



HAL
open science

Évaluation du dispositif PiGaT (PilotGazeTrainer) pour l'entraînement des stratégies visuelles d'élèves pilotes

Emilien Dubois, Cyril Camachon, Colin Blättler, Christophe Hurter

► To cite this version:

Emilien Dubois, Cyril Camachon, Colin Blättler, Christophe Hurter. Évaluation du dispositif PiGaT (PilotGazeTrainer) pour l'entraînement des stratégies visuelles d'élèves pilotes. Actes de la 28ième conférence francophone sur l'Interaction Homme-Machine, Oct 2016, Fribourg, Suisse. pp.177-187, 10.1145/3004107.3004119 . hal-01383966

HAL Id: hal-01383966

<https://hal.science/hal-01383966>

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.

Évaluation du dispositif PiGaT (PilotGazeTrainer) pour l'entraînement des stratégies visuelles d'élèves pilotes

Dubois Emilien

ENAC

31055, Toulouse, France

Emilien.dubois@enac.fr

Camachon Cyril

CRéA

13300, Salon-de-Provence, France

Cyril.Camachon@defense.gouv.fr

Blättler Colin

CRéA

13300, Salon-de-Provence, France

Colin.Blattler@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 [17]. 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'entraînement de 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 du dispositif. Les résultats de cette expérimentation ad-hoc, réalisée avec 81 participants, 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 dispositif 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 [17]. This wrong behavior affects the flight safety in visual flight rule (VFR) because it reduces the time spent scanning the outside world. To prevent this incorrect habit as earlier as

possible, we have developed a new visual strategies training system, 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 realize 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 usages 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* (Figure 1). Ces derniers remplacent les traditionnels cockpits à quadrants au profit d'affichages numériques. Ces écrans permettent de regrouper toutes les informations de manière condensée.



Figure 1. Cockpit numérique ("Glass cockpit") du Cirrus® SR20 utilisé en formation initiale de pilotes de combat

Ces « cockpits numériques » - présents dans de nombreux types d'appareils de l'aviation civile générale - sont connus pour attirer d'avantage le regard du pilote à

l'intérieur de l'habitacle que les cockpits classiques [17, 27]. Ce phénomène, nommé « *Too much head-down time* » par Rudisill [27], représente un risque important en termes de sécurité des vols, notamment lors des vols à vue (en VFR). À ce titre, les autorités préconisent de passer environ 70% du temps à regarder à l'extérieur du cockpit afin de Voir et Éviter les différents dangers extérieurs [1,15,16]. 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 [8,21]. 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. Les instructeurs chargés de cette instruction sur simulateur 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. Une manière d'analyser ce cheminement oculaire directement est d'utiliser un instrument de mesure tel qu'un oculomètre appelé aussi *eye-tracker*. Ces appareils permettent de mesurer les mouvements des yeux et d'en déduire précisément où regarde l'individu équipé. Ce genre d'outil est maintenant démocratisé et permet toutes sortes d'applications, que ce soit pour analyser passivement des comportements et réactions d'êtres humains ou que ce soit comme dispositif d'entrée pour l'interaction [13].

En 1998, Wetzel, Anderson et Barelka [35] ont utilisé un eye-tracker pour permettre 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, 29], d'enfants sains [34] ou atteints de troubles autistiques [32], 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 2) que nous avons créé dans le but d'étudier la capacité à modifier les stratégies visuelles. 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 comportements oculaires 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 visuelle. PiGaT intègre une solution de création de règles qui sont à la base des principes d'analyse du comportement oculaire 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 près aux besoins pédagogiques les plus divers.



Figure 2. Dispositif mis en œuvre pour permettre la modification des stratégies visuelles.

