



HAL
open science

Optimisation cognitive de la prise de décision dans les systèmes fortement automatisés : tirer ou ne pas tirer lors d'un engagement aérien

Jean-Christophe Hurault, Grégory Froger, Marianne Jarry, Anne-Lise Marchand,
Colin Blättler

► To cite this version:

Jean-Christophe Hurault, Grégory Froger, Marianne Jarry, Anne-Lise Marchand, Colin Blättler. Optimisation cognitive de la prise de décision dans les systèmes fortement automatisés : tirer ou ne pas tirer lors d'un engagement aérien. *Ingénierie cognitive*, 2025, 8 (1), pp.24-35. <10.21494/ISTE.OP.2025.1344>. <hal-05227375>

HAL Id: hal-05227375

<https://hal.science/hal-05227375v1>

Submitted on 28 Aug 2025

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.



HAL Authorization

Optimisation cognitive de la prise de décision dans les systèmes fortement automatisés : tirer ou ne pas tirer lors d'un engagement aérien (simulation)

Cognitive optimization of decision-making in highly automated systems: to shoot or not to shoot during an air strike (simulation)

Jean-Christophe Hurault¹, Grégory Froger¹, Marianne Jarry¹, Anne-Lise Marchand¹, Colin Blättler¹

¹ CREA, Centre de Recherche de l'École de l'Air et de l'Espace, Salon de Provence, France, jean-christophe.hurault@ecole-air.fr

RÉSUMÉ. La montée en puissance de l'intelligence artificielle dans les systèmes de combat aérien accélère la collecte et l'agrégation d'informations, mais laisse à l'humain la responsabilité finale des décisions critiques, purement cognitives, telle que la décision de « tirer / ne pas tirer ». Ce type de décision engendre une charge cognitive élevée, car l'opérateur doit intégrer, en un temps très court, des informations hétérogènes. L'objectif de cette étude est d'optimiser les performances à cette prise de décision par un entraînement reposant sur des scénarios issus de retours d'expérience, mis en œuvre dans un dispositif agile et facilement déployable. Soixante-dix membres d'équipage, affectés en escadron de chasse et issus de l'Armée de l'Air et de l'Espace française, ont participé : un groupe expert (N = 39) et un groupe intermédiaire (N = 31). Le protocole expérimental comprend, pour les intermédiaires, un pré-test, un entraînement de quarante-cinq minutes et un post-test, tandis que pour les experts, le protocole se limite à un pré-test. Les résultats sur les performances (taux d'exactitude et temps de réponse) des experts, comparés à celles des intermédiaires, indiquent que le dispositif d'entraînement mobilise effectivement des connaissances expertes dans ce type de prise de décision. Après l'entraînement, les intermédiaires améliorent significativement leurs performances. Le transfert de cette amélioration en milieu opérationnel devra être confirmé par de futures recherches. Néanmoins, ces résultats soutiennent le développement d'entraînements aisément déployables en escadron et pouvant s'intégrer de façon complémentaire aux dispositifs de formation existants. Malgré l'intensification de l'usage des systèmes basés sur l'IA, l'humain restera dans la boucle décisionnelle. Il convient donc de continuer les efforts de formation et d'entraînement pour maintenir l'efficacité des humains « aux commandes » et comprendre comment utiliser l'IA de manière adaptée pour accompagner les décisions humaines. C'est dans cette perspective que s'inscrit la présente étude afin que les développements technologiques ne laissent pas l'humain « derrière l'avion ».

ABSTRACT. The growing integration of artificial intelligence into air-combat systems accelerates the collection and fusion of data, yet leaves humans with ultimate responsibility for purely cognitive, high-stakes decisions such as the “shoot / no-shoot” judgment. Because the operator must integrate heterogeneous information within seconds, this decision imposes a substantial cognitive load. The present study aims to improve performance on this task through a training program built from operational feedback and implemented on a lightweight, easily deployable platform. Seventy fighter-squadron aircrew members from the French Air and Space Force participated: an expert group (N = 39) and an intermediate group (N = 31). Intermediates completed a pre-test, a 45-minute training session and a post-test, whereas experts completed only the pre-test. Results on performance (accuracy and response time) show that the training material successfully engages expert knowledge; moreover, intermediates exhibited significant gains after a training session. Transfer of these gains in an operational setting remains to be demonstrated in future work. Nevertheless, the findings support the development of squadron-ready training modules that complement existing instructional tools. Even as AI usage intensifies, humans will remain in the decision loop. Thus, sustained efforts in education and training are essential to keep operators effective, while also understanding how to use AI in an appropriate way to support human decision-making, and to ensure that technological advances do not leave people “behind the aircraft.”

MOTS-CLÉS. Aviation de combat, Renforcement cognitif, Prise de décision, Psychologie Appliquée.

KEYWORDS. Applied Psychology, Combat Aviation, Cognitive Reinforcement, Decision-Making.

1. Introduction

Au cours des dernières décennies, dans la plupart des secteurs à forte réactivité – défense, finance, médecine, transport – des systèmes hautement informatisés et basés sur l’IA transforment la façon de collecter, filtrer et prioriser l’information. L’aviation de combat s’inscrit dans cette dynamique : des liaisons tactiques haut débit, une prolifération de capteurs et des algorithmes capables de fusionner et de classer les données en quelques millisecondes alimentent désormais l’affichage du cockpit. Ces avancées technologiques bouleversent la boucle décisionnelle O-O-D-A (*Observer, Orienter, Décider et Agir* ; [JOH 23]). Les étapes *Observation* et *Orientation* sont pré-filtrées par les algorithmes, tandis que les étapes *Décider* et *Agir* se contractent – plus la machine propose vite des options, moins les membres d’équipage disposent de secondes pour statuer sous contrainte juridique et tactique.

