

Changements technologiques et compétences individuelles : l'influence des glass-cockpits sur la formation des pilotes de l'armée de l'air

Technological change and individual competencies: the influence of glass cockpit aircraft on French Air Force pilot training and competencies

Cyril Camachon¹, Pierre Barbaroux^{1, 2, 3}

¹ Centre de recherche de l'armée de l'air, Ecole de l'air, Salon de Provence, France, cyril.camachon@ecole-air.fr

² Chaire « Cyber-résilience Aérospatiale », pierre.barbaroux@ecole-air.fr

³ Université de Strasbourg, BETA, CNRS UMR 7522.

RÉSUMÉ. L'article interroge les changements induits par l'introduction d'aéronefs de nouvelles générations sur la formation des pilotes de l'armée de l'air. Ces nouveaux aéronefs (Cirrus SR20 et Pilatus PC-21), dotés de capacités nouvelles (glass-cockpits et simulation embarquée), représentent une rupture technologique susceptible d'affecter la nature et la diversité des compétences des pilotes, ainsi que le processus de formation qui gouverne leur acquisition. Capitalisant sur plusieurs études technico-opérationnelles conduites par les auteurs au profit de l'état-major de l'armée de l'air et des écoles de formations du personnel navigant, l'article montre, d'une part, que les nouvelles fonctionnalités offertes par ces aéronefs ne sont pas neutres sur le processus d'acquisition du socle de compétences techniques de base (« les basiques ») lors des phases initiales de la formation des pilotes. D'autre part et plus largement, il identifie les conditions favorables à une exploitation raisonnée et efficace des capacités de simulation embarquée en matière de formation des pilotes de combat de l'armée de l'air.

ABSTRACT. This article investigates the influence of introducing new generation aircraft to the training of Air Force pilots. New generation aircraft (Cirrus SR20 and Pilatus PC-21), equipped with novel capabilities (glass cockpit and embedded training), represent a technological disruption that is likely to affect the nature and diversity of pilots' competencies, and more globally the learning process that leads to their development. Building on past research projects that the authors conducted for the benefit of Air Force Staff and Pilot Training Schools, the article first shows that the new functionalities offered by next generation aircraft are not neutral in regards to how future pilots develop fundamental technical skills ("the basics") during the initial stages of the training process. Secondly, it identifies the conditions enabling a consistent exploitation of embedded simulation techniques for training pilots.

MOTS-CLÉS. Changement technique, Apprentissage, Compétences, Glass-cockpit, Simulation Embarquée.

KEYWORDS. Technological change, Learning, Competencies, Glass cockpit, Embedded Simulation.

1. Introduction

Technologie et compétences sont intimement liées [GOL 98]. De nombreux travaux établissent l'existence d'une relation étroite entre les propriétés des technologies utilisées pour produire, gérer et communiquer des informations ou aider à la décision, et les compétences des acteurs responsables de leur conception, de leur maintenance et de leur utilisation [ADL 91 ; BRE 05 ; GAL 02]. Si nous considérons, avec [CAP 93, p. 516], que « *la technologie détermine la nature des compétences nécessaires* », alors toute modification affectant les propriétés sociomatérielles et/ou les fonctionnalités de la technologie induit nécessairement une reconfiguration des compétences des acteurs, voire de leur qualifications [LEI 96 ; OIR 05].

Les organisations aérospatiales et de défense (A&D) sont particulièrement sensibles aux innovations technologiques, en particulier celles qui concernent les capacités des aéronefs [BAR 11] et des systèmes de Commandement et de Conduite des opérations (C², GOD 10). La numérisation des cockpits et des environnements de C², l'automatisation de certaines tâches de pilotage, de navigation

ou de contrôle du trafic aérien, et l'hyper-connectivité des aéronefs et des opérateurs désignent en effet des capacités technologiques nouvelles auxquelles les acteurs doivent s'adapter.

Dans ce cadre, l'article interroge la nature des changements induits par l'introduction de nouveaux aéronefs sur les compétences des pilotes de l'armée de l'air française. Plus particulièrement, il étudie les implications de l'utilisation des avions Cirrus SR20 et Pilatus PC-21 sur la formation des pilotes et l'acquisition des compétences, deux aéronefs dotés d'une avionique moderne de type « glass-cockpit¹ » et, pour le PC-21 uniquement, d'une capacité de simulation embarquée.

Nous étudions plus spécifiquement l'influence de l'introduction du SR20 sur le processus d'acquisition des compétences techniques élémentaires (« les basiques ») lors de la phase initiale de formation du pilote. Le modèle de formation des pilotes de l'armée de l'air repose en effet sur la décomposition du processus de formation en phases, l'objectif étant d'accompagner le développement de l'expertise du pilote stagiaire à travers l'acquisition progressive de trois catégories de compétences : techniques, relationnelles et situationnelles [BAR 12]. Ainsi, à l'issue de la phase initiale de formation (Ecole de l'air à Salon de Provence), l'élève-pilote doit faire la preuve de sa maîtrise d'un socle de compétences de base relatif à la réalisation de manœuvres élémentaires appliquées au pilotage (roulage, décollage, navigation, atterrissage, voltige basique), à travers la mobilisation d'un ensemble d'attitudes comportementales conformes aux principes garantissant la sécurité des vols (circuits visuels [DUB 15] et boucle de contrôle des paramètres du vol, navigation et conscience de la situation). Cette phase cruciale du processus de formation est en outre réalisée en temps contraint (27 à 36 semaines maximum), l'acquisition des habiletés élémentaires (« stick and rudder skills ») reposant sur la répétition d'un cycle composé de trois séquences (de vol) : découverte, mise en œuvre et validation.

Le changement principal qu'introduit l'arrivée d'aéronefs dotés de glass-cockpit peut être analysé à deux niveaux. Premier niveau, il requiert la maîtrise d'une gestuelle (« boutonite ») adaptée à l'usage d'une interface numérisée ; il engage également le développement de compétences nouvelles relatives à la gestion de l'espace informationnel, ces compétences nouvelles affectant par extension la dynamique de construction de la conscience de la situation du pilote. Deuxième niveau, l'introduction d'aéronefs type Cirrus SR20 (glass-cockpit, phase initiale) et Pilatus PC-21 (simulation embarquée) ouvre un champ de questionnements relatif à la décomposition et à la distribution des contenus de formation au cours du parcours de formation du pilote. Ces deux niveaux d'analyse apparaissent pertinents pour notre propos.

Le reste de l'article est organisé comme suit. La section 2 présente le modèle et les techniques de formation du pilote ainsi que la typologie des compétences développées. La section 3 introduit le contexte de la recherche (collecte et analyse des données, présentation du contexte de la recherche). La section 4 rend compte des évolutions observées en matière de développement des compétences techniques élémentaires (« les basiques ») lors de la phase initiale de formation sur Cirrus SR20. Elle discute également des implications de ces évolutions au regard des enjeux soulevés par l'utilisation des techniques de simulation embarquées lors des phases suivantes du parcours de formation du pilote. La section 5 discute les implications de la recherche et conclue.

2. Le modèle de formation du pilote : fondements épistémologiques et typologie des compétences

La formation des pilotes reflète un choix épistémologique profond consistant à multiplier les opportunités de développement de l'expérience des individus à travers leur mise en situation lors de vols réels et simulés. Ici, l'apprentissage résulte de l'accumulation de connaissances expérientielles. Dans ce cadre, l'expérience désigne « à la fois l'objet et le produit de l'apprentissage » [BAR 16, p. 42].

L'armée de l'air a choisi de former ses pilotes en combinant différents procédés d'entraînement fondés sur la mise en situation des individus et des équipages. Ces procédés s'inscrivent dans le cadre de référence des simulations de type LVC - *Live* (Opérateurs et matériels réels), *Virtual* (Opérateurs réels – environnements et systèmes simulés), et *Constructive* (Opérateurs et systèmes simulés), ou de leur combinaison (e.g., la simulation embarquée). Ces différents procédés sont en effet particulièrement attractifs dans la mesure où ils multiplient les opportunités d'accumulation de l'expérience et d'acquisition de compétences [BOL 09] dans des environnements qui, selon les objectifs de la formation, peuvent être réalistes ou imaginaires, simples ou complexes. La simulation LVC permet ainsi de confronter les individus à des événements critiques dans des conditions (e.g., coûts, délais, sécurité) maîtrisées [SAL 98 ; 09].

