LES DOSSIERS

Académie de l'Air et de l'Espace
Air and Space Academy

Le traitement de situations imprévues en vol

Une amélioration de la sécurité aérienne

Dossier 37 - version française 2013

© Académie de l'air et de l'espace, 2013
Tous droits réservés

Photo couverture principale /
Carlos Santa Maria, Fotolia.com

Imprimé par
Evoluprint
Parc Industriel Euronord - 10 rue du Parc - 31150 Bruguières
www.evoluprint.fr

ISBN 2-913331-53-X
ISSN 1147-3657

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS 5

1- PART DE L'IMPRÉVU DANS LA SÉCURITÉ AÉRIENNE 7

2- TRAITEMENT ACTUEL DU PROBLÈME 12

2.1 Tendances et solutions actuelles 12

2.1.1 Points marquants 12

2.1.2 Constats principaux mentionnés 13

2.1.3 Méthodes citées 15

Formation militaire (armées de l'air) 15

Formation civile (OACI, IATA) 16

Formation des spationautes 18

2.2 Limitations observées 18

2.3 Avancée des connaissances sur le comportement 19

2.4 Avancée des connaissances sur les fonctionnements cognitifs 20

3- COMPLÉMENTS D'INFORMATIONS 22

3.1 Méthodes de formation - Bref historique 22

3.2 Méthodes de formation - État actuel 24

3.3 Résumé des connaissances scientifiques sur le comportement opérationnel 24

3.3.1 Présentation 24

3.3.2 La psychologie 25

3.3.3 La neuropsychologie 27

3.3.4 La théorie de "*Threaded cognition*" 27

3.3.5 Traitement de situations inattendues d'extrême urgence 28

4- SUGGESTIONS ET PROPOSITIONS 29

4.1 Présentation 29

4.2 Faut-il un pilote à bord ? 30

4.3 Difficulté des recommandations 32

4.4 L'interfaçage avec le cockpit 33

4.4.1 Émetteurs et récepteurs 34

4.4.2 Fonctions et paramètres 34

4.4.3 Les procédures 37
4.4.4 Récupération de positions inusuelles 37
4.4.5 Les actions sur les commandes 38
4.4.6 L'informatique à bord 38
4.4.7 Le PFD 39
4.4.8 Que faire ? 39
4.5 Formation et sélection / gestion 39
4.5.1 Formation 39
L'imprévu comme norme ? 39
Les coûts 40
Adaptation de la formation actuelle 41
Points-clés de la formation 43
Simulateurs de vol 45
4.5.2 Sélection et gestion des pilotes 47
La sélection 47
La gestion 47
L'entretien de la vigilance 48
4.6 Recherches de base - connaissance des mécanismes cognitifs 49

5- RECOMMANDATIONS 52

Annexe 1 : Introduction of the new flight crew licence 56
Annexe 2 : Evidence-based training (EBT) 58
Annexe 3 : Extrait des recommandations du rapport final du BEA sur l'accident de l'AF447 du 01/06/2009 60
Annexe 4 : Vers la simplification de l'action humaine et l'amélioration des perceptions de la situation 63
Annexe 5 : Information d'incidence sur la planche de bord 68
Annexe 6 : La fonction prise de décision 70
Annexe 7 : Enseigner la mécanique du Vol ? 74

AVANT-PROPOS

Le colloque de novembre 2011 organisé par l'Académie de l'air et de l'espace, "Les pilotes de transport aérien face à l'imprévu", a montré l'importance majeure du comportement opérationnel humain dans le traitement des situations imprévues en vol. Il a surtout souligné les attentes de la communauté aéronautique mondiale pour des solutions à ce problème, considéré comme "la plus grande menace dans l'aviation[1]".

On s'aperçoit que les seules technologie et psychologie ne conduisent aujourd'hui qu'à de lentes améliorations de la sécurité, la technologie n'étant qu'un outil entre les mains des humains l'ayant créée, et la psychologie n'ayant pas su prendre en compte l'aspect dynamique de très faible constante de temps des multi-comportements élémentaires sous stress.

Or la plupart des accidents ne sont que les très rares manifestations catastrophiques d'un comportement rendu aberrant par l'atteinte des limites mentales humaines normales sous l'emprise de circonstances, de surprise, de faible temps disponible, de perceptions imparfaites, de stress. Dans une telle situation on pense immédiatement à un manquement à la nécessaire discipline du vol, à l'insuffisance de culture professionnelle, mais à l'analyse fine des phénomènes on s'aperçoit rapidement que ce genre d'explication est insuffisant. Lorsqu'on se rend compte que l'imprévu est permanent au cours des missions gérées par les pilotes, il ne faut pas se contenter de traiter les cas ayant conduit à des accidents mais logiquement s'occuper aussi de toutes les situations imprévues rencontrées, probablement de façon différente. Il faut analyser les comportements opérationnels de très faibles durées en tenant compte de l'environnement réel des pilotes et de leurs limitations mentales normales, sans penser en faire des super-pilotes, ni croire qu'on peut les supprimer du cockpit car l'humain possède des qualités propres le rendant supérieur aux automatismes face à l'imprévu.

Ce dossier se limite, et ceci est important pour sa compréhension, à une étude des situations imprévues ou inattendues, ce qui ne couvre évidemment pas la totalité des aspects opérationnels mais qui cependant englobe une partie importante des cas à problèmes. Il a pour objet d'ouvrir une réflexion vers des voies possibles d'aide au progrès s'ajoutant

1. *Dieter Harms, IATA Senior Advisor*

aux pratiques actuelles, voire en les améliorant, où en particulier la neuropsychologie peut jouer un important rôle dans trois directions :

- vers un nouveau concept de définition de l'interfaçage humain-avion, en ajoutant un volet-clé à l'ergonomie, tenant compte des limitations humaines du comportement sous stress ;
- vers l'éducation de la résistance sous stress du comportement des pilotes et sa prise en compte dans leur sélection ;
- et en amont vers la connaissance rationnelle des limitations mentales opérationnelles humaines.

Les conséquences sont importantes car elles obligent à modifier sensiblement les habitudes et les standards mondiaux. Le rôle incitatif des autorités règlementaires pourrait être déterminant.

Le texte de ce dossier a été rédigé avec la collaboration active de nombreux membres de l'Académie, surtout ceux de la Section III[2], avec des échanges parfois passionnés d'expériences vécues. L'Académie l'a adopté en assemblée générale le 27 mars 2013.

Le chapitre 1 présente le problème. Une synthèse rapide du colloque est donnée dans le chapitre 2, avec des compléments hors colloque dans le chapitre 3. Des suggestions et propositions composent le chapitre 4 et des recommandations sont présentées dans le chapitre 5. Enfin sept annexes offrent des compléments et des exemples illustrant certains points particuliers présentés.

Jean Pinet et **Jean-Claude Bück**

Anciens présidents de l'Académie de l'air et de l'espace

2. *Section III: "Présence et activités humaines dans l'air et dans l'espace"*

- 1 -
PART DE L'IMPRÉVU DANS LA SÉCURITÉ AÉRIENNE

L'expérience en aviation est un atout majeur de la sécurité. Par sa prise en compte dans l'entière communauté du transport aérien, par la diffusion en retour d'expérience des incidents et accidents aériens, elle permet de prévoir de nombreux cas opérationnels parmi les plus potentiellement dangereux. Ainsi les bureaux d'études, les services d'opérations aériennes, les autorités peuvent-ils agir en amont sur la conception des avions et de leurs systèmes, sur les procédures d'utilisation, sur la formation des équipages, sur les règlements, afin de réduire les risques associés à ces situations ou de minimiser leurs conséquences.

Depuis 40 ans, depuis Concorde, on a classifié les pannes et leur probabilité d'occurrence, ce qui a conduit à l'adoption actuelle d'une classification d'acceptabilité des pannes et des situations critiques suivant leur degré de probabilité d'occurrence, une panne fréquente devant avoir des conséquences mineures sur le vol, à l'opposé une panne envisagée avec des conséquences catastrophiques doit être très peu probable, voire improbable. Ainsi travaille-t-on aujourd'hui sur les règlements CS EASA et FAR 25.1309, stipulant l'occurrence admise par heure de vol. Par exemple l'objectif d'accepter un risque dit majeur pour les passagers toutes les cent mille heures de vol (10^{-5}) implique de juguler les pannes à dix millions d'heures de vol (10^{-7}) pour laisser la place à l'insécurité "hors pannes".

L'analyse des pannes et de leurs combinaisons ne concerne que l'utilisation de l'avion et de ses systèmes et il est nécessaire d'étendre ce genre d'analyse à l'ensemble des cas opérationnels pouvant se présenter au cours d'une mission. Mais malgré le très grand soin apporté à cette analyse et le très grand nombre de cas traités il est impossible d'imaginer ou de chiffrer les probabilités de la quasi-infinité des cas opérationnellement possibles. Les procès intentés aux acteurs après chaque accident montrent que s'il est possible en général **après** l'événement d'en connaître les causes les plus probables, il était cependant humainement impossible de les prévoir ou de les estimer **avant** sa survenance.

En fait les règlements ne portent pas sur l'analyse de l'ensemble des circonstances et combinaisons de circonstances opérationnelles pouvant amener à un accident. On tient évidemment compte de cet aspect dans les procédures et dans la formation, avec tout ce qu'on connaît par expérience ou qu'on peut imaginer dans le répertoire des probabilités acceptables, mais comme déjà dit leur nombre est quasi infini.

Autre fait, en moyenne statistique un accident est le résultat de la combinaison de quatre causes différentes, de nature très diversifiée et chacune de faible probabilité, ce qui ne conforte pas l'établissement de prévisions.

Le colloque de novembre 2011 a montré qu'une situation aérienne est la résultante d'un grand nombre de composantes qui sont, entre autres, l'état de l'équipage, les opérations de la compagnie, l'état technique de l'avion, l'état des moyens extérieurs de contrôle et de navigation, la situation météo sur les routes et les aérodromes possibles, la situation commerciale, l'état du trafic aérien, les réglementations générales et locales, la situation politique, l'état des aéroports, etc.

Chacune de ces composantes, pour chaque vol, peut prendre des états très différents, et d'une manière souvent aléatoire. Par conséquent, étant la résultante d'un grand nombre de composantes pour beaucoup aléatoires, chaque situation aérienne est par nature impossible d'être exactement prévisible.

Bien entendu, le caractère imprévu d'une situation aérienne peut s'écarter plus ou moins de ce à quoi on pouvait s'attendre *a priori*. La plupart du temps, heureusement, on s'en écarte assez peu, mais si on y regarde de près, on constate que tout ne se passe jamais très exactement comme on pouvait supposer que cela allait se passer au départ.

L'ensemble de ces constats amène à une conclusion dérangeante vis-à-vis de ce qu'en pensent le public, les médias et beaucoup de personnes s'intéressant au comportement des pilotes.

Contrairement à ce qu'on pense souvent en se référant à des événements spectaculaires comme ceux très célèbres de Bagdad, Sioux City, Hudson River, ou Apollo 13, **l'imprévu est le lot quotidien des aviateurs et non pas l'exception**. En revanche, si l'imprévu est le lot quotidien les dysfonctionnements qu'il peut entraîner ont rarement des conséquences graves, les pilotes le traitant correctement dans la très grande majorité des cas.

Partant de cette constatation, on peut en déduire que c'est précisément pour cela qu'il faudra toujours des êtres humains capables d'intelligence, de jugement et possédant une culture professionnelle réelle suffisante pour conduire (pas forcément piloter) le vol des véhicules aériens transportant des personnes ayant acheté un service qu'elles veulent sûr.

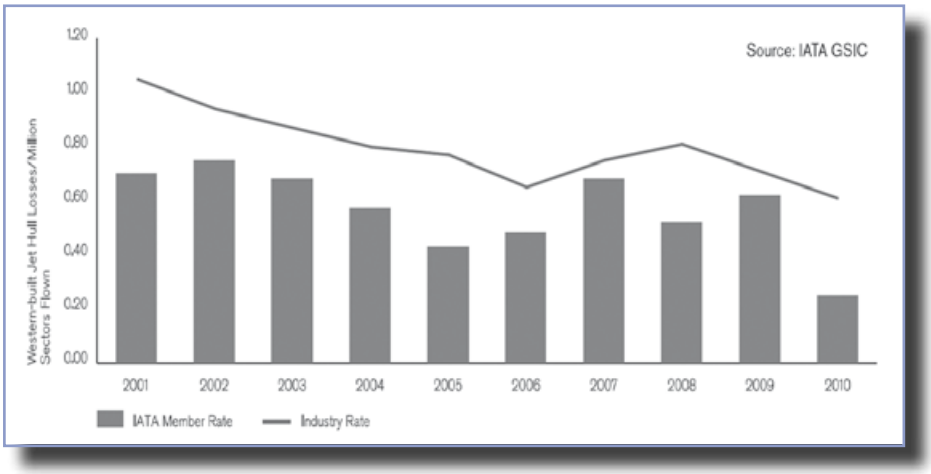
Comme conséquence du fait que l'imprévu est la norme, il est nécessaire et logique qu'on doive s'attacher à améliorer, outre la machine elle-même, tout ce qui doit faciliter son traitement humain, aussi bien l'interfaçage entre l'avion et le pilote que la formation de ce dernier.

Les records de sécurité du transport aérien sont obtenus grâce à une véritable culture de la sécurité édifiée et renforcée au cours des ans.

Les courbes montrant par type d'avions l'évolution du taux d'accidents à partir de la date de première mise en service de chaque type, montrent qu'aujourd'hui les avions de 4ème génération, les avions construits depuis le milieu des années 80, ont un taux très faible d'accidents. L'ensemble des flottes en service donne un taux d'accidents avec perte de l'avion de 0,8 par million (10^6) de secteurs[3] avec un taux de pertes humaines inférieur à 5 personnes pour 100 millions (10^8) d'heures de vol.

Quoique faibles ces taux moyens incluent cependant les accidents de compagnies de régions en développement dont les taux sont parfois 10 fois supérieurs à ces moyennes, ce qui est toujours préoccupant.

Et surtout on observe une amélioration faible sinon asymptotique de ces taux depuis des années.



L'IATA recense en 2011 pour l'ensemble de l'industrie, 11 pertes de coques d'avion contre 17 en 2010 soit 0,37 perte d'avion par million d'étapes en 2011 à comparer à 0,61 en 2010. Mais sur plusieurs années les résultats confirment une tendance relativement faible à la diminution du nombre et du taux d'accidents depuis plus de 10 ans.

La poursuite de cette amélioration oblige à des efforts accrus, d'une part pour préserver le niveau atteint dans un contexte où les changements économiques, techniques et humains nécessitent des ajustements permanents et, d'autre part, pour apprendre à gérer la sécurité d'un transport aérien pratiquement sans accident. Ce dernier point peut sembler paradoxal mais il constitue l'un des principaux enjeux des années à venir pour les raisons suivantes :

- érosion de la conscience et connaissance du risque d'accident chez l'ensemble des acteurs de l'industrie ;

3. *Un secteur concerne le vol entre son point de départ et son point d'arrivée. Le temps de vol est variable suivant les missions mais en général dépasse largement une heure de vol. En conséquence les valeurs de taux d'accidents se référant au nombre d'heures de vol sont inférieures à celles se référant au nombre de secteurs.*

- corrélations et tendances de plus en plus difficiles à établir sur la base des seuls accidents dont la rareté oblige à quitter la douteuse signification scientifique de leur faible occurrence au profit de la recherche des causes humaines profondes.

Il faut donc rechercher de nouvelles voies d'amélioration.

Nous devrons dans les années à venir faire face à des **accidents atypiques** de plus en plus difficiles à comprendre et à exploiter. La gestion de l'imprévu constitue donc un enjeu aussi bien à l'échelle des équipages dans la réalisation de chaque vol qu'à l'échelle de l'ensemble des acteurs du transport aérien dans leur politique de maîtrise des risques d'accident.

Ce constat a amené l'Académie de l'air et de l'espace (AAE) à s'intéresser à des situations parmi les plus potentiellement dangereuses, les situations imprévues, c'est-à-dire celles qu'on n'a pas imaginées, ou qu'on a estimées improbables. On doit y ajouter les situations de même type tout aussi dangereuses, prévisibles mais inattendues, surgissant par surprise parce qu'on les aura négligées.

L'analyse du répertoire des accidents montre clairement que la soudaineté de l'événement déclencheur de ce genre de situations est l'élément-clé à l'origine des dysfonctionnements humains amenés par la surprise et le stress[4].

Bien sûr la communauté aérienne n'a pas attendu le colloque de l'AAE de novembre 2011 pour s'inquiéter des aspects accidentogènes de ces situations imprévues ou inattendues. Le colloque a permis de faire le bilan des actions déjà prises ou en cours. Cependant les initiatives prises montraient qu'il n'y avait pas de prise en compte de ce danger de façon explicite. Les seuls documents évoquant l'imprévu émanaient de la Flight Safety Foundation et de l'IFALPA. Ce colloque a surtout permis de déceler les tendances d'évolution des préventions, augurant d'importants progrès dans le traitement humainement efficace de ces situations. Le comportement humain et son adaptation au contexte immédiat technique et opérationnel sont au centre des études actuelles.

Il est important de noter que l'aviation militaire et les vols spatiaux habités doivent faire face à ce problème vital de l'imprévu de façon permanente du fait de la structure basique de leurs missions où l'imprévu et l'inattendu font partie de la vie courante malgré tout le soin apporté aux préparations des missions et aux prévisions de situations. Cependant les organisations concernées utilisent des populations en nombre nettement plus faible que dans l'aviation de transport, ce qui leur permet une meilleure gestion de la sélection et de la formation.

Un autre point important est lié au taux de croissance du nombre des pilotes de l'aviation de transport supérieur à celui de la population en général, conduisant à la tendance à l'affaiblissement du rempart de la sélection, et à l'acceptation de plus en plus difficile des nécessaires modifications et améliorations dans la formation côté humain, et dans l'inter-

4. *Pinet J. (2011). Thèse "Traitement de situations inattendues d'extrême urgence en vol".*

façage technologique côté avion. Il faut donc convaincre de leur nécessité même si elle apparaît évidente aux gens expérimentés.

Autre problème, celui du coût des formations, amenant à l'adoption quasi systématique des minima requis par les règlements, ce qui montre l'importance du bon ajustement des programmes et de leurs standards de façon mondiale.

En conséquence ce dossier est consacré à l'étude de ces situations imprévues, inattendues, surgissant par surprise, et aux moyens de résoudre les problèmes de sécurité s'y trouvant liés.

- 2 -
TRAITEMENT ACTUEL DU PROBLÈME

2.1 TENDANCES ET SOLUTIONS ACTUELLES

Ce chapitre présente des informations et remarques enregistrées pendant le colloque et mentionnées dans les actes. Elles sont objectivement rapportées dans l'ensemble du chapitre 2 sans aucun jugement de valeur de notre part. Ces actes[5] ont été publiés séparément. Ils contiennent de très nombreux détails qui permettront au lecteur d'avoir une idée claire sur ce qui se fait actuellement. Leur lecture est recommandée. Ce qui suit n'en est qu'un très bref résumé.

2.1.1 Points marquants

L'un des intervenants au colloque, Dieter Harms, IATA Senior Advisor, a bien qualifié le problème traité :

> ***"... I think it is clear for all of us that to be prepared for the unexpected is the biggest challenge, or let me call it 'threat' to stay in nomenclature, it's the biggest threat in aviation, to human beings working in aviation".***

Or ainsi qu'il est apparu évident, cet imprévu, ou cet inattendu, sont des situations courantes dans les missions aériennes, qui méritent donc une attention particulière.

De façon générale le problème a été abordé de manière assez limitative par l'adaptation de l'équipage à la situation (formation) et non par la recherche d'une modification quelconque du contexte technique dans lequel il agit forcément (interfaçage dans le cockpit). L'OACI et l'IATA travaillent depuis des années sur des méthodes de formation tenant

5. *Ces actes sont disponibles sur le site de l'AAE : www.academie-air-espace.org, ressources en ligne*

compte de cet impératif. De leur côté les militaires et les spationautes l'ont inclus dans leurs programmes.