Malgré ces avancées, la force létale demeure – au sein de l’OTAN et plus encore dans la doctrine française – une prérogative exclusivement humaine. L’OTAN exige le maintien d’un « *meaningful human control* » sur toute action létale, rappelant qu’un « *algorithme ne doit pas avoir le contrôle total des décisions létales* » [WEB 01]. La France s’inscrit dans cette ligne, comme le rappelle Pappalardo dans la Revue de Défense Nationale (2023) [WEB 02], « *l’Homme reste in the loop ; son sens de la responsabilité demeure le garant moral de l’usage de la force létale ; l’IA doit permettre à l’aviateur de se concentrer sur les tâches nobles du combat tactique et opératif* ». En effet, la dimension éthique et politique impose de préserver un lien clair de responsabilité entre la Nation et l’opérateur qui agit en son nom ; déléguer une frappe à un algorithme ferait « sauter le fusible humain », pour reprendre les termes de Pappalardo.

Ces tâches « nobles » partagent un trait commun : elles demandent une charge cognitive élevée, car l’opérateur doit intégrer en un temps très court des informations hétérogènes, juridiquement contraignantes et potentiellement ambiguës. La décision de tir en est l’illustration typique : le membre d’équipage d’avion de chasse doit croiser messages tactiques, paramètres d’attaque, spécificités d’engagement et indices visuels, tout en conciliant les recommandations algorithmiques avec son appréciation tactique. Toute erreur peut entraîner des conséquences humaines, médiatiques ou diplomatiques dramatiques [RAS 07] ; il est donc crucial de statuer correctement — tirer ou ne pas tirer — sous forte contrainte temporelle. Or, cette décision apparaît rarement en situation réelle, rendant sa maîtrise plus difficile.

Pour caractériser plus finement cette difficulté, une enquête qualitative a été menée en deux volets auprès de vingt-deux membres d’équipages de chasse expérimentés. D’abord, six membres d’équipages experts, ayant servi en opérations extérieures, ont été interrogés par entretiens semi-directifs : tous décrivent la décision de tir comme un « *moment de bascule* » où l’afflux d’indices impose un choix immédiat. Ensuite, la méthode des incidents critiques [FLA 54] a été appliquée à seize autres experts, générant quarante récits d’opérations (5 h 38). La décision de tir est mentionnée dans trente-quatre récits ; vingt-trois relatent une surcharge cognitive prononcée, et seuls six se soldent par un tir effectif — les vingt-huit autres aboutissent à l’inhibition du feu. Ces résultats confirment que la décision « tirer / ne pas tirer » constitue une tâche noble à forte charge cognitive, justifiant le développement d’un outil d’entraînement spécifique destiné à multiplier, sans risque, les expositions à cette décision critique.

L’objectif de la présente étude est de montrer qu’il est possible d’optimiser la prise de décision de tir des membres d’équipage d’aviation de chasse à partir d’un dispositif agile et facilement déployable en escadron.

Dans ce contexte où l’exigence cognitive se concentre sur la prise de décision, l’enjeu est donc d’ajouter aux simulateurs, ou vols d’entraînement, des dispositifs spécifiques capables de renforcer, avec précision, la performance décisionnelle des équipages au moment critique de la décision. Parmi ces dispositifs, la simulation de vol reste au cœur de la formation militaire : qu’il s’agisse d’un simple poste informatique ou d’un simulateur « *full flight* », elle permet de recréer l’environnement sensoriel et procédural du cockpit. Deux logiques pédagogiques y coexistent. La première – la tâche complète –

rejoue un vol du décollage à l'atterrissage, favorisant la gestion intégrée de la mission. La seconde – l'entraînement fractionné (ou part-task training) – extrait un segment critique (p. ex. panne moteur) et le répète de manière intensive et rapprochée. Les travaux sur l'entraînement fractionné montrent que le fractionnement, lorsqu'il respecte la logique fonctionnelle de la tâche, facilite un transfert vers la performance globale [WIG 85]. Plus récemment, une revue sur l'entraînement cognitif en milieu militaire [BLA 19] souligne que les programmes les plus efficaces combinent justement : une segmentation fine des compétences ; un nombre élevé de répétitions contextualisées ; et un feedback immédiat favorisant l'ajustement des futures décisions.

Suivant ces recommandations, un entraînement fractionné a été développé sur un support agile et facile à déployer. Le fractionnement permet de cibler la décision « tirer / ne pas tirer », tâche rare mais à très forte valeur opérationnelle, tandis qu'un dispositif facile à déployer – un poste informatique diffusant des séquences vidéo interactives – garantit une mise en œuvre agile dans les escadrons de chasse. Cette combinaison peut offrir ainsi un nombre important de répétitions contextualisées, associé à un feedback immédiat, sans monopoliser les simulateurs haut de gamme.

Cette stratégie de répétition ciblée repose sur des mécanismes cognitifs robustement établis : la construction de schémas adaptés qui réduisent la charge cognitive [SWE 94] grâce à l'automatisation progressive qui est la conséquence de l'accumulation de traces mnésiques permettant une accessibilité optimale des schémas [LOG 88] [LOG 02], la pratique délibérée se focalisant sur les difficultés de l'activité tout en offrant des feedbacks adaptés faisant progresser l'apprenant vers l'expertise [ERI 96] [ERI 18].

Dans la plupart des activités militaires à enjeux élevés, l'opérateur est confronté à des situations complexes qu'il doit interpréter en quelques secondes afin de réaliser – ou d'inhiber – une action potentiellement létale. Qu'il s'agisse d'autoriser un tir, d'orienter un armement ou de décider d'un changement de trajectoire, la difficulté initiale provient du morcellement de l'information (identification de la cible, repères géographiques, paramètres de trajectoire, signaux alliés, risques collatéraux...). Traités l'un après l'autre en mémoire de travail, ces éléments saturent rapidement les ressources attentionnelles. La théorie de la charge cognitive propose une issue à cette saturation : la formation d'un schéma – au sens de Sweller [SWE 94] – qui organise ces fragments dans une construction cognitive cohérente et immédiatement reconnaissable. Une fois le schéma construit, l'opérateur ne jongle plus avec cinq ou six variables ; il identifie d'emblée la configuration globale autorisant – ou interdisant – l'action. La flexibilité d'exécution tient précisément au schéma, lequel organise les composantes de l'action selon leur dépendance logique. Activée au moment opportun, cette structure dirige l'attention vers les informations pertinentes et balise la sélection de la réponse. Ce schéma est stocké en mémoire à long terme (MLT) [MON 96] [PRI 97] [MEI 10].

