau d'expertise sur le comportement

oculaire des pilotes [31]. Des tests plus poussés devront être conduits afin de valider les possibilités offertes par ce micromonde à l'instar des micromonde NASA-MATB et SpaceFortress.

## CONCLUSION & TRAVAUX FUTURS

Dans cet article, nous avons présenté un nouvel outil capable de générer des notifications visuelles sur un écran à partir de la détection en temps-réel d'un comportement oculaire donné. Cet outil ouvre la voie au développement de méthodes innovantes d'éducation/rééducation du circuit visuel dans de nombreux domaines où il y a une nécessité d'adapter l'environnement d'apprentissage de manière personnalisée.

Les voies d'amélioration de PiGaT sont nombreuses. Elles seront probablement guidées dans un premier temps par les besoins exprimés par les cadres de formation de l'école de l'air de Salon de Provence au sein de laquelle la première phase de la formation du pilote de combat est dispensée. Ces améliorations pourraient porter sur la création de nouvelles variables (temps de la fixation courante ; nombre de fixation par seconde ; durée moyenne de la fixation) permettant de capturer plus finement encore le comportement oculaire d'une personne. L'architecture modulaire du logiciel permet d'envisager l'intégration de nouveaux composants comme, par exemple, la capacité d'analyser les fixations oculaires en temps réel. Cependant, il faudra veiller à optimiser les opérations de calcul à réaliser sur chaque donnée oculaire reçue, au risque d'avoir une latence trop importante entre la détection d'un comportement déclencheur et l'apparition de notifications. Des tests devront également être mené pour évaluer jusqu'à quelle fréquence d'échantillonnage l'architecture proposée est robuste.

## BIBLIOGRAPHIE

1. AOPA Air Safety Foundation (1993). How to avoid a midair collision. January 16.
2. Becic, E., Boot, W. R., & Kramer, A. F. (2008). Training older adults to search more effectively: scanning strategy and visual search in dynamic displays. *Psychology and aging*, 23(2), 461.
3. Bellenkes, A. H., Wickens, C. D., & Kramer, A. F. (1997). Visual scanning and pilot expertise: the role of attentional flexibility and mental model development. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*.
4. Benedetto, S., Pedrotti, M., Minin, L., Baccino, T., Re, A., & Montanari, R. (2011). Driver workload and eye blink duration. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 14(3), 199-208.
5. Bertin, J. (1973). *Sémiologie graphique: Les diagrammes-Les réseaux-Les cartes*.
6. Boot, W. R., Kramer, A. F., Becic, E., Wiegmann, D. A., & Kubose, T. (2006). Detecting transient changes in dynamic displays: The more you look, the less you

see. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 48(4), 759-773.