Ce dispositif permet donc une utilisation interactive de l'eye tracker. En 2002, Duchowski [13] considère que les applications interactives de l'eye tracking, utilisent la donnée oculaire soit comme un pointeur ("*selective*"), soit comme un indicateur passif du regard ("*gaze-contingent*"). La différence peut également se trouver dans l'intention de l'utilisateur. Dans un cas, ce dernier va déclencher volontairement des actions (e.g. écriture avec

un clavier numérique pour les personnes handicapées). Dans l'autre, il va constater une modification de l'interface (e.g. affichage en détail uniquement de la partie regardée d'une scène 3D complexe) qu'il ne contrôle pas sur la base de son regard. Dans cet article, le dispositif PiGaT que nous présentons va déclencher des modifications de l'interface sur la base du comportement de l'utilisateur sans que ce dernier ne l'ait décidé. Notre dispositif se trouve donc plutôt dans les applications dites *gaze-contingent*.

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, comment et quoi regarder. En 1989, Shapiro et Raymond [29] 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 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, Boot et Kramer (2008) [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. À 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 efficace à adopter.

C'est dans ce cadre qu'en 2013, pour les besoins de leur recherche, Wang, Wall et Kim [32] 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 3a).

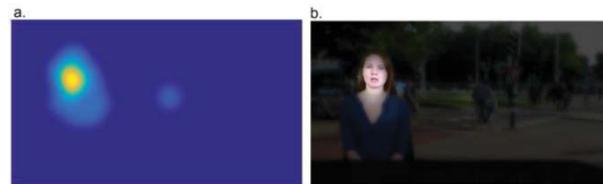


Figure 3. Carte de chaleur des enfants sains (a) et vidéo avec le voile de redirection du regard (b) (Wang *et al.*, 2015).

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 3b). 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 6) 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 [7,12,20]) et fournit 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. Nous présentons dans cet article la première version fonctionnelle *V1* de PiGaT. En tant que première version, le niveau de complexité a été limité afin d'assurer un fonctionnement sans erreur. PiGaT sera amené à évoluer et à se complexifier en suivant un cycle de conception itératif et centré utilisateur.

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 4).

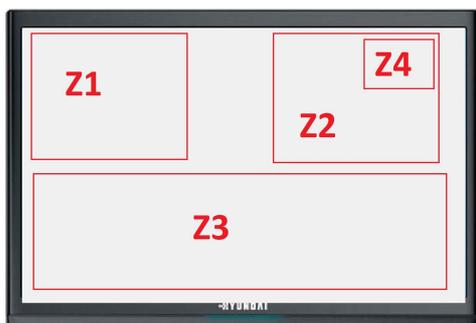


Figure 4. Exemple de définition de zones d'intérêt et/ou de notification. A noter qu'une même zone peut servir aux deux.

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 (Area Of Interest, AOI) est une étape essentielle dans ce dispositif. Les AOI 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 AOI statiques en 2 dimensions.

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 le logiciel. Afin de permettre à ce dernier d'analyser en continu le comportement oculaire et de déceler les comportements déclencheurs, nous avons dû définir quelles étaient les caractéristiques pertinentes du comportement oculaire et comment les enregistrer. Nous avons ainsi, pour cette version de PiGaT, 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. Nous avons en partie basé nos choix de variables sur la facilité technique à les mettre en place en temps réel. Les variables choisies permettent donc un premier niveau d'analyse du comportement oculaire qui gagnera en complexité au fur et à mesure des évolutions du système.

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 (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 AOI 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 AOI 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 AOI. Le calcul de cette variable est donné par la formule :

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

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 5). 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 5).

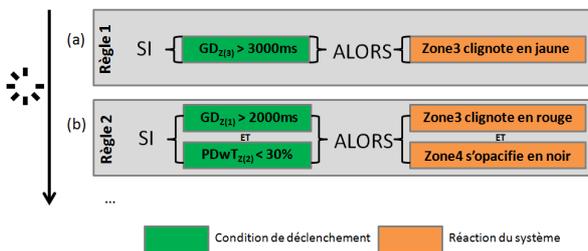


Figure 5. Fonctionnalité et traitement séquentiel d'un scénario comprenant 2 règles d'interaction. La première règle (a) consiste à faire clignoter la zone 3 en jaune à chaque fois que la durée du regard dans la zone 3 est supérieure à 3000ms. La seconde règle (b) fait clignoter la zone 3 en rouge ET cache progressivement la zone 4 en noir (opacifier) lorsque la durée du regard dans la zone 1 dépasse les 2000ms ET que la proportion du temps passé à regarder la zone 2 est inférieure à 30%

Notifications

L'identification de comportements déclencheurs permet au logiciel de produire un *feedback* immédiat. Ces *feedbacks* correspondent ici à des notifications. Plusieurs types de notifications visuelles et/ou sonores [19] peuvent être produites. En ce qui concerne les notifications visuelles, cette première version de PiGaT permet 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.