La phase initiale de formation du pilote repose sur la combinaison de séquences de vols réels et de vols simulés au sol. Les pilotes en formation alternent les cycles de découverte, mise en œuvre et validation des compétences au sol et en vol, la consolidation des aptitudes ainsi développées procédant selon un mécanisme de transfert des connaissances [NOK 09]. Plus largement, BAR [10] et BAR [12] ont montré dans deux études de cas portant sur les escadrons de transports de l'armée de l'air, que les compétences acquises et mises en œuvre par le personnel navigant peuvent être classées en trois catégories : technique, relationnelle et situationnelle. Les compétences techniques relèvent de la mobilisation de savoirs et savoir-faire appliqués à la réalisation de tâches liées au pilotage de l'aéronef (atterrissage, décollage, navigation etc.), à la mise en œuvre des réglementations aéronautiques générales et spécifiques (check-lists, sécurité des vols), et à la surveillance des automatismes (e.g., gestion du pilote automatique). Ces compétences sont développées tout au long du parcours de formation du pilote jusqu'à l'obtention de la qualification « Pilote de combat opérationnel » (*combat ready*). Lors de la phase initiale de formation, les compétences techniques se limitent à la compréhension du comportement « physique » de l'aéronef (« sens de l'air »), à la réalisation des manœuvres élémentaires liées au pilotage de l'aéronef (« basiques ») et à la gestion rudimentaire des systèmes de navigation et de communication (gestion de l'espace informationnel).

Si leur développement débute lors de la phase initiale de formation du pilote, les compétences relationnelles et situationnelles sont surtout cultivées lors des phases ultérieures, le but étant d'amener le pilote à maîtriser les enjeux relatifs à la mise en œuvre d'un système d'armes dans des environnements décisionnels plus complexes. Dans ce type d'environnement, la maîtrise des communications internes et externes (e.g., standardisation des langages, usages des systèmes de communication) et la gestion des dynamiques collectives (e.g., synergie équipage, briefing-débriefing des missions, connaissances des codes et des pratiques de travail au sein d'organisations interarmées et internationales) deviennent prépondérantes. Cela est vrai également pour les compétences situationnelles qui désignent l'ensemble des compétences relatives à la prise de décision (e.g., interpréter et donner du sens aux situations) et à la gestion d'un environnement tactique complexe (recherche et synthèse des informations tactiques, gérer en temps réel les vols en formation, proposer certaines manœuvres etc.). Notons que les compétences relationnelles et situationnelles ne sont pas indépendantes et que les savoirs faire, savoir être et savoir quoi faire associés sont développés lors des différentes phases de la formation du pilote et, plus largement, de sa carrière opérationnelle.

Les sections suivantes explorent les changements induits par l'introduction des aéronefs Cirrus SR20 et Pilatus PC-21 sur les compétences et la formation des pilotes. Nous présentons d'abord le contexte de la recherche (sources et analyse des données, description de la phase initiale du parcours de formation), puis nous présentons les résultats en distinguant deux niveaux d'analyse : les modifications du contenu et des modalités d'acquisition des compétences techniques et, les adaptations de la décomposition et de la distribution des programmes de formation au sein des différentes phases du parcours de formation du pilote justifiées par la possibilité d'exploiter très tôt dans ce parcours la capacité de simulation embarquée offerte par le Pilatus PC-21.

3. Contexte de la recherche

3.1. Sources et analyse des données

Les auteurs du présent article ont collecté une grande variété de données à l'occasion de la réalisation de plusieurs études technico-opérationnelles au profit de l'armée de l'air entre 2005 et 2017. Ces études leur ont permis de travailler au contact des officiers en charges de la planification, du commandement et de la conduite des opérations (opérations réseau-centrées et C², 2005), des escadrons de chasse (introduction du Rafale et évolution des compétences, 2009), des escadrons de transport (introduction de l'A400M et transfert des compétences, 2010), des opérateurs de drones (filiale de formation, 2010), des unités de formation des pilotes (Simulation sol et simulation embarquée, 2012 ; Gestion de système en formation initiale, 2014). Outre la diversité des thématiques de recherche (e.g., systèmes de commandement et de conduite des opérations, compétences et processus d'apprentissage, de formation et d'entraînement), des organisations (en France et à l'étranger) et des acteurs (officiers supérieurs, pilotes, navigateurs, mécaniciens navigants systèmes d'armes, opérateurs drones, formateurs, moniteurs etc.), ces études les ont conduit à explorer les multiples dimensions du changement technologique et de ses implications individuelles et organisationnelles.

Cette contribution est le résultat d'une réflexion pluridisciplinaire (sciences de gestion et sciences cognitives) qui capitalise notamment sur quatre études distinctes auxquelles les auteurs ont participé (cf. encadré A). Ces études proposent des enquêtes de terrain conduites, pour trois d'entre elles (2009, 2010 et 2012), selon une méthodologie qualitative de type étude de cas [YIN 05] et, pour la dernière (2014), dans le respect des principes de la méthode expérimentale. Ces enquêtes ont nécessité le recueil et l'analyse de données primaires (39 entretiens semi-directifs, observations participantes et non participantes au cours de dizaines de briefing et débriefing de missions, de séances de formation et d'entraînement et d'exercices en vols réels ou simulés, expérimentations sur une population d'élèves-pilotes et de formateurs). Ces sources primaires ont été complétées par une variété de données secondaires (documentations institutionnelle, conceptuelle et doctrinale, études antérieures, publications professionnelles). Selon les études, l'analyse thématique des données a procédé par triangulation et codage ouvert (traitement manuel ou à l'aide de logiciels type NVivo). La robustesse des catégories et de la liste de codage a été obtenue grâce à des aller-retours successifs auprès des opérationnels.

Encadré A.

Les quatre études sur lesquelles s'appuie cette contribution sont :

1. [CAM 14] 2014. Impact de l'introduction de modules de formation à la Gestion de Systèmes (GS) sur l'apprentissage des basiques de vols en Phase I (Note de synthèse - 6 pages). Contrat de recherche sur commande des Ecoles de Formation du Personnel Navigant (E.F.P.N). Cette étude contribue à étudier l'impact des systèmes sur la conduite du vol, et à définir les plus-values et pièges liés à la manipulation de ces systèmes en vol, afin de proposer des recommandations à destination des instructeurs et moniteurs.
2. [CAM 12]. La simulation sol et la simulation embarquée (56 pages). Contrat de recherche sur commande du Bureau Plan de l'Etat major de l'Armée de l'air (E.M.A.A.). Cette étude explore les limites et les risques de l'utilisation de la simulation (LVC) dans la formation et l'entraînement du personnel navigant, en s'intéressant notamment à l'impact sur la sécurité aérienne de la capacité "d'injecter du virtuel dans des systèmes réels" offerte par les avions de formation moderne.

3. [BAR 10]. Maintien et transfert des compétences dans les escadrons de transport tactique : du Transall à l'A400M (105 pages). Contrat de recherche sur commande du Bureau Plan de l'Etat major de l'Armée de l'air (E.M.A.A.). Cette étude est réalisée par une équipe composée d'économistes et de gestionnaires. Elle explore la double question du maintien des compétences des équipages de conduite Transall et de leur transfert vers les équipages A400M.
4. [BAR 09]. Les compétences de l'armée de l'air à horizon 2015 (125 pages). Contrat de recherche sur commande du Bureau Plan de l'Etat major de l'Armée de l'air (E.M.A.A.). Cette étude est réalisée par une équipe d'économistes et de gestionnaires. Elle contribue à identifier les compétences clés associées à l'usage des nouveaux systèmes et technologies complexes (système Rafale et Liaison de données tactique, L16) dans les escadrons de l'Armée de l'air.

3.2. La phase initiale de formation à Salon de Provence

L'armée de l'air française assure la formation ab initio de son personnel navigant (Pilotes de chasse, pilotes de transport et navigateurs de combat). Pour la filière « Chasse » par exemple, l'institution reconnaît un pilote comme « expert » dès lors que celui-ci a obtenu la qualification de Chef de Patrouille (CP). Le parcours menant à cette qualification nécessite en moyenne huit années d'entraînements sur avions écoles et sur avions d'armes. Concernant la partie « école », la formation est découpée en 4 phases principales. La formation aéronautique initiale – la Phase 1 – se déroule à Salon de Provence sur planeur et sur avion léger de type Cirrus SR20. Durant cette phase, les élèves-pilotes apprennent essentiellement à maîtriser le vol à vue. Lors de la phase 2, réalisée à Cognac, ils apprennent à maîtriser le vol aux instruments, à pratiquer la voltige et à réaliser des navigations plus évoluées et plus complexes. La pré-spécialisation « chasse » conduit les élèves-pilotes sélectionnés vers la phase 3, à Tours, où ils apprendront à piloter un avion à réaction (Alphajet). Enfin, la phase 4, réalisée à Cazaux, doit permettre l'acquisition des compétences tactiques élémentaires (sur Alphajet également). A l'issue de ces quatre phases, les élèves-pilotes, devenus « stagiaires », devront encore passer quelques mois dans des escadrons spécialisés afin de se former spécifiquement sur l'avion d'armes sur lequel ils voleront lorsqu'ils rejoindront leur premier escadron d'affectation.