Les problèmes du comportement humain réactif et cognitif permettant de répondre aux situations inattendues sont bien connus. Les solutions possibles sont convergentes comme nous allons le voir.

2.1.2 Constats principaux mentionnés

On en donne ici une liste résumée sans souci de classification ni de valeur relative.

- Les automatismes prendront en compte de plus en plus de tâches encore dévolues aux pilotes mais ces derniers resteront indispensables pour traiter les situations imprévues que les automatismes ne sauront pas traiter de par leur structure logique et leurs hypothèses d'utilisation.
- Les générations d'avions cohabiteront pendant de nombreuses décennies et des pilotes y sont toujours prévus.
- Face à un événement imprévu la surprise est un élément majeur amenant un abaissement des capacités cognitives pouvant aboutir dans les cas extrêmes au phénomène de sidération, souvent qualifié de "blanc cognitif".
- Dans le répertoire des surprises on inclut les déconnections d'automatismes, accidentelles ou non observées.
- En urgence les habiletés manuelles de contrôle de trajectoires sont essentielles, pour des actions soit directes sur les commandes de vol, soit au travers de systèmes automatiques valides appropriés. On observe que ces systèmes automatiques sont plus performants que le pilote lorsqu'il est possible de les utiliser.
- Les capacités humaines requises pour faire face à l'imprévu sont multiples. Elles devraient être contrôlées dès la sélection initiale des pilotes. En voici une liste non-exhaustive :
  - rapidité de perception ;
  - capacité d'attention et de captation de conscience de situation ;
  - capacité d'analyse et de synthèse ;
  - capacité de décision ;
  - maîtrise de soi ;
  - gestion du stress ;
  - coopération.
- La réaction face à l'imprévu peut s'éduquer. Cependant on introduit ainsi un champ additionnel de compétences des pilotes sans devoir abandonner le registre actuel des compétences retenues. Il s'agit de les ouvrir vers d'autres aptitudes de prise de décisions et d'actions.
  Les *check-lists* et *do-lists* ne sont conçues que pour faire face aux situations "connues". Il faut donc préparer les pilotes à être "surpris" par les situations inattendues et imprévues.

- La notion de marge de sécurité devrait s'appliquer pour permettre la meilleure sélection possible d'actions correctrices.
  En fait le temps disponible est un élément-clé de succès. C'est la part de chance. Trois cas extrêmes et efficacement gérés sont là pour le montrer :
  - l'atterrissage à Bagdad de l'A310 de DHL touché par un missile le 22 novembre 2003 ;
  - l'amerrissage sur l'Hudson de l'A320 d'US Airways après la perte de poussée de ses deux moteurs le 15 janvier 2009 ;
  - la récupération de l'A380 de Qantas à Singapour après l'explosion d'un moteur le 4 novembre 2010.
- La technologie permet de mettre à la disposition des pilotes des informations supplémentaires pour une meilleure compréhension de la situation nouvelle, avec le grave défaut de rajouts augmentant le nombre de paramètres à surveiller.
  Cependant la même technologie peut permettre de résoudre cette difficulté, par exemple en ne faisant apparaître certaines informations que lorsqu'elles sont réellement nécessaires, ou bien en synthétisant les affichages, ou en les allégeant comme dans la fonction de suppression des informations non essentielles (*declutter*) en place sur certains HUD (*Head-Up Displays*).
- Le problème du traitement de l'imprévu a déjà mobilisé la communauté aéronautique mondiale : ECCAIRS et ECAST pour l'Europe, ASIAS pour les États-Unis, ADREP pour l'OACI, GSIC pour l'IATA (voir les acronymes en annexes).
  L'AESA (ou EASA) travaille en permanence sur l'amélioration des règlements FCL (*Flight Crew Licencing*) : ESSI, ECAST, EHEST, EGAST (voir en annexes).
- La gestion de l'imprévu nécessite :
  - des connaissances de base, mais aussi celles liées aux particularités de l'avion utilisé ;
  - de la réflexion ;
  - une capacité de synthèse rapide ;
  - de se poser les bonnes questions et de ne pas s'enfermer dans des certitudes ;
  - du bon sens, bien qu'il soit difficile de le définir avec précision, qu'on peut compléter par la notion d'airmanship tout aussi difficile à définir ;
  - et surtout une grande maîtrise de soi.

  De façon plus précise il faut éduquer la capacité de recul, d'analyse de la situation et de prise de décision.
- Concernant les connaissances basiques il est indispensable qu'elles soient réelles et non établies sur une assimilation trop rapide, de bachotage, contrôlée seulement par des QCM[6] non adaptées. La mémoire étant essentiellement volatile, elles doivent être maintenues à jour.

6. *Question à choix multiples.*

2.1.3 Méthodes citées

On en donne un résumé. Des précisions peuvent être trouvées en annexes.

Formation militaire (armées de l'air)

- Pour les militaires l'entretien d'un socle de compétences tactiques est indispensable. Il est entretenu de façon permanente par le partage des expériences. La sélection est quotidienne en fonction des missions et le principe de séniorité n'existe pas chez eux.
- Dès la formation de base, la préparation aux missions est un objectif primaire.
- Les principes de leur formation sont :
  - la continuité ;
  - la progressivité ;
  - l'évaluation permanente.
- Les clés de cette formation sont :
  - l'apprentissage ;
  - l'anticipation ;
  - l'adaptation.
- L'objectif de la formation est de construire la compétence par éléments, par "briques", et non grâce à l'application de procédures.

  Comme dans les centres de formation civils les programmes sont édifiés à partir d'analyses des tâches et dorénavant des impératifs des missions (*Training needs analysis*) définissant ainsi les objectifs de formation. Le principe du *Competency based training*, CBT (voir annexes) est utilisé.
- On développe l'esprit critique, la capacité d'autocritique, mais aussi le contrôle de situation, en éduquant un mode de fonctionnement mental créatif et productif à l'aide d'une formation opérationnelle basée sur des scénarios (*Scenario based training*).
- La gestion du stress est traitée de plusieurs façons, par :
  - la gestion de l'erreur et de la menace potentielle (*Error and threat management*, ETM) ;
  - des "contre-mesures" : planification des missions, briefings ;
  - la gestion des modes mentaux, automatiques et adaptatifs ;
  - la méthode TOP, Technique d'Optimisation du Potentiel, utilisée dans les sports de haut niveau ;
  - l'obligation de rester simple.
- L'importance des instructeurs est primordiale. Leur formation au CRM (*Crew Resource Management*) est en vigueur.
- De façon générale les performances exigées par les militaires sont plus sévères que celles exigées dans les normes FCL (*Flight Crew Licence*). Cette recherche de l'excellence est favorisée par la maîtrise directe des affectations personnelles aux missions par le commandement.

Formation civile (OACI, IATA)

- L'IATA a débuté l'étude du problème depuis longtemps car il est considéré comme la plus grande menace en aviation, et a organisé il y a 4 ans un colloque sur le sujet "Training qualification initiative". En fait la réforme préconisée est globale et ne prend pas en compte le seul traitement de l'imprévu, mais recherche le meilleur rendement possible de la formation en efficacité et en coûts. Si les grands principes et la recherche sont le domaine de l'OACI et de l'IATA, la formation ne peut se faire qu'en accord avec les règlements rédigés et mis en œuvre par les autorités de l'aviation civile, en pratique la FAA et l'AESA.

  Ainsi les aspects de coûts sont très présents et la méthode tend à traiter essentiellement ce qui par expérience est nécessaire et suffisant pour les équipages de transport aérien dans un contexte en permanente évolution.
- Une partie de la solution au problème est donnée par l'adoption du concept MPL, (*Multi-crew Pilot Licence*) (voir annexes 1 et 2). En fait par principe on ne peut pas entraîner les équipages sur un inattendu quelconque qu'on ne connaît pas mais on peut les préparer à le gérer à partir de scénarios reproduisant des accidents.
  Les méthodes utilisées dorénavant s'orientent vers la formation basée sur la compétence (*Competency based training*, CBT) et non plus sur l'exécution de tâches sélectionnées ou exigées.
- Le Competency based training est pratiqué en suivant les objectifs de formation découlant de l'ensemble connu des tâches que les pilotes doivent exécuter, objectifs analysés eux-mêmes pour chaque tâche et classés en 3 catégories : connaissances nécessaires (*Knowledge* K) – habiletés nécessaires (*Skills* S) – comportements adaptés (*Attitude* A), qu'on regroupe dans le terme KSA.
  Cette formation exige le jugement permanent de l'évolution de la compétence grâce à la notation de 9 éléments-clés KSA pour chaque phase opérationnelle tout au long de la formation.
  Ce genre de formation devrait être pratiqué dès la formation *ab initio*.
- Cinq zones d'amélioration sont définies :
  - une présélection avec des critères adaptés ;
  - une formation *ab initio* adoptant le CBT ;
  - le maintien des qualifications (*Recurrent Training*, RT) adoptant la formation d'après le concret (*Evidence Based Training*, EBT) mentionnée ci-après ;
  - la qualification adaptée des instructeurs qui restent l'élément majeur de la formation ;
  - des équipements de simulation adaptés.
- Un autre concept s'ajoute aux précédents, la formation basée sur le concret, sur l'évidence, *l'Evidence Based Training* (EBT), où l'on s'efforce d'entraîner les équipages sur des cas et situations les plus réalistes possibles d'après l'expérience opérationnelle. Cependant il ne s'agit pas forcément de situations imprévues.
  L'objectif primaire de cette formation est d'éduquer la résilience des équipages et non la capacité à traiter un cas précis.

- Le besoin de personnaliser la formation en fonction des niveaux individuels de compétence est évoqué, notamment avec les pilotes débutants et les pilotes expérimentés, mais on est encore loin du menu à la carte. Cependant les militaires sont beaucoup plus proches de cet objectif.
- Les instructeurs sont considérés comme les intervenants essentiels dans la formation. Cependant, alors que la part humaine est désormais considérée importante dans toutes les étapes de la formation des équipages, il est fait remarquer qu'aucune qualification CRM n'est prévue par les règlements FCL et OPS (*Operations*) pour les instructeurs, contrairement à la formation militaire.
- La fonction de surveillance doit être éduquée pour détecter en équipage les erreurs et les menaces potentielles (*Error and threat management*). Les séances de simulateur FFS[7] devraient permettre cette éducation, avec des scénarios appropriés.
  Des audits (*checks*) en opération suivant la méthode LOSA (*Line Operational Safety Audit*), permettant le suivi individuel des équipages, sont effectués avec l'objectif d'évaluer la capacité des équipages en gestion des erreurs et des menaces.
- L'adaptation à l'évolution physique dans les trois dimensions, la récupération de désorientation spatiale, le sens de l'air, sont considérés indispensables au vu des incidents et accidents. Deux cas sont évoqués :
  - dans l'Armée de l'air toutes les spécialités de pilotes pratiquent de la voltige aérienne et suivent une formation sur la récupération des positions inusuelles en vol sans visibilité ;
  - En France, l'ENAC a ajouté depuis longtemps un module sur CAP 10 incluant positions inusuelles et éléments de voltige avec une partie en solo dans le cursus de formation de leurs cadets. Depuis peu Air France y inclut du vol à voile ce qui est bon pour l'éducation du sens de l'air.
- Concernant de façon particulière le comportement face à l'inattendu les compétences principales recherchées sont :
  - la gestion de la charge de travail en équipage, avec sa part importante de surveillance ;
  - la prise de décision, avec l'utilisation de la méthode FOR-DEC (*Facts, Options, Risks and benefits – Decision, Execution, Check*) définie par Lufthansa.
- La manière de vérifier l'acquisition des connaissances par les QCM (Questions à Choix Multiples) est sévèrement critiquée dans sa forme actuelle permettant d'obtenir la réussite aux examens par simple bachotage. L'informatique permet des vérifications libérées d'une nomenclature de tests figés à l'avance, donc susceptibles d'être connus par les candidats, ou rédigés de façon ambigüe. Cette obligation d'acquérir les connaissances et de les maintenir en mémoire est vitale pour les pilotes. Pour subsister en mémoire cette acquisition doit s'obtenir par la pratique d'exercices théoriques basés sur des cas concrets, ou grâce à des simulations.

7. *FFS, "Full Flight Simulators", moyens de formation offrant la simulation la plus réaliste possible des environnements interne (cockpit, systèmes, instrumentation et physique du vol) et externe (visualisation de l'environnement externe, mouvements perçus dans le cockpit, communications).*

Formation des spationautes

- La formation des spationautes est basée sur l'entraînement à toutes les situations connues et prévisibles, par utilisation intensive de simulations les plus réalistes possibles. Cependant l'évolution dans un environnement hostile dans des conditions difficiles oblige à considérer l'inattendu comme inévitable et probable. Il s'agit là de survie.
- Le stress est donc considéré comme un facteur normal qu'il s'agit de gérer, avec la particularité de surgir dans un espace confiné au sein d'une équipe constituée. Les causes sont très variées, qu'elles soient physiologiques, psychologiques, sociologiques et autres.
  L'une des clés de la formation est l'entraînement à surmonter la panique.
- L'augmentation de la durée des vols spatiaux a amené à prendre en compte la notion d'habileté comportementale (*Human behaviour and performance*, HBP), notion incluant le CRM.
- La nécessité de faire face à l'imprévu a amené les programmes de formation à passer de la formation aux tâches (*task training*) à l'apprentissage des habiletés (*skill training*).
- La sélection est très poussée et longue.
  Les clés du travail des spationautes sont :
  - l'entraînement ;
  - l'humilité.

2.2 LIMITATIONS OBSERVÉES

Elles sont données sans souci de classification.

- Les situations soumises aux contraintes du temps exigent la simplicité de leur traitement. Or l'application de procédures augmente sa complexité.
- Les limitations cognitives sont fréquemment ignorées dans les recommandations résultant des enquêtes d'accidents.
- La technologie et l'automatisation sont souvent considérées comme la solution aux problèmes, même dans l'inattendu. Mais la technologie ne peut seule les résoudre car elle n'est qu'un outil et non un remède.
- La présentation des informations appropriées aux pilotes a une influence directe sur la conscience de la situation et la capacité à résoudre les problèmes associés.
  Les problèmes de l'incidence[8] de vol, des variations rapides de paramètres (*upsets*) et donc des informations permettant une meilleure prise de conscience de la situation anormale et la récupération de situations de vol au-delà du domaine périphérique sont posés. Une formation adaptée est indispensable. Des recommandations sont en cours de diffusion (ICATEE, RAeS, BEA).

8. *Voir Annexe 5*

Les simulateurs actuels (FFS) ne sont pas adaptés (sensations inertielles, dépassements hors domaine de vol), et l'entraînement sur avion est dangereux. Il est donc nécessaire de revoir l'adaptation des FFS aux nouveaux impératifs de formation.
Le changement éventuel des références de vol (par exemple l'utilisation de l'incidence) est évoqué pour citer la complexité de les rendre accessibles à la population mondiale des pilotes.

- L'enseignement des forces régissant le vol, abstractions devant être reliées aux réalités physiques, mérite une attention particulière car elles constituent la base de la physique du vol que pratiquent quotidiennement les pilotes.
  Il est nécessaire que ces derniers comprennent les modèles physiques cachés derrière les équations et les calculs. Les limites de fonctionnement doivent être assimilées en les corrélant aux effets physiques régissant l'avion.
- Par définition on ne peut pas entraîner les pilotes à l'inattendu, il faut donc les préparer à y faire face par l'éducation d'un comportement approprié.
- L'évolution de la formation s'effectue aujourd'hui en rajoutant des éléments suivant les besoins et recommandations du moment, et sans recherche de cohérence globale.
- Pour la récupération de trajectoire les pilotes devraient percevoir immédiatement et de façon non ambigüe les éléments essentiels favorisant un pilotage basique simple.
- La procédure actuelle de sélection des pilotes ne permet pas de les placer en situation dangereuse. On se limite à les placer dans des situations complexes présentant des problèmes à résoudre. On espère alors que l''expérience du vol permettra de conforter chez eux la gestion du stress, sinon de détecter la propension au stress.
- L'efficience de la formation, son coût, est un facteur déterminant dans l'évolution de la formation dans le secteur civil.

2.3 AVANCÉE DES CONNAISSANCES SUR LE COMPORTEMENT

- En opération une surprise se traduit par une saturation mentale causée par l'irruption de paramètres dans un environnement conventionnel.
- Le traitement de l'imprévu est soumis à la présence, ou l'absence, du facteur "chance". Le temps disponible est l'élément chance essentiel.
- L'automatisation ne concerne pas uniquement celle des fonctions. Elle est aussi adoptée pour le traitement des informations.
- Placés dans des situations identiques les équipages réagissent de façon similaire. Cependant il y a apprentissage dans le cas d'une deuxième occurrence de la situation.
- La formation classique ne prépare pas au diagnostic d'une conscience de situation correcte lorsqu'il y a combinaison inattendue de multiples perceptions.
- Connaître l'état exact de l'avion est important.
- Dans le traitement de l'imprévu 3 éléments sont importants :
  - la nature insolite de l'événement ;
  - le délai disponible pour son traitement ;
  - sa réversibilité.

- Pour savoir résoudre un problème il faut l'identifier et le traiter en situation.
  La gestion correcte de situations complexes nécessiterait :
  - leur anticipation ;
  - des hypothèses suffisantes pouvant conduire à des résultats satisfaisants ;
  - une automatisation des comportements autour des 3 catégories SRK, habiletés (*skills*, S), procédures (*rules*, R), connaissances (*knowledge*, K), la catégorie K, connaissances, nécessitant le plus de ressources mentales.
- Au sujet de la compréhension d'une situation 3 niveaux jouent un rôle important :
  - les perceptions ;
  - le sens donné aux perceptions ;
  - la capacité à projeter dans le futur l'état des éléments perçus.
- L'imprévu relatif (inattendu d'une situation probable) pourrait être traité grâce à des procédures, si le temps disponible le permet.
  L'imprévu "absolu" nécessite une intelligence pratique.
- Dans les nouvelles générations de pilotes il y a une aisance accrue à l'utilisation des outils informatiques.

2.4 AVANCÉE DES CONNAISSANCES SUR LES FONCTIONNEMENTS COGNITIFS

- Le stress déclenche l'existence d'une fonction cognitive particulière simultanément à des phénomènes physiologiques déterminés. Cette fonction cognitive gère les fonctions de perception, de choix de décision et de lancement des actions.
- Il existe des limitations cognitives banales (traitement conscient séquentiel, limitation en durée et capacité de la mémoire à court terme par exemple) qui, lorsqu'elles sont atteintes, peuvent provoquer des erreurs, des oublis, une focalisation localisée excessive de l'attention.
  Connaître exactement ces limitations devrait aider à la simplification du traitement des facteurs humains.
- La conscience de situation sous stress est grandement améliorée par le traitement simplifié des perceptions. Ce problème des perceptions concerne à la fois l'émetteur, l'interface du cockpit, et le récepteur, la capacité cognitive du pilote.
  Ne traiter que le récepteur, l'humain immuable, par exemple par la formation des pilotes, sans agir sur l'émetteur, les paramètres mis à leur disposition (par exemple en simplifiant le nombre et la nature des paramètres de vol et des procédures), ne résoudrait pas correctement les problèmes de l'inattendu.
- Le cerveau est plus apte à prendre des décisions dans des environnements ouverts et changeants qu'à exécuter des tâches compliquées telles que résoudre mentalement les équations de physique du vol avec la dizaine (ou plus) de paramètres immédiatement disponibles afin de se tirer d'une situation inattendue.
- La fonction de prise de décision est localisée dans le cortex préfrontal du cerveau. La structure générale de prise de décision et de ses limites est désormais connue.