La théorie des instances de Logan [LOG 88] [LOG 02] décrit comment chaque exposition à une tâche dans une situation donnée laisse une trace en mémoire. Lors de la première exposition, un raisonnement très coûteux en ressources cognitives est mobilisé pour réaliser la tâche : le raisonnement algorithmique. Lorsque la situation se répète, toutes les traces mnésiques pertinentes « entrent en course » avec le raisonnement algorithmique ; si l'une d'elles est récupérée la première, la réponse surgit quasiment sans effort. Plus le nombre d'expositions est élevé, plus la probabilité qu'une instance, la trace mnésique, gagne cette course augmente. Le traitement algorithmique est alors supplanté par la reconnaissance, ce qui permet une réduction des temps de réponse au fil de la pratique. Une tâche rarement rencontrée demeure, à l'inverse, coûteuse en ressources cognitives parce qu'aucune trace ne s'impose. En d'autres termes, une tâche suffisamment répétée est facile à réaliser alors qu'une tâche insuffisamment répétée est difficile à réaliser. D'autres modèles proches existent dans la littérature, tels que celui de Kahneman [KAH 11], qui distingue un Système 1 (rapide, automatique) et un Système 2 (lent, analytique), ou celui de Shiffrin et Schneider [SHI 77], mettant l'accent sur l'opposition entre traitement contrôlé et automatique. Cette étude s'appuie préférentiellement sur le modèle de Logan car il apparaît plus facilement opérationnalisable : il s'agit de répéter des situations pour favoriser le traitement automatique des informations par la récupération en mémoire à long terme, permettant ainsi la résolution de la tâche.

Afin de favoriser la construction de schémas adaptés, chaque essai doit s'achever par un feedback précis : l'opérateur sait instantanément si sa décision était conforme aux exigences de la situation et peut ajuster son schéma avant qu'une trace erronée ne se fixe. À mesure que les traces s'accumulent, la structure mnésique globale évolue. Selon le modèle de la mémoire de travail à long terme [ERI 95], l'expert dispose d'un registre de schémas indexés par contexte ; lorsqu'une configuration familière survient, l'entrée correspondante est récupérée sans effort, libérant les ressources cognitives pour la surveillance des éléments inattendus. Le défi, dans la plupart des domaines opérationnels, est que les situations critiques surviennent trop rarement pour alimenter suffisamment ce réservoir de traces (i.e. pannes en aviation). D'où l'intérêt d'entraînements fractionnés, capables d'offrir en quelques dizaines de minutes le volume d'expositions que des mois d'activité réelle ne fourniraient pas pour ce type de tâche spécifiquement. Une opérationnalisation de ces concepts se retrouve dans la méthode XBT [FAD 13], c'est à dire eXpert-Based Training.

Cette approche XBT extrait les micro-situations qui déclenchent la décision experte, les convertit en clips vidéo très courts présentés en vue subjective, puis impose à l'apprenant une série d'essais à cadence rapide avec feedback immédiat sur l'indice déterminant. En répétant ainsi, XBT densifie les traces mnésiques, automatise la reconnaissance des schémas et accélère l'accès à un schéma décisionnel fiable. L'entraînement proposé s'inscrit ainsi dans la méthode XBT en proposant un entraînement fractionné de situations critiques d'experts. Il se compose de vidéos interactives basées sur des scénarios courts dérivés des verbatim d'experts issus de l'enquête qualitative. Chaque scénario est une vidéo à la première personne, issue du logiciel de simulation de combat aérien – Mission Combat Simulator (MCS), dans laquelle les participants doivent décider de tirer ou de ne pas tirer. Avant chaque vidéo, un briefing textuel fournit : (1) description de la cible ; (2) description du repère visuel ; (3) orientation cible-repère ; (4) cap d'attaque. Ces situations de tir/pas tir simplifient les critères de décision auxquels sont exposés les équipages sans prétendre reproduire la totalité, forcément variable, d'un contexte opérationnel réel.

Une correction est donnée à la fin de chaque essai durant la phase d'entraînement. Le dispositif suit un plan pré-test / entraînement / post-test pour un groupe de membres d'équipage en escadron de chasse de niveau intermédiaire, tandis qu'un groupe de membres d'équipage en escadron de chasse de niveau expert réalise exclusivement le pré-test. La première hypothèse est que les membres d'équipage de niveau expert auront une meilleure performance que les membres d'équipages de niveau intermédiaire en pré-test. La seconde hypothèse est que l'entraînement améliorera la performance des membres d'équipages de niveau intermédiaire entre pré-test et post-test.

2. Méthode

2.1. Participants

Soixante-dix membres d'équipage affectés en escadron de chasse, issus de l'Armée de l'air et de l'espace française, ont pris part à l'étude. Les critères de répartition reposaient sur l'avancement dans la filière chasse, le statut tactique et le capital d'heures de vol. Les membres d'équipages intermédiaires se situent dans la fenêtre charnière où le cursus bascule de l'acquisition des techniques de base à l'entraînement tactique appliqué : une centaine d'heures de vol chasse, aucune sortie en opération extérieure (OPEX) et moins de cinq ans de carrière. À l'inverse, les membres d'équipages experts totalisent en moyenne plus de mille heures sur avion de chasse, plus de dix ans de service, ont tous participé à des OPEX et ont des responsabilités de formation en escadron de chasse. Ce différentiel d'expérience – en volume horaire, en ancienneté et en statut tactique – fournit un gradient clair d'expertise décisionnelle. Voir tableau 1.

Tous les participants ont donné un consentement éclairé et volontaire. Aucune compensation n'a été versée. Le protocole a respecté les principes éthiques de la Déclaration d'Helsinki [WOR 18]. L'ensemble des données a été stocké et traité de façon sécurisée afin de garantir la confidentialité.