S'agissant de la phase 1 (Salon de Provence), le Cirrus SR20 a succédé au Socata TB10 à l'été 2012 amenant ainsi un bond technologique important. En effet, le cockpit passe d'une instrumentation de bord datant du milieu des années 1970 (multi-cadrans, multi-jauges) à une instrumentation composée d'afficheurs numériques (cf. Fig. 1).



Figure 1. Cockpit analogique (gauche) vs glass cockpit (droite)

Le Cirrus SR20 fait partie de cette catégorie d'avions modernes qualifiés de *Technically Advanced Aircraft* (TAA) du fait de la présence à bord d'équipements et de systèmes avioniques modernes. En

effet, de manière générale, les TAA sont des avions dans lesquels le pilote doit interagir avec un ou plusieurs ordinateurs dans le but de voler, naviguer ou communiquer. Selon l'Administration Fédérale de l'Aviation américaine (FAA), un TAA est un aéronef équipé *a minima* d'un système de navigation GPS certifié IFR, d'un système de cartographie (*Moving Map Display*) et d'un pilote-automatique intégré. Toutefois, de nombreux aéronefs classés dans la catégorie TAA disposent également d'un écran multifonctions (MFD) permettant d'afficher les conditions météo, le trafic aérien ou la topographie.

Ce changement de niveau de la technologie embarquée n'est pas sans conséquence sur la façon de piloter et d'apprendre à piloter [FUN 99]. Ainsi, lors de son arrivée à Salon de Provence, le Cirrus SR20 est apparu sur-dimensionné aux yeux de certains instructeurs de la phase I, dans la mesure où l'objectif de cette phase est essentiellement de permettre aux jeunes élèves-pilotes d'acquérir « les basiques de vol ». Bien qu'il n'en existe pas de définition officielle, les instructeurs-pilotes militaires se réfèrent au concept de basique de vol pour définir les compétences simples et essentielles à l'exécution d'un vol sans considération tactique. Il s'agit d'habiletés fondamentales permettant de faire évoluer un avion dans la troisième dimension en toute sécurité. Les basiques peuvent se traduire en actes élémentaires à partir desquels se développent des compétences plus complexes. Traditionnellement, il est possible de les regrouper en cinq grands domaines (cf. Tableau 1).

Domaines	Compétences
Pilotage	Tenue machine : assiette et inclinaison Maintien et respect de la trajectoire Respect des calages Relation assiette - vitesse
Surveillance du ciel	En palier En virage
Actions vitales	Périodiques En montée/descente
Navigation	Procédures de départ et d'arrivée Navigation à vue Vol sans visibilité
Communication	Phraséologie Gestion radio

Tableau 1. Les compétences basiques regroupées par Domaines de compétences

Les objectifs de la phase I sont de donner aux élèves le socle de compétences nécessaire à la poursuite de leur cursus en écoles aval tout en évaluant leur potentiel de progression. Au travers de différents modules, les élèves sont évalués en permanence, et une vitesse de progression jugée trop lente peut marquer l'arrêt définitif de leur formation de pilote. Au cours de cette phase, on retrouve par exemple les modules de navigation à vue (BN - Basic navigation), Secteur (GH - General Handling) et d'atterrissage (BL - Basic Landing) qui concourent à l'acquisition des compétences basiques de pilotages et de navigation. A ceci s'ajoute les modules voltige (BA - Basic Aerobatics), vol de nuit (NF - Night Flight), et vol aux instruments (BI - Basic instruments) qui introduisent de nouvelles briques de compétences tout en offrant l'opportunité aux pilotes-instructeurs d'examiner la capacité d'assimilation des élèves. La quasi-totalité de ces modules est développée et consolidée lors de la phase II (Cognac). Un module de vol en formation (BF - Basic Formation flying) est également introduit avec pour

objectif final de permettre aux élèves de réaliser et de conduire des missions sur secteur et d'accomplir les tâches de navigation de façon autonome (i.e., vol solo sans instructeur à bord).

L'arrivée, à compter du second semestre 2018, du Pilatus PC-21 lors de la phase II (Cognac) de formation, soulève un nouveau défi lié aux changements technologiques apportés par un aéronef doté notamment de la capacité de simulation embarquée. Une réflexion sur la redéfinition de l'articulation des modules de formation entre la phase I et II (voire III et IV), ainsi que sur la redéfinition du concept de basique de vol est nécessaire afin de garantir la parfaite adéquation entre ces capacités technologiques nouvelles et les compétences du personnel navigant.

4. Numérisation des glass cockpits : quelles implications pour la formation des pilotes ?

4.1. Les compétences techniques élémentaires revisitées

Dans les années 2000, l'aviation civile générale a vu les TAA bouleverser les habitudes en matière de pilotage, de formation et de sécurité. Ces avions dotés d'une technologie avancée sont supposés participer à améliorer la sécurité aérienne. Or, peu de temps après leur introduction dans l'espace aérien, les autorités américaines ont constaté que le taux d'accidents de ce type d'avions était supérieur à celui attendu. Pour y remédier, le programme de recherche TAA-FITS développé par la FAA et un groupe d'industriels a été lancé en 2003 [TAA 03]. Un des objectifs de ce programme était de comprendre si et comment les nouvelles technologies présentes dans les TAA étaient liées aux accidents impliquant ce type d'avions. Les premiers éléments issus de ces recherches montrent que l'avionique moderne des TAA implique une remise en question profonde de la manière de piloter et par conséquent d'apprendre à piloter. L'arrivée de nouvelles technologies dans ces avions a ainsi généré des changements importants dans au moins trois domaines.

- Le premier domaine concerne l'accès à l'information et la gestion des flux d'information. En effet, à bord de ce type d'avion et contrairement à ce qu'un pilote peut trouver dans les avions classiques, les sources d'informations sont multiples, continues et abondantes. Ainsi, l'élève-pilote doit développer très tôt des compétences lui permettant de savoir sélectionner l'information pertinente au bon moment parmi tous les flux d'information, et de comprendre la portée et l'utilité de cette information vis-à-vis du contexte afin de prendre les bonnes décisions.
- Le deuxième domaine concerné par le changement est bien connu des pilotes de lignes et des pilotes militaires confirmés. Il s'agit de l'automatisation des cockpits. Jusqu'à présent, un haut niveau d'automatisation (e.g., Pilote automatique, FMS) était réservé aux avions de ligne ou militaires. Aujourd'hui ces systèmes sont accessibles et présents dans la flotte TAA de l'aviation générale. Or, de nombreux incidents et accidents dans l'histoire récente de l'aéronautique témoignent de la nécessité de posséder une solide formation pour travailler en interaction avec et au sein de systèmes fortement automatisés. Il apparaît alors indispensable que les élèves-pilotes soient sensibilisés le plus tôt possible aux apports, aux limites et aux dangers de l'automatisation des cockpits modernes pour ne pas subir les *ironies de l'automatisation* [BRA 83] observés notamment dans l'aviation commerciale.
- Enfin, le dernier domaine concerne l'architecture logicielle et de navigation propres aux systèmes informatisés : la « Gestion Système» (GS). La gestion d'un vol à bord d'un TAA se fait en effet principalement via ces systèmes. Or, il apparaît clairement que leur logique de fonctionnement relève davantage du monde de l'informatique que de celui de l'aéronautique classique. Les individus peu familiers à ces logiques « informatiques » risquent de se perdre dans les nombreux menus, sous-menus, options et fonctionnalités. Cette logique « informatique » de la GS représente un danger car elle possède une forte propension à capturer l'attention du pilote sur la gestion d'épiphénomènes orientés « système » au dépend

d'une gestion plus globale du vol. La maîtrise de la GS devient une composante capitale du registre de compétences du jeune pilote.

Ces changements ont un impact direct sur la manière dont le pilote perçoit et comprend son environnement, prend des décisions et gère le risque. Les compétences du pilote principalement affectées par les changements observés concernent moins les habiletés techniques (*technical skills*) que la manière dont le pilote perçoit et comprend son environnement, prend des décisions et gère le risque.