7. Buisson, M., Bustico, A., Chatty, S., Colin, F. R., Jestin, Y., Maury, S., ... & Truillet, P. (2002, November). Ivy: un bus logiciel au service du développement de prototypes de systèmes interactifs. In *Proceedings of the 14th French-speaking conference on Human-computer interaction (Conférence Francophone sur l'Interaction Homme-Machine)* (pp. 223-226). ACM.
8. Colvin, K. W., Dodhia, R. M., Belcher, S. A., & Dismukes, R. K. (2003). Scanning for visual traffic: An eye tracking study. In *Proceedings of the 12th International Symposium on Aviation Psychology* (pp. 255-260). Dayton, OH, USA: The Wright State University
9. Comstock Jr, J. R., & Arnegard, R. J. (1992). The multi-attribute task battery for human operator workload and strategic behavior research.
10. Conversy, S. (2015, October). De la pré-attention des conjonctions visuelles. In *27ème conférence francophone sur l'Interaction Homme-Machine*. (p. alt2).
11. Dalmaijer, E. (2014). Is the low-cost EyeTribe eye tracker any good for research? (No. e585v1). PeerJ PrePrints.
12. Dubois, E., Blättler, C., Camachon, C., & Hurter, C. (2015). Eye Movements Data Processing for Ab Initio Military Pilot Training. In *Intelligent Decision Technologies* (pp. 125-135). Springer International Publishing.
13. Eyrolle, H., Mariné, C., & Mailles, S. (1996). La simulation des environnements dynamiques: intérêts et limites. *Cellier, JM, De Keyser, V., Valot, C., La gestion du temps dans les environnements dynamiques. PUF, Paris*, 103-121.
14. Federal Aviation Administration (1998b). Scanning for Other Aircraft. Aeronautical Information Manual, 8-1-6-c. Oklahoma City, OK: Author.
15. FAR/AIM (2003). Aeronautical Information Manual/ Federal Aviation Regulations. McGraw-Hill.
16. Funk, K., Lyall, B., & Wilson, J. (1999). Flight deck automation issues. ... *Journal of Aviation* .... Retrieved from [http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1207/s15327108ijap0902\\_2](http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1207/s15327108ijap0902_2)
17. Gonzalez, C., Vanyukov, P., & Martin, M. K. (2005). The use of microworlds to study dynamic decision making. *Computers in Human Behavior*, 21(2), 273-286.
18. Imbert, J. P. (2014). Adaptation du design des visualisations de type supervisions pour optimiser la transmission des notifications classées par niveau d'intérêt (Doctoral dissertation, Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace (ISAE)).
19. Imbert, J. P., Hurter, C., Peysakhovich, V., Blättler, C., Dehais, F., & Camachon, C. (2015). Design Requirements to Integrate Eye Trackers in Simulation Environments: Aeronautical Use Case. In *Intelligent Decision Technologies* (pp. 231-241). Springer International Publishing.
20. Johnson, N., Wiegmann, D., & Wickens, C. (2006, October). Effects of advanced cockpit displays on general aviation pilots' decisions to continue visual flight rules flight into instrument meteorological conditions. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 50, No. 1, pp. 30-34). Sage Publications.
21. Kasarskis, P., Stehwien, J., Hickox, J., Aretz, A., & Wickens, C. (2001, March). Comparison of expert and novice scan behaviors during VFR flight. In *Proceedings of the 11th International Symposium on Aviation Psychology* (pp. 1-6).
22. Mané, A., & Donchin, E. (1989). The space fortress game. *Acta psychologica*, 71(1), 17-22.
23. Mattes, S. (2003). The lane change task as a tool for driver distraction evaluation. In H. Strasser, H. Rausch, & H. Bubb (Eds.), *Quality of work and products in enterprises of the future* (pp. 57-60). Stuttgart: Ergonomia Verlag.
24. Robinski, M., & Stein, M. (2013). Tracking visual scanning techniques in training simulation for helicopter landing. *Journal of Eye Movement Research*, 6(2), 1-17.
25. Rudisill, M. (1994). Flight crew experience with automation technologies on commercial transport flight decks. *Human performance in automated systems: Current research and trends*, 203-11.
26. Santiago-Espada, Y., Myer, R. R., Latorella, K. A., & Comstock Jr, J. R. (2011). The Multi-Attribute Task Battery II (MATB-II) Software for Human Performance and Workload Research: A User's Guide.
27. Shapiro, K. L., & Raymond, J. E. (1989). Training of efficient oculomotor strategies enhances skill acquisition. *Acta Psychologica*, 71(1), 217-242.
28. Sullivan, J., Yang, J. H., Day, M., & Kennedy, Q. (2011). Training simulation for helicopter navigation by characterizing visual scan patterns. *Aviation, space, and environmental medicine*, 82(9), 871-878.
29. Turkle, S. (1984). *The second self: Computers and the human spirit*. London: Granada.
30. Wang, Q., Celebi, F. M., Flink, L., Greco, G., Wall, C., Prince, E., ... & DiNicola, L. (2015, June). Interactive eye tracking for gaze strategy modification. In

*Proceedings of the 14th International Conference on Interaction Design and Children* (pp. 247-250). ACM.

31. Wang, L., Li, H., Dongb, D., & Shu, X. (2015, August). Relationship between the technical skills and eye-movement indicators of pilots. In *Proceedings 19th Triennial Congress of the IEA* (Vol. 9, p. 14).
32. Wass, S., Porayska-Pomsta, K., & Johnson, M. H. (2011). Training attentional control in infancy. *Current biology*, 21(18), 1543-1547.
33. Wetzal, P. A., Anderson, G. M., & Barelka, B. A. (1998, October). Instructor use of eye position based feedback for pilot training. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 42, No. 20, pp. 1388-1392). SAGE Publications.
34. Wynn, T., & Richardson, J. H. (2008). Comparison of subjective workload ratings and performance measures of a reference IVIS task.