	Groupe intermédiaire de l'aviation de chasse	Groupe expert de l'aviation de chasse
Effectif (N)	31	39
Âge moyen (ET)	27,8 ans (2,4)	32,9 ans (4,8)
Ancienneté militaire (ET)	4,8 ans (1,3)	10,4 ans (5,0)
Heures de vol en avion de chasse (ET)	97,1 h (25,6)	1179,5 h (140,3)

Tableau 1. Description des groupes de participants

2.2. Matériel

2.2.1. Ordinateurs et logiciels.

Les expérimentations se sont déroulées sur des ordinateurs portables (Intel i7, 16 Go RAM), écran 17" (full HD, 60 Hz). Les temps de réponse, correspondant à l'appui de la touche *i* pour indiquer une réponse « tirer » ou l'appui de la touche *e* pour indiquer une réponse « ne pas tirer », étaient horodatés à 1 ms près par OpenSesame 3.3.12 [MAT 12]. Les vidéos ont été générés sur une station fixe (Intel i9-14900K, RTX 4090, 64 Go RAM) avec le logiciel de simulation de vol de combat *Mission Combat Simulator* (MCS).

2.2.2. Construction des scénarios.

Cent-quatre-vingts vidéos uniques ont été réalisés sous MCS, sur une carte dépourvue de marqueurs géopolitiques, en qualité « High ». Chaque séquence (10 s) est constituée d'une vidéo à la première personne, de situation de vol en piqué vers une cible, standardisée avec le même type d'aéronef pour tous les participants. La cible est visible dès la première image ; sa taille et celle du repère ont été ajustées en fonction de la distance d'apparition pour rester constantes à l'écran. Quatre indices invariants définissent chaque scène : (1) type de cible (ex. véhicule, bâtiment, infrastructure) ; (2) repère visuel saillant (ex. piste, route, rivière) ; (3) orientation cible-repère; (4) secteur de cap d'attaque (huit tranches de 20°). La moitié des clips correspond à une décision de tirer, l'autre moitié à ne pas tirer. Deux experts, membres d'équipage de chasse, ont validé la cohérence tactique de chaque vidéo.

2.2.3. Feedback.

À l'issue de chaque essai de la phase d'entraînement, un feedback (voir figure 1) s'affiche jusqu'à l'appui volontaire sur la barre d'espace : dans le bandeau gauche, les quatre éléments du briefing – cap d'attaque (jaune), cible (bleu), repère visuel (orange) et gisement (pêche) – sont rappelés sous forme de vignettes colorées ; chacun est comparé à la valeur réellement observée dans la vidéo par un symbole « = », puis validé par une coche verte ou invalidé par une croix rouge. Au bas de ce panneau, une case « TIR » ou « PAS TIR » indique immédiatement le statut de la bonne décision pour l'essai. Sur la partie droite, l'image figée du cockpit est annotée : pointillés de même couleur relie chaque vignette à son repère (cap, cible et point de repère) ainsi qu'un mini-compass indiquant l'orientation de l'avion (gisement). Le feedback est conçu pour recentrer l'attention du participant sur la conformité des quatre indices qui fondent la décision.

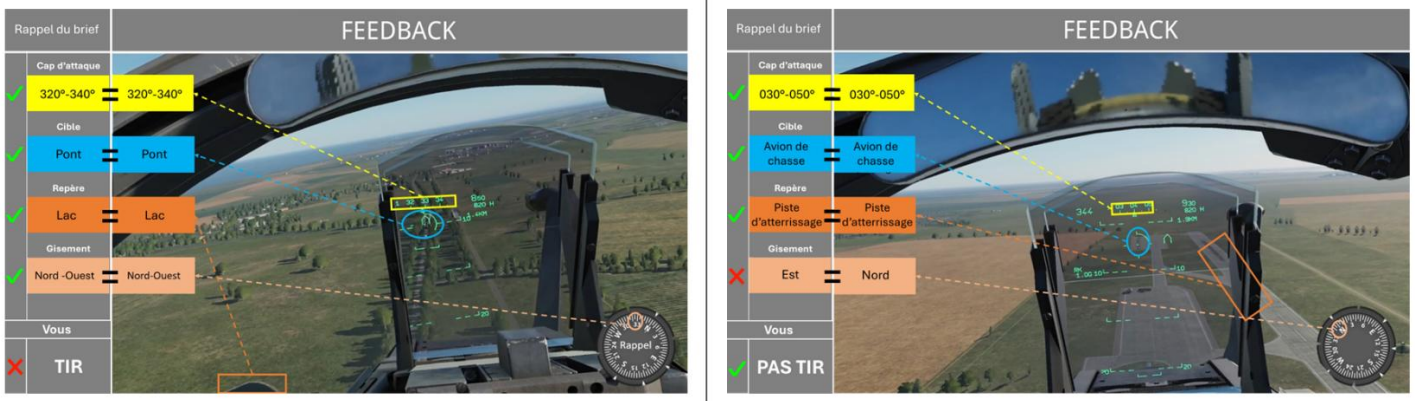


Figure 1. La réponse correcte pour l'essai est indiquée par une coche verte (bonne réponse) ou une croix rouge (mauvaise réponse) à côté de la case « TIR / PAS TIR ». À gauche : exemple d'un essai « TIR » mal répondu, tous les indices correspondaient mais le participant a choisi « PAS TIR » ; À droite : exemple d'un essai « PAS TIR » correctement identifié, le gisement observé ne correspondant pas au briefing.

2.3. Procédure

Les sessions se déroulaient individuellement dans une salle calme attenante à l'escadron. Les participants étaient assis à une distance fixe de l'écran (environ 50 cm) ; un essai d'habitué était fourni avant le début de la tâche pendant les consignes.