Présentation synoptique des composants de l'architecture PiGaT

La figure 6 montre les sept composants logiciels interconnectés. Les trois premiers (i.e., création de scénarii, définition de zones d'intérêts, définition de règles d'interaction) ont été détaillés précédemment.

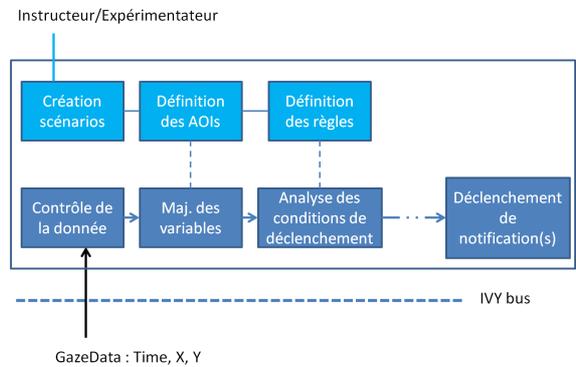


Figure 6. Architecture en composants de l'outil permettant de produire des notifications en temps réel sur la base de l'analyse du comportement oculaire. Les flèches symbolisent le parcours des données oculaires lors de la mise en place d'un scénario.

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 AOI.
- **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 d'élève-pilotes militaires. Cette population de futurs 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.

Bien que nous souhaitons, *in fine*, intégrer PiGaT dans les simulateurs de vol utilisés en formation, notre besoin ici était 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 à vue (VFR) 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 sur les instruments de vol.

Définition des micromondes

Les micromondes [18] sont des sortes de simulateurs simplifiés où l'habillage contextuel et le réalisme importent moins que le fort contrôle expérimental qu'ils permettent [14,31]. Dans un premier temps, les deux micromondes de pilotage que nous considérons les plus aboutis au regard de nos besoins ont été étudiés. Il s'agit du NASA MATB [9,28] et de Space Fortress [23]. L'objectif était d'examiner si les caractéristiques des tâches proposées par ces micromondes pouvaient convenir à l'étude du « *Too much head-down time* » à l'aide du dispositif PiGaT. 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.* [32]. Nous avons donc conçu un nouveau micromonde dont les caractéristiques sont présentées ci-après.

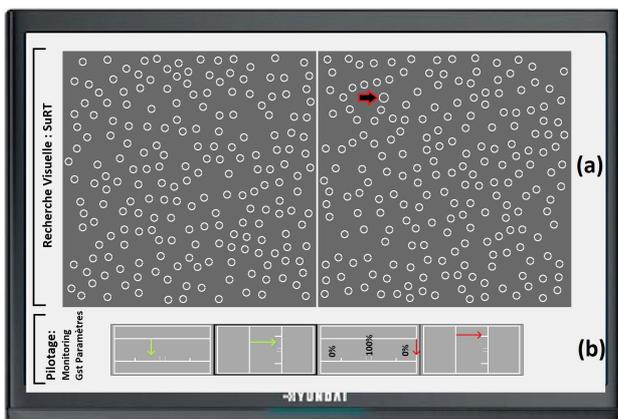


Figure 7. Capture d'écran du Micromonde AFT annoté. Sur cette image, la cible de la tâche de recherche visuelle (a) est indiquée par une flèche rouge et noir dans la partie supérieure droite de l'écran. La tâche de maintien des paramètres (b) est dans une configuration où les deux jauges de droite ont 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.

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 7) à l'aide d'un joystick. Le joystick doit être équipé de trois boutons sur le manche pour réaliser la tâche de recherche visuelle. Pour la tâche de maintien des paramètres, il doit être équipé d'une gâchette et permettre la rotation du manche sur les 3 axes : X (Droite-Gauche), Y (Haut-Bas) et Z (rotation du poignet).

