

Conception d'un environnement hybride d'apprentissage pour l'entraînement du comportement oculaire en aéronautique

Quentin Vantrepotte¹, Cyril Camachon¹, Mickaël Causse²

¹ CReA - Centre de Recherche de l'École de l'air, 13300 Salon-de-Provence, France

quentin.vantrepotte@ecole-air.fr

cyril.camachon@ecole-air.fr

² Fédération ENAC ISAE-SUPAERO ONERA, Université de Toulouse, France

mickael.causse@isae-supero.fr

Résumé. Cet article présente une méthode d'entraînement visuel hybride, combinant pédagogie traditionnelle et technologies numériques (eye-tracking, machine learning), pour optimiser les stratégies oculaires des élèves-pilotes. Fondée sur la modélisation de comportements experts, incluant les prises d'information visuelle dans le cockpit et à l'extérieur, et développée en étroite collaboration avec les instructeurs, cette approche intègre des tableaux de bord interactifs et des exercices d'apprentissage adaptatif. L'objectif est d'offrir une évaluation objective et un entraînement personnalisé, transférable à d'autres contextes exigeants.

Mots-clés : Formation aéronautique ; Stratégies visuelles ; Pédagogie hybride ; Eye-tracking ; Apprentissage adaptatif

1 Introduction

L'évolution technologique des cockpits d'avion, notamment avec la généralisation des écrans numériques multifonctions (« glass cockpits »), transforme profondément l'interaction entre pilotes et avionique, et nécessite de repenser les méthodes pédagogiques actuelles [1]. Historiquement fondée sur des simulateurs physiques et l'expertise des instructeurs, la formation aéronautique est aujourd'hui invitée à s'adapter aux évolutions technologiques, afin de mieux prendre en compte les exigences perceptives et cognitives induites par les interfaces numériques [2][3]. Les recherches actuelles utilisant des tableaux de bord pédagogiques [4] ou l'eye-tracking pour l'analyse des stratégies visuelles [5] restent souvent déconnectées des environnements opérationnels directs et manquent d'intégration directe dans les pratiques pédagogiques existantes. Pour répondre concrètement à ces enjeux, nous proposons une démarche participative co-construite avec les instructeurs [6], combinant simulateurs physiques, interactions humaines et outils numériques avancés (eye-tracking, machine learning, dashboards), permettant de concevoir un environnement d'apprentissage hybride capable d'améliorer les stratégies visuelles des élèves-pilotes via une évaluation automatisée, des retours personnalisés et un accompagnement intégré au dispositif pédagogique existant. Cette démarche hybride s'inscrit également dans la logique d'apprentissage adaptatif [7], en

intégrant une analyse fine des comportements individuels afin d'ajuster dynamiquement l'environnement proposé.

2 Architecture de notre méthode d'entraînement

2.1 Identification du comportement de référence

Une première étape concerne l'identification du comportement visuel de référence. Elle a reposé sur une revue approfondie de la littérature et une collecte expérimentale de données oculaires en simulateur, lors de scénarios de vol basiques (virages, montées, descentes), réalisée sur des instructeurs expérimentés et des élèves-pilotes novices.. À partir des métriques oculaires reconnues en aéronautique [8], nous avons proposé une modélisation simplifiée du comportement visuels fondée sur trois composantes intuitives pour les instructeurs : (1) vitesse (rapidité du balayage visuel) ; (2) empan perceptuel (quantité d'informations captées) ; (3) structuration (structuration des fixations sur les instruments selon le contexte).

2.2 Modélisation adaptative

Une seconde étape repose sur la modélisation et la validation pédagogique. À partir du référentiel établi, nous développons une modélisation des comportements oculaires via des méthodes de machine learning pour identifier les stratégies visuelles sous-optimales [8]. Afin d'évaluer de manière continue le positionnement d'un élève par rapport aux comportements experts, une Analyse en Composantes Principales (ACP) a été faite.

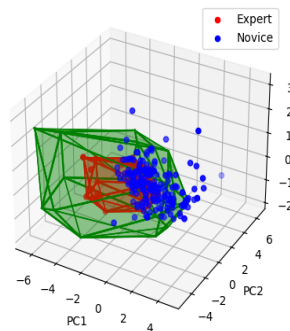


Fig. 1: Projection ACP de la métamétrique Vitesse lors d'une descente. L'enveloppe rouge représente la zone experte définie par les pilotes expérimentés ; l'enveloppe verte résulte d'une homothétie permettant de graduer la distance des élèves (points bleus) au modèle expert.

Cette méthode non supervisée réduit les métriques associées à chaque Métamétrique (Vitesse, Empan perceptuel, Adaptabilité) dans un espace tridimensionnel via une ACP, tout en conservant l'essentiel de l'information. Une enveloppe convexe (en rouge, voir Fig. 1) y délimite la zone d'expertise à partir des données des experts.. Chaque point

représente une manœuvre réalisée par un élève pour une métamétrie donnée (points bleus, voir Fig. 1). Projetés dans le même espace 3D que les experts, les élèves sont évalués par leur distance à l'enveloppe convexe (zone rouge, Fig. 1), convertie en un score de 1 (éloigné) à 20 (proche). Pour chaque élève, les scores sont ensuite moyennés par manœuvre et métamétrie afin de refléter sa proximité moyenne au modèle expert.