- Trois contraintes principales limitent cette fonction :
  - le choix effectif de la réponse appropriée à des stimuli est sériel, ils sont traités l'un après l'autre ;
  - le nombre maximal de "routines" (tâches) à évaluer simultanément est de 2 à 3 ;
  - le choix de la routine est binaire (choix entre 2 routines seulement) et fonction de leur fiabilité estimée.
- La prise de décision est motivée par les enjeux des résultats estimés.

  La volatilité, le changement de l'environnement externe est pris en compte. Si le cerveau perçoit une anomalie dans l'évolution, il "bascule" vers une nouvelle routine (tâche).
- Il y a foncièrement tendance à surestimer la vraisemblance d'événements très peu probables et à sous-estimer celle d'événements très probables. Ce phénomène est à considérer pour la validité de l'intuition dans le diagnostic de situation.
- Le rôle des indices et perceptions contextuels est prépondérant dans la mémoire à long terme pour la recherche des routines et des procédures à adopter.
- Il y a des différences individuelles en matière de prise de décision, avec deux catégories d'individus :
  - les explorateurs, favorisant l'exploration de la mémoire profonde pour faire face à une situation nouvelle ;
  - les exploiteurs, favorisant le recours à des stratégies et des routines.

- 3 -
COMPLÉMENTS D'INFORMATIONS

Le colloque a permis la collecte de précieuses et nombreuses informations. Cependant les réflexions l'ayant suivi nécessitent des informations supplémentaires que ce chapitre va s'efforcer de présenter.

3.1 MÉTHODES DE FORMATION - BREF HISTORIQUE

On essaie ici de se limiter au cadre de ce dossier, ce qui n'est pas aisé car la formation des pilotes est la combinaison de nombreux facteurs essentiels.

L'utilisation d'appellations spécifiques résumées par 3 lettres (MPL, CBT, EBT, SBT, CRM, etc.) ne doit pas faire illusion. Ces appellations repèrent une évolution chronologiquement lente des méthodes de formation. Un brin d'historique semble nécessaire. Il concerne surtout l'aviation de transport, car les formations d'équipages militaires et d'astronautes intéressant des populations moins nombreuses et très contrôlées sont déjà de grande efficacité.

De façon schématique les pilotes subissent chronologiquement 3 catégories de formation. Au fil du temps des sortes de standards internationaux se sont bâtis, autour des minima règlementaires, en temps de formation, en heures de vol et de simulateurs, suivis de près sinon adoptés par les compagnies, les constructeurs, les centres de formation. Ils définissent de fait les coûts de formation et constituent de sévères références de compétition.

La première est la formation de base (*ab initio training*) au cours de laquelle les pilotes obtiennent leurs licences de base les autorisant à pratiquer le métier de pilote d'avion de transport. Cette partie est d'importance majeure car ils acquièrent les compétences de base conditionnant le comportement opérationnel nécessaire à la poursuite de leur carrière. En pratique il s'agit de leur éducation professionnelle de base. Par principe cette éducation/formation est un acquis individuel qui laisse des traces indélébiles dans la mémoire.

La deuxième catégorie est la qualification de type, QT (*Type rating* TR), sur chaque type d'avion piloté. C'est l'adaptation à l'utilisation opérationnelle de l'avion sur lequel un pilote est affecté. Normalement la QT est un complément à la formation de base. Cependant si le type d'avion présente d'importantes différences avec les matériels utilisés antérieurement, cette QT doit apporter tous les compléments de formation nécessaires à une utilisation sans problème.

Enfin la troisième catégorie, le maintien périodique des compétences (*Recurrent training* RT), se pratique avec une périodicité en général de 6 mois au cours de l'activité dans une compagnie aérienne.

Les qualifications de type et le maintien périodique des compétences sont de la responsabilité de l'employeur, la compagnie aérienne, mais peuvent être déléguées à un organisme spécialisé habilité (TRTO, *Type rating training organisation*).

La formation sur les avions de 2e génération (747, DC-10, Concorde, A300), a permis dans le transport aérien l'avènement de ce qui avait été utilisé au cours de la Seconde Guerre mondiale par l'US Air Force, l'analyse des tâches sur le principe des *Specific Behavioural Objectives*, SBO, pour ne retenir que ce qui est nécessaire et suffisant en qualification de type, QT, ainsi que l'utilisation intensive des *check-lists*. Dans la même période l'utilisation de la simulation est devenue essentielle, avec surtout les *Full Flight Simulators*, FFS.

À partir de cette 2e génération pour laquelle intervenaient de très importantes innovations techniques, le rôle des constructeurs (Boeing, McDonnell Douglas, Aérospatiale, Airbus Industrie) est devenu primordial dans la définition des programmes de QT, et dans la formation des instructeurs et des premiers équipages des clients.

Ces programmes concernaient les tâches techniques d'utilisation des avions. Cependant dès la fin des années 70 et au début des années 80 le comportement en équipage retient l'attention des compagnies aériennes par son influence sur la sécurité, et ainsi est né le concept de *Cockpit* puis *Crew Resource Management*, CRM.

L'avènement de l'informatique avec les Glass cockpits et l'automatisation poussée du contrôle de trajectoire, en particulier les commandes de vol électriques (*Fly-by-wire*) des 3e et 4e générations, a obligé à raffiner les méthodes. Les analyses portent toujours sur les tâches à effectuer mais en ajoutant pour chacune des tâches élémentaires une 3e exigence aux 2 exigences déjà prises en compte (connaissances *Knowledge* K, habiletés *Skill* S) : le comportement *Attitude* A. D'où la définition d'un nouveau concept d'analyse technico-opérationnel "KSA". Mais autant les deux premières exigences étaient aisées à déterminer autant la troisième posait un problème : comment définir un comportement adéquat ? Faute de mieux on s'est alors concentré sur celui concernant la répartition et la coordination des tâches dans le cockpit.

À cette époque un autre concept a vu le jour, destiné à éduquer les équipages à l'utilisation du CRM : la formation, en équipage constitué, à la résolution de problèmes opérationnels (non communiqués à l'avance aux stagiaires) survenant au cours d'un vol réel simulé au FFS. Ces séances sont appelées *Line-Oriented Flight Training*, LOFT[9].

Cependant à l'époque subsistait un problème majeur : la plupart des centres de formation *ab initio* n'avaient pas suivi l'évolution technique et opérationnelle de ces dernières générations. Et les QT devaient fournir les compléments de formation de base nécessaires à la bonne utilisation des avions.

---

9. ICAO Circular 217 AN/132 'Human Factors Digest No 2' in 1989

3.2 MÉTHODES DE FORMATION - ÉTAT ACTUEL

Si l'évolution des méthodes a été très rapide entre 1970 et 1985, en revanche son évolution est lente ensuite, et les MPL, CBT, EBT, SBT ne concernent en fait que des améliorations, certes importantes, de ce qui existait il y a 25 ans. Il n'y a pas de nouveau concept majeur modifiant de façon radicale la situation pédagogique de base. Il y a des raffinements techniques dans les cockpits et des moyens pédagogiques qu'on tend à présenter comme majeurs, mais qui en réalité ne le sont pas, tout en étant bons à prendre, un peu comme pour les avions subsoniques actuels les raffinements de l'aérodynamique buttant vers Mach 0,8 sur le mur de l'onde de choc.

Les méthodes exposées au colloque n'étaient pas spécifiques à la formation sur le traitement des situations imprévues. Ces méthodes, globales, intéressent tous les aspects concernant l'obtention de l'ensemble des compétences nécessaires aux pilotes, mais en revanche les exposés mettaient l'accent sur les aspects traitant ce problème, montrant qu'il y était inclus d'une certaine façon.

Il y a cependant une amélioration essentielle dans la formation de base. Cela a duré 20 ans pour que les méthodes d'analyse utilisées en QT atteignent la formation *ab initio*. L'utilisation du concept KSA tel que présenté par l'IATA, avec la notation du comportement dans l'exécution des exercices, est un progrès important. Son extension à la formation *ab initio* est un pas majeur.

Un point très important doit être précisé ici. Il n'est pas suffisant de bien définir ce qui doit être nécessairement enseigné, la manière de le faire est tout aussi importante. La pratique sous toutes ses formes s'est avérée comme le moyen le plus efficace de fixation mémorielle. La méthode est utilisée depuis l'aube des temps.

3.3 RÉSUMÉ DES CONNAISSANCES SCIENTIFIQUES SUR LE COMPORTEMENT OPÉRATIONNEL

3.3.1 Présentation

Il n'est pas dans les objectifs du dossier de donner l'ensemble des références des communications portant sur les très nombreux travaux traitant de l'imprévu. Nous ne donnerons que quelques exemples illustrant les résultats concernant ce dossier consacré aux problèmes de situations imprévues ou inattendues, sans aller trop au-delà.

À leur lecture on peut dresser une image schématique des apports scientifiques, schéma probablement critiquable par une généralisation que certains jugeront outrancière, mais valable quant aux objectifs de ce dossier.

La psychologie donne depuis 30 ans une bonne description des phénomènes humains opérationnels, de leurs dysfonctionnements et de leurs causes. Des centaines de publications existent à ce jour. On en tire des recommandations valables, le plus souvent qualitatives et "cinématiques" sans qu'elles puissent définir de façon dynamique (fonction du temps et chronologique) les paramètres humains impliqués. L'outil principal d'investigation de la psychologie est le recours à des résultats statistiques. Mais elle considère les

situations imprévues comme exceptionnelles, donc difficiles à être traitées statistiquement. Elle n'intègre pas le paramètre temps comme il intervient quantitativement et chronologiquement dans la réalité.

La neuropsychologie en est à ses débuts. Son avantage est de relier les comportements à des réalités tangibles de fonctionnement du cerveau. Par ses méthodes elle offre la base quantitative temporelle faisant défaut à la psychologie. Cependant un important travail reste à accomplir pour définir les mécanismes des composantes élémentaires du comportement opérationnel, ceux de leurs combinaisons, pour en déduire les forces et les limitations de ce comportement dans le cockpit. En fait il reste à relier ces résultats quantitatifs à ceux qualitatifs de la psychologie.

Deux directions particulières dans les recherches psychologiques, citées ci-après, méritent d'être mentionnées car, avec des approches différentes, elles relient les comportements à leur réalité et à leurs contraintes temporelles. Elles offrent un lien entre les phénomènes "macroscopiques" décrits par la psychologie et "microscopiques temporels" (de l'ordre de grandeur de la seconde ou moins) observés dans les composantes du comportement opérationnel. De plus l'une d'elles utilise l'expertise comme moyen d'investigation interne, méthode d'une grande efficacité.

Aucune des deux ne considère les situations imprévues ou inattendues comme exceptionnelles.

3.3.2 La psychologie

On se réfère ici aux travaux de Christopher Wickens[10] relatifs à la psychologie de la surprise dans des études sur le système futur de transport aérien NextGen impliquant les contrôleurs aériens et les pilotes. On en donne un bref résumé.

Ces travaux traitent du comportement provenant de la surprise (*psychology of surprise*) causée par des événements opérationnels inattendus (*unexpected*), qualifiés de *black swans* (cygnes noirs)[11].

Une distinction est faite entre l'inattendu concernant des événements connus survenant brusquement et l'inattendu provenant de l'imprévu, considéré comme créant la véritable surprise et étant le plus sérieux pour la sécurité.

Ces événements à problèmes appartiennent de façon marginale à l'ensemble des conditions opérationnelles et sont difficiles à traiter de par leur rareté. Le temps de réponse des acteurs est l'élément-clé du problème et dépend de leur attention, en particulier visuelle.

---

10. *Wickens, C.D. (2001). Keynote address: Attention to safety and the psychology of surprise. Proceedings of the 11th International Symposium on Aviation Psychology, Columbus, OH: Dept. of Aerospace Engineering, Applied Mechanics, and Aviation, Ohio State University.*
Wickens, C.D. (2009). 15th International conference ISAP Keynote address: The psychology of aviation surprise: an 8 year update regarding the noticing of black swans.

11. *"Black swan" se réfère à la découverte inattendue en Australie il y a 3 siècles des cygnes noirs, qu'on refusait de croire être des cygnes parce qu'ils étaient noirs. Théorie de N.N. Taleb, The Black Swan, Penguin, 2007*

Elle a un impact direct sur la conscience de situation et les dysfonctionnements se retrouvent sur les trois étapes cognitives :

- perception (*notice, perceive*), (75% des dysfonctionnements) ;
- diagnostic (*situation awareness*) ;
- choix et exécution (*select, execute*).

L'étude porte principalement sur les phénomènes d'absence de perception des changements de situation (*change blindness*), où l'absence de perception n'est pas intentionnelle (*inattentional blindness*).

Dans un environnement visuel complexe l'attention est attirée par :

- le contraste de l'événement ;
- le degré d'attente d'un tel événement ;
- son rapport avec la situation en cours ;
- l'effort requis pour déplacer l'attention d'une localisation à une autre.

L'exécution de tâches multiples augmente le taux des ratés.

L'automatisation peut assister les acteurs par 4 façons de traiter l'information :

- filtrage et présentation privilégiée ;
- diagnostics et déductions pertinents ;
- actions recommandées ;
- actions automatiques.

Cependant quelques problèmes peuvent alors surgir, par exemple quand :

- le fonctionnement apparent des automatismes ne correspond pas à ce qu'en attend le pilote ;
- la vigilance se relâche en oubliant de les contrôler avec les informations de base disponibles.

Le FMA, *Flight Mode Annunciator*, situé sur l'instrument primaire de pilotage, fait l'objet d'une remarque intéressante. Il n'est consulté dans le balayage visuel que 2% du temps, et les changements de modes présentés ne sont perçus que dans 60% des cas et après un délai compris entre 5 et 10 secondes.

Des recommandations sont données sur la conception des cockpits et sur la formation des pilotes. Un soin particulier doit être porté sur la facilité à changer de point d'intérêt visuel, par exemple dans la transition entre les visions intérieure et extérieure.

La formation doit comporter la gestion de l'attention.

Les dysfonctionnements observés sont rares, mais cette rareté influe sur les diminutions de l'attention, de la vigilance, donc augmente le danger potentiel.

Un modèle informatique, appelé N-SEEV, a été conçu pour prédire le comportement d'un pilote soumis à un événement inattendu.

N, *Noticing* (perception) est la composante prédisant la durée de prise en compte visuelle de l'événement, ou la probabilité pour qu'il passe inaperçu.

SEEV décrit les 4 composantes qui conduisent le balayage visuel dans le cockpit : *Salience* (contraste), *Effort* (effort pour changer le point d'attention), *Expectancy* (attente de l'événement), *Value* (valeur attachée au point regardé).

Cependant le système ne peut pas prévoir quand l'événement passera inaperçu, ni sous quelle forme il se présentera. Il peut simplement définir les circonstances dans lesquelles le taux d'occurrence du dysfonctionnement peut évoluer, dans la mesure où le type de l'événement peut être prévu.

3.3.3 La neuropsychologie

À titre d'exemple on cite le mécanisme cérébral de prise de décision, fonction primordiale dans le traitement des situations inattendues, prévues ou non. Le développement, tiré de l'intervention d'Étienne Koechlin[12] dans le colloque de l'AAE, est porté en annexe 6.

Les recherches en neurologie et psychologie expérimentale ne datent que de quelques années. Elles concernent les mécanismes profonds cérébraux et psychologiques, dont la prise de décision dans des environnements incertains, variables et ouverts, comme dans un vol.

Mais on les rencontre de façon banale dans la vie de tous les jours. Notre cerveau est particulièrement élaboré pour prendre des décisions dans de telles situations plutôt que dans l'exécution de tâches compliquées et bien définies comme par exemple le pilotage d'après les paramètres de vol d'un avion. Il utilise alors sa flexibilité et ses capacités d'adaptation.

La fonction de décision concerne un tiers du cerveau humain, le cortex préfrontal.

Plusieurs niveaux de traitement des tâches et des mémoires se trouvent ainsi interconnectés. Ces niveaux de contrôle forment l'organisation générale de la sélection de l'action dans le cortex préfrontal latéral.

On retrouve ici de façon concrète les limitations constatées et décrites par la psychologie, qui ne sont que l'expression des contraintes imposées par l'architecture du cerveau, mais désormais avec la possibilité d'arriver à les quantifier, à rationaliser leur occurrence.

On connaît aussi où se trouve la fonction de motivation dans la prise de décision, comment on évalue le caractère changeant de l'environnement externe, comment on compense l'absence de référence fiable dans une situation donnée. C'est la porte ouverte à une bien meilleure compréhension des aberrations de comportement constatées.

3.3.4 La théorie de "*Threaded cognition*"[13]

Cette théorie fait suite aux recherches sur les composants élémentaires de la pensée, "*The atomic components of thought*"[14] (Les composants élémentaires de la cognition) de John Anderson et Christian Lebiere il y a 15 ans. Contrairement aux théories "classiques"

---

12. Directeur du laboratoire de neurosciences cognitives de l'École normale supérieure

13 "Threaded cognition" : la structure filaire (ou les fils indépendants) de la cognition

14. Anderson, J.R., & Lebiere, C. (1998). The atomic components of thought. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, Publishers.

de la psychologie, essentiellement descriptives et cinématiques, cette théorie s'attaque à la dynamique de la cognition en analysant la chronologie des étapes élémentaires de courtes durées.

La théorie de "*Threaded cognition*"[15], de Dario Salvucci et Niels Taatgen, utilise la précédente comme base pour l'adapter à la dynamique des tâches multiples. Elle propose un traitement intégré de tâches concomitantes. Elle suppose que les flux de la pensée soient représentés par un ensemble de "fils" de traitements de tâches coordonnés par un centre (*resource*) de procédure de mise en série, et exécutées grâce à un ensemble d'autres centres (*resources*) disponibles tels que la perception et l'activation des organes moteurs. La théorie utilise un minutieux "mécanisme" permettant une exécution concomitante de tâches, et la résolution de conflits entre les différentes "*resources*" gérant les tâches.

Elle fait appel aux différentes mémoires et à leurs mécanismes.

3.3.5 Traitement de situations inattendues d'extrême urgence

La thèse en question[16] traite de façon dynamique le comportement opérationnel des pilotes confrontés à des situations d'extrême urgence, le temps étant pris comme facteur de référence.

Une combinaison originale de 3 concepts (processeur séquentiel de J.Rasmussen, modèles mentaux de P.Lecomte et J-C.Wanner, agents et fonctions cognitives de G.Boy) a permis de dégager des résultats intéressants à partir d'une analyse détaillée d'accidents aériens. Ils concernent principalement les comportements cognitifs sous stress et les limitations humaines qui en découlent. Ils conduisent à des recommandations concrètes sur la partie matérielle de l'interfaçage avion-pilotes du cockpit, sur l'exigence de procédures simples et intuitives, sur la formation des pilotes.

Il est intéressant de constater, bien que les recherches aient été conduites de façons différentes et indépendantes et avec l'utilisation de concepts différents, que ces résultats sont proches de ceux de la "*Threaded cognition*", avec cependant une utilisation opérationnelle directe.

Une autre originalité de l'étude est l'utilisation intensive de l'expertise dans les analyses précises des tâches et actions.

15. *Salvucci, D.D., & Taatgen, N.A. (2011). The multitasking mind. New-York: Oxford University Press.*

16. *Pinet J. (2011). Thèse "Traitement de situations inattendues d'extrême urgence en vol". www.air-space-academy.org, ressources en ligne.*

- 4 -
SUGGESTIONS ET PROPOSITIONS

4.1 PRÉSENTATION

La communauté aéronautique avait déjà réalisé le danger des situations imprévues et inattendues, et a recherché les moyens de le combattre. Ce danger existe depuis le tout début de l'aéronautique comme un risque courant, majeur et inévitable, et pas seulement pour elle.