Le protocole comprenait trois phases successives : pré-test, entraînement et post-test. Le groupe intermédiaire a suivi l'ensemble du protocole; le groupe expert n'a réalisé que le pré-test. Dans chaque phase, le nombre d'essais dont la réponse correcte était « tirer » était exactement le même que celui dont la réponse correcte était « ne pas tirer ». Au total, 180 essais différents les uns des autres (correspondant aux 180 vidéos uniques) ont été programmés : 30 au pré-test, 120 à l'entraînement et 30 au post-test. Les essais dans le pré-test sont identiques pour les deux groupes, garantissant un niveau de difficulté équivalent. L'ordre des essais était entièrement aléatoire dans chaque phase. Voir le tableau 2 pour une synthèse des différences de protocole.

Phase	Groupe intermédiaire	Groupe expert
Pré-test ≈ 10 min	30 essais (15 tir / 15 pas-tir) sans feedback	30 essais (15 tir / 15 pas-tir) sans feedback
Entraînement ≈ 45 min	120 essais (60 tir / 60 pas-tir) feedback après chaque essai	(non réalisé)
Post-test ≈ 10 min	30 essais (15 tir / 15 pas-tir) sans feedback	(non réalisé)
Temps total par participant	≈ 65 min	≈ 10 min

Tableau 2. Synthèse des différences de protocole entre les groupes expérimentaux

À chaque essai, un briefing textuel (5 s) présente les quatre indices ; la vidéo démarre ensuite, la cible étant immédiatement visible. Le participant doit décider pendant la lecture de la vidéo s'il doit tirer, en appuyant sur la touche *i* du clavier, ou s'il doit ne pas tirer, en appuyant sur la touche *e*. La bonne réponse est de tirer si et seulement si les quatre éléments du briefing correspondent exactement à la vidéo. Si l'un

de ces éléments ne correspond pas, la bonne réponse est alors de ne pas tirer. Le temps de réponse est chronométré dès l'apparition de la première image. Enfin, à l'issue de chaque essai de la phase d'entraînement, l'écran de feedback s'affiche jusqu'à l'appui volontaire sur la barre d'espace. Voir figure 2.



Figure 2. Représentation schématique d'un essai type de décision de tir

3. Résultats

3.1. Comparaison pré-test entre membres d'équipage intermédiaire et expert

3.1.1. Taux d'exactitude (Figure 3a)

Une ANOVA à mesures répétées a été réalisée sur le taux d'exactitude, avec GROUPE (expert, intermédiaire) comme facteur inter-sujets et TIR (tirer, ne pas tirer) comme facteur intra-sujets.

Le facteur GROUPE est significatif : les membres d'équipage experts présentent une exactitude significativement plus élevée que les intermédiaires : $F(1, 68) = 62,928, p < .001, M = 72,8 \%, ET = 8,1 \%$ contre $M = 54,6 \%, ET = 11,1 \%$. Le facteur TIR est également significatif : les essais « ne pas tirer » donnent de meilleurs scores que les essais « tirer » ($F(1, 68) = 10,030, p = .002 ; M = 69,0 \%, ET = 16,8 \%$ contre $M = 60,5 \%, ET = 17,1 \%$).

Une interaction GROUPE \times TIR significative a été observée ($F(1, 68) = 4,535, p = .037$). Les tests post-hoc de Tukey montrent : une différence significative entre groupes pour les essais « tirer » ($p = .001$) ; une différence significative entre groupes pour « ne pas tirer » ($p < .001$) ; une différence, uniquement chez les membres d'équipages experts, entre « tirer » et « ne pas tirer » ($p < .001$).

3.1.2. Temps de réponse (Figure 3b)

Une seconde ANOVA à mesures répétées, menée sur les temps de réponse, révèle un effet principal du GROUPE : les membres d'équipage experts répondent plus vite que les intermédiaires ($F(1, 68) = 4,642, p = .035 ; M = 6566 \text{ ms}, ET = 1146 \text{ ms}$ contre $M = 7097 \text{ ms}, ET = 847 \text{ ms}$). Le facteur TIR est également significatif : les essais « ne pas tirer » sont plus rapides que les essais « tirer » ($F(1, 68) = 8,109, p = .006 ; M = 6524 \text{ ms}, ET = 1147 \text{ ms}$ contre $M = 6608 \text{ ms}, ET = 1228 \text{ ms}$).

L'interaction n'atteint pas le seuil de signification ($F(1, 68) = 2,856, p = .096$). Un post-hoc de Tukey indique toutefois que les intermédiaires sont plus lents sur les essais « ne pas tirer » comparés aux experts ($p < .05$).