Tâche de maintien des paramètres

Cette tâche (voir Figure 7b) 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'École Nationale de l'Aviation Civile (ENAC) [25]. 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 (choisie également aléatoirement). Le but de la tâche est de réussir à garder toutes les flèches au centre de leur jauge respective. La sélection d'une flèche à déplacer se fait à l'aide des rotations du poignet (axe Z) et de la gâchette. Le repositionnement de la flèche sélectionnée se fait avec les mouvements rectilignes du manche (axes X et Y).

Tâche de recherche visuelle

Cette tâche (voir Figure 7a) est la réplique de la Surrogate Reference Task (SuRT) [24]. 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 un des trois boutons ad hoc placés sur le manche 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 aux participants de porter volontairement leur attention sur différentes zones de l'écran. Contrairement à Boot, Kramer, Wiegmann et Kubose (2006) [6] et Becic *et al.* (2008) [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].

*

Note au lecteur

Afin de vérifier la cohérence du micromonde AFT au regard de la situation de pilotage d'un avion, nous avons conduit une série d'analyses supplémentaires sur ce micromonde. Nous avons pour cela sélectionné des mesures généralement étudiées dans la littérature pour le pilotage d'avion [33,30,26] : (1) le nombre de fixations ; (2) la durée moyenne de ces fixations ; (3) la durée moyenne des fixations sur les deux différentes tâches.

Classiquement pour le pilotage, les résultats montrent qu'avec l'expérience, les pilotes ont (1) un nombre de fixations qui augmente ainsi (2) qu'une durée moyenne des fixations qui diminue [33]. Également, (3) la durée

des fixations dans le cockpit est plus importante que celle à l'extérieur du cockpit [30,26].

Sur les mesures présentées ci-dessus, les résultats de nos analyses (voir partie RESULTATS-Mesures de contrôle de l'AFT) sont cohérents avec ceux obtenus classiquement dans les études sur le pilotage d'avion.

*

Dans ces conditions, en combinant PiGaT et AFT, nous pensons qu'il est possible, avec de l'entraînement, d'éduquer des participants à adopter un comportement oculaire qui privilégie le temps passé à regarder la tâche de recherche visuelle (SuRT) plutôt que le temps passé à monitorer les paramètres. Nous pensons que cette modification qualitative devrait se faire sans dégradation de la performance.

METHODE

Participants

Quatre-vingt-un étudiants de l'Université 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 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 2). 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

Les paramètres de la configuration de l'AFT ont été validés empiriquement de sorte à permettre au participant de pouvoir s'engager pleinement dans la *réalisation simultanée* des deux tâches. Pour la tâche de recherche visuelle, nous avons utilisé une configuration 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, Pedrotti, Minin, Baccino, Re et Montanari (2011) [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 et Richardson (2008) [36]. 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 dérivait du centre vers l'extrémité de la jauge à vitesse constante.

Lorsque le participant se mettait à manipuler une flèche de sorte à la repositionner au centre, la vitesse de déplacement était six 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 occupée par la tâche de maintien des paramètres (Zone « Bas »). Ce voile apparaissait automatiquement dès lors qu'un participant passait plus de 2 secondes à regarder dans cette zone (Figure 8). Cette règle est définie comme suit :

« SI (GD_{ZBas} >= 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* » [27] évoquée en introduction.

Procédure

Tâche

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

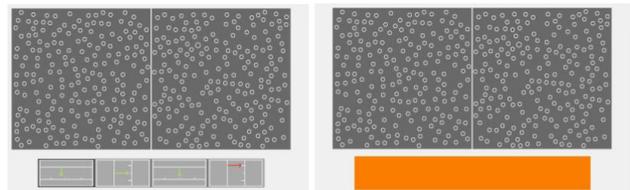


Figure 8. Notification reçue par le groupe Full (à droite) lorsque la règle est activée par un participant. Le groupe contrôle (à gauche) ne recevait pas de notification même si un participant passait plus de 2s dans la zone « Bas ».

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 30 secondes. 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 8).