Le plus important et le plus surprenant pour les non-opérationnels a été énoncé par un pilote intervenant du colloque :

> ***"****… Mais comme les facteurs qui interviennent dans la conduite du vol d'un avion sont en très grand nombre et extrêmement complexes, l'imprévu s'impose en permanence. Bien sûr on va nous parler au cours de ce colloque de situations imprévues spectaculaires (Apollo13, Sioux City, Bagdad, Hudson River, etc.),* ***mais nous avons vu qu'en réalité l'imprévu est quotidien****. Nous avons donc en permanence besoin du pilote pour y faire face****".***

Ainsi l'élément le plus important en ressortant, plutôt ignoré du public, est que les situations opérationnelles imprévues ou inattendues sont courantes, voire banales dans les missions de transport aérien. Elles sont de façon très générale heureusement bien traitées et le faible taux d'accidents tendrait à montrer que l'ensemble fonctionne correctement, que les pilotes sont correctement formés. Mais la rareté et la forte résonance médiatique de ces accidents attirent automatiquement l'attention sur leurs causes principales, humaines, donc banales, obligeant à ne pas les ranger dans des aléas statistiques inévitables.

Cependant cette rareté des accidents entraîne la difficulté de relier les situations les ayant provoqués à des causes probantes, le traitement statistique faisant défaut. En essayant de le faire on est confronté à une grande diversité de causes apparentes et particulières

attachées à chacun des accidents. Il faut donc probablement changer de domaine et de méthode d'investigation, disons de paradigme, ce que nous proposons dans ce dossier.

Les accidents de ces dernières années ont renforcé le désir, sinon la nécessité, d'améliorer les solutions actuelles. Ainsi doit-on citer le rapport du BEA sur l'accident du vol AF447 concernant un événement inattendu bien que prévisible, cependant imprévu dans le vol en question. Paru après le colloque de l'AAE, une partie de ses recommandations recoupent celles de ce dossier. Un extrait de ces recommandations est donné en annexe 3.

Ce dossier s'efforce donc de présenter des pistes de progrès s'ajoutant à celles déjà utilisées aujourd'hui ou en préparation dans les bureaux d'études. À ce sujet un constat s'impose, évoqué au début du document. La sécurité a bénéficié des innovations introduites avec succès, pour la plupart de façon pragmatique, par des opérationnels, des ingénieurs et des ergonomes expérimentés et de bon sens, aidés depuis trois décennies par des psychologues. L'utilisation des possibilités de plus en plus grandes des avancées de la technologie a mené à la réalisation des cockpits modernes de très hautes performances.

Ce très solide acquis est constamment remis en cause à chaque nouvel accident avec l'accusation désormais classique de ne pas avoir suffisamment prévu l'imprévisible. En conséquence et bien que le taux d'accidents soit faible, on est obligé de continuer de rechercher l'amélioration de la sécurité, d'aller au-delà de nos connaissances actuelles.

La difficulté réside dans ce faible taux ayant beaucoup de mal à sensiblement diminuer alors que le nombre d'avions en service et celui de passagers à bord ont tendance à augmenter.

Deux possibilités peuvent être envisagées :

- l'amélioration de ce qui existe ;
- la prospection de nouvelles pistes.

Nous allons les traiter dans les chapitres suivants.

Cependant auparavant nous désirons mettre en garde contre toute interprétation abusive, erronée ou biaisée de ce qui suit. Les cockpits actuels et leurs systèmes bénéficient des dernières avancées technologiques, ergonomiques et industrielles utilisables et acceptées en certification, donc de l'application des dernières connaissances en matière de sécurité. Les améliorations présentées ne sont en aucune façon de quelconques critiques de ce qui existe mais des propositions de solutions jugées possibles ou souhaitables.

4.2 FAUT-IL UN PILOTE À BORD ?

Au-delà des accusations classiques d'indiscipline présentées comme cause première d'accident, les situations imprévues ou inattendues peuvent induire des dysfonctionnements humains dans leur traitement, ce qui les situe parmi les causes les plus fréquentes d'accidents même s'ils sont rares, et de fait la plus redoutable de ces causes par sa dangerosité. Résoudre leur problème de causalité garantit une avancée majeure en matière de sécurité.

Sur le sujet facile à énoncer de l'indiscipline de vol, parfois très réelle comme dans l'accident de l'A320 d'Habsheim en 1988[17], il est bon de rappeler un rapport demandé par la DGAC datant de 1998 sur le problème de non utilisation des check-lists à bord. À l'époque l'indiscipline était soupçonnée en être la cause essentielle. Une enquête poussée a montré que seulement 12% des pilotes interrogés (207, de plusieurs compagnies) disaient n'avoir jamais manqué une check-list alors que les autres admettaient avoir eu des interruptions, des oublis ou des abandons de check-lists à cause "d'interférences opérationnelles" et de "pressions temporelles" d'origines opérationnelles banales.

On peut donc se demander si le problème des événements imprévus ne pourrait pas être résolu en confiant les réactions à des automatismes sans état d'âme, plus fiables que les pilotes car n'ayant pas leurs limitations physiologiques et mentales. Le colloque a montré clairement que les automatismes peuvent résoudre des problèmes très complexes à condition qu'ils soient prévus. Or, même si l'on s'attache comme aujourd'hui à tenir compte systématiquement de tous les enseignements tirés des accidents, les aléas du vol subsisteront avec une infinité de possibilités de situations et de combinaisons des situations imprévisibles. L'humain reste alors le moins mauvais moyen pour trouver une solution à ce type de problème, peut-être le meilleur si les automatismes d'information l'aident dans cette tâche, à condition qu'il y soit préparé, éduqué.

Nous laissons parler Etienne Koechlin :
"On voit souvent le facteur humain comme une limitation. C'est vrai qu'il y a des contraintes cognitives fortes... Mais la nature a aussi développé au sein du cerveau une architecture extrêmement élaborée pour faire face à un problème très complexe, à savoir la prise de décision dans des environnements ouverts, incertains et changeants qu'au fond on rencontre souvent dans la vie de tous les jours. Notre cerveau est particulièrement élaboré pour prendre des décisions dans de telles situations plutôt que dans l'exécution de tâches compliquées et bien définies comme par exemple le réglage des paramètres de vol d'un avion. En effet, on sait faire des programmes informatiques qui sont beaucoup meilleurs et qui prennent des décisions beaucoup plus élaborées que les êtres humains dans des situations données et bien définies. En revanche, on ne sait toujours pas faire des programmes qui soient capables de prendre des décisions dans des environnements ouverts et changeants où tout événement même impensable peut arriver, avec la même flexibilité et les mêmes capacités d'adaptation que les êtres humains. Je pense ainsi que les travaux en neurosciences cognitives peuvent vous inspirer pour le problème qui vous occupe …."

17. *De Brito, G., Pinet, J., Boy, G. (1998). L'utilisation des checklists dans un cockpit d'avion de nouvelle génération, Rapport technique EURISCO, Toulouse.*

Il y aura toujours une combinaison imprévue de situations nécessitant le jugement d'un "conducteur-gérant" humain placé dans le même environnement que celui des passagers pour prendre en compte leur sécurité en dernier ressort. Nous adoptons cette hypothèse.

De toute façon les flottes mondiales d'avions de transport sont constituées et seront constituées pour des décennies de modèles où des pilotes sont prévus pour les diriger, les gérer. Avant que le ciel ne soit encombré de drones transportant des centaines de passagers il est donc nécessaire de tout faire pour que les pilotes puissent agir lorsque les situations deviennent critiques, et celles résultant de l'imprévu et de l'inattendu le sont en majorité. Mais cela implique qu'ils aient d'abord une idée claire de la situation, ou si cela était impossible qu'ils puissent reconfigurer l'avion pour retrouver une situation maîtrisable, et qu'ensuite ils aient la possibilité et la capacité d'agir correctement.

La tendance détectée dans le colloque était surtout de traiter les aspects de formation destinés à améliorer leur capacité à faire face au danger, mais peu de chose était dit sur l'amélioration de la présentation de la situation et sur la possibilité offerte de corriger une situation critique. La technologie est devenue un outil puissant qui peut être utilement mobilisé pour cela, probablement pas pour tous les cas mais pour bon nombre d'entre eux. D'imprévus ils deviendraient connus donc prévisibles, tout en pouvant cependant rester inattendus avec effet négatif de la surprise, donc potentiellement dangereux…

4.3 DIFFICULTÉ DES RECOMMANDATIONS

Toute recommandation comporte d'inévitables changements dans les procédures, les moyens et les habitudes en cours. Ces changements ont un coût, financier et humain. L'acceptation de ce coût dépend du niveau de risque accepté par la société, le public et les passagers, et par la communauté aéronautique, les opérateurs, les industriels, et les assurances. Il faut donc être pragmatique dans l'évaluation du succès de telles recommandations n'imposant aucune contrainte formelle.

Ainsi aujourd'hui le très faible taux d'accidents est implicitement accepté par la communauté aéronautique. Cependant des accidents récents ont remué le public via les médias, ce qui a amené une réaction d'étude de préventions, et qui met en lumière l'influence déterminante de l'information. Certains problèmes difficiles à résoudre s'imposent d'eux-mêmes :

- L'adoption de nouveaux équipements, donc de nouveaux règlements et de standards dans un milieu compétitif, se traduit par une évolution lente des équipements (sauf en cas d'exigence immédiate de sécurité), toujours chère et d'autant plus lente qu'il y a un grand mélange de générations d'avions, dont chacun possède une espérance de vie opérationnelle moyenne de plus de 20 ans.
- L'acceptation des changements par la population du demi-million des pilotes de l'aviation de transport est aussi un vrai problème. Pour eux changer les habitudes et les références est parfois difficile après des années de travail dans un souci permanent de les respecter. La position parfois à contre-sens du progrès de certaines organisa-

tions professionnelles dont l'objectif principal est la défense des privilèges de carrière, retarde l'adoption des nécessaires changements.

- Enfin la gestion mondiale du trafic aérien va imposer des changements technologiques et procéduraux qui obligeront à une nouvelle adaptation des pilotes en charge de la conduite des vols.

En résumé, de façon pragmatique il ne s'agit pas de sélectionner et d'éduquer des super-pilotes, mais de faire au mieux en modulant les évolutions suivant les possibilités potentielles, humaines et technologiques, en fonction du niveau de risque acceptable et de son coût… et de la pression médiatique.

4.4 L'INTERFAÇAGE AVEC LE COCKPIT

Comme déjà dit, ne considérer que l'adaptation des pilotes aux situations grâce à la formation est beaucoup trop restrictif. Le traitement des situations imprévues implique d'abord celui des informations mises à la disposition des pilotes, essentiellement dans le cockpit. Une conscience correcte de situation et son traitement correct nécessitent des perceptions appropriées et une décision adaptée. C'est-à-dire que les informations correspondantes doivent être parfaitement "accordées", adaptées, entre l'émetteur qu'est le cockpit et le récepteur qu'est le pilote. Il faut certes se préoccuper de l'adaptation du récepteur, c'est-à-dire de la sélection et de la formation du pilote, mais ne considérer que cela serait une erreur majeure pour deux raisons :

- L'être humain, le récepteur, est difficilement malléable dans son adaptation à l'évolution galopante de la technologie, même si désormais on connaît de mieux en mieux ses limitations psycho-physio-cognitives, disons neurologiques encore immuables pour quelques siècles.
- En revanche l'interfaçage matériel du cockpit, l'émetteur, bien que de mieux en mieux traité par l'ergonomie cognitive, permet encore d'envisager une meilleure adaptation aux exigences psycho-physio-cognitives des pilotes par la souplesse de l'utilisation de la technologie dans le choix et la présentation des paramètres pertinents permettant une meilleure conscience de situation et son traitement adapté.

L'AAE considère que l'approche du problème passe par l'acceptation prioritaire de l'adaptation de la technologie à l'humain et non l'inverse, comme pourrait parfois le faire croire la présentation erronée de la technologie comme l'unique remède à un défaut constaté. Elle n'est qu'un outil que l'homme se procure à lui-même. En revanche penser que ce dernier puisse s'y adapter indéfiniment serait irréaliste et dangereux. La réalité est qu'aujourd'hui on s'attache vigoureusement à corriger ou à minimiser les effets connus des dysfonctionnements humains chaque fois qu'ils se présentent, mais sans encore en connaître exactement la genèse. C'est vers cette connaissance qu'il faut évoluer dans la façon d'attaquer le problème, sans forcément abandonner les méthodes actuelles quand elles donnent de bons résultats.

4.4.1 Émetteurs et récepteurs

On doit faire d'emblée un constat lorsqu'on regarde les mécanismes cérébraux. Les perceptions constituent l'origine des processus mentaux, cérébraux, devant résoudre les problèmes du traitement des situations soudainement imprévues. Elles concernent à la fois les émetteurs, les informations données par les interfaces matérielles dans le cockpit, et les récepteurs, les membres de l'équipage exploitant les sensations perçues provenant de ces informations. C'est à partir de ces perceptions que se bâtit l'action correctrice. Est-il impossible d'améliorer ces interfaces d'échanges d'informations et de commandes ? Doit-on les accepter comme intangibles ? Évidemment non, car il serait paradoxal qu'on se focalise sur l'amélioration du récepteur humain de structure immuable en ignorant celle, possible, de l'émetteur matériel que l'évolution rapide de la technologie rend beaucoup mieux malléable et modifiable.

4.4.2 Fonctions et paramètres

Pour les situations imprévues et/ou inattendues l'adaptation technologique de l'interfaçage est probablement la voie la plus efficace de progrès (voir l'exemple de l'annexe 4 sur le pilotage à court terme).

L'un des éléments essentiels dont il faut obligatoirement tenir compte est l'aspect dynamique de cette résolution où la rapidité et le temps disponible jouent le rôle primaire.

On peut résumer les actions possibles d'amélioration côté avion en 3 catégories :

- **La connaissance rationnelle des limitations mentales, cognitives, humaines** pour introduire des marges d'utilisation dans les limites opérationnelles, peut-être de façon analogue à la définition des domaines de vol normal et périphérique de l'avion.

  Beaucoup de ces marges existent déjà de façon pragmatique, par exemple les alarmes visuelles et auditives précédant l'arrivée aux limitations opérationnelles. Mais l'analyse des incidents et accidents montre leur dépassement du fait de l'atteinte des limitations mentales cognitives des pilotes sous stress.

> *Comme exemple de limitation qu'on est obligé "d'accepter" sans pouvoir la traiter autrement que de façon pragmatique par expérience de façon approximative, c'est l'ignorance involontaire d'alarmes auditive sous contrainte de tâches excessives. Ou bien l'influence négative de l'ambiance sonore d'une alarme sur la concentration mentale, et bien d'autres exemples pour lesquels la connaissance du fonctionnement neuropsychologique du cerveau apporterait des réponses concrètes aux problèmes détectés et connus. Peut-on étudier comment ces limitations pourraient être prises en compte dans le cockpit ?*

  Il s'agit là d'introduire un nouveau volet dans l'étude ergonomique des cockpits : la prise en compte des comportements de pilotes "normaux" sous contrainte de multi-

tâches rapides en temps limité, de stress. Cette étude est déjà prise en compte de façon pragmatique, basée sur l'expérience, mais en supposant qu'une procédure, éventuellement enseignée en formation fera l'affaire. C'est vrai heureusement dans la grande majorité des cas, mais malheureusement pas toujours. Il faut donc progresser pour faire encore diminuer ce "pas toujours".

Point délicat : l'ergonomie des cockpits est définie au stade du développement d'un avion, et pour un avion donné elle n'évolue ensuite que de façon parcimonieuse. Cette définition est menée à l'aide d'équipes d'essais en vol assistées de pilotes de compagnies aériennes pour les situations normales, anormales et de détresse, prévues de la manière la plus exhaustive possible. Mais d'une part ces équipes, même les pilotes de compagnies qui les assistent, sont plutôt bien formées à l'imprévu, connaissent très bien l'avion et ne sont peut-être pas tout à fait représentatives du pilote de ligne n'ayant qu'une connaissance limitée de l'avion acquise au cours d'une qualification de type minimale. D'autre part on ne peut définir le cockpit que pour le prévisible des situations, ce qui laisse dans l'ombre la quasi-infinité des zones imprévisibles.

Donc il s'agirait d'ajouter une partie additionnelle dans la philosophie de cockpit tenant compte d'un nouvel aspect de l'ergonomie, celui de la **dynamique d'évolution** de la succession rapide des perceptions, du diagnostic, de la décision, des actions et de leur contrôle, et celui des **limitations sous contrainte de temps, et/ou de stress** des perceptions, de leur traitement et des actions de pilotes normaux.

- **La synthétisation des informations pertinentes présentées aux pilotes**, voire leur limitation allant jusqu'à l'élimination temporaire des informations non indispensables, avec le choix des paramètres et des combinaisons de paramètres les plus simples et les mieux appropriés à un traitement cognitif rapide de la situation présente, avec si nécessaire l'incitation à les consulter.

  La combinaison des paramètres liés à l'aérodynamique avec ceux concernant la gestion de la trajectoire, en position et en énergie, mériterait une étude sérieuse de simplification, iconoclaste car pouvant amener l'abandon de leurs présentations traditionnelles.

Par exemple pour le pilotage à court terme, immédiat, ne peut-on pas trouver une présentation basée sur une combinaison synthétique et ergonomique des paramètres classiques incidence, vitesse, altitude, vitesse verticale, assiettes, poussée, vecteur vitesse, énergie totale, peut-être recalculés à partir de données différentes de celles couramment utilisées ? Les équations de la physique du vol, la technologie de captation des paramètres nécessaires, celle des systèmes, et l'expérience sur l'ergonomie des postes d'équipage, tout cela existe aujourd'hui et peut être utilisé.

Le problème de l'incidence a été évoqué pendant le colloque, avec la remarque que son introduction comme paramètre de vol serait difficile pour des raisons techniques et de formation des nombreuses populations de pilotes. En fait il s'agit plutôt de revoir entièrement l'assemblage des paramètres de conduite d'un avion dont l'incidence n'est qu'une composante, certes primordiale[18] .

Dans les actions rapides et multiples la connaissance de l'état de l'avion peut être un élément primordial. Cependant l'obligation de l'observation du FMA semble devoir être améliorée car interférant avec des actions pouvant être vitales, même si cette connaissance peut elle-même être vitale. Dans la réaction à un événement soudain la lecture de textes et d'acronymes, en fait la perception mentale de leur signification pour pouvoir être pris en compte, prend un temps toujours précieux dans des actions rapides et séquentielles.

Une étude menée au début des années 80 par Aeroformation sur l'enseignement des modes du FMA montrait la difficulté mentale des stagiaires à traiter sur le même instrument des paramètres quantitatifs de contrôle de vol et des paramètres qualitatifs d'état de systèmes. Un enseignement approprié a résolu le problème pédagogique mais le phénomène mental de base reste toujours présent.

Le problème de la focalisation permanente de l'attention, l'effet tunnel, doit aussi être traité. On peut citer l'éventuelle solution de supprimer totalement l'information sur laquelle se focalise le pilote, déduite de recherches neuropsychologiques.

- **La recherche d'automatismes utilisant au mieux les qualités humaines opérationnelles** et la capacité normale des pilotes pour des réactions correctes et rapides, en particulier dans l'aide à la récupération des situations anormales, sans chercher à en faire des super-virtuoses.

  À titre d'exemple de fonction devenue inadaptée au cours de l'évolution des automatismes, on peut citer le directeur de vol. Initialement il était destiné à fournir au pilote en pilotage manuel les informations de suivi de trajectoire, tirées du pilote automatique, pour le soulager d'avoir à résoudre mentalement les équations de la mécanique du vol alors que le pilote automatique le faisait mieux que lui. Lorsqu'il suit "les ordres" du directeur de vol, le pilote devient un substitut moins performant du pilote automatique, mais ce suivi est tellement prenant que c'est au détriment de la surveillance des paramètres de vol primaires. En revanche en pilotage automatique, c'est-à-dire la plupart du temps, le directeur de vol sert à vérifier éventuellement le fonctionnement du pilote automatique.