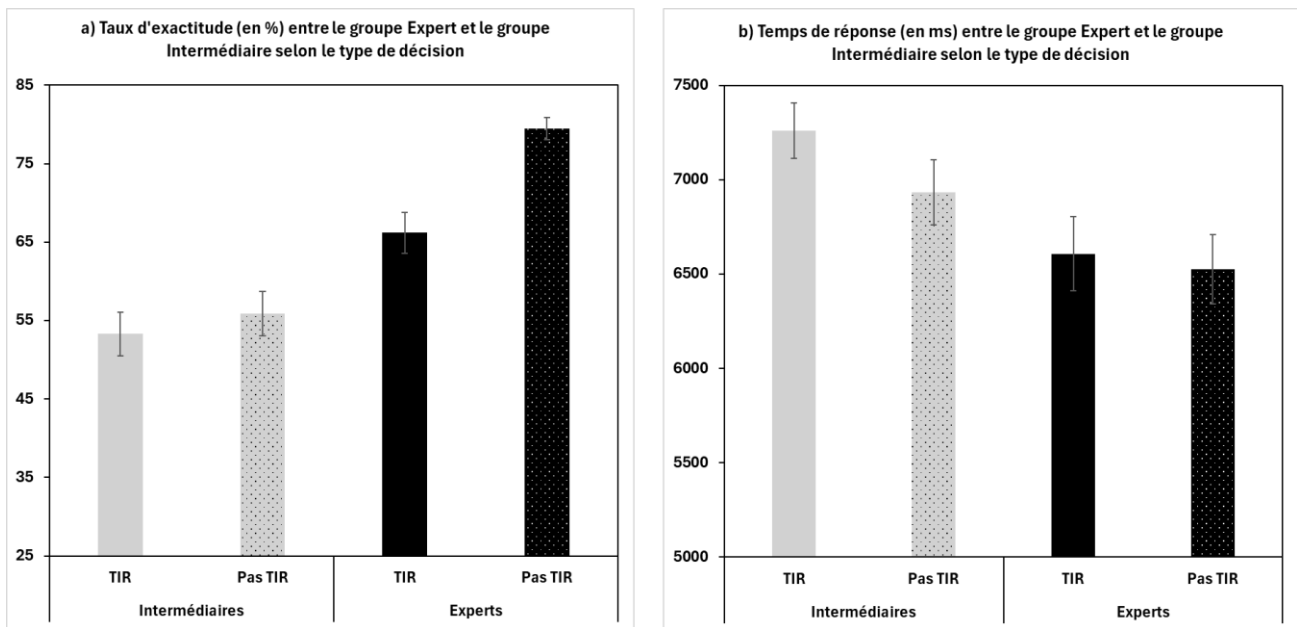


Figure 3. (a) taux d'exactitude moyens et (b) temps de réponse moyens selon le groupe et le type de décision

3.2. Effet de l'entraînement chez les membres d'équipage intermédiaire

3.2.1. Taux d'exactitude (Figure 4a)

Une ANOVA à mesures répétées, avec ENTRAÎNEMENT (pré-test vs. post-test) et TIR en facteurs intra-sujets, montre un effet principal de l'entraînement : les intermédiaires sont plus précis après entraînement qu'avant ($F(1, 30) = 14,707, p < .001$; $M = 61,5 \%$, $ET = 14,2 \%$ contre $M = 54,6 \%$, $ET = 11,1 \%$).

Aucun effet significatif du facteur TIR n'apparaît ($F(1, 30) = 0,502, p = .484$; $M = 55,9\%$, $ET = 15,4\%$ contre $M = 53,3\%$, $ET = 15,5\%$) et l'interaction n'est pas significative ($F(1, 30) = 0,162, p = .690$).

3.2.2. Temps de réponse (Figure 4b)

L'ANOVA conduite sur les temps de réponse révèle un effet principal de l'entraînement : après entraînement, les temps de réponse diminuent significativement ($F(1, 30) = 25,336, p < .001$; $M = 6374$ ms, $ET = 715$ ms contre $M = 7097$ ms, $ET = 847$ ms). Aucun effet principal du facteur TIR n'est relevé ($F(1, 30) = 0,315, p = .579$; $M = 6714$ ms, $ET = 880$ ms contre $M = 6757$ ms, $SD = 794$ ms).

En revanche, l'interaction ENTRAÎNEMENT \times TIR est significative ($F(1, 30) = 13,636, p < .001$). Les tests de Tukey indiquent : un gain important entre pré- et post-test sur les scénarios « tirer » ($p < .001$) ; une amélioration plus modeste mais significative sur « ne pas tirer » ($p = .046$) ; avant entraînement seulement, les essais « ne pas tirer » sont plus rapides que les essais « tirer » ($p = .02$).

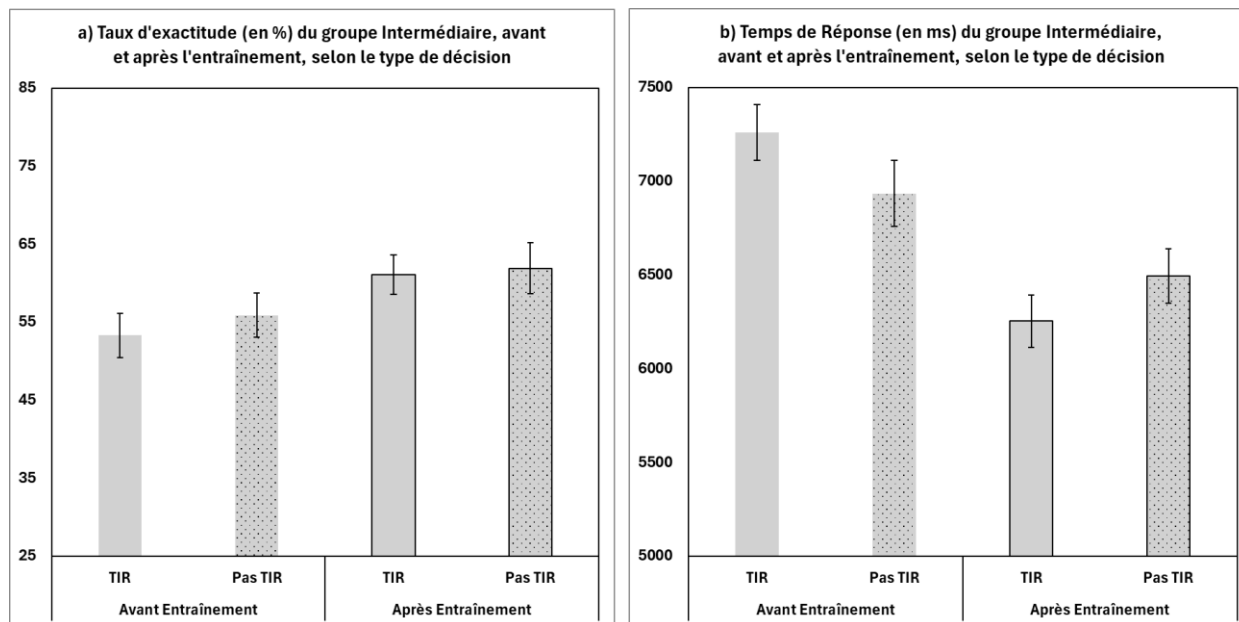


Figure 4. (a) *taux d'exactitude moyens* et (b) *temps de réponse moyens* pour le groupe intermédiaire, avant et après entraînement, selon le type de décision « tirer / ne pas tirer »

4. Discussion

L'objectif de cette étude était de vérifier qu'un entraînement fractionné pouvait améliorer, en un temps très court, la décision « tirer / ne pas tirer » chez des membres d'équipage de l'aviation de chasse.