Calcul de la performance aux tâches

La performance à la tâche de recherche visuelle (voir Figure 7a) 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 7b) 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.

RESULTATS

Des analyses de la variance (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", $F(2,158) = 162.1522$; $MSE = 17802.1$; $p < .001$. Les résultats ne montrent pas de différence pour le facteur "Groupe", $F(1,79) = 0.0988$; $MSE = 71.8$; $p = .754$, et il n'y a pas d'interaction Groupe x Test, $F(2,158) = 0.3652$; $MSE = 40.1$; $p = .694$.

Des tests *a posteriori* (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), $p < .001$. La performance lors du test de rétention (moyenne = 60.45, SD = 19.52) est également significativement supérieure à celle lors en pré-test, $p < .001$. Les performances en post-test et en test de rétention ne sont pas différentes, $p = 1$.

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", $F(2, 158) = 68.412$; $MSE = 11042.1$; $p < .001$. Les résultats ne montrent pas de différence pour le facteur "Groupe", $F(1,79) = 0.331$; $MSE = 160.8$; $p = .566$, et il n'y a pas d'interaction Groupe x Test, $F(2, 158) = 1.304$; $MSE = 210.4$; $p = .274$.

Des tests *a posteriori* (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), $p < .001$. La performance lors du test de rétention (moyenne = 66.52, SD = 13.82) est également significativement supérieure à celle lors du pré-test, $p < .001$. Les performances lors du post-test et lors du test de rétention ne sont pas différentes, $p = 1$.

Mesure comportementale

Temps passé à porter le regard sur la tâche de recherche visuelle (%)

Les résultats de l'analyse de la proportion du temps passé à regarder la tâche de recherche visuelle (figure 9) montrent un effet significatif des facteurs "Groupe", $F(1,79) = 13.7313$; $MSE = 8564,2$; $p < .001$, et "Test", $F(2,158) = 13.0535$; $MSE = 1822,6$; $p < .001$, ainsi qu'un effet d'interaction, $F(2,158) = 4.86$; $MSE = 678.6$; $p = .008$.

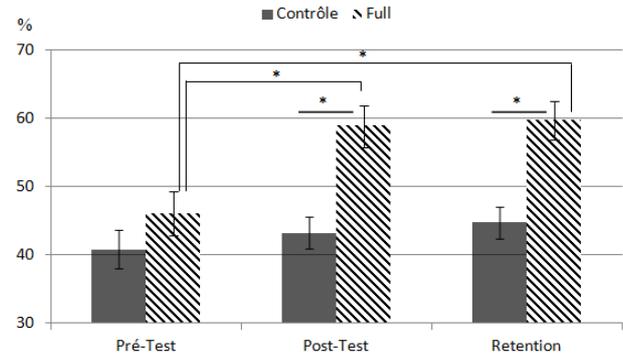


Figure 9. Graphique présentant la proportion de temps passé à regarder la tâche de recherche visuelle (%) avec les erreurs types, pour le groupe Contrôle en noir et le groupe Full en rayé, durant les sessions de pré-test, post-test et rétention.

Des tests *a posteriori* (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), $p = 1$; aucune différence entre le pré-test et le test de rétention (moyenne = 44.72, SD = 15.17), $p = 1$; et aucune différence entre le post-test et le test de rétention, $p = 1$.

Pour le groupe Full, ces tests montrent que le temps passé à porter le regard sur 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), $p < .001$, et à celui lors du test de rétention (moyenne = 59.68, SD = 17.12), $p < .001$. Aucune différence n'a été montrée entre les sessions de post-test et de test de rétention, $p = 1$.

Entre les groupes, il n'y a pas de différence lors du pré-test, $p = 1$. 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 : $p = .001$; rétention : $p = .002$).

Mesures de contrôle de l'AFT

Dans le cadre de la vérification de la cohérence du micromonde AFT par rapport à la situation de pilotage d'avion, des analyses ont été réalisées sur des variables comportementales pour le groupe contrôle. Le groupe Full a été retiré de ces analyses puisque leur entraînement à la tâche a été augmenté des notifications du dispositif PiGaT. Ces notifications ayant entraîné des modifications dans le comportement oculaire de ces personnes, nous ne pouvons donc pas considérer leur comportement comme

l'unique résultante de la pratique de la tâche du micromonde AFT. Les ANOVA réalisées ici ont été conduites avec un simple facteur "Test" (pré-test ; post-test ; rétention) comme facteur intra-groupe.