  Cependant le supprimer totalement reste un problème. Si l'on veut une réaction rapide guidée, lorsqu'on connaît la manœuvre de récupération adaptée à l'événement, il peut être utile, mais à condition de devenir l'élément immanquable et unique de référence,

18. L'Annexe 5 donne un aperçu de l'utilisation de l'incidence sur les avions de transport.

ce qui est loin d'être le cas. Les automatismes ont là un rôle à jouer, de façon "intelligente" : aux automatismes ce qu'ils peuvent faire efficacement sans peine, résoudre les équations de la physique du vol, au pilote le choix de la solution adéquate de trajectoire sans la saturation de calculs compliqués, tout en étant directif dans l'exécution des tâches nécessaires. Un exemple est donné en annexe 4 pour le pilotage à vue.

4.4.3 Les procédures

Les procédures ont apporté une grande contribution à la sécurité. Elles sont indispensables à une opération aérienne efficace et sure.

Cependant le traitement des cas imprévus exige des procédures ou plutôt des règles simples et intuitives. Le cas de l'incident de l'A380 de Qantas, le 4 novembre 2010 près de Singapour, pose le problème de la durée d'exécution de procédures multiples intercorrélées et en cascade. Le traitement de l'événement imprévu d'éclatement de la turbine d'un moteur a nécessité 50 minutes, heureusement avec la disponibilité du temps nécessaire ce qui fut l'un des facteurs "chance" de l'incident.

Souvent dans ces cas d'urgence des règles plus générales peuvent efficacement remplacer des procédures trop détaillées.

On peut citer là comme exemple les "Golden rules" d'Airbus Training concernant le comportement vis-à-vis des automatismes :

1. ***The aircraft can be flown like any other aircraft.***
2. ***Fly, navigate, communicate-in that order.***
3. ***One head up at all times.***
4. ***Cross check the accuracy of the FMS.***
5. ***Know your FMA at all times.***
6. ***When things don't go as expected – TAKE OVER.***
7. ***Use the proper level of automation for the task.***
8. ***Practice task sharing and back-up each other.***

Un autre problème des procédures est leur multiplication. Après la mise en service d'un avion, alors qu'on a pris grand soin de définir au mieux les procédures d'utilisation, l'expérience oblige de prendre en compte des cas opérationnels initialement imprévus, ce qu'on fait fréquemment en rajoutant des procédures, ou de nouvelles consignes ce qui revient au même. A l'inverse la suppression ou la simplification de procédures sont des événements très rares.

4.4.4 Récupération de positions inusuelles

Ces situations sont en général inattendues, même si elles peuvent être prévisibles mais avec l'incertitude de l'occasion et de l'instant de leur survenance.

On peut penser qu'une récupération automatique serait la solution appropriée, à condition de prévoir de telles situations (qui ne seraient plus imprévues). Les Américains sont allés loin sur cette piste avec la récupération automatique d'avions de combat. L'US Air Force semble vouloir équiper ses avions à commandes de vol électriques, en particulier les F-22 et F-35, d'un système de contrôle automatique lorsque le pilote approche une situation irrécupérable. L'évitement automatique d'obstacles, relief ou avions, est envisagé dorénavant dans le transport civil.

Cependant il existe des cas, et il continuera d'en exister, où les automatismes fonctionnent correctement avec leur logique propre, inadaptée à la situation imprévue. Ce qui nécessite la reprise en main aggravée par la méconnaissance de l'apport négatif de l'automatisme. C'est par exemple le cas de la remise de gaz en approche mal conduite à forte incidence avec un trim automatique rendant difficile la reprise manuelle, ou la déconnexion du pilote automatique dont l'alarme est passée inaperçue dans l'exécution de tâches nécessitant une attention soutenue.

Comme les récupérations automatiques ne peuvent se concevoir que dans des situations prévues et avec des automatismes fiables en toutes circonstances, il est nécessaire que les inévitables reprises en main de cas imprévus puissent être immédiatement jugées et décidées grâce à des présentations de paramètres et de commandes correctes, immanquables et intuitives. Là aussi il s'agit de philosophie de cockpit sous stress.

Le rôle évoqué précédemment du directeur de vol et sa fiabilité sont à considérer, probablement de façon différente de celui classique et habituel.

4.4.5 Les actions sur les commandes

Associé à ce qui précède il faut que la gestuelle des actions nécessaires aux récupérations de situations soit simple et coordonnée avec l'incitation provoquée par les informations présentées.

On peut citer ici en exemple la gestuelle du PNF, du pilote non aux commandes, dans la remise de gaz d'un bimoteur avec les deux moteurs en fonctionnement. Il doit manipuler rapidement en séquences évolutives de 10 à 20 secondes, volets, train, affichages de cap et d'altitude, changements de modes d'automatismes, avec la diversité de localisation des commandes. Il doit le faire en assurant la communication radio, en surveillant les paramètres du PFD dont le FMA, la poussée des moteurs et en annonçant tous les changements lus sur les instruments.

4.4.6 L'informatique à bord

Un point délicat est à mentionner. L'informatique a définitivement colonisé les cockpits sous une forme plus ou moins dérivée de la bureautique. Son usage est étudié pour les missions et cas prévus, en situations normales, anormales et en détresse, et apparem-

ment cela se passe bien. On peut cependant se poser la question de son utilisation sous contrainte de temps et sous stress au vu des erreurs de tous genres lorsqu'on la manipule au calme. Dans des situations complexes la virtuosité nécessaire alors n'est peut-être pas à la portée de tous, même pour les générations de pilotes éduquées aux i-Pads.

4.4.7 Le PFD

Étant l'instrument de référence du pilotage à court terme il est impliqué en premier dans les améliorations évoquées, aussi bien dans ses rôles que dans sa structure et ses présentations. Par exemple le T basique de pilotage aux instruments doit-il être retenu ? Si oui comment modifier ses présentations de paramètres ? De quels paramètres s'agit-il, les classiques ou des synthèses ? Etc.

Mais cet instrument doit-il faire place à un autre mieux adapté, et par exemple devenir son secours ?

4.4.8 Que faire ?

Si elles sont lancées ces actions amèneront nécessairement d'importants changements dans les habitudes, dans les équipements, dans les procédures (et dans la formation ainsi qu'on le verra ci-après), avec de notables implications financières. Mais elles ont probablement le meilleur potentiel de progrès.

Nous pensons que l'industrie, les transporteurs, les Autorités devraient y réfléchir. D'abord en décidant si la résolution des cas d'imprévus dangereux en vol, dont ceux pouvant déjà être estimés, mérite une telle évolution certainement coûteuse dans le pilotage des avions, et ensuite en décidant l'ouverture d'études de nouveaux standards appropriés.

4.5 FORMATION ET SÉLECTION / GESTION

4.5.1 Formation

L'imprévu comme norme ?

Si l'imprévu était la norme, la formation des équipages devrait être fondamentalement orientée pour leur permettre de lui faire face, en stimulant en particulier chez eux les capacités de jugement et de créativité qui sont indispensables à cet effet.

Mais il faut regarder la réalité en face. Les pilotes actuels sont sélectionnés et formés pour des missions effectuées dans des situations prévues, qu'elles soient normales, anormales ou d'urgence, et à la stricte application des procédures. Leur formation actuelle et surtout leurs qualités professionnelles leur donnent la possibilité de réagir, le plus souvent correctement, face aux imprévus. Ces imprévus étant le lot courant dans l'accomplissement de la mission, l'expérience vient combler en partie les possibles déficiences. Cependant on a vu que parfois qualités et expérience ne suffisent pas pour venir à bout d'une situation particulière lorsque le temps nécessaire est trop restreint. Que faire pour que des pilotes ordinaires soient mieux armés afin de diminuer les risques de ratés ?

Un aperçu du problème est donné par un pilote instructeur de grande expérience :

"Devant une situation un peu complexe (mais pas beaucoup) de panne combinée à une situation météo et à la région survolée, alors que je propose une conduite à tenir qui me semble simple, bien adaptée, et de bon sens, je m'entends répondre par le pilote de ligne: 'C'est écrit où ?'

Autre exemple. Lors d'un vol de démonstration, après avoir longuement expliqué en détails pendant la croisière à un pilote de compagnie aérienne comment nous allons effectuer une série de 'touch and go[19]' sur notre terrain de destination, j'entends juste avant de descendre le même pilote me faire le "briefing descente". Ce qu'il raconte n'a absolument rien à voir avec ce que je viens de lui expliquer quelques instants auparavant ! Il ne fait que psalmodier le sacrosaint 'briefing descente' tel qu'il récite tous les jours, ce qui prouve qu'il ne fait qu'égrener mécaniquement des paroles vides de sens.

Ces deux exemples personnels, que je tiens parmi beaucoup d'autres, montrent que les pilotes de ligne sont formatés à exécuter des tâches apprises par cœur, ou à appliquer des procédures déjà écrites, mais qu'ils sont souvent incapables de s'adapter à ce qui n'est pas strictement prévu ou écrit à l'avance. Si les pilotes ne devaient être que cela, ce serait très facile de les remplacer par des machines. On saurait le faire dès maintenant. Or ce dont nous avons besoin chez le pilote, aujourd'hui et demain, surtout demain, c'est précisément le contraire d'une machine…."

Ces exemples résument les principales impasses actuelles de la formation : les procédures sont largement utilisées comme bases de la formation, et la méthode de définition de cette formation est axée sur le nécessaire et le suffisant, où le suffisant, pour des considérations financières et de concurrence, est pris au strict minimum des conditions d'exécution de la mission.

Les coûts

On en a peu parlé pendant le colloque. De fait ils régissent entre autres les programmes de formation. On adopte le principe du nécessaire et suffisant, mais parfois seulement du nécessaire en traitant le suffisant d'après les missions normales bien définies sans imprévu. On s'en remet fréquemment à la seule référence de la licence qui définit les compétences minimales de base, espérant que l'expérience viendra ensuite combler les vides éventuels. Avec ce concept de la formation a minima associé à la forte compétition

19. Atterrissages limités à un toucher des roues immédiatement suivi d'une remise des gaz sur la piste.

des coûts entre centres de formation, on voit la grande responsabilité pour la sécurité d'une part des autorités chargées des règlementations et d'autre part des utilisateurs.

Les études et propositions de l'OACI et de l'IATA n'ont pas pour objectifs de baisser les coûts de formation ni de réduire le nombre d'heures de vol. S'ils en ont le souci ce ne sont pas leurs objectifs primaires ni prioritaires.

Les Autorités ont une tâche difficile. Elles règlementent d'après l'évolution des technologies, des connaissances et de l'expérience. Elles sont donc toujours en aval de l'évolution avec la charge de définir des règles et des standards censés constituer une référence permanente pour tous dans un monde en perpétuel changement. Cependant il est fréquent, à la suite d'accidents ou d'incidents graves qu'une action rapide s'avère nécessaire. En matière de navigabilité la procédure concernant les aspects techniques est connue, rapide et efficace. On devrait l'étendre au même titre que la navigabilité à la partie humaine des implications, en particulier à la formation.

Les utilisateurs, soumis à la concurrence, doivent rechercher le meilleur compromis pour eux entre le respect de l'efficacité et de la sécurité, et les dépenses de formation, incluant entre autres les immobilisations correspondantes des équipages. Ils doivent nécessairement faire des choix de priorité dans les programmes.

Le pourcentage de ces coûts est connu dans chaque compagnie, et chez les constructeurs dont la responsabilité dans la formation initiale des clients est grande du fait des particularités techniques et opérationnelles de leurs avions.

Adaptation de la formation actuelle

Le concept de MPL utilise pour les licences de base le principe du nécessaire et suffisant, en introduisant le travail en équipage dès le début de la formation. C'est évidemment correct en matière d'économie de coûts, à condition que l'éducation ainsi donnée ne pénalise pas les comportements lors de situations nécessitant obligatoirement une réaction individuelle appropriée. Car le comportement immédiat dans une situation de surprise est essentiellement individuel et si le traitement approprié de la situation implique l'équipage, il implique l'addition correcte de deux comportements individuels chacun correctement entraîné. De plus la probabilité pour qu'un jeune copilote de peu d'expérience se trouve confronté à une situation où son commandant de bord ait une incapacité n'est pas négligeable. Le seul travail en équipage n'est donc pas suffisant. Pour assurer la nécessaire confiance en soi il est nécessaire d'avoir en parallèle des vols en solo **réel** (et non assisté, avec un instructeur passif à bord comme cela se pratique souvent) afin de conforter la confiance en soi et la maîtrise de soi. Le vol-à-voile peut jouer ce rôle.

L'introduction de séances de voltige aérienne dans la formation de base est un atout certain dans la préparation à la maîtrise de soi indispensable pour la récupération de cas imprévus. L'entraînement à la récupération de positions inusuelles tel que pratiqué par les militaires apporte une amélioration majeure.

La vérification des connaissances de base par la méthode des QCM, telle qu'elle est le plus souvent appliquée, est jugée par l'Académie insuffisante et dangereuse car ne garantissant pas la bonne compréhension de ces connaissances professionnellement

vitales. Des QCM non adaptées encouragent le bachotage conduisant à une absence d'assimilation de l'enseignement. Cette pratique semblerait montrer l'absence d'innovation dans l'acquisition de ces connaissances, voire le peu d'attention qu'on leur apporte alors qu'on demande en réalité aux pilotes de résoudre en permanence les équations de la physique du vol au travers de leurs actions sur les commandes de vol et sur les automatismes. Il ne s'agit pas ici de connaissances livresques mais de la création de modèles mentaux dans leur mémoire, ce qui est évidemment plus difficile que le bachotage. La technologie actuelle, l'expérience acquise en enseignement assisté par ordinateur, les connaissances sur le fonctionnement neurologique des mémoires, devraient permettre une réflexion approfondie sur la pédagogie d'acquisition des connaissances nécessaires aux pilotes.

On observe bien les efforts réels pour définir et prendre en compte une formation permettant les réactions correctes aux situations inattendues et imprévues. Cependant, à l'examen des actes du colloque, vis-à-vis de ce danger, de cette menace, il ne peut pas s'agir uniquement de formation, mais d'une véritable éducation du comportement.

La formation au CRM avec l'accent mis sur le contrôle réciproque des actions et une communication sans restriction au sein de l'équipage, amène une diminution du risque de focalisation excessive de l'attention. Des scénarios réalistes au FFS, du type LOFT, permettent l'éducation de la maîtrise de soi et celle des diagnostics de conscience de situation.

Remarque importante, pour que la formation soit valable ces scénarios doivent être diversifiés, réalistes et inconnus des acteurs, ce qui est souvent loin d'être le cas pour des raisons matérielles d'enregistrement, de collecte et de traitement d'informations, d'introduction dans des programmes définis de formation, ou pire parfois pour des motifs règlementaires. Or aujourd'hui l'informatique permet une définition quasi aléatoire de situations imprévues au cours d'un vol simulé, mais peu de centres utilisent cette possibilité qui existe cependant. On peut citer ici le système étudié par l'UCF, *University of Central Florida*, le RRLOE[20].

Une autre source d'aléas dangereux est le dépassement des limites opérationnelles de l'avion ou une incursion hors de son domaine de vol périphérique. Tout est fait pour que ces incursions soient rendues impossibles, avec des méthodes différentes par exemple sur les avions Boeing et Airbus. Les faits montrent que l'imprévu défie cette volonté. Il est évident que la technologie permet de combler en grande partie les lacunes observées dans les protections en les renforçant partout où les déficiences sont détectées. Mais peut-on conserver l'idée qu'il est inutile de savoir ce qui se passe au-delà des frontières artificielles réputées infranchissables, qu'il est inutile de donner aux pilotes une connaissance concrète des dangers qui les attendraient alors ? Jusqu'à présent les pratiques en vigueur répondent par la négation de cette nécessité. Nous pensons que cette connaissance des dangers physiques est nécessaire, mais qu'elle doit faire l'objet d'un consensus mondial pour que la mesure soit efficace en étant adoptée par tous.

20. Rapidly Reconfigurable Event-Set Based Line-Oriented Evaluations Generator.

Le problème majeur pour traiter ces problèmes en formation est l'inadaptation des FFS, traitée plus loin.

On a aussi vu que les programmes actuels n'incluent qu'implicitement le traitement des situations imprévues, noyé dans l'ensemble des autres impératifs règlementaires. Or au contraire les qualités requises pour que le délicat traitement de telles situations soit efficace, englobent largement celles aujourd'hui considérées nécessaires à une bonne exécution de la mission dévolue aux pilotes de l'aviation de transport.

En ce sens la formation des pilotes militaires et celle des spationautes sont nettement en avance sur celle des pilotes de l'aviation de transport et on aurait envie de dire qu'il suffirait de les copier pour améliorer les choses. Il faut remarquer que le suivi personnel des pilotes militaires et des spationautes et de l'évolution de leurs compétences est à la clé de cette efficacité.

L'affaire est un peu plus compliquée car dans l'aviation de transport les populations concernées sont beaucoup plus nombreuses, et gérées par des règles internationales dont l'existence fixe non seulement les conditions minimales de sécurité mais indirectement aussi les conditions régissant les coûts de formation, donc la compétition financière entre opérateurs et entre centres de formation.

Points-clés de la formation

Ainsi il faut s'attaquer simultanément à plusieurs points-clés, ce qui pour des problèmes économiques implique de revoir l'éducation/formation des pilotes et équipages de fond en comble pour en tirer un ensemble homogène, efficace et économique.

Éducation de la réaction à l'imprévu, de la maîtrise de soi

La maîtrise de soi est la qualité essentielle dans la gestion du stress.

Pour un maximum d'efficacité l'éducation doit se baser sur des prédispositions détectées à la sélection de base. Elle doit se conduire dès la formation de base et s'entretenir tout au long de la carrière.

L'outil principal est si c'est possible l'avion lui-même en formation *ab initio*, et surtout le simulateur de vol, type FFS, reproduisant au mieux l'environnement opérationnel réel d'une mission. L'outil doit servir à jouer un scénario approprié incluant une situation délicate à surprise. Le choix de l'événement doit être aléatoire, inconnu de l'équipage et jamais le même. On ne forme pas l'équipage sur l'événement mais sur ses réactions à l'événement, en particulier sur la prise de décision.

Pour les FFS il faut donc des logiciels permettant ces choix aléatoires dans un répertoire très étendu.

Les jugements s'appuient sur des cotations de réactions permettant la mise en lumière des déficiences éventuelles et des progrès réalisés au cours de la formation.

Formation de base, *ab initio*

Souvent la formation initiale est considérée comme une liste de connaissances et de savoir-faire à enseigner aux pilotes. C'est malheureusement un concept courant et

restrictif car l'objectif réel dépasse ce concept en l'englobant : il faut leur inculquer une véritable culture aéronautique basée sur la compétence et la sécurité.

Une formation de base insuffisante resterait un handicap permanent pour un pilote, qui serait alors un danger potentiel permanent pour le transport aérien. La qualité est importante car il est prouvé que des manœuvres vitales apprises pendant cette phase initiale restent imprimées de façon indélébile dans la mémoire, et peuvent réapparaître spontanément en l'état initial dans des situations requérant ce type de manœuvre quelles que soient les modifications de procédure apportées entre-temps.

On a vu qu'on y introduit le travail en équipage. Cependant c'est dans cette période que se forgent les qualités individuelles nécessaires à la gestion sous stress des situations imprévues et inattendues, outre la maîtrise de soi dont on a parlé, principalement :

- **L'acquisition et la rétention des bonnes connaissances de base.** La liste de tout ce qui est nécessaire à enseigner n'est pas suffisante, il faut aussi et surtout utiliser les méthodes et programmes permettant une bonne compréhension et un stockage mémoriel permettant la réutilisation de ces connaissances de façon correcte en fonction des situations[21]. Les outils modernes d'enseignement par ordinateur autorisent la formation théorique par l'usage de la simulation. Cette même simulation permet le contrôle des connaissances par des questions à choix multiples, QCM, où les résultats ne sont pas donnés à l'avance, donc sont libérés du bachotage.
- **La confiance en soi et le sens de l'air.** Les vols en solo (en solo réel, non accompagné d'un instructeur) en sont un élément puissamment confortant. Le vol en planeur est un bon moyen éducatif.
- **La récupération de positions inusuelles.** Il n'est pas besoin d'inventer, il suffit de copier ce que font les militaires en l'adaptant aux missions civiles et à leurs retours d'expérience. Le vol en planeur n'est pas suffisant pour cela.
- **La "division de l'attention",** ainsi est appelée la faculté de traiter plusieurs tâches simultanées malgré la limitation humaine de ne pouvoir traiter ces tâches de façon consciente qu'en séquences. Cet apprentissage est un rempart contre la dangereuse focalisation permanente de l'attention, la tunnélisation[22].
- **L'anticipation**, permettant de réduire le temps de réaction aux situations se déroulant rapidement.
- **La reconnaissance et la gestion des erreurs**. Cela peut se traiter en équipage en confortant la fonction de surveillance et de vigilance.