Les résultats comparant les performances en prétest montrent que les experts présentent des taux d'exactitude plus élevés et des temps de réponse plus courts que leurs homologues intermédiaires, ce qui reflète la distinction classique entre experts et novices. La différence de performance indique que les quatre indices retenus – type de cible, repère visuel, gisement, cap d'attaque – suffisent à activer les schémas décisionnels associés à leurs connaissances expertes et implique un transfert pertinent de la situation réelle vers la situation d'entraînement proposée ici [BLA 19] [GOB 23]. Autrement dit, le matériel ne mesure pas une simple capacité perceptive, mais bien une compétence experte ; il peut fournir, à ce titre, une référence quantitative pour évaluer la progression des membres d'équipage intermédiaires.

Chez ces derniers, une unique session d'entraînement de 45 minutes a produit un gain significatif d'exactitude et de réduction du temps de réponse. Ce résultat va dans le sens de la théorie selon laquelle la répétition intensive et rapprochée d'épisodes proches consolide les schémas, accroît le stock de traces mnésiques et amorce le passage vers l'expertise [LOG 02]. Le gain est particulièrement marqué dans les situations où l'action de tir est autorisée ; l'inhibition du tir demeure, en revanche, le domaine où l'expérience opérationnelle confère un avantage durable.

Les résultats confirment que la décision de « tirer / ne pas tirer » est sensible au mécanisme d'automatisation [LOG 88] [FRO 23]. La théorie des instances prédit qu'une exposition répétée déplace la charge cognitive de la stratégie algorithmique vers la récupération de traces mnésiques, améliorant ainsi la vitesse et la fiabilité de la décision. Le protocole proposé place ainsi les individus « *sur l'autoroute de l'expertise* » [ERI 96] en réduisant la charge cognitive d'une tâche exigeante.

L'entraînement répond ainsi à un besoin précis : offrir un nombre élevé de décisions de tir sur un dispositif agile et facilement déployable. Il n'a pas vocation à remplacer les simulateurs haute-fidélités ni les vols d'entraînement, mais à favoriser les expositions. Intégré à une progression spiralaire, il peut servir de passerelle : d'abord isoler la tâche critique, puis l'intégrer dans des scénarios incluant différentes variables tactiques (variation du type d'armes, des positions des troupes amies, de la météo,

etc.). La nature même du dispositif – un simple ordinateur portable – autorise des sessions fréquentes, y compris entre deux vols ou à la maison.

Plusieurs limites appellent cependant à la prudence. Premièrement, la durabilité des gains n'a pas été testée au-delà du post-test immédiat. Deuxièmement, seules quatre règles de décision ont été travaillées ; d'autres variables tactiques (p. ex., présence de troupes amies, type d'armement, etc.) pourraient être intégrés pour approcher la complexité réelle. Troisièmement, bien que l'échantillon reste relativement modeste dans l'utilisation de statistiques inférentielles il n'en reste pas moins qu'il représente une part significative de la population cible (moins de 1000 membres d'équipage affectés en escadron de chasse).

Au-delà de ces limites méthodologiques, le protocole ne permet pas d'identifier ce qui est le plus déterminant dans le schéma décisionnel, qu'il s'agisse de l'orientation spatiale [HEG 05], de la recherche visuelle [WOL 94] ou encore de l'accessibilité aux règles de résolution de la tâche [BUN 04]. La répétition pouvant optimiser chacun de ces mécanismes, le protocole présenté ici ouvre la voie à de futures analyses permettant de mieux caractériser leur contribution respective, notamment par l'ajout de mesures différenciées (par exemple, oculométrie, erreurs typiques, verbatim des participants). Par ailleurs, si l'automatisation favorise la rapidité et la fiabilité, elle peut aussi exposer à des erreurs systématiques. Comme l'a montré Reason [REA 90], la dépendance à des schémas familiers peut induire des biais de reconnaissance ou des illusions de familiarité. Ces erreurs potentielles pourraient être explorés dans de futures études par l'introduction de scénarios trompeurs conçus pour activer des schémas inadaptés.

Néanmoins, l'entraînement proposé constitue une preuve de concept : il montre qu'un format vidéo court, centré sur le schéma décisionnel, permet de favoriser les apprentissages à des tâches critiques issues de l'expertise réelle. Facile à déployer en escadron, il pourrait enrichir les outils pédagogiques disponibles pour préparer les équipages aux décisions létales exigeant à la fois vitesse et fiabilité dans un environnement au sein duquel les décisions seront de plus en plus assistées par l'IA.

Dans cette perspective, l'utilisation de l'IA peut jouer un rôle bénéfique, voire crucial. Les systèmes basés sur l'IA pourraient réduire la charge cognitive de certains mécanismes, par exemple celui de l'orientation spatiale, en projetant en réalité augmentée des informations spatiales qui en simplifient le traitement. La compréhension des erreurs typiques de l'expert dans ces situations pourrait permettre d'implémenter dans les systèmes basés sur l'IA une connaissance des « erreurs de l'expert », afin de les détecter et d'en éviter la survenue. Ainsi, l'IA pourrait devenir un véritable « équipier cognitif », complémentaire de l'humain, et contribuer à une prise de décision optimisée.

L'avenir des forces aériennes s'oriente vers l'utilisation d'un système de systèmes : le *Système de Combat Aéronautique du Futur* (SCAF). Le SCAF comblera un *New Generation Fighter* (NGF) embarquant un ou des membres d'équipage accompagné de drones ailiers, les *Remote Carrier* (RC), connectés au combat cloud dans le cadre structurant de l'engagement des armées appelé le *Multi-Milieu Multi-Champs* (M2MC). Les opérateurs aux commandes du SCAF auront en charge des tâches « nobles » qui ne pourront pas, par définition, être réalisées par des systèmes basés sur l'IA. Ces tâches, comme la prise de décision de tir pour soi (NGF) ou pour d'autres (RC) sont coûteuses cognitivement pour l'individu. Il est d'ailleurs probable qu'il ne reste aux opérateurs du NGF que les tâches « nobles », c-à-d les plus coûteuses cognitivement à réaliser. De plus le nombre d'exposition à ces tâches en vol réel devrait être faible, comme c'est le cas pour les prises de décision de tir actuellement, ce qui est de nature à favoriser l'exigence cognitive de ces tâches. Ainsi, le développement de divers entraînements, agiles et faciles à déployer, simulant ces tâches exigeantes permettra de mieux aborder ce nouvel outil et ainsi de profiter pleinement de ses avantages technologiques.