4.1.1. Perception et compréhension de son environnement

Le préalable à toute prise de décision est de posséder une bonne représentation de la situation. La construction de cette « bonne » représentation repose en grande partie sur le recueil et la synthèse d'informations fiables, récentes, précises et multiples (i.e., état de l'avion, localisation et environnement extérieur proche). Avec l'avènement des systèmes avioniques modernes, toutes les informations fournies par le système au pilote lui permettent d'avoir une conscience de la situation (Situation Awareness – SA , cf. Encadré B pour une présentation du concept) bien plus fine et développée. La contrepartie de cette amélioration de la SA est que le pilote place souvent une grande confiance dans la capacité du système à rendre compte de la réalité de la situation d'une manière exhaustive et complète. Le pilote pourrait ainsi développer, à tort, le sentiment de « maîtriser » l'incertitude inhérente à n'importe quel vol grâce à la maîtrise de l'information. Or, il a largement été démontré qu'un haut niveau de confiance dans les systèmes pouvait favoriser la tendance naturelle des pilotes à « sortir de la boucle » lorsqu'ils sont placés en situation passive de supervision des paramètres de vol et/ou supervision du pilote automatique. Ainsi, les procédures d'autocontrôle par exemple, sont réduites voire abandonnées. Ces comportements constituent alors un terrain favorable à la propagation des « erreurs latentes », ce qui à terme, conduit généralement à une perte de conscience de la situation. Cet écueil peut être évité si l'élève-pilote est sensibilisé très tôt aux tâches consistant à définir quand et pourquoi il doit utiliser tel ou tel système automatique et comment rester en contact avec la dynamique d'une situation malgré l'automatisation. L'amélioration de la qualité de la conscience de la situation est un progrès. Par conséquent, on pourrait s'attendre à ce que cela crée de la valeur en conduisant systématiquement à une amélioration de la qualité de la prise de décision et de la gestion du risque. Ce n'est pas toujours le cas.

Encadré B. Le concept de conscience de la situation

Dans le cas du pilote, [END 96] définit la Situation Awareness (SA) comme « *un modèle interne du pilote concernant le monde qui l'entoure* » ou bien encore de manière plus générale, comme « *la perception des événements de l'environnement dans un volume de temps et d'espace, la compréhension de leur signification et la projection de leur état dans le futur proche* ». L'auteur propose ainsi un modèle de la décision humaine articulé autour de trois niveaux différents de Situation Awareness : (i) le niveau de la perception des événements, (ii) le niveau de l'interprétation de la situation, (iii) et le niveau de l'anticipation. Dans son modèle, Endsley insiste également sur le fait que la qualité de la SA peut être affectée par la quantité de ressources cognitives disponibles. Or, la capacité cognitive d'un individu est limitée. Les ressources cognitives du (jeune) pilote peuvent être mobilisées/saturées de différentes manières en fonction de la méthode d'enseignement utilisée. Si ces ressources sont saturées très tôt dans le processus de construction de la SA (i.e., niveau 1), alors l'acquisition des compétences liées à l'interprétation de la situation (niveau 2) et à l'anticipation (niveau 3 du modèle d'Endsley), fortement mobilisées dans le processus décisionnel, pourrait être affectée.

4.1.2. Prise de décision

De nombreux rapports d'accidents² mettent en avant qu'une mauvaise appréciation du danger est souvent à l'origine d'une mauvaise prise de décision. Une bonne prise de décision en revanche, s'appuie

souvent sur une bonne anticipation des évènements qui pourraient poser problème. Comme nous le rappelle un pilote, « une bonne décision ..., c'est avant tout faire les bonnes choses au bon moment. » Même si les systèmes de bord modernes permettent d' « alimenter » le pilote en informations précises et actualisées, la prise de décision qui découle de cette information affinée ne réduit pas mécaniquement l'incertitude relative à la dynamique de la situation en cours [GOD 16]. Il n'est pas rare en effet d'observer les effets négatifs sur le pilote de l'abondance et de la réactualisation permanente de l'information (cf. [SAL 18 ; ce numéro]). Ce dernier peut développer une forme de dépendance à l'information qui le conduit parfois à privilégier l'attente de nouvelles informations au dépend de l'action.

4.1.3. La gestion des risques

Les systèmes d'information peuvent parfois générer des effets négatifs sur la prise de risque du pilote ; dans certaines situations par exemple, l'abondance d'informations peut conduire le pilote à prendre plus de risques que ce qu'il accepterait de prendre en l'absence de ces informations. Comme le rapporte un pilote instructeur de l'aviation civile générale à propos des risques liés à la météo, « ces systèmes d'information semblent faire naître le sentiment chez le pilote qu'il est capable d'assumer une plus grande prise de risque que ne le permettent son avion et son expérience ». En effet, voir les conditions météo environnantes sur leur MFD pousse parfois les pilotes à aller au-delà du risque acceptable par rapport à leur niveau ou leur expérience. Comme le souligne cet instructeur : « Ce n'est pas parce que vous voyez en détails sur votre écran une zone de danger météo, que cela vous donne le droit de voler plus près que ne l'autorise la réglementation ». Il est évident que la précision de l'information mise à disposition du pilote lui permet, dans des conditions particulières et exceptionnelles, en fonction des caractéristiques de l'avion et de ses/son compétences/expérience, de voler plus près du « danger ». Pour autant, cela doit rester l'exception et non la règle. Quelques chiffres permettent d'attester la réalité de ce problème. Concernant les accidents liés à la météo, les aéronefs de type TAA sont impliqués à hauteur de 31% dans ce type d'accidents en comparaison des 4.7% pour l'aviation générale. Les chiffres grimpent à 61.5% dans le cas d'accidents mortels contre 16.4% pour l'ensemble de la flotte de l'aviation générale. L'implication du constat précédent est que la gestion d'un vol à bord d'un TAA nécessite le développement, tôt dans la formation, de nouvelles compétences chez l'élève-pilote. L'arrivée des Cirrus SR20 à Salon-de-Provence a également suscité une réflexion concernant les pratiques d'enseignement et de formation au pilotage au sein de l'armée de l'air. Cela s'est matérialisé par la réalisation d'une série d'expérimentations afin de recueillir des éléments d'information sur les effets de l'apprentissage des « basiques système » sur le maintien des basiques de vol (cf. Encadré C).

Encadré C. Présentation d'une expérimentation au sein de l'école de l'air

Une expérimentation impliquant dix élèves-pilotes de l'École de l'air a été conduite afin de vérifier, d'une part, que ces derniers étaient capables d'assimiler rapidement (i.e., une semaine) le fonctionnement et l'utilisation simple de certaines fonctionnalités avancées du système du SR20 (i.e., certains modes du pilote automatique et la navigation GPS sur fond de carte). D'autre part, cette expérimentation a également permis de vérifier que l'usage en vol de ces outils/fonctionnalités ne perturbait pas la conduite normale de l'appareil ainsi que les fondamentaux du vol, notamment à la suite d'une avarie rendant inopérante l'utilisation des systèmes.

L'expérimentation s'est déroulée en deux temps : la réalisation et l'évaluation des effets de la formation au sol d'une part, les résultats aux tests en vol d'autre part. La formation a été divisée en deux étapes : une première étape a permis de dispenser un enseignement théorique réalisé principalement à partir des manuels techniques du système et sur le Garmin PC-trainer permettant une navigation dans les différents menus et sous-menus du système grâce à une souris et un clavier. La seconde étape de formation s'est déroulée sur un simulateur de vol expérimental développé en interne pour l'occasion. L'objectif de cette étape était de permettre aux élèves-pilotes de mettre en pratique

les connaissances théoriques acquises, dans un contexte plus réaliste en réalisant sept segments de vol au cours desquels le recours aux fonctionnalités avancées du système variait. Chacune de ces étapes de formation a donné lieu à une évaluation permettant d'attester l'acquisition des savoirs et savoir-faire requis pour participer à la suite de l'expérimentation devant s'effectuer en vol réel. A l'issue de ces deux étapes de formation, les élèves-pilotes retenus ont participé à deux vols réels espacés d'une semaine durant lesquels ils avaient entièrement les commandes et pouvaient utiliser les systèmes étudiés au sol. L'intervention des instructeurs n'était requise qu'en cas de mise en danger de la sécurité des vols. La nature de ces deux vols (vol de navigation simple) était identique à ceux réalisés sur le simulateur. Ces deux vols ont permis d'évaluer l'aptitude des élèves-pilotes à mobiliser correctement les connaissances acquises dans des conditions réelles. Ils ont également permis de tester leur capacité à savoir revenir aux fondamentaux de vols en cas de défaillance système (e.g., en utilisant la méthode classique de navigation « chrono–carte–sol »). Chaque vol a fait l'objet d'une fiche de débriefing remplie par les moniteurs et les élèves. La compilation de ces fiches a permis d'évaluer les performances en vol des élèves, d'observer l'aisance dont ils font preuve lors de l'utilisation des fonctionnalités propres à la gestion système et de recueillir les commentaires des équipages.