Les programmes doivent être définis d'après des méthodes rationnelles de type CBT où le comportement est pris en compte à chaque pas d'analyse.

Au fur et à mesure de l'augmentation de la complexité des moyens aériens utilisés, des automatismes en particulier, il est indispensable que les stagiaires conservent une idée

21. Voir l'annexe 7 : Enseigner la mécanique du vol ?

22. ou effet tunnel. Phénomène de focalisation parasite de l'attention sur certains éléments au détriment de la perception de l'évolution de leur environnement.

simple de leur utilisation. Si l'usage de procédures opérationnelles est de mise, en revanche des règles générales à enseigner, simples et de bon sens, doivent être étudiées pour traiter des situations complexes imprévues, de développement rapide, où l'exécution des procédures est problématique. Ce cas a déjà été traité précédemment.

Le rôle des instructeurs est primordial dans cette phase de formation initiale. Leur propre formation est à soigner principalement dans leur compétence à suivre la progression individuelle de stagiaires de comportements différents.

Qualifications de type et entretien de la compétence

Il ne s'agit pas de réformer ce qui se pratique très bien aujourd'hui, mais de l'orienter.

L'accent doit être mis sur les cas où la contrainte de temps est la plus forte, pas forcément sur ceux considérés techniquement les plus dangereux. Ainsi, dans l'utilisation des avions bimoteurs, les remises de gaz avec les deux moteurs en fonctionnement sont potentiellement plus dangereuses que celles avec panne d'un moteur, par les variations très rapides des conditions de vol et par suite l'obligation d'actions correctes très rapides. Les remises de gaz avec un seul moteur sont "plus calmes" et ainsi permettent une meilleure gestion des actions requises malgré le stress induit par la panne. Les limitations opérationnelles par la contrainte temporelle semblent supérieures à celles provenant du stress de l'observation de la panne, ce qui pourrait justifier une recherche particulière.

La revue de ces cas prévisibles est nécessaire et peut constituer une base d'entraînement des imprévisibles. Ce qui ne supprime pas l'obligation dans les différents programmes de maintenir les qualités apprises en formation initiale.

L'enseignement des limitations du domaine de vol devrait comporter des démonstrations aux frontières où les phénomènes physiques et l'évolution de ces limitations sont particuliers. L'enseignement théorique n'est pas suffisant pour fixer la notion de danger dans la mémoire. Se reposer sans démonstration sur l'action des systèmes de protection est tout aussi insuffisant.

Le contrôle périodique des qualités de maîtrise de soi doit aller de pair avec celui des connaissances et du savoir-faire.

Simulateurs de vol

Les FFS actuels sont très performants mais au vu des problèmes soulevés dans ce dossier il y a trois types différents de difficultés.

La programmation

Il serait souhaitable, pour introduire l'imprévu dans la formation, de pouvoir programmer des séances aléatoires dans le cadre du LOFT et aussi lors de l'épreuve pratique de l'ATPL. Par exemple et sans être exhaustif, les variables aléatoires de ces séances pourraient être les aérodromes utilisés, l'état des aides à l'atterrissage, les conditions météorologiques, des obstacles, des consignes particulières de l'ATC, l'état de l'avion et de ses systèmes, un certain nombre de pannes ou d'événements imprévus, chacun affecté d'un coefficient de difficulté et d'une durée de traitement. Cela éviterait, étant donné le petit

nombre actuel de scénarios, que le candidat ne sache, dès la première panne, ce qui l'attend par la suite. Déjà cité un système du genre du RRLOE, "*Rapidly Reconfigurable Event-Set Based Line-Oriented Evaluations Generator"* serait à utiliser.

Le mouvement de la cabine

Fréquemment les situations rapides imprévues concernent des évolutions rapides de l'avion. Au FFS la mauvaise réplique de ces mouvements peut provoquer des perceptions physiologiques fausses amenant des jugements et des réactions inappropriées.

Il y a 40 ans des études poussées ont conduit aux réglages actuels des mouvements de la cabine du simulateur afin de restituer au mieux les sensations inertielles et de rotation dans des phases de vol sélectionnées dans une mission classique, en fonction des caractéristiques physiologiques humaines. Cependant aujourd'hui on s'aperçoit que certaines manœuvres au simulateur ne répliquent pas les mêmes sensations qu'en vol réel, par exemple en remise de gaz.

Sachant bien que l'exacte réplique de la réalité est impossible, il est donc nécessaire de se pencher à nouveau sur ces réglages pour trouver là-aussi des compromis acceptables entre les possibilités techniques et les réalités physiologiques dans les situations à problèmes.

Le domaine de vol.

Il s'agit ici des cas de sortie du domaine de vol normal, surtout pour des démonstrations de dangerosité de situations. On a vu que la connaissance du comportement de l'avion et de ses équipements était en jeu dans des cas, certes extrêmes mais réels, hors domaine de vol par exemple pour des grandes incidences.

Les données actuelles (*data package*) transmises aux constructeurs de simulateurs ne concernent souvent que le seul domaine opérationnel, parfois le domaine périphérique, jamais l'extérieur de ces domaines

Donc il faut étudier des "compromis" de données permettant de baliser ces zones dangereuses sans rechercher l'exactitude rigoureuse qui serait impossible à obtenir sans coûts prohibitifs, ni sans danger.

En exemple on peut citer dans la qualification de type Concorde l'exercice de dépassement volontaire des limites de vol en transsonique avec la panne d'un corps de servocommande de vol, allant jusqu'à la perte de contrôle. C'était une excellente et efficace démonstration pédagogique du danger de sortie du "couloir de centrage" qui était une nouveauté pour les stagiaires.
De plus il y avait la démonstration au FFS des limitations de l'ensemble du domaine de vol et de ses protections.

4.5.2 Sélection et gestion des pilotes

La sélection

Le nombre d'avions en opération augmentant, celui des pilotes augmente aussi. On se heurte ici à la nécessité d'un recrutement, souvent dicté par la nécessité immédiate, pour satisfaire la demande en continuelle augmentation, où la rigueur de sélection peut faire défaut et où le niveau minimum règlementaire de formation devient le standard retenu.

Sans revenir sur les critères actuels de sélection des pilotes, on est obligé de constater que dans les incidents et accidents répertoriés les dysfonctionnements humains ont une cause majoritairement commune, le manque de maîtrise de soi, et souvent en conséquence la propension à la focalisation permanente de l'attention.

Avec l'expérience de milliers de pilotes formés en qualification de type il est raisonnable de penser qu'une forte proportion des pilotes actuels auraient de sérieux problèmes pour traiter des combinaisons de situations imprévues vraiment dangereuses et stressantes, heureusement rares dans une carrière de pilote travaillant en équipage.

Pour déceler cette maîtrise de soi, qualité majoritairement innée, il est nécessaire de placer l'individu dans une situation opérationnelle **réellement stressante**, et les simulateurs n'offrent pas des situations où les actions soient **vitales**. Cependant cette détection est de prime importance dans l'accès à la fonction de pilote, présente ou future. Nous pensons que des études fondées sur les connaissances neuropsychologiques doivent être conduites pour combler cette déficience.

La comparaison entre les résultats de la sélection initiale et de l'observation du comportement en cours de formation devrait s'étendre à la carrière d'un pilote, ce qui est rarement fait. Le retour d'expérience permettrait éventuellement de remettre en cause certains tests utilisés.

La gestion

La sélection et la formation des pilotes ne suffisent pas à garantir la pérennité des compétences face à l'imprévu. Le colloque a montré la grande importance de la gestion des pilotes en fonction de la mission, de ses conditions d'exécution, et des compétences individuelles. L'aviation militaire présente une avancée considérable sur le transport civil. Le suivi et la gestion serrée des individus est la règle, assurant la meilleure efficacité et la bonne sécurité des vols.

Les compagnies aériennes ont d'importantes difficultés à maîtriser cette gestion de par le grand nombre de pilotes et leur grande diversité. Elles le font au mieux des règlements, des circonstances, de leur gestion de la sécurité des vols, de leurs problèmes financiers et autres.

La règle de la séniorité, qui n'existe pas chez les militaires, est quoi qu'on en dise un obstacle à la bonne gestion de la sécurité. Qu'on considère l'ancienneté dans la compagnie, donc de l'expérience opérationnelle, comme l'un des garants de l'efficacité est normal. Mais que cette ancienneté ait comme objectif, par dévoiement de la règle,

le seul maintien des privilèges des pilotes, est aberrant en matière de sécurité et d'efficacité.

Nous pensons que cette règle de séniorité devrait être assortie de considérations objectives sur les compétences comportementales et techniques des individus, ce qui implique une gestion serrée de ces compétences, attentive à toute divergence dans les actes quotidiens professionnels. Pendant les audits et checks en vol il est prévu d'apporter une attention particulière aux comportements dans toute situation imprévue même mineure. En tient-on compte efficacement dans la gestion individuelle des pilotes ? Cela pèse-t-il suffisamment vis-à-vis de la séniorité ?

L'entretien de la vigilance

Aussi bien formé et entraîné soit-il, un pilote ne peut faire face à l'imprévu s'il n'est pas vigilant, ce qui n'est pas toujours facile, en particulier pendant le vol de croisière où il doit surveiller des automatismes qui fonctionnent très bien et une planche de bord sur laquelle il ne se passe rien ; aucune information ne vient stimuler son cerveau. De plus le pilote est dans un environnement défavorable : bruit, faible taux d'humidité, taux d'oxygène dans le sang diminué par l'altitude de la cabine, décalage horaire éventuel et, souvent, vol de nuit.

S'ajoute à cela le fait que le pilote est, comme tous les humains, soumis au rythme circadien sous forme de cycles d'une durée d'environ une heure et demie qui sont particulièrement ressentis pendant la nuit (cycles du sommeil). Le début de chaque cycle, même pendant la journée, est propice à l'endormissement qui peut être totalement inconscient. Cet endormissement inconscient est responsable chaque année de milliers de morts sur la route quand il se produit au volant d'une voiture, et on cite de nombreux cas d'endormissement inconscient dans les cockpits. Notons qu'il existe une période particulièrement propice à la perte de vigilance entre 5h et 7h (corrigée du décalage horaire) pendant laquelle certains paramètres physiologiques comme la température corporelle passent par un minimum. Cette période correspond à un pic d'accidents chez les chauffeurs routiers.

Pour lutter contre la perte de vigilance et, *a fortiori*, à l'endormissement, plusieurs stratégies sont possibles, devant être adaptées aux circonstances :

- en comblant l'absence d'information dans le cockpit par des occupations ne mobilisant qu'une partie de l'attention du pilote : lecture fractionnée, révision du manuel d'utilisation, conversation qui présente l'avantage de renseigner chaque pilote sur l'état de vigilance de l'autre, etc. ;
- en combattant le mal par le mal, c'est-à-dire en s'accordant un bref moment de sommeil quand on se rend compte de la diminution de la vigilance. Ce repos qui ne doit pas durer plus de 20 minutes pour éviter de tomber dans la phase de sommeil profond est connu sous le nom de NASA nap aux États-Unis et sous le nom de pause parking en France. Il doit être pris quand le besoin s'en fait sentir, que les circonstances s'y prêtent, et ne doit pas être programmé à l'avance. Il en est de même pour la période allouée au sommeil de chaque pilote sur les vols très longs exigeant plus de deux pilotes ;

- Il faut aussi prendre en compte le fait qu'un pilote réveillé en urgence en plein sommeil profond a besoin de plusieurs minutes avant d'être capable de faire une analyse correcte de la situation et, *a fortiori*, de prendre une décision.

La gestion des pilotes doit inclure ce problème essentiel du contrôle de la fatigue et de l'éveil.

4.6 RECHERCHES DE BASE - CONNAISSANCE DES MÉCANISMES COGNITIFS

Ayant jusqu'alors été le moteur des améliorations de l'interfaçage humain, façonné par des millénaires de pratiques d'observation et de bon sens, conforté par l'aide de la toute puissante technologie, le pragmatisme s'essouffle sur le traitement de dangereuses situations imprévues dynamiques.

S'attaquer au comportement face aux situations imprévues ou inattendues implique la reconnaissance des mécanismes mentaux élémentaires dynamiques, et surtout de leurs limitations. Ce sont des données de base du comportement humain opérationnel, applicables sans distinction à toutes les situations opérationnelles d'une mission, ce qui unifie les concepts de facteur humain utilisés en aéronautique en les simplifiant. L'avancée dans les connaissances neuro-psycho-cognitives est nécessaire pour rationaliser l'utilisation pratique des connaissances de ce comportement.

Depuis plusieurs décennies la psychologie s'est efforcée de trouver les causes des dysfonctionnements observés dans les comportements et d'y apporter des solutions. Limitée par son discours qualitatif, cinématique, elle est relayée maintenant par la neuropsychologie.

Nous pensons que les clés des problèmes de comportement opérationnel sous stress devant l'imprévu se trouvent dans cette connaissance des mécanismes mentaux, dont un aperçu sur les apports de la psychologie et de la neuropsychologie a été résumé précédemment.

Le colloque a montré clairement que la formation, l'éducation, voire la sélection des pilotes sont difficiles à faire évoluer, ce qui n'est pas une raison d'ignorer les améliorations proposées car aujourd'hui leur suivi, bien que complexe, est seul à pouvoir améliorer la situation. Mais dans ce secteur l'innovation observée ne concerne que l'utilisation généralisée de méthodes déjà expérimentées avec succès chez des utilisateurs en nombre relativement limité, et n'ouvre pas sur une amélioration importante de la situation actuelle de la sélection et de la formation dans l'aviation de transport mondiale avec ses quelque 500 000 pilotes, soumises le plus souvent aux considérations financières et règlementaires minimales qui resteront présentes qu'on le veuille ou non. En fait on utilise des méthodes millénaires, aussi anciennes que notre cerveau, avec les seuls raffinements de l'aide technologique des moyens utilisés et de l'analyse rationnelle de ce qui est nécessaire à l'exercice de la profession.

En revanche l'apport scientifique dans la connaissance du comportement dans les situations d'évolution rapide, en particulier celle des limitations mentales dues à la surprise et

au stress, permet une ouverture vers des solutions réalistes d'ergonomie dans les cockpits, dans les procédures, dans l'adaptation des formations. Cet apport devrait amener l'innovation recherchée.

Cette ouverture vers de réels concepts innovants nécessite une coordination entre de nombreux acteurs, les universités avec les chercheurs, aujourd'hui trop cloisonnés dans des matières scientifiques très compartimentées, les opérationnels des compagnies aériennes et des avionneurs, les industriels systémiers et constructeurs avec leurs intérêts propres et leurs soucis de confidentialité, les autorités règlementaires.

On a montré l'influence directe du dépassement des limitations mentales (cognitives) normales, irréductibles, sur le comportement des pilotes. Lorsqu'elles sont atteintes, ces limitations influent sur la façon dont une situation est perçue, diagnostiquée et traitée sous le stress engendré par l'irruption du problème. Elles dépendent de paramètres internes à l'individu mais la manière dont une situation lui est présentée a une influence directe sur la marge existant avant leur atteinte. Associé à la focalisation normale de l'attention causée par la surprise, le dépassement des limites engendre inévitablement des aberrations (erreurs, oublis) pouvant conduire à l'établissement rapide du phénomène de tunnélisation.

Même si les individus ont des caractéristiques différentes de comportement, le cerveau possède un fonctionnement de base commun à tous. La connaissance exacte des limitations cognitives et leur prise en compte rationnelle, en particulier pour éviter leur transgression, auront un impact direct sur l'évolution de l'interfaçage, de l'intégration humain-systèmes, surtout dans l'évolution de l'automatisation des avions où la technologie est un extraordinaire support qu'il faut discipliner pour qu'elle soit une aide efficace sans être une source de contraintes.

Pour cela il faut augmenter le niveau de connaissance des comportements cognitifs dynamiques impliqués, sous le double aspect (1) d'être fonction du temps en chronologie et en durée, et (2) de concerner l'exécution de multitâches opérationnelles. Il s'agit là du comportement déclenché et géré surtout par le stress, inhérent à la structure des situations.

La neuropsychologie est la meilleure voie vers la connaissance, alliant les résultats de la psychologie à ceux des fonctionnements internes du cerveau, pour une synthèse applicable à l'utilisation opérationnelle des avions pilotés (ou "conduits").

Les objectifs impliqués de recherches pourraient être, par exemple et de façon non exhaustive :

1- Nature, rôles respectifs des modèles mentaux et des fonctions cognitives dans un fonctionnement opérationnel dynamique de faible constante de temps (entre 1/10 et 10 secondes). Liaisons entre eux.

2- Correspondances, particularités d'utilisation et limitations des mémoires à court terme, de travail, déclarative, procédurale dans les activités opérationnelles de courte durée. Liaisons entre fonctions cognitives et mémoires.

3- Liaisons et coordination dans l'exécution de tâches multiples rapides entre actions conscientes, mémorisation, actions automatiques inconscientes. Détermination et

rôle des objectifs. Mécanisme des choix. Liaisons entre les différents niveaux et boucles d'actions.

4- Altération par le stress des capacités de perception, d'analyse, d'action dans l'exécution de tâches multiples. Limitations et effet tunnel.

L'implication des Autorités dans l'orientation et l'application de ces recherches de base leur permettrait d'influencer directement l'évolution des critères de sécurité.

- 5 -
RECOMMANDATIONS

L'Académie de l'air et de l'espace prend acte du constat, exprimé par la communauté aéronautique, de la grande dangerosité de certaines situations imprévues en vol.

Les situations imprévues sont le lot courant des missions de transport aérien, et la culture de sécurité qui est l'apanage de l'aéronautique s'emploie à minimiser leur danger en renforçant les barrières destinées à éviter les dysfonctionnements humains chaque fois qu'une situation dangereuse est connue ou estimée. Cette pratique diminue les risques sans les éliminer car les imprévus en vol sont inévitables par principe.

Une analyse des problèmes liés à la recherche de solutions pour diminuer l'impact de la dangerosité de l'imprévu en vol a été menée de façon limitée dans le chapitre 4. Elle montre la nécessité d'efforts importants, en particulier avec des implications financières, dans l'interfaçage dans le cockpit, dans la sélection, la gestion et la formation des pilotes. Or le taux actuel d'accidents étant très faible, nous posons la question de savoir si les acteurs de l'ensemble de la communauté sont disposés à mener cet effort.

1

L'Académie recommande à l'ensemble des acteurs, Autorités, industriels, opérateurs, de définir une stratégie commune d'actions efficaces contre le danger des situations imprévues provoquant des dysfonctionnements de comportement des pilotes.

Dans la mesure où une entente globale existe, et même s'il était impossible de l'obtenir, l'Académie recommande aux acteurs cités d'agir dans trois domaines :

- **l'interfaçage pilote-avion dans le cockpit ;**
- **la sélection, la formation, la gestion des pilotes ;**
- **la recherche fondamentale sur les comportements sous stress.**

L'Académie est d'avis qu'une stratégie commune faciliterait la mise en place des moyens nécessaires. Mais elle est consciente que des actions particulières pourraient être soit préjudiciables à leurs initiateurs, par exemple financièrement, soit au contraire bénéfiques au plan de la notoriété en matière de sécurité.