2.3 Conception et finalité pédagogique des tableaux de bord

Les tableaux de bord interactifs seront conçus selon une démarche de co-conception itérative avec les instructeurs, inspirée des principes formulés par Bonnin et al. [6]. À l'instar de leur méthodologie, nous mènerons des ateliers successifs combinant présentations de prototypes, recueils de retours qualitatifs et ajustements incrémentaux, afin de produire des visualisations à la fois sobres, actionnables et adaptées aux besoins pédagogiques du terrain. Bien que leur étude ne formalise pas de grille d'évaluation, elle insiste sur la prise en compte des représentations, pratiques, et contraintes exprimées par les opérateurs. Chaque itération intégrera des retours utilisateurs centrés sur la lisibilité, l'utilité perçue et le potentiel réflexif des représentations [7]. Les visualisations proposées dans les tableaux de bord (voir Fig.2) traduiront cette démarche : elles s'appuieront, pour le moment, sur quatre représentations complémentaires du comportement oculaire, conçues pour répondre à des usages différenciés tels que l'analyse rapide, le suivi longitudinal ou l'exploration fine des stratégies visuelles. Ils s'appuient sur diverses représentations complémentaires du comportement oculaire.

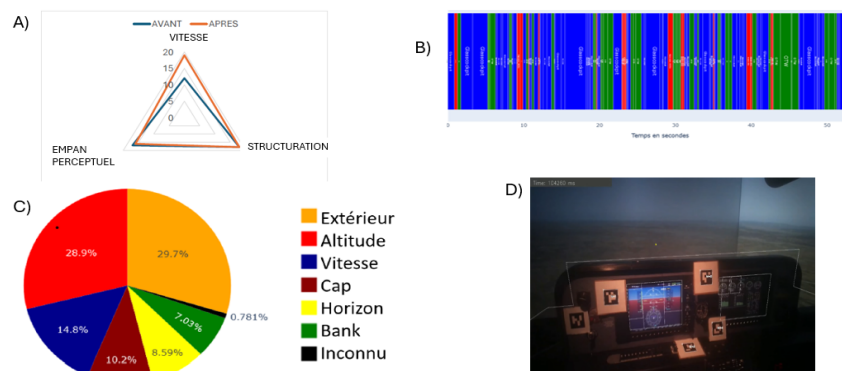


Fig. 2: Visualisations intégrées au tableau de bord. A. Diagramme radar des scores agrégés des Métamétries (Vitesse, Empan perceptuel, Structuration) avant et après entraînement. B. Séquence temporelle des fixations sur les zones d'intérêt (AOI) pendant une manœuvre simulée. C. Répartition des pourcentages de temps de fixation par AOI. D. Rejeu vidéo du "circuit visuel" du participant durant la manœuvre, avec surimpression des AOI sur le cockpit.

Ce pluralisme des formats permet de répondre à des besoins différenciés : diagnostic rapide, suivi longitudinal, ou analyse approfondie. Ces représentations ne sont pas seulement destinées à l'instructeur : elles soutiennent une lecture conjointe

instructeur/élève, favorisant la réflexivité, la compréhension des écarts au modèle expert, et le dialogue pédagogique autour des stratégies visuelles [7].

Enfin, en complément de l'analyse, des exercices d'entraînement visuel adaptatifs sont actuellement en cours de développement. Inspirés des principes de visualisation réflexive et de soutien à l'action évoqués par Schwendimann et al. [7], ces exercices visent à corriger les comportements jugés sous-optimaux (par exemple : vitesse insuffisante de balayage, faible couverture du cockpit, rigidité de séquentialité). Ces exercices visent à favoriser une progression mesurable grâce à un retour comparatif sur le comportement oculaire avant et après entraînement.

3 Conclusion et perspectives

Notre méthode vise à objectiver et optimiser les stratégies visuelles des pilotes en formation aéronautique grâce à l'intégration de technologies numériques dans les pratiques pédagogiques existantes. Co-construite avec les instructeurs, elle présente un potentiel fort de transfert vers d'autres domaines éducatifs complexes, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives pour la conception de dispositifs pédagogiques adaptatifs et efficaces.

References

1. Camachon, C., & Barbaroux, P. (2018). Changements technologiques et compétences individuelles: l'influence des glass-cockpits sur la formation des pilotes de l'armée de l'air. *Technologie et innovation*, 3(3).
2. Kaľavský, P., Rozenberg, R., Mikula, B., & Zgodavová, Z. (2018). Pilots' performance in changing from analogue to glass cockpits. *Transport Means*, 6.
3. Vantrepotte, Q., Dubois, E., Camachon, C., & Causse, M. (2025). *Effect of pilot expertise on visual scanning and precision of flight maneuvers in military aviation*. *Aviation Psychology and Applied Human Factors*
4. Knabl-Schmitz, P., Cameron, M., Wilson, K., Mulhall, M., Da Cruz, J., Robinson, A., & Dahlstrom, N. (2023). Eye-tracking: From concept to operational training tool. *Aviation Psychology and Applied Human Factors*, 13(1), 47.
5. Lounis, C., Peysakhovich, V., & Causse, M. (2020). Flight eye tracking assistant (feta): Proof of concept. In *Advances in Human Factors of Transportation: Proceedings of the AHFE 2019 International Conference on Human Factors in Transportation, July 24-28, 2019, Washington DC, USA 10* (pp. 739-751). Springer International Publishing.
6. Bonnin, G., Perry, E., Baraudon, C., & Fleck, S. (2019). Design participatif d'un tableau de bord enseignant. In *EIAH Workshops*.
7. Schwendimann, B. A., Rodriguez-Triana, M. J., Vozniuk, A., Prieto, L. P., Boroujeni, M. S., Holzer, A., ... & Dillenbourg, P. (2016). Perceiving learning at a glance: A systematic literature review of learning dashboard research. *IEEE transactions on learning technologies*, 10(1), 30-41.
8. Ziv, G. (2016). Gaze behavior and visual attention: A review of eye tracking studies in aviation. *The International Journal of Aviation Psychology*, 26(3-4), 75-104.