L'observation du comportement des élèves en vol et l'exploitation de fiches de débriefing ont permis de dégager des résultats intéressants. Concernant les performances en vol, aucune dégradation n'a été constatée. Les élèves semblent parfaitement capables de restituer en vol les techniques de Gestion de Système (GS) récemment acquises au sol tout en conservant un haut niveau de précision dans la tenue des paramètres standards de vol (i.e., cap, altitude, vitesse). Les élèves ont également démontré une certaine aisance dans la gestion des systèmes étudiés en alternant convenablement entre les différents niveaux d'automatisation et en se détachant de ces systèmes d'aide au pilotage lorsque la situation le nécessitait. Les retours à la navigation classique à vue, suite aux simulations d'avaries des systèmes, ont été bien gérés dans l'ensemble. Le sentiment de l'équipage (i.e., élèves + instructeurs) à l'égard d'un apprentissage précoce des compétences liées à la GS, – les basiques systèmes –, est plutôt positif. La seule réserve des instructeurs concerne le temps supplémentaire alloué à ce nouvel apprentissage qui ne devra pas se faire au détriment des autres basiques présentés dans la section 3.2 (Tableau 1). Ces résultats sont rassurants mais peu surprenants dans la mesure où les élèves-pilotes qui ont pris part à cette expérimentation ont fait l'objet d'une sélection stricte à l'entrée dans l'armée de l'air. Il n'est pas évident que ces résultats soient généralisables à une population plus hétérogène, de type aéroclub, confrontée au même changement technologique.

Nous venons de dresser les contours des défis posés par les systèmes avioniques modernes dans le cadre de l'apprentissage du pilotage. Les basiques du vol ainsi revisités (e.g., gestion des systèmes, usage de l'automatisation) représentent le socle indispensable de connaissances nécessaires à la construction des compétences propres au pilote de combat. C'est dans ce périmètre d'apprentissage que la capacité de simulation embarquée peut créer des situations d'apprentissage plus réalistes grâce notamment à la combinaison de deux éléments. Le premier concerne la possibilité d'injecter des informations « virtuelles » directement au sein des systèmes avioniques modernes. Le deuxième élément est la construction d'un programme de formation équilibré, favorisant la progression de l'individu au cours des différentes phases de formation.

4.2. Reconfigurer le parcours de formation ? Le rôle de la simulation embarquée

Le terme « simulation embarquée » ou « Embedded Training » dans sa version anglo-saxonne, est de manière générale utilisé pour décrire toute capacité d'entraînement intégrée ou ajoutée au système, sous-système ou équipement opérationnel [KEU 10]. Un rapport de 2009 du CHEAr3 précise que « le concept de simulation embarquée consiste à embarquer sur des systèmes réels des fonctions de simulation ». Cette capacité permet ainsi à un opérateur d'utiliser son propre système opérationnel dans les conditions pour lesquelles ce système a été conçu, sans pour autant que la situation réelle ne soit disponible (i.e., présence d'une menace air/air ou sol/air), ou que l'utilisation du système réel ne soit

autorisée (e.g., illumination laser, brouillage électromagnétique). En pratique, la simulation embarquée se matérialise surtout à travers la génération d'un environnement tactique virtuel dans lequel des menaces fictives, ou des événements de tous types, sont simulés et présentés sur les interfaces du système opérationnel réel. L'utilisation de ce nouvel outil pédagogique n'est évidemment pas neutre sur la qualité de l'apprentissage ainsi que sur la sécurité aérienne. Plus particulièrement, les implications de la simulation embarquée sur les processus d'acquisition des compétences du pilote de combat sont doubles. D'une part, il s'agit de savoir si le niveau de performance atteint en sortie d'école sera supérieur (performance définie en termes de qualité et/ou rapidité des apprentissages) à celui obtenu par les méthodes pédagogiques « classiques » actuelles. D'autre part, il s'agit de savoir si la simulation embarquée permettra de mieux préparer les élèves-pilotes à faire face à la complexité du contrat opérationnel sur avions d'armes modernes.

Les pratiques pédagogiques actuelles, dispensées sur des avions d'ancienne génération (e.g., Alphajet), autorisent l'acquisition des compétences utiles au pilote de combat évoluant au sein d'un cadre tactique « imaginaire » simple. Nous utilisons le terme « imaginaire » car tout se passe « dans la tête » de l'équipage. Une mission de formation ou d'instruction dédiée à l'apprentissage de l'évolution au sein d'un environnement tactique simple commence par une phase de préparation au sol de la mission, par l'instructeur d'une part, et l'élève-pilote d'autre part. Le premier conçoit une situation tactique crédible pour amener l'élève à développer des compétences tactiques et apprendre à gérer la dynamique d'une situation. Par exemple, pour une mission d'attaque d'une cible au sol dans un cadre tactique simple, l'instructeur conçoit une situation qui intègre, la plupart du temps, un objectif, une ligne amie/ennemie avec des horaires associés (i.e., heure sur l'objectif ; altitude et heure de passage des portes), ainsi qu'un ensemble de menaces sol-air et/ou air-air, des zones d'attente et de ravitaillement et des zones d'incertitude météo. De son côté, l'élève-pilote doit préparer son vol en tenant compte de toutes ces informations. Il doit définir la « route » principale sur l'objectif, les « routes » alternatives en cas de déroutement, en tenant compte de la menace connue (i.e., fournie au sol par l'instructeur). Une fois en vol, l'élève et l'instructeur « déroulent » la mission prévue. L'instructeur « joue » le rôle de contrôleur aérien et peut ainsi modifier ou adapter, par diffusion radio, certains événements ou menaces de la situation initiale (e.g., apparition d'une nouvelle menace; trafic dans la zone; dégradation des conditions météo). De son côté, l'élève doit traiter les nouvelles informations fournies par son instructeur pour s'adapter aux contraintes et poursuivre la mission. Pour y parvenir, l'élève note les éléments importants sur sa carte (papier/crayon), mais il stocke également tout ou partie de ces informations dans sa mémoire de travail afin de « faire vivre dans sa tête » tous les éléments de la situation. En effet, à défaut de le visualiser sur son instrumentation de bord, il doit calculer mentalement la dynamique de chaque entité pour actualiser en permanence leur évolution spatio-temporelle. Or, cet effort de simulation mentale consomme des ressources cognitives. Dans un contexte d'apprentissage classique, il n'est ainsi pas rare de voir des élèves-pilotes être saturés très rapidement par l'évolution de la situation tactique dans laquelle ils sont engagés (e.g., apparition d'une nouvelle menace sol-air ou air-air). Ce phénomène de saturation est très courant chez les novices quel que soit le domaine d'application. Un individu peu familier d'une situation dans un domaine particulier ou du matériel et des systèmes utilisés, sera considérablement surchargé par le recueil des informations, leur compréhension et la formulation des réponses correctes (i.e., les trois niveaux de la conscience de la situation, SA). Plus précisément, l'étape de recherche et de recueil de l'information pertinente chez un novice est sous-optimale et souvent très consommatrice de ressources cognitives. Certaines informations clés sont parfois négligées alors que d'autres, inutiles, sont sur-examinées. Pour l'élève-pilote, le phénomène de saturation présente néanmoins l'avantage de lui faire prendre conscience de ses limites cognitives et de la nécessité de développer une/des stratégie(s) lui permettant de mieux gérer la situation. D'un point de vue pédagogique, cette pratique oblige également le jeune pilote à s'adapter sans cesse à l'augmentation progressive de la complexité des situations d'apprentissage. Cette adaptation nécessaire va conditionner tout son parcours de formation, l'absence d'adaptation marquant l'arrêt de la progression d'un pilote.