2

Dans le domaine de l'interfaçage dans le cockpit l'Académie recommande les actions suivantes :

- **La prise en compte dans l'ergonomie des cockpits des limitations normales mentales sous stress,** en simplifiant le traitement des paramètres de vol afin d'améliorer la rapidité du diagnostic de la situation, et en donnant des indications immanquables au pilote sur la nature et le sens des actions immédiates nécessaires de récupération, ces actions devant être exécutées le plus simplement et le plus rapidement possible, le temps disponible étant le paramètre-clé mais fréquemment inconnu.
- **La recherche des meilleures combinaisons de tâches entre les pilotes et les automatismes** afin que chacun des deux acteurs soit utilisé au mieux de ses capacités, les automatismes pour s'occuper des traitements physiques, de trajectoire ou de systèmes, et le pilote pour exercer son choix de décisions et commander l'exécution des actions aux automatismes.
- **L'utilisation de procédures simples, sinon intuitives**. Si la situation imprévue exclut la possibilité de suivre des procédures, donner des règles simples et générales aisées à retenir et à appliquer.
- Dans la répartition des tâches en équipage à deux, dans des phases de vol où la pression temporelle est forte, **prendre soin que le pilote non aux commandes puisse exercer correctement sa fonction essentielle de surveillance** de la situation (*monitoring*).

3

Dans le domaine de la sélection l'Académie recommande les actions suivantes :

- **La maîtrise de soi** étant essentielle dans le traitement des situations imprévues dangereuses il est important de **bien détecter cette caractéristique personnelle** dans les tests de sélection avec les moyens appropriés, peut-être à mieux définir.
- **Comparer l'évolution des compétences des pilotes** pendant leur carrière aux résultats des tests de leur sélection.

4

Dans le domaine de la formation l'Académie recommande les actions suivantes :

- Au titre de l'indispensable formation personnelle **inclure des vols réellement solo et de voltige aérienne dans la formation de base** des pilotes ainsi que la **démonstration au simulateur de vol des dangers de sortie du domaine de vol périphérique**, avec l'enseignement des manœuvres de récupération à l'atteinte des limites de domaine, quel que soit le type de protection utilisable plus tard en opération.

- **Enseigner correctement la physique du vol et ses limitations** en utilisation opérationnelle, sans bachotage et par la pratique d'exercices. Utiliser des tests vérifiant le niveau réel de connaissances, là-aussi en excluant le bachotage. À ce sujet la conception et l'usage des questions à choix multiples sont à revoir de façon fondamentale, sans pour cela les supprimer.
- **Éduquer la maîtrise de soi et la vigilance** dans le suivi permanent des situations en vol, par des séances au simulateur de vol où l'on introduit de façon aléatoire des situations imprévues à problèmes, sans que les stagiaires puissent les connaître à l'avance.

L'utilisation des simulateurs de vol est essentielle et quelques adaptations s'avèrent nécessaires.

5

Pour les simulateurs de vol (FFS) l'Académie recommande :

- Pour la formation aux réactions aux situations imprévues, **l'utilisation de logiciels permettant une sélection de combinaisons imprévues de situations**, ne pouvant pas être connues au préalable des stagiaires.
- Pour les démonstrations des dangers de sortie du domaine de vol, avoir **des extensions des données des *data-packages* classiques**, sans qu'elles soient rigoureusement conformes à une réalité difficile ou impossible à mesurer.
- Les mouvements des cabines étant physiquement limités, la **revue des cas de vol d'évolution rapide et dynamique** est à mener cas par cas pour éviter des sensations parasites pouvant perturber les perceptions, ou au contraire pour donner des sensations les plus proches possibles de celles perçues en vol.

6

Dans le domaine de la gestion des pilotes l'Académie recommande les actions suivantes :

- **Suivre le maintien de la capacité de maîtrise de soi** tout au long de la carrière individuelle de chaque pilote.
- **Suivre le maintien des connaissances et des savoir-faire de base** au cours de leur carrière.
- Lorsque la sécurité l'exige, **placer la priorité sur la compétence individuelle** devant les problèmes de séniorité.
- **Veiller à l'éducation de la vigilance**.

Ce qui précède repose sur une exacte connaissance des mécanismes cérébraux en situation de contrainte temporelle et de stress, et de leurs limitations, car le fonctionnement dynamique des processus mentaux à très faible constante de temps, inférieure à la seconde parfois, régit le comportement dans de telles situations.

7

Pour que les actions citées soient efficaces elles doivent être basées sur des données scientifiques supplémentaires, afin de mieux connaître le fonctionnement dynamique des processus mentaux et leurs limitations, par exemple et en particulier, mais sans que ce soit limitatif, l'effet tunnel. L'Académie recommande le **recours à la neuropsychologie pour l'étude de ces phénomènes.**

Cependant ces recherches ne doivent pas entraver la mise en pratique immédiate des recommandations précédentes partout où c'est possible.

ANNEXE 1 :
INTRODUCTION OF THE NEW FLIGHT CREW LICENCE

Source EASA

The Multi-crew Pilot License (MPL) *is a licensing scheme widely implemented, including in Europe. MPL is defined in Part-FCL, Subpart E, and relative Acceptable Means of Compliance (AMC) and Guidance Material (GM), and in Appendix 5, published in 2012*[1].

MPL is not a new licensing programme in Europe, however: it was already mentioned in JAR FCL 1, Subpart K[2].

Part-FCL states that the privileges of the holder of an MPL are to act as co-pilot in an aeroplane required to be operated with a co-pilot. The holder of an MPL may obtain the extra privileges of the holder of a PPL(A), provided that the requirements for the PPL(A) specified in Subpart C are met; and of a CPL(A), provided that the requirements specified in FCL.325.A are met.

Getting an MPL licence is one way to apply for an Air Transport Pilot Licence (ATPL) (A): FCL.510.A ATPL(A) states that applicants for an ATPL(A) shall hold an MPL or a CPL(A) and a multi-engine IR for aeroplanes. In this case, the applicant shall also have received instruction in Multi Crew Cooperation (MCC).

MPL is designed on a competency-based framework of learning objectives: combining the skills, knowledge and attitude required to perform any given task to the prescribed level of skills. Competency Based Training (CBT) and assessment are characterised by a performance orientation, emphasis on standards of performance and their measurement, and the development of training to the specific performance standards embedded in a continuous assessment against a predefined objective.

In the MPL licensing scheme, the training organisation (ATO) works in close relation with the airline in which the pilot will then start operating: ORA.ATO.350 General states that the privileges to conduct MPL integrated training courses and MPL instructor courses shall only be given to the ATO if it also has the privilege to conduct commercial air transport operations or a specific arrangement with a commercial air transport operator.

EASA is chairing the "EASA - European MPL Advisory Board", where implementation experiences and possible improvements are discussed with the training community, the operators and operator associations like IATA.

---

1 *http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:311:0001:0193:EN:PDF*

2 *http://www.jaa.nl/publications/jars/607069.pdf*

Source Wikipedia

Highlights of MPL

The Multi-Crew Pilot License programme can produce co-pilot in 240 hours, of which 210 hours is in simulators.

This training programme can be completed in 45 weeks as compared to 18 months to 2 years in the current existing system.

Introduced in late 2006, Multi-Crew Pilot License, has been driven to success by the cost and speed effectiveness

ANNEXE 2 :
EVIDENCE-BASED TRAINING (EBT)

Source IATA[3]

What?

Evidence Based Training applies the principles of competency-based training for safe, effective and efficient airline operations while addressing relevant threats. ICAO has defined competency as the combination of Knowledge, Skills and Attitudes (KSAs) required to perform a task to a prescribed standard under a certain condition. EBT prioritizes the development and assessment of a relevant global competency framework and aligns training content with the actual competencies necessary, in context.

EBT is part of the IATA Training and Qualification Initiative (ITQI) comprising: EBT, Multi-Crew Pilot License (MPL), Pilot Aptitude Testing (PAT), Instructor Qualification (IQ), Flight Simulation Training Devices (FSTD), and Engineering & Maintenance (E&M).

Phase one of the EBT project addresses recurrent training and phase two will address type-rating training.

Why?

The Evidence Based Training (EBT) project arose from an industry-wide consensus that, in order to reduce the aircraft hull loss and fatal accident rates, a strategic review of recurrent and type-rating training for airline pilots was necessary.

Over time, aircraft design and reliability has improved significantly, yet accidents still occur, even though the aircraft and systems are operating without malfunction. Controlled Flight into Terrain (CFIT) is one example of this principle, where inadequate situational awareness on the part of the crew is almost always a contributing factor.

It is impossible to foresee all plausible accident scenarios in today's complex yet highly reliable aviation system and the circumstances of the next accident are difficult to predict. EBT addresses this by prioritizing the development and assessment of key competencies. Scenario-based training is recommended within an EBT program but the scenarios are simply a vehicle and means to develop and evaluate competence.

Mastering a finite number of key competencies will allow pilots to manage an unlimited number of potentially dangerous situations in flight operations.

3 *http://www.iata.org/whatwedo/ops-infra/Documents/ebt.pdf*

Evidence?

The availability of data covering both flight operations and training activity has improved substantially over the last 20 years. Sources such as flight data analysis, flight observation (e.g. Line Operational Safety Audit (LOSA)) and air safety reports give a detailed insight into the threats, errors and undesired aircraft states encountered in modern airline flight operations as well as their relationship to unwanted consequences.

A comprehensive analysis of training results has demonstrated important differences in training needs between different maneuvers and different aircraft generations. Availability of such data has both established the need for the EBT effort and supported the definition of the resulting training concept and curriculum.

How?

The aim of an EBT program is to identify, develop and evaluate the key competencies required by pilots to operate safely, effectively and efficiently in a commercial air transport environment, by managing the most relevant threats and errors, based on evidence collected in operations and training.

An ICAO manual of Evidence Based Training planned for publication in 2011 moved to 2013[4] *and this, together with updates to ICAO Procedures for Air Navigation Services - Training (PANS-TRG) Doc 9868 and comprehensive guidance material, will allow airlines to develop an EBT program.*

Implementation of EBT will enable airlines and corporate operators to develop more effective training programs and improve operational safety. Guidance material will encourage the large, better resourced airlines to build their own EBT programs. Sufficient detail will also be provided for smaller operators to use "off the shelf" EBT material.

Instructors

In recognition of the criticality of competent instructors in any training program, the EBT project provides specific additional guidance on the required competencies and qualifications of instructors delivering EBT.

4 *Submitted to the ICAO ANC in Oct 2012 for final review, the EBT manual is expected to be published in 2013. See for instance: http://halldale.com/files/halldale/attachments/Murray%20Final.pdf.*

ANNEXE 3 :
EXTRAIT DES RECOMMANDATIONS DU RAPPORT FINAL DU BEA SUR L'ACCIDENT DE L'AF447 DU 01/06/2009

Seules les recommandations traitant des problèmes humains sont reportées ici.

"… *En conséquence, le BEA recommande que :*

- *l'AESA revoie le contenu des programmes d'entraînement et de contrôle et y impose notamment la mise en place d'exercices spécifiques et réguliers dédiés au pilotage manuel, à l'approche et à la récupération du décrochage, y compris à haute altitude ;*
- *l'AESA définisse des critères supplémentaires permettant l'accès à la fonction de suppléant du commandant de bord afin d'assurer une meilleure répartition des tâches dans les cas d'équipages renforcés ;*
  - *et que, transitoirement, la DGAC définisse des critères supplémentaires permettant l'accès à la fonction de suppléant du commandant de bord afin d'assurer une meilleure répartition des tâches dans les cas d'équipages renforcés ;*
- *l'AESA et la FAA évaluent le bien-fondé d'intégrer la présence d'un indicateur d'incidence directement accessible par les pilotes à bord des avions ;*
- *l'OACI impose à bord des appareils effectuant du transport public de passagers un enregistreur d'images permettant de visionner l'ensemble du tableau de bord ;*
  - *et que, dans le même temps, l'OACI établisse des règles très strictes d'exploitation de tels enregistrements afin de garantir la confidentialité des données enregistrées ;*
- *l'AESA et la FAA rendent obligatoire l'enregistrement :*
  - *de la position des barres de tendance des directeurs de vol ;*
  - *des paramètres de conduite du vol affichés en place droite, en plus de ceux affichés du côté gauche ;*
  - *et que l'AESA et la FAA étudient le bien-fondé de rendre obligatoire l'enregistrement des paramètres anémométriques et inertiels de l'ensemble des sources utilisées par les systèmes ;*

- *l'AESA et l'OACI imposent aussi rapidement que possible pour les avions effectuant du transport public de passagers au-dessus de zones maritimes ou hostiles, le déclenchement de la transmission de données facilitant la localisation dès qu'une situation d'urgence est détectée à bord ;*
  - *et que l'AESA et l'OACI étudient la possibilité d'imposer pour les avions effectuant du transport public de passagers au-dessus de zones maritimes ou hostiles, l'activation de la balise de détresse (ELT), dès qu'une situation d'urgence est détectée à bord ;*

- *l'AESA s'assure de l'intégration, dans la qualification de type et dans les programmes d'entraînements périodiques, d'exercices prenant en compte l'ensemble des lois de reconfiguration. L'objectif recherché est d'en faciliter la reconnaissance et la compréhension par les équipages, notamment en ce qui concerne le niveau de protection disponible et les éventuelles différences de caractéristiques de pilotage, y compris aux limites du domaine de vol [Recommandation FRAN-2012-039] ;*

- *l'AESA, plus généralement, s'assure que la qualification de type et les programmes d'entraînement prennent bien en compte les spécificités des aéronefs auxquels ils sont dédiés [Recommandation FRAN 2012 040] ;*

- *l'AESA définisse des exigences de formation continue permettant de valider, par des exercices pratiques, l'assimilation de connaissances théoriques notamment sur la mécanique du vol [Recommandation FRAN-2012-041] ;*

- *l'AESA revoie les exigences de formation initiale, d'entraînement et de qualification des pilotes afin de développer et de maintenir une capacité de gestion des ressources de l'équipage face à la surprise de situations inattendues [Recommandation FRAN-2012-042] ;*

- *l'AESA demande aux exploitants de renforcer la formation CRM pour permettre l'acquisition et l'entretien d'automatismes comportementaux adéquats dans des situations inattendues et rares, de forte charge émotionnelle [Recommandation FRAN-2012-043] ;*

- *l'AESA définisse des critères de sélection et de maintien de compétences des instructeurs qui permettraient d'atteindre un niveau élevé et standardisé d'instruction [Recommandation FRAN-2012-044] ;*

- *l'AESA fasse évoluer les bases règlementaires afin d'assurer une meilleure représentativité des simulateurs pour la reproduction réaliste des scénarios de situations anormales [Recommandation FRAN 2012 045] ;*

- *l'AESA s'assure de l'introduction dans les scénarios d'entraînements des effets de surprise afin d'entraîner les pilotes à faire face à ces phénomènes et à travailler sous une forte charge émotionnelle [Recommandation FRAN 2012 046] ;*

- *l'AESA impose de revoir les logiques de réaffichage et de réengagement des directeurs de vol après leur disparition, notamment de revoir les conditions dans lesquelles une action de l'équipage serait nécessaire pour les réafficher [Recommandation FRAN-2012-047] ;*

- *l'AESA impose de revoir la logique de fonctionnement ou d'affichage du directeur de vol afin qu'il disparaisse ou présente des ordres adaptés lorsque l'alarme de décrochage se déclenche [Recommandation FRAN 2012-048] ;*

- *l'AESA étudie la pertinence qu'un avertissement spécifique soit fourni aux équipages lorsque des surveillances se déclenchent, afin de faciliter la compréhension de la situation [Recommandation FRAN 2012 049] ;*

- *l'AESA détermine des conditions dans lesquelles, à l'approche du décrochage, la présence d'une indication visuelle dédiée, combinée à l'alarme sonore, doit être rendue obligatoire [Recommandation FRAN 2012 050] ;*

- *l'AESA impose de revoir les conditions de fonctionnement de l'alarme de décrochage en vol lorsque les mesures de vitesse sont très faibles [Recommandation FRAN 2012 051] ;*

- *l'AESA améliore les processus de retour d'expérience en rendant obligatoire une analyse opérationnelle et facteurs humains des événements en service afin de faire évoluer les procédures ainsi que les contenus des formations [Recommandation FRAN 2012 052] ;*

- *la DGAC prenne des dispositions visant à améliorer la pertinence et la qualité des comptes rendus d'incidents rédigés par les équipages et de leur diffusion, notamment vers le constructeur [Recommandation FRAN 2012 053] ;*

- *la DGAC revoie son organisation en matière de surveillance de façon à en améliorer la cohésion et l'efficacité en particulier pour les contrôles en vol [Recommandation FRAN 2012 054] ;*

- *la DGAC s'assure de l'adéquation des conditions de recrutement, de formation et d'emploi de l'ensemble des inspecteurs à l'exercice de leurs fonctions [Recommandation FRAN 2012 055]".*

ANNEXE 4 : VERS LA SIMPLIFICATION DE L'ACTION HUMAINE ET L'AMÉLIORATION DES PERCEPTIONS DE LA SITUATION

L'ensemble des interventions du colloque, opérationnelles et scientifiques, précisent que les cas soudains imprévus et inattendus exigent la simplification de leur traitement cognitif, ce qui est une limitation humaine incontournable. Cela commence par le traitement des perceptions, base de la conscience de situation, de son diagnostic et des décisions d'action. Nous allons essayer d'analyser ce point au travers du pilotage de base, le plus souvent l'un des éléments-clés du succès ou de l'échec.

Le pilote-ordinateur

Le pilotage de base n'est autre que la gestion par le pilote de la trajectoire immédiate de l'avion. Pour ce faire il utilise les informations mises à sa disposition, essentiellement visuelles, et agit sur le vecteur-vitesse de l'avion, en grandeur et direction, grâce aux commandes de vol et de poussée. Il utilise alors des connaissances et des habiletés stockées en mémoire lui permettant de résoudre en pratique et de façon dynamique les équations théoriques de la physique du vol. Il fonctionne alors comme un véritable ordinateur vivant programmé par sa formation et son expérience. En fait aujourd'hui l'action du pilote s'insère dans la partie "intelligente" de la gestion de la trajectoire au milieu de nombreux automatismes destinés à l'aider. On peut remarquer que pour toute trajectoire pouvant être prévue et gérée par des automatismes, ceux-ci sont plus fiables et plus précis que le pilote.

On ne s'intéresse ici qu'au pilotage à court terme, le seul intéressant les situations imprévues et inattendues surgissant par surprise.

Les perceptions

Aujourd'hui le pilote fonctionne d'après l'exploitation de ses perceptions (qui sont **l'interprétation** par le cerveau de ses sensations) pour gérer la trajectoire au travers des commandes de vol et de poussée. Cette gestion est conduite en boucle fermée d'asservissement, avec vérification permanente du résultat escompté au travers des perceptions.

Les perceptions en question sont aujourd'hui essentiellement visuelles, auditives pour certaines alarmes et pour la communication entre pilotes. Les sensations inertielles induisent des perceptions de position souvent erronées et la formation de base au vol aux instruments pose par principe de volontairement les ignorer, ce qui n'est pas forcément aisé dans certains cas de difficile conscience de situation. Pour les visuelles le pilote a à sa disposition sur le PFD (*Primary Flight Display*), l'instrument dévolu au pilotage à court

terme, les paramètres suivants (le nombre de paramètres associé à chaque variable est une estimation minimale):

- Vitesse VC avec ses limitations, ses tendances, ses objectifs, (4 paramètres sur la même échelle)
- Altitude pression Z avec ses objectifs, (2 paramètres)
- Vitesse verticale vz
- Cap et route avec les objectifs, (3 paramètres)
- Assiette longitudinale avec ses limitations, (2 paramètres)
- Assiette latérale avec ses limitations, (2 paramètres)
- Dérapage
- Directeur de vol en tangage et roulis (2 paramètres)
- Symbole du vecteur-vitesse
- Déviations de trajectoire commandée, longitudinale et latérale (2 paramètres)
- Hauteur radioaltimètre
- Sur le FMA, l'état des automatismes, automatismes de conduite et de guidage, poussée, (5 paramètres).