(1) Nombre de fixations

Les résultats de l'ANOVA à mesures répétées sur le nombre de fixations montrent un effet simple significatif du facteur "Test", $F(2,86) = 9.748$, $MSE = 18314$, $p < .001$.

Les tests réalisés *a posteriori* (Bonferroni) montrent que le nombre de fixations lors du post-test (moyenne = 238.61, SD = 54.20) est significativement supérieur à celui lors du pré-test (moyenne = 210.90, SD = 50.17), $p = .01$. Les résultats montrent que le nombre de fixations lors du test de rétention (moyenne = 250.70, SD = 53.83) est significativement supérieur à celui lors du pré-test, $p < .001$. Le nombre de fixations n'est pas différent entre le post-test et le test de rétention, $p = .582$.

(2) Durée moyenne des fixations

Les résultats de l'ANOVA à mesures répétées sur la durée moyenne des fixations montrent un effet simple significatif du facteur "Test", $F(2,86) = 16.832$, $MSE = 44193$, $p < .001$.

Les tests réalisés *a posteriori* (Bonferroni) montrent que la durée des fixations lors du post-test (moyenne = 332.04, SD = 57.68) est significativement inférieure à celle lors du pré-test (moyenne = 370.47, SD = 81.12), $p = .002$. La durée des fixations lors du test de rétention (moyenne = 307.60, SD = 39.29), est significativement inférieure à celle du pré-test, $p < .001$. Enfin, la durée des fixations lors du test de rétention est tendanciellement inférieure à celle lors du post-test, $p = .083$.

(3) Durée moyenne des fixations sur les différentes tâches

Un T-test a été réalisé pour comparer la durée moyenne des fixations sur la tâche de recherche visuelle et la durée moyenne des fixations sur la tâche de maintien des paramètres. Les résultats montrent une différence significative $t(43) = -18.6094$; $p < .001$. La durée moyenne des fixations sur la tâche de recherche visuelle (moyenne = 234.70, SD = 27,02) est significativement inférieure à la durée moyenne des fixations sur la tâche de maintien des paramètres (moyenne = 459.62, SD = 73.76).

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. Le comportement naturel des participants lors du pré-test était de regarder la tâche de maintien de paramètres 60% du temps contre 40% pour la tâche de recherche visuelle. Ainsi, avec seulement 6 fois 2 minutes d'entraînement, le groupe ayant bénéficié du PiGaT a pu inverser cette tendance. Cette modification semble 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 n'a pas entraîné de diminution de la performance. 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 a permis de modifier un comportement oculaire. Compte tenu de sa capacité à pouvoir générer autant de règles que nécessaire, il est possible d'imaginer des scénarii bien plus complexes permettant d'éduquer, non plus un simple comportement oculaire, mais une stratégie ou 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. Les résultats des analyses sur les variables de contrôle de l'AFT ont permis une première évaluation positive de ce micromonde par rapport à la situation qu'il tente de reproduire partiellement. 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) [12]. 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 test de rétention, de manière similaire à ce qui est classiquement observé [33]. Le nombre de fixations augmente et la durée moyenne de ces fixations diminue. 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 [22,33]. L'analyse des durées des fixations dans les deux tâches du micromonde montre que, comme dans le pilotage d'un avion [26,30], les participants ont proportionnellement une durée moyenne des fixations plus importante sur la tâche de maintien des paramètres (cockpit) que sur la tâche de recherche visuelle (extérieur). Des tests plus poussés devront bien évidemment être conduits afin de valider les possibilités offertes par ce micromonde à l'instar des micromondes NASA-MATB et SpaceFortress. Mais les premiers résultats sont encourageants et aucune incohérence avec la situation de pilotage n'a été décelée. Le micromonde AFT semble donc permettre d'étudier, dans une certaine mesure, l'activité de pilotage d'un avion sur ordinateur.