Si la visée pédagogique des pratiques actuelles n'est pas remise en question, la méthode peut en revanche réduire la vitesse de progression de l'élève dans l'acquisition des compétences du pilote de combat. C'est notamment le développement d'une SA adaptée à la gestion de situations de plus en plus complexes qui pourrait faire défaut. Avec une méthode classique, la diffusion de nouvelles données tactiques se fait essentiellement à l'oral. Cela oblige l'élève à calculer mentalement la dynamique de chaque élément de la situation s'il veut avoir une information utile et exploitable (i.e., la position spatio-temporelle réactualisée des éléments de la situation). Avec une méthode classique l'élève est obligé de « fabriquer » mentalement l'information qu'il doit utiliser pour construire sa représentation mentale du monde qui l'entoure. En sollicitant d'emblée les ressources de l'élève-pilote pour « seulement » calculer et générer de l'information utile à l'élaboration de la SA, le risque est de limiter l'empan et la profondeur de l'apprentissage. D'une part cela réduit les possibilités de recueillir et de gérer un nombre plus important d'éléments d'une situation (niveau 1 de la SA) à cause d'une saturation rapide des ressources de l'individu induite par la simulation mentale de chaque élément. Le niveau de complexité des situations tactiques proposées dans le cadre de l'acquisition des compétences du pilote de combat sera par conséquent limité. D'autre part, cela réduit la quantité de ressources disponibles pour développer les compétences mises en jeu aux niveaux 2 et 3 de la conscience de la situation (i.e., interprétation et anticipation). Or, des études réalisées dans le domaine militaire (i.e., infanterie ; [STR 01]) montrent que ce sont précisément ces compétences qui font le plus défaut aux jeunes commandants de section. Il ressort par exemple que dans des situations d'apprentissage, caractéristiques des situations de combat, les chefs de section débutants éprouvent de grandes difficultés (i) à fusionner les informations pour obtenir une vision d'ensemble d'une situation (i.e., niveau 2 de la SA) et (ii) à définir différentes options d'actions (i.e., niveau 3 de la SA). Qu'il s'agisse d'un jeune chef de section ou d'un jeune pilote, ces étapes (niveau 2 et 3 de la SA) nécessitent des processus cognitifs complexes faisant notamment appel à leurs connaissances. Pour ces « novices du terrain », comprendre correctement la signification de tout ce qu'ils perçoivent est difficile du fait de leur faible expérience en matière d'interprétation de ces informations et d'anticipation. Les auteurs de l'étude précisent par exemple que les chefs de section débutants ont du mal à prioriser les tâches, à comprendre l'impact de certains facteurs sur la fatigue des troupes, ou encore à visualiser le positionnement adapté des soldats pour éviter des tirs fratricides. Parmi les autres difficultés relevées, les auteurs citent également la compréhension des forces et faiblesses de l'ennemi, comme les zones de combat stratégiques de l'ennemi. Concernant le niveau 3 de la SA, les jeunes chefs de section ont aussi du mal (i) à échauffer différents plans d'actions alternatifs, (ii) à prévoir la rapidité d'utilisation des munitions et des vivres, (iii) à anticiper les intentions de l'ennemi, voire à anticiper les conséquences des manœuvres de ses propres troupes. Les auteurs concluent leur étude en mentionnant que la nature des difficultés rencontrées par les jeunes chefs de section dans l'infanterie est en adéquation avec les problèmes d'élaboration de la SA identifiés également dans d'autres domaines. Ainsi, ils recommandent vivement que le développement et l'acquisition des compétences de niveaux 2 et 3 soient des enjeux majeurs des futurs programmes de formation au combat.

En ce qui concerne la formation actuelle du pilote de combat, le matériel (i.e., les avions de formation de type Alphajet) et la méthode classique ne sont peut-être pas adaptés pour permettre le développement des niveaux 2 et 3 de la SA. Avec les méthodes d'enseignement actuelles (sur Grob ou Alphajet), l'élève passe beaucoup de temps à calculer mentalement la dynamique d'une faible quantité d'évènements. Ces calculs consomment des ressources cognitives qu'il n'est alors plus possible de mobiliser pour soutenir les processus cognitifs de plus haut niveau impliqués dans la prise de décision (niveau 2 et 3 de la SA). En l'absence d'une instrumentation de bord moderne capable d'afficher une situation tactique, comme c'est le cas par exemple dans les avions de combat équipés de la L16 [GOD 13], les données tactiques diffusées à l'oral n'existent que dans la tête de l'élève (et de l'instructeur) et ne « vivent » qu'au prix d'un effort cognitif important. Dans ces conditions, il n'est pas envisageable dans la formation actuelle de pousser plus loin la complexité des missions sans risquer de saturer inutilement les capacités de l'élève et de compromettre la sécurité aérienne. Pourtant, les systèmes avioniques modernes en général, et la brique de simulation embarquée (Embedded Training –

ET) en particulier, permettraient d'aller plus loin lors des phases initiales de la formation en école et d'optimiser l'acquisition des compétences du pilote de combat. La capacité de simulation embarquée, portée par des systèmes avioniques modernes, permet en effet un affichage visuel complet d'une situation tactique fictive en autorisant notamment le mixage des éléments virtuels et réels sur la même interface. Cette capacité d'affichage hybride (réel + virtuel) offre la possibilité à l'élève-pilote d'avoir accès visuellement à une représentation synthétique enrichie, complète et directe de son environnement. Grâce à la matérialisation physique de l'information sur les interfaces, l'élève-pilote est déchargé de la nécessité d'effectuer mentalement tout le travail coûteux de « fabrication » et de maintien en mémoire de l'information utile à la compréhension de la situation dans laquelle il évolue. L'affichage en temps réel des informations offre également à l'élève-pilote un accès direct au niveau 1 de la SA (i.e., perception des éléments d'une situation) avec un niveau suffisant de précision et de fiabilité, sans que cela lui coûte beaucoup de ressources. C'est exactement ce que semble proposer la Liaison 16 dans les avions de combat de dernière génération.

La simulation embarquée offre donc un cadre d'apprentissage qui partage plusieurs attributs d'une situation réelle de combat et peut, à certaines conditions, favoriser à l'acquisition de compétences tactiques, situationnelles et informationnelles. En autorisant un allègement des ressources cognitives mobilisées pour la construction du niveau 1 de la SA, la simulation embarquée facilite le développement des processus cognitifs de plus haut niveau impliqués dans l'interprétation et la compréhension de la signification de la configuration de cadres tactiques de plus en plus complexes. Pour comprendre et interpréter finement la signification d'une situation, il est en effet nécessaire de posséder une base expérientielle solide sur laquelle s'appuyer. Des études réalisées notamment dans le cadre du programme TAA-FITS montrent qu'il est judicieux de placer l'élève-pilote, très tôt et régulièrement durant sa formation, face à des situations crédibles et réalistes au regard de ce que sera la réalité d'un vol réel. C'est ce qui est proposé par une méthode d'apprentissage basée sur la « scénarisation » de la situation d'apprentissage. En permettant à l'élève-pilote d'évaluer la pertinence de son analyse de la situation et d'évaluer les conséquences de ses décisions et de ses actions au sein de ces cadres tactiques fictifs mais réalistes, la probabilité d'obtenir un transfert d'apprentissage positif entre la formation et la réalité du métier de pilote de combat est renforcée. Parce qu'elle relie les contraintes de la situation simulée de celles d'une situation réelle, la simulation embarquée doit permettre d'ancrer plus profondément en mémoire les compétences en cours d'acquisition. Dans le même ordre d'idées, la simulation embarquée offre un environnement d'apprentissage favorable à l'accumulation de l'expérience, en combinant les avantages d'un entraînement réel classique (stress du vol, sensations physiques, acquisition du sens de l'air) avec ceux d'un entraînement au simulateur sol (i.e., cadre d'apprentissage sécurisé et contrôlé, richesse des scénarios possibles, répétition à l'identique d'une situation d'apprentissage, niveau de complexité de la situation tactique, moins d'avions « plastrons » en l'air). Ainsi, du point de vue de l'apprentissage, on peut faire l'hypothèse qu'en matérialisant sur les interfaces les informations utiles (menaces, routes, objectifs, etc...), la simulation embarquée donne au pilote l'accès à une réalité « virtuelle » à même de solliciter des processus cognitifs identiques à ceux impliqués lors d'un exercice réel. Contrairement à ce qui est proposé dans les méthodes classiques, la situation tactique n'est ici plus seulement imaginaire : elle devient réelle à travers sa représentation (virtuelle) physique sur les interfaces. Chaque décision prise, chaque action réalisée, chaque expérience vécue ou chaque connaissance acquise par l'élève-pilote en simulation embarquée, participera au développement d'une base expérientielle adaptée aux conditions qui seront réellement rencontrées en missions opérationnelles. Grâce à la simulation embarquée, l'élève-pilote sera en mesure de mobiliser davantage de ressources cognitives pour développer rapidement une conscience de la situation (SA) lui permettant d'atteindre un haut niveau de performance dans l'exercice de son métier de pilote de combat. Du point de vue pédagogique et du cursus de formation, il devient possible d'exposer plus tôt les élèves-pilotes à la gestion de cadres tactiques complexes et, par extension, de soutenir un haut niveau de sécurité des vols. En permettant à l'élève-pilote d'être placé dans des conditions d'apprentissage proches de celles du monde opérationnel réel, la simulation embarquée contribue au développement de comportements efficaces et sûrs.