De plus, et cela est primordial, le pilote enregistre et tient compte des variations dynamiques de ces paramètres, donc de leurs dérivées.

Pour simplifier il a sa disposition **26 paramètres complexes et leurs dérivées** (au minimum), pouvant varier rapidement, qu'il doit trier, sélectionner, interpréter, combiner, utiliser pour gérer correctement la trajectoire de son avion. Nous retiendrons ce nombre comme une approximation valable.

À ceux-là il faut ajouter au moins 2 autres sur un instrument voisin, le ND, et les indications de poussée des moteurs sur l'écran central ECAM:

- La vitesse sol
- Le vent en force et direction
- Vitesses de rotation ou EPR (Engine Pressure Ratio) des moteurs.

Ici il faut noter que l'indication directe de l'apport d'énergie des moteurs, paramètre important, se trouve placée en dehors du PFD.

Pilotage manuel et automatismes

Cette gestion de trajectoire peut se conduire (1) entièrement au travers d'automatismes, et dans ce cas le rôle du pilote est de vérifier que ces derniers donnent un résultat conforme aux ordres donnés, ou (2) de façon manuelle par un manche commandant les mouvements autour du centre de gravité de l'avion et par des leviers commandant la poussée des moteurs.

Aujourd'hui une aide par des automatismes intermédiaires est apportée au pilotage manuel. Dans le cas d'absence de panne, heureusement de loin le plus fréquent, sur les Airbus le pilote commande directement la courbure de la trajectoire (facteur de charge) et la vitesse de l'inclinaison latérale à l'aide de son manche, et à l'aide d'automatismes la

poussée des moteurs nécessaire à l'obtention de la vitesse sélectionnée. Sinon les commandes directes d'assiette et de poussée sont à sa disposition.

Par sa formation et son expérience le pilote a enregistré et mémorisé un ensemble de réseaux mentaux lui permettant de résoudre pratiquement et concrètement les équations de la physique du vol, aérodynamique, mécanique du vol et énergie totale. Dans les cas d'utilisation normale de l'avion, ou d'utilisation anormale avec panne par exemple, en fait dans les cas où le paramètre "temps disponible" est conforme aux prévisions, la formation et l'entraînement du pilote lui permettent de traiter correctement l'ensemble des paramètres de vol à sa disposition, bien qu'en général (en l'absence de panne) les automatismes traitent mieux que lui les équations du vol par le fait qu'ils ont en permanence accès à l'ensemble des paramètres qu'ils peuvent traiter simultanément de façon fiable, avec précision et sans état d'âme.

Ce type de fonctionnement d'habiletés mémorisées peut se rattacher à la virtuosité des interprètes musicaux jouant des morceaux entièrement mémorisés. La clé de la virtuosité du pilote est l'exécution d'actions prévues ou anticipées. Comme chez les musiciens, dans le demi-million de pilotes seul un pourcentage réduit est capable d'une extrême virtuosité pouvant traiter l'imprévu avec compétence.

Limitations dynamiques devant l'inattendu

Le pilotage, en particulier lorsqu'il est manuel, est le traitement dynamique mental de la trajectoire, dont l'évolution en fonction du temps est l'équation fondamentale, surtout lorsque la durée d'intervention s'impose limitée. Ainsi lorsqu'un cas imprévu, ou inattendu bien que prévisible, ou délicat parce que sortant de l'ordinaire, surgit avec un impératif de temps disponible limité, il est nécessaire de très rapidement trier les perceptions permettant sa résolution, de faire un diagnostic correct et de lancer sans attendre les actions correctives. Et là surgissent les limitations humaines, banales mais inéluctables :

- Obligation de traiter de façon séquentielle toute action consciente ;
- Limitation de la mémoire à court terme ;
- Apparition de stress avec limitation de capacité mentale (cognitive) ;
- Obligation du recours aux actions simples ;
- Focalisation de l'attention pouvant conduire à sa "tunnélisation".

Un résultat expérimental concernant les perceptions est que la proximité immédiate des paramètres concentrés sur la surface réduite d'environ 2,5 dm^2 du PFD n'empêche pas la focalisation sur un paramètre, ignorant ceux adjacents situés à 2 cm de distance, résultat en particulier de la focalisation visuelle sous stress dans un cône de 3° d'ouverture.

Le traitement simultané rapide des 26 paramètres cités n'est pas assuré et le recours à des modèles mentaux complexes l'est tout autant. La partition est trop compliquée pour être jouée avec le tempo requis.

Émetteur - Récepteur

Lorsqu'on analyse le traitement des perceptions on doit considérer le système émetteur-récepteur constitué par l'ensemble d'interface cockpit-pilote.

De fait la solution la plus efficace est de s'attaquer à l'émetteur bénéficiant de l'avancée permanente de la technologie, donc *a priori* modifiable sans autre limite que celle de la technologie en constante évolution. Les cockpits, leur environnement interne, les équipements, les présentations et les commandes, tout cela a évolué jusqu'à présent dans le bon sens, ainsi que l'aide apportée par les automatismes. Cependant on peut remarquer que les améliorations apportées concernent surtout l'ergonomie physiologique, les figurations et les commandes ayant atteint un état d'efficacité remarquable. Seul petit bémol, les pratiques propres à la bureautique s'étant installées dans le cockpit, efficaces dans des situations maîtrisées où le facteur temps l'est aussi, n'apportent pas une simplification dans les actions exigeant la rapidité d'exécution en situation imprévue.

L'utilisation pertinente et rapide sous stress des (26) paramètres cités n'a fait l'objet d'aucune étude connue. Ces paramètres viennent de loin dans l'histoire aéronautique et sont considérés indispensables pour le pilotage manuel et pour le contrôle du vol. La tendance est d'améliorer les présentations pour rajouter encore des informations avec toujours l'idée que le pilote doit pouvoir trier, sélectionner et se servir de toutes les informations qu'on lui présente si intelligemment et généreusement. Ainsi l'incidence, paramètre aérodynamique essentiel étonnamment ignoré aujourd'hui, pourrait être rajoutée à la panoplie, un paramètre de plus à traiter.

Industriellement la modification des standards de présentation des paramètres est de plus en plus une gageure avec les flottes de milliers d'avions dont la durée de vie est entre 20 et 30 ans, et on comprend la réticence de l'ensemble des acteurs à même essayer sinon envisager de les modifier tant qu'aucun standard ni qu'aucune pression sérieuse n'obligent de le faire.

Modifier l'émission

Il faut simplifier l'émission des informations pertinentes et vitales pour une meilleure perception par le pilote.

Il faut certes repenser le rôle des 26 paramètres dans leur traitement mental dynamique par le pilote. Le traitement de la trajectoire peut sans aucun doute se contenter de leur présentation synthétique pouvant simplifier les modèles mentaux des pilotes dans la résolution rapide des équations de la dynamique du vol. Une analyse neuro-psycho-technico-opérationnelle, du type SKA (*Skill-Knowledge-Attitude*) utilisée en formation, s'appliquant à la gestion immédiate de la trajectoire, est certainement possible.

Il faut vaincre l'habitude de considérer leur présentation actuelle comme la meilleure possible, ce qui ne veut surtout pas dire qu'ils sont inutiles alors qu'ils doivent être très bien connus des pilotes. Il s'agit de les présenter sous une forme synthétique, intuitive et fiable pour une utilisation quasi instantanée dans la gestion de la trajectoire. Comme déjà mentionné une telle modification des standards, bien que nécessaire, ne pourra pas s'effectuer sans difficultés industrielles et humaines.

Modifier le rôle du pilote

Mais aussi le rôle du pilote peut être reconsidéré. Au lieu de lui demander cette résolution compliquée de la physique du vol qu'il a toujours de fortes chances de rater sous stress, la technologie pourrait la prendre en charge de façon fiable, en laissant au pilote ce qu'il peut beaucoup mieux faire que les automatismes, le choix et la décision de la trajectoire à adopter.

Un exemple. Aujourd'hui le directeur de vol précise au pilote les actions que les automatismes définissent comme nécessaires d'après les données que le pilote leur assigne. En suivant ses indications le pilote n'agit alors que comme substitut d'automatisme dans la chaîne de commande de la trajectoire, rôle peu gratifiant menant logiquement à l'idée que son élimination de l'avion est possible.

En revanche si en pilotage manuel le pilote commande directement un objectif à atteindre, en choisissant et en désignant visuellement cet objectif, par exemple le point sur la piste et l'axe où le vecteur vitesse de l'avion doit se diriger, et en laissant les automatismes asservir le vecteur vitesse de l'avion sur la trajectoire ainsi choisie par le pilote, on inverse les rôles en les distribuant à ceux ayant la meilleure compétence Ce "Contrôleur d'objectif de vol" ("*Flight Target Controller*") ne supprime pas le pilotage manuel, qui restera obligatoire avec des passagers à bord, mais le rend plus simple, plus efficace et sûr.

On rappelle que ce guidage commandé est du type de celui ultra-précis des missiles air-sol et bombes guidées utilisé avec succès par les militaires.

ANNEXE 5 :
INFORMATION D'INCIDENCE SUR LA PLANCHE DE BORD

L'incidence est une information primordiale pour la conduite du vol même si la fiabilité des informations de vitesse l'a fait oublier pendant longtemps jusqu'à son retour déguisé sous la forme du vecteur vitesse. Elle est un élément de sécurité fondamental quand les informations de vitesse ne sont plus disponibles et/ou quand la nature des opérations amène à voler à des incidences proches de celle du décrochage (appontage, combat aérien, atterrissage sur terrains courts, etc.) ce qui explique que les armées de l'air du monde entier l'ont plébiscitée.

Sur les avions de ligne elle est pour le moment absente probablement parce que les constructeurs ont été réticents à ajouter un instrument sur le tableau de bord et surtout que les compagnies aériennes n'en voyaient pas la nécessité malgré la demande des organisations professionnelles, du NTSB et de la Flight Safety Foundation. Elle est cependant proposée actuellement en option par les constructeurs Boeing et Airbus. Concorde a bénéficié avec succès de son usage. Le Mercure de Dassault avait déjà cette information et tous les avions Falcon en sont équipés.

La perte temporaire ou permanente et même la dégradation des informations de vitesse est une possibilité vérifiée qu'on ne peut pas négliger : givrage des sondes anémométriques, impact d'oiseaux sur les sondes, perte du radôme après foudroiement etc.

Si la panne intervient lorsque la trajectoire de l'avion est stabilisée, normalement la sécurité immédiate de l'avion est assurée en maintenant l'assiette et le régime moteur au moment de la panne correspondant à une position des manettes des gaz et à une valeur sur l'indicateur d'EPR.

Si la panne intervient dans des conditions plus difficiles, en particulier en forte turbulence, après la mise hors service de certains automatismes ou la mise accidentelle de l'avion dans une position inusuelle, il peut être plus difficile de savoir quelle assiette afficher et la connaissance du régime moteur est aléatoire lorsque la turbulence rend difficile la lecture d'un petit cadran et lorsque la position de la manette des gaz ne correspond pas directement au régime moteur. L'indication d'incidence permet alors de ne pas sortir du domaine de vol sûr.

Il n'est cependant pas question de demander au pilote de piloter à l'incidence en situation d'urgence. La présentation de l'incidence sur un cadran gradué en degrés semblable à celui de l'horizon de secours, comprenant trois secteurs : rouge, jaune et vert comme sur les premiers Mirage et le Mercure, permettrait, d'un coup d'œil de savoir où l'on est et de donner des consignes d'action simple si on entre dans le jaune et, *a fortiori*, dans le rouge. Cependant se pose le problème d'utiliser un nouveau paramètre de façon simple et immédiate au milieu des autres paramètres de conduite.

Si les informations de vitesse sont définitivement perdues et sans instrument supplémentaire, on peut très bien poser l'avion lorsqu'on n'est pas pressé par le temps si l'on connaît l'incidence correspondant aux différentes configurations utilisées dans le tour de piste et qui pourraient figurer dans un tableau très simple. La procédure était enseignée et pratiquée autrefois, et les pilotes étaient capables d'effectuer un tour de piste sans "Badin" avec une très grande précision : en palier il suffisait de maintenir l'assiette correspondant à l'incidence recherchée et, en diminuant cette assiette de 3°, on se trouvait sur une pente de 5% recommandée en approche. C'est encore plus facile si l'on peut lire l'incidence sur un instrument dédié comme c'était le cas avec Concorde.

Il convient donc de prendre en considération, sans préjuger de la manière de l'appliquer, la recommandation du Bureau d'Enquête et d'Analyse dans le rapport final sur l'accident du vol AF447 (Annexe 3, item n° 3):

"Que l'AESA et la FAA évaluent le bien-fondé d'intégrer la présence d'un indicateur d'incidence directement accessible par les pilotes à bord des avions".

ANNEXE 6 :
LA FONCTION PRISE DE DÉCISION

On reprend, du fait de la nouveauté de la matière, l'intervention d'Étienne Koechlin dans le colloque de l'AAE sur la prise de décision, fonction de première importance dans le traitement des situations imprévues.

Généralités

La fonction de décision concerne un tiers du cerveau humain, à savoir le cortex préfrontal. Juste à l'arrière du cortex préfrontal se situe le cortex moteur, région dédiée à l'élaboration et à la gestion de la commande motrice. Cette organisation est logique puisque le cortex préfrontal décide tandis que le cortex moteur s'occupe d'exécuter ce qui est décidé.

On connaît aujourd'hui la structure générale de la prise de décision dans le cortex préfrontal latéral avec :

- le cortex prémoteur s'occupant de l'exécution des routines , des procédures ou des tâches où des réponses sont associées à des stimuli spécifiques. C'est une région critique car le cerveau humain forme et utilise par défaut des routines pour agir ;
- la partie postérieure du cortex préfrontal s'occupant du "contrôle contextuel", c'est-à-dire essentiellement du choix des routines d'action en fonction des indices contextuels immédiats de l'action, par exemple l'environnement du cockpit, qui vont déterminer les routines appropriées à ce contexte ;
- plus avant une région intermédiaire dédiée au "contrôle épisodique", à savoir au choix des routines, en fonction d'événements qui ont eu lieu auparavant ou d'instructions reçues ;
- le cortex fronto-polaire s'occupant du "contrôle des embranchements", essentiellement la gestion multitâche. Cette région va permettre de mettre en attente des routines d'action pour gérer un événement imprévu et sélectionner une autre routine d'action avant de revenir le cas échéant à la routine interrompue.

Ces niveaux de contrôle forment l'organisation générale de la sélection de l'action dans le cortex préfrontal latéral.

Les contraintes

Des contraintes cognitives principales existent sur ce système décisionnel.

La première contrainte est la sérialité.

Beaucoup de traitements sont parallélisés dans le cerveau, mais le système de contrôle préfrontal de l'action ou de la décision ne l'est pas. Lorsque deux stimuli surviennent en même temps, les étapes perceptives sont parallélisées ainsi que les étapes de l'élaboration des commandes motrices. En revanche, le contrôle du choix effectif de la réponse appropriée à un stimulus est sériel : prendre une décision sur le deuxième stimulus doit

attendre en quelque sorte que le cortex préfrontal ait pris la décision sur le premier stimulus. Il s'agit d'une contrainte extrêmement forte de notre système cognitif et cérébral qui ne peut pas être affaiblie par l'entraînement.

Il existe évidemment des tâches purement automatiques, comme la marche, qui échappent à cette contrainte, du moins lorsqu'elles ne sont pas sous contrôle préfrontal, et qui peuvent s'exécuter indépendamment d'autres tâches.

Ainsi, le contrôle préfrontal n'est pas capable de contrôler l'exécution consciente de plusieurs routines à la fois, d'où la mise en attente de routines pendant l'exécution d'autres routines, fonction assurée comme dit plus haut par le cortex fronto-polaire.

Ce dernier exerce un "monitoring", un contrôle, de routines/tâches alternatives à celle en cours d'exécution afin de déterminer si ces routines alternatives seraient plus appropriées que celle choisie pour agir.

La deuxième contrainte est le nombre maximal de routines alternatives "monitorées" (contrôlées) simultanément.

Les recherches récentes suggèrent que ce nombre est de deux ou trois routines sans différences majeures entre les individus.

Qu'est-ce que le "monitoring" et comment le système préfrontal évalue les routines, les tâches ? Ce système évalue la fiabilité (*reliability*), la capacité des routines d'action à prédire les événements et les résultats des actions qui lui sont propres. En effet, les routines sont constituées à la fois de représentations sélectives qui déterminent les actions à effectuer, et de représentations prédictives qui explicitent les résultats attendus des actions de la routine envisagée. Lorsqu'un résultat attendu ne survient pas, la fiabilité de la routine diminue. S'il survient, la fiabilité augmente.

Ainsi, la partie médiane des régions préfrontales antérieures évalue la fiabilité de la routine, de la tâche en cours d'exécution, tandis que le cortex fronto-polaire évalue la fiabilité de deux ou trois routines et tâches alternatives.

Cette évaluation est centrale car le choix des routines, l'arbitrage entre modifier une routine, changer de routine ou créer de nouvelles routines se fait en fonction de leur fiabilité effective. La modification des routines, en revanche, se fait de manière à optimiser l'utilité, et non pas la fiabilité de chaque routine.

La troisième contrainte est que le choix des routines en fonction de leur fiabilité est fondé sur un processus binaire.

Le système décisionnel humain est particulièrement efficace et flexible lorsqu'il s'agit de se décider entre deux routines ou deux tâches. Mais il génère des flottements dès qu'il s'agit de se décider entre trois routines ou plus et le système va dès lors favoriser des processus exploratoires.

Il faut noter que ces trois limitations sont dures et inhérentes au mode de fonctionnement du système décisionnel humain. Elles ne peuvent pas être améliorées par l'entraînement.

Pour une situation donnée, la seule manière d'y échapper est d'apprendre une nouvelle routine spécifique à la situation, quelle que soit sa complexité, afin que la sélection des

actions se fasse au sein de la routine, plutôt qu'au travers de plusieurs routines. Ce processus peut devenir très efficace après de longs entraînements. Cependant la routine ou procédure ainsi apprise devient très spécifique à la situation et peu flexible.

Inversement, des situations très changeantes peuvent amener les sujets à subir ces contraintes de plein fouet, ce qui entraînera la perte du contrôle de la situation et générera du stress, qui à son tour va diminuer l'efficacité du système de contrôle de la décision et augmenter encore plus le sentiment de stress. Un cercle vicieux s'enclenche pouvant conduire le sujet à un état de stress avancé, c'est-à-dire à un état de sidération, ou à l'inverse de panique menant à des actions incohérentes et dangereuses.

La motivation

La motivation dans la prise de décision implique la partie médiane du cortex préfrontal. Une première fonction de cette région est d'évaluer l'enjeu des résultats des actions et de moduler, par un mécanisme de contrôle de gain, les processus de sélection qui ont lieu dans la partie latérale du cortex préfrontal. Une augmentation de l'enjeu va augmenter le gain et donc le rapport signal/bruit, donc l'efficacité du contrôle préfrontal sur le comportement. Un enjeu trop faible diminue le contrôle tandis que inversement un enjeu perçu comme trop fort peut conduire à une saturation du gain et rendre le système de contrôle non sélectif et donc inopérant pour faire des choix.

La volatilité

Une deuxième fonction de cette région médiane est l'évaluation de la volatilité externe, c'est-à-dire le caractère changeant (et non pas le caractère incertain) de l'environnement externe. Le système préfrontal médian a un rôle très spécifique associé à la motivation pour essayer d'estimer dans quelle mesure les contingences externes, c'est-à-dire les événements qui se passent, résultent d'une même situation ou résultent d'un changement de situation et requiert par conséquent un changement de routine. Une bonne estimation de la volatilité va permettre au système de quitter plus facilement la routine en cours, la routine qui est en train d'être exécutée, car le système médian perçoit que quelque