CONCLUSION & TRAVAUX FUTURS

Dans cet article, nous avons présenté un nouvel outil (PiGaT) capable de générer des notifications visuelles sur un écran à partir de la détection en temps-réel d'un comportement oculaire donné. Nous avons également présenté une nouvelle tâche de pilotage (AFT) permettant

d'analyser en laboratoire une partie de l'activité de pilotage d'un avion.

PiGaT contribue donc au développement de méthodes innovantes d'entraînement 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. Par exemple, l'architecture modulaire du logiciel permet d'envisager l'intégration de nouveaux composants. Le composant que nous prévoyons d'intégrer prochainement concerne l'analyse en temps réel des fixations oculaires. Cela permettrait la création de nouvelles variables d'analyse du comportement oculaire (temps de la fixation courante, nombre de fixations par seconde, durée moyenne de la fixation) permettant de capturer plus finement encore le comportement oculaire d'une personne. 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 menés 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, Vol (23)*, 461-466.
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. Vol68*, 569-579.
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. Ivy: un bus logiciel au service du développement de prototypes de systèmes interactifs. (2002, November) 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. 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. Duchowski, A. T. 2002. A breadth-first survey of eye-tracking applications. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers, 34(4)*, 455-470.
14. 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.
15. Federal Aviation Administration. 1998. Scanning for Other Aircraft. Aeronautical Information Manual, 8-1-6-c. Oklahoma City, OK: Author.
16. FAR/AIM. 2003. Aeronautical Information Manual/ Federal Aviation Regulations. McGraw-Hill.
17. Funk, K., Lyall, B., Wilson, J., Vint, R., Niemczyk, M., Suroteguh, C., & Owen, G. (1999). Flight deck automation issues. *The International Journal of Aviation Psychology, 9(2)*, 109-123.
18. 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.
19. 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)).
20. 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.
21. Johnson, N., Wiegmann, D., & Wickens, C. 2006. 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.
22. Kasarskis, P., Stehwien, J., Hickox, J., Aretz, A., & Wickens, C. 2001. Comparison of expert and novice scan behaviors during VFR flight. In *Proceedings of the 11th International Symposium on Aviation Psychology* (pp. 1-6).
23. Mané, A., & Donchin, E. 1989. The space fortress game. *Acta psychologica, 71(1)*, 17-22.
24. 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.
25. Matton, N., Paubel, P., Cegarra, J., & Raufaste, E. (sous presse). Differences in Multitask Resource Reallocation after Change in Task Values. *Human Factors*.
26. Robinski, M., & Stein, M. 2013. Tracking visual scanning techniques in training simulation for helicopter landing. *Journal of Eye Movement Research, 6(2)*, 1-17.
27. Rudisill, M. 1994. Flight crew experience with automation technologies on commercial transport flight decks. *Human performance in automated systems: Current research and trends*, 203-211.

28. 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.
29. Shapiro, K. L., & Raymond, J. E. 1989. Training of efficient oculomotor strategies enhances skill acquisition. *Acta Psychologica*, 71(1), 217-242.
30. 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.
31. Turkle, S. 1984. *The second self: Computers and the human spirit*. London: Granada.
32. Wang, Q., Celebi, F. M., Flink, L., Greco, G., Wall, C., Prince, E., ... & DiNicola, L. 2015. Interactive eye tracking for gaze strategy modification. In *Proceedings of the 14th International Conference on Interaction Design and Children* (pp. 247-250). ACM.
33. Wang, L., Li, H., Dongb, D., & Shu, X. 2015. Relationship between the technical skills and eye-movement indicators of pilots. In *Proceedings 19th Triennial Congress of the IEA* (Vol. 9, p. 14).
34. Wass, S., Porayska-Pomsta, K., & Johnson, M. H. 2011. Training attentional control in infancy. *Current biology*, 21(18), 1543-1547.
35. Wetzel, P. A., Anderson, G. M., & Barelka, B. A. 1998. 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.
36. Wynn, T., & Richardson, J. H. 2008. Comparison of subjective workload ratings and performance measures of a reference IVIS task.