5. Discussion et conclusion

Les conditions nécessaires à une exploitation efficace et sûre des capacités nouvelles offertes par les aéronefs de dernière génération) reposent sur une réorganisation des apprentissages au cours des premières phases de la formation au pilotage (i.e., phase I et II) visant l'acquisition des compétences nécessaires à l'utilisation de leur potentiel technologique (e.g., gestion des systèmes et rôle de l'automatisation) doivent être acquises. Ces compétences devront nécessairement être duales. Il s'agira d'acquérir, d'une part, l'aisance technique dans la manipulation des systèmes avioniques modernes, pour acquérir, d'autre part, le plus tôt possible les compétences propres aux spécificités du vol militaire. La formation de nos pilotes doit être repensée en profondeur en abandonnant quelque peu le schéma traditionnel de l'empilement des capacités dans lequel les élèves apprennent d'abord les basiques du pilotage, avant d'explorer les capacités informationnelles et situationnelles « tactiques » des systèmes. Autrement dit, les systèmes deviennent des parties intégrantes de l'utilisation des avions modernes et ne se différencient plus de l'utilisation « normale ». La formation doit donc intégrer ces nouvelles capacités de façon continue et non pas uniquement après l'acquisition ponctuelle de certaines capacités de vol.

Cette contribution montre à quel point le concept de « Basique » a changé. Dans un cursus classique de formation, le curseur est trop souvent positionné uniquement sur l'acquisition des « basiques du vol » dans la mesure où les compétences primordiales pour faire voler l'avion se situent majoritairement dans le domaine de la compréhension du comportement « physique » de l'aéronef (pas de systèmes modernes à bord). Les pilotes formés en école sur aéronefs classiques puis sur avions d'armes d'ancienne génération connaissent bien l'importance de ce domaine de compétences. Un ancien pilote de chasse breveté sur Mirage F1 nous a ainsi confié qu'« à l'époque, il fallait posséder de très bonnes compétences de vol pour faire voler ce type d'aéronefs, il fallait être ultra-performant si tu ne voulais pas te mettre au tas, car il n'y avait pas autant de systèmes et d'aide au pilotage comme on le trouve aujourd'hui ». Cependant, l'évolution de la technologie embarquée, les systèmes d'aide à la décision et l'automatisation des cockpits, ont contribué à la nécessité d'acquérir de « nouveaux basiques ». On observe une prise de conscience progressive de la part des formateurs que l'acquisition de certaines compétences, jusqu'alors abordées tardivement, puisse être réalisée plus tôt dans le cursus de formation.

Finalement, le concept de « basique » doit être appréhendé selon deux dimensions. La première concerne les compétences fondamentales permettant au pilote de réaliser un vol simple en solo sur avion moderne. Si les objectifs n'ont pas changé (e.g., sécurité, connaissance du comportement physique de l'aéronef, navigation etc.), le périmètre des basiques « initiaux » est aujourd'hui plus étendu sur avions modernes que ce qu'il était sur avions classiques. Dans le rapport final de la « TAA Safety Study Team », les auteurs distinguent trois catégories de compétences basiques nommées respectivement « *Physical Airplane* », « *Mental Airplane* » et « *Risk Assessment and Management* ». Si la première catégorie relève des habilités basiques traditionnelles (« stick and rudder »), les deux dernières sont directement conditionnées par les capacités offertes par les nouveaux aéronefs dotés de glass cockpits (cf. Encadré D pour une présentation).

Encadré D. La typologie des basiques selon la *TAA Safety Study Team*

Le « *Physical Airplane* » concerne la cellule et les commandes de vol (i.e., les volets, le train d'atterrissage, les lumières, etc.) permettant de faire décoller ou atterrir un avion dont les performances sont caractéristiques des avions classiques à voilure haute d'aéroclubs civils. Les compétences mises en jeu sont les compétences traditionnelles de base de type « stick and rudder ». Les auteurs de l'étude estiment qu'une défaillance de ces compétences conduit assez rarement aujourd'hui à des accidents mortels, mais occasionne plutôt des accidents ou incidents très coûteux financièrement. De plus, ce type de défaillance peut également interférer avec la capacité du pilote à maîtriser le « *Mental Airplane* ». Le « *Mental Airplane* » concerne la combinaison de la gestion des systèmes avioniques

modernes – utilisés pour la communication, la navigation et la surveillance, – et la gestion du vol. Le « Mental Airplane » englobe, d'une part, la capacité à utiliser les fonctions clés de chaque sous-système technique pris individuellement (i.e., la « boutonite »). Il englobe, d'autre part, la manière d'utiliser correctement ces fonctions au moment opportun dans l'opération en cours. Les compétences de base mise en jeu dans le domaine « Mental Airplane » touchent alors autant à la capacité du pilote à comprendre l'utilité des systèmes avioniques modernes dans l'amélioration de la sécurité du vol, que sa capacité à comprendre les limitations inhérentes à ces systèmes modernes. En effet, une surestimation des capacités des systèmes ou une mauvaise utilisation de ces systèmes peuvent produire une dégradation du niveau de sécurité. Enfin, les compétences de base doivent aussi permettre à l'élève-pilote de comprendre que la sécurité est le résultat d'un équilibre précaire entre les capacités et limites du couple pilote/avion, et les exigences de la mission. Le dernier domaine critique identifié par les auteurs du rapport concerne le « Risk Assessment » et le « Risk Management ». L'acquisition de compétences liées à ce domaine est largement dépendante de la bonne maîtrise des compétences acquises dans les deux autres domaines précédemment décrits. Toutefois, c'est aussi à travers le développement des compétences de prise de décision en situation que les compétences d'évaluation et de gestion du risque s'améliorent. Un programme d'entraînement à base de scénarios écrits et construits avec des objectifs pédagogiques spécifiques et ciblés (« Scenario-based Training ») est fortement recommandé pour préparer les pilotes à la spécificité de la gestion d'un vol sur TAA [SUM 07]. Les pilotes sont ainsi régulièrement confrontés à des situations critiques réalistes « contrôlées » leur permettant d'acquérir l'expérience propre à la prise de décision en situation dynamique sur avion moderne. Un autre avantage d'un programme d'entraînement à base de scénarios est d'enseigner/démontrer au pilote que l'augmentation des capacités des avions modernes ne se traduit pas automatiquement par une amélioration des capacités du pilote à accomplir en toute sécurité toutes les missions.

La deuxième dimension concerne le haut niveau de performance requis lors de l'acquisition des différents types de compétences basiques initiales car elles conditionnent, selon nous, tous les apprentissages réalisés lors des phases suivantes. Par exemple, la maîtrise de la GS ou l'utilisation de l'automatisation sont des prérequis indispensables pour permettre l'acquisition des compétences spécifiques du pilote de combat évoluant dans un cadre tactique complexe. Même si les nouveaux aéronefs sont aujourd'hui déployés dans les unités, il persiste encore une croyance forte au sein de la communauté des pilotes et des cadres de formation selon laquelle une action de formation réalisée trop tôt sur des aéronefs équipés d'une avionique moderne pourrait altérer l'acquisition des fondamentaux du vol. En réalité, ce ne sont pas tant les fondamentaux au sens strict qui changent, mais ce sont plutôt l'interface et les systèmes (GS), au travers desquels le pilote prend de l'information et agit, qui diffèrent et qui modifient certaines pratiques. Malgré des différences importantes dans la manière dont un avion de formation moderne (e.g., TAA) est piloté/géré, le cœur de l'activité ainsi que la plupart des facteurs de risques inhérents au vol sont identiques sur avions « numériques » et « analogiques ». Par conséquent, une sensibilisation trop tardive aux risques et aux opportunités offertes par ces nouvelles interfaces et ces nouveaux systèmes risque de contraindre l'acquisition des fondamentaux de vol.