Au-delà des équipages de chasse, cette approche d'entraînement ciblée sur des tâches cognitivement coûteuses peut être transposée à toute activité, militaire ou civile, évoluant dans un système sociotechnique complexe, dynamique et à haut risque, où l'accès à la situation réelle demeure limité ou dangereux. Son utilité pourrait se vérifier, par exemple, chez les contrôleurs aériens qui doivent, en

quelques secondes, résoudre un conflit de trajectoires, ou encore chez les coordinateurs de cellule de crise chargés de décider s'il faut déclencher l'alerte à la population. Elle s'impose tout autant pour les astronautes, dont les vols restent rares, ou pour les ministres, parfois en fonction pour une durée brève [FRO 23]. Ainsi, le développement d'une telle méthode d'entraînement pourrait constituer un véritable tournant dans une société soumise à des mutations rapides induites par une technologisation à la croissance exponentielle.

5. Bibliographie

- [BLA 19] BLACKER K. J., HAMILTON J., ROUSH G., PETTIJOHN K. A., BIGGS A. T., "Cognitive training for military application: a review of the literature and practical guide", *Journal of cognitive enhancement*, 3, 30-51, 2019.
- [BUN 04] BUNGE S. A., "How we use rules to select actions: a review of evidence from cognitive neuroscience", *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 4(4), 564-579, 2004.
- [ERI 96] ERICSSON K. A., *The road to excellence: the acquisition of expert performance in the arts and sciences, sports, and games*, Psychology press, 1996.
- [ERI 95] ERICSSON K. A., KINTSCH W., "Long-term working memory", *Psychological review*, 102(2), 211, 1995.
- [ERI 18] ERICSSON K. A., "Intelligence as domain-specific superior reproducible performance: The role of acquired domain-specific mechanisms in expert performance", in R. J. Sternberg (Ed.), *The nature of human intelligence* (pp. 85–100), Cambridge University Press, 2018.
- [FAD 13] FADDE P. J., "Accelerating the acquisition of intuitive decision making through expertise-based training (XBT)", *Proceedings of the Interservice/Industry Technology, Simulation, and Education Conference (IITSEC)*, 2013.
- [FLA 54] FLANAGAN J. C., "The critical incident technique", *Psychological bulletin*, 51(4), 327–358, 1954.
- [FRO 23] FROGER G., BLÄTTLER C., BONNARDEL N., "L'acquisition de l'expertise ou l'abandon progressif du renforcement des processus génériques", *Psychologie française*, 2023.
- [GOB 23] GOBET F., SALA G., "Cognitive training: a field in search of a phenomenon", *Perspectives on psychological science*, 18(1), 125-141, 2023.
- [HEG 05] HEGARTY M., WALLER D., "Individual differences in spatial abilities", *The Cambridge handbook of visuospatial thinking*, 121-169, 2005.
- [JOH 23] JOHNSON J., "Automating the OODA loop in the age of intelligent machines: reaffirming the role of humans in command-and-control decision-making in the digital age", *Defence Studies*, 23(1), 43-67, 2023.
- [KAH 11] KAHNEMAN D., *Thinking, fast and slow*, Macmillan, 2011.
- [LOG 88] LOGAN G. D., "Toward an instance theory of automatization", *Psychological review*, 95(4), 492–527, 1988.
- [LOG 02] LOGAN G. D., "An instance theory of attention and memory", *Psychological review*, 109(2), 376, 2002.
- [MAT 12] MATHÔT S., SCHREIJ D., THEEUWES J., "Opensesame: an open-source, graphical experiment builder for the social sciences", *Behavior research methods*, 44(2), 314-324, 2012.
- [MEI 10] MEIRAN N., "Task switching: mechanisms underlying rigid vs. Flexible self control", *Self control in society, mind, and brain*, (pp. 202–220). New york, ny: oxford university press, 2010.
- [MON 96] MONSELL S., Control of mental processes. In v. Bruce (ed.), *unsolved mysteries of the mind: tutorial essays in cognition* (pp. 93–148). Erlbaum (uk) taylor & francis, publ, 1996.
- [PRI 97] PRINZ W., "Perception and action planning", *European journal of cognitive psychology*, 9(2), 129-154, 1997.
- [RAS 07] RASMUSSEN R. E., "The wrong target: the problem of mistargeting resulting in fratricide and civilian casualties", *National defense university norfolk va joint advanced warfighting school*, 2007.
- [REA 90] REASON J., *Human error*, Cambridge university press, 1990.
- [SHI 77] SHIFFRIN R. M., SCHNEIDER W., "Controlled and automatic human information processing: II. Perceptual learning, automatic attending and a general theory", *Psychological review*, 84(2), 127, 1977.
- [SWE 94] SWELLER J., "Cognitive load theory, learning difficulty, and instructional design", *Learning and instruction*, 4(4), 295-312, 1994.
- [WIG 85] WIGHTMAN D. C., LINTERN G., "Part-task training for tracking and manual control", *Human factors*, 27(3), 267-283, 1985.

[WOL 94] WOLFE J. M., “Visual search in continuous, naturalistic stimuli”, *Vision research*, 34(9), 1187-1195, 1994.

[WOR 18] WORLD MEDICAL ASSOCIATION, *Declaration of Helsinki – Ethical principles for medical research involving human subjects*, 2018.

Sites internet

[WEB 01] <https://press.un.org/en/2023/gadis3731.doc.htm> – Consulté en dernier le 16 juillet 2025

[WEB 02] <https://www.defnat.com/e-RDN/vue-article-cahier.php?carticle=106> – Consulté en dernier le 16 juillet 2025