Afin d'éviter cet écueil, les syllabus des premières phases de formation doivent prendre en compte la spécificité des nouveaux modes d'interaction avec l'avionique moderne pour permettre aux élèves-pilotes de développer très tôt un nouveau registre de compétences (i.e., « basiques systèmes ») dans le domaine de la gestion de l'information et de la gestion des systèmes. La capacité de simulation embarquée constitue, quant à elle, un excellent moyen de développement des compétences du pilote de combat [ROE 09], en permettant notamment de rapprocher l'environnement d'apprentissage de l'environnement de travail réel (« Train as you fight »). Là encore, l'exploitation efficace et en toute sécurité de cette capacité de simulation repose sur le niveau de préparation des élèves-pilotes lors des premières phases de la formation. L'arrivée de cette capacité nouvelle doit nécessairement conduire à une réforme structurelle profonde du contenu des apprentissages lors des différentes phases de

progression du pilote. Une nouvelle redistribution des objectifs d'apprentissage lors des différentes étapes du processus de formation apparaît alors indispensable.

6. Bibliographie

- [ADL 01] ADLER P., "Workers and flexible manufacturing systems: Three installations compared", *Journal of Organizational Behavior*, vol. 12, p. 447-460, 1991.
- [BAR 08] BARBAROUX P., GODE C., MERINDOL V., VERSAILLES, D. *Les Compétences de l'Armée de l'air à horizon 2015*, État-major de l'Armée de l'air, Bureau Plan, 125 pages, 2008.
- [BAR 10] BARBAROUX P., GODE C., *Maintien et Transfert des compétences dans les escadrons de transport tactiques : du Transall à l'A400M*, État-major de l'Armée de l'air, Bureau Plan, 105 pages, 2010.
- [BAR 10] BARBAROUX P., GODE C., « Quelle typologie pour identifier les compétences ? Le cas des pilotes de transport de l'armée de l'air », *Information Science and Decision Making*, n° 40, 2010. <http://isd.univ-tln.fr>
- [BAR 11] BARBAROUX P., « Technologie polyfonctionnelle et compétences des acteurs : le cas des pilotes de chasse de l'armée de l'air », *Revue Française de Gestion*, vol. 37, n° 212, p. 29-43, 2011.
- [BAR 12] BARBAROUX P., GODE C., « Changement technologique et transfert de compétences : une réflexion à partir du cas des équipages de transport de l'armée de l'air », *Management International*, vol. 16, n° spécial, p. 57-73, 2012.
- [BAR 16] BARBAROUX P., GODE C., "Le briefing-débriefing: une procédure pour lever les barrières pesant sur l'apprentissage organisationnel ?", *Gérer & Comprendre*, 2016/2, n°124, p. 41-51, 2016.
- [BRA 83] BAINBRIDGE, L., « Ironies of automation. *Automatica* ». 19: 775–79, 1983.
- [BRE 02] BRESNAHAN T.F., E. BRYNJOLFSSON L., HITT M., « Information technology, workplace organization, and the demand for skilled labor: Firm-level evidence », *The Quarterly Journal of Economics*, vol. 117, n° 1, p. 339-376, 2002.
- [BOL 09] BOLAND R. THIEL D., "A special issue on simulation", *Systèmes d'Information & Management*, vol. 14, n°4, p. 5-7, 2009.
- [CAM 12] CAMACHON C., BLÄTTLER, C. *La simulation sol et la simulation embarquée : Enjeux pour la formation et l'entraînement du personnel navigant*, État-major de l'Armée de l'air, Bureau Plan, 60 pages, 2012.
- [CAM 14] CAMACHON C., BLÄTTLER, C. *Impact de l'introduction de modules de formation à la Gestion de Systèmes (GS) sur l'apprentissage des basiques de vols en Phase I. Contrat de recherche sur commande des Ecoles de Formation du Personnel Navigant (E.F.P.N)*, Note de synthèse - 6 pages, 2014.
- [CAP 93] CAPPELLI P. « Are skill requirements rising? Evidence from production and clerical jobs », *Industrial and Labor Relations Review*, vol. 46, n° 3, p. 515-530, 1993.
- [DUB 15] DUBOIS, E., BLÄTTLER, C., CAMACHON, C., & HURTER, C. « Eye Movements Data Processing for Ab Initio Military Pilot Training ». In *Intelligent Decision Technologies* (p. 125-135). London, UK: Springer International Publishing., 2015.
- [END 96] ENDSLEY, M. R., *Automation and situation awareness*. In R. Parasuraman & M. Mouloua (Eds.), *Human factors in transportation. Automation and human performance: Theory and applications* (pp. 163-181). Hillsdale, NJ, US: Lawrence Erlbaum Associates, Inc., 1996.
- [FUN 99] FUNK, K., LYALL, B., WILSON, J., VINT, R., NIEMCZYK, M., SUROTEGUH, C., & OWEN, G. « Flight deck automation issues ». *The International Journal of Aviation Psychology*, 9(2), 109-123, 1999.
- [GAL 02] GALE, H.F. WOJAN, T.R. OLMSTED, J.C. "Skills, manufacturing technology, and work organization", *Industrial Relations*, vol. 41, n°1, p. 48-79, 2002.
- [GOD 10] GODE C., BARBAROUX P. « La fabrique des usages technologiques en environnement volatil », *Management & Avenir*, 2010/2, n°32, p.71-90, 2010.
- [GOD 13] GODÉ C., LEBRATY, J. F., « Improving decision making in extreme environment: The case of a military Decision Support System », *International Journal of Technology and Human Interaction*, Vol.9, N°2, 2013.
- [GOD 16] GODÉ C., BARBAROUX P. « Combining technologies' properties to cope with uncertainty: Lessons from the military », *International Journal of E-Entrepreneurship and Innovation*, vol.6, n° 1, p.1-18.

- [GOL 98] GOLDIN C., KATZ L.F., “The origins of technology-skill complementarity”, *The Quarterly Journal of Economics*, vol. 113, n° 3, p. 693-732, 1998.
- [KEU 10] KEUNING M.F.R. “Embedded Training and LVC”, proceedings of the NATO MSG-076, 2010.
- [LEI 96] LEI D., HITT M.A., GOLDHAR J.D., “Advanced manufacturing technology: Organizational design and strategic flexibility”, *Organization Studies*, vol. 17, n° 3, p. 501-523, 1996.
- [NOK 09] NOKES T., “Mechanisms of knowledge transfer”, *Thinking & Reasoning*, vol. 15, n° 1, p. 1-36, 2009.
- [OIR 05] OIRY E., « Qualification et compétence : deux sœurs jumelles ? », *Revue Française de Gestion*, n° 158, p. 13-34, 2005.
- [ROE 09] ROESSINGH, J.J.M., & VERHAAF, G.G. « Training effectiveness of embedded training in a (multi) fighter environment ». In proceedings of the NATO HFM-169 Research Workshop on the Human Dimensions in Embedded Virtual Simulation. 3:1-3: 8. Orlando, FL., 20-22 October 2009.
- [SAL 98] SALAS E., BOWERS, C.A., AND PRINCE, C. « Special Issue: Simulation and training in aviation ». *International Journal of Aviation Psychology* 8(3), 1998.
- [SAL 09] SALAS E., WILDMAN J.L., PICCOLO R.F., “Using simulation-based training to enhance management education”, *Academy of Management Learning & Education*, vol. 8, n°4, p. 559-573, 2009.
- [STR 01] STRATER, L., JONES, D. G., & ENDSLEY, M. R., « Analysis of infantry situation awareness training requirements ». SA Technologies: Marietta, GA., 2001.
- [SUM 07] SUMMERS, M.M. « Scenari-based Training in TAA as a method to improve risk management ». Technical Report – Embry-Riddle Aeronautical University. 2007
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.573.4527&rep=rep1&type=pdf>
- [TAA 03] FAA – Industry training standards (FITS) program plan. Washington, DC: Government Printing Office, 2003.
- [YIN 03] YIN R., *Case Study Research: Design and Methods*, Sage Publication, Applied Social Research Methods Series, Third Edition, 2003.

¹ Les cockpits modernes sont composés de deux écrans LCD remplaçant les traditionnels cadrans : le PFD (Primary Flight Display) permet l'affichage des informations primaires de vol et le MFD (MultiFunction Display) sert pour accéder aux différentes pages de gestion des systèmes embarqués (GPS, fond de carte, plan de vol, ...).

² La consultation des rapports d'enquêtes est accessible sur le site du National Transport Safety Board (NTSB).
https://www.nts.gov/_layouts/ntsb.aviation/index.aspx

³ Centre des hautes études de l'armement. Rapport du 2ème comité de la 45ème session nationale. Titre : « Avenir de la simulation pour l'entraînement des forces : quels bénéfices pour le fonctionnement et quelles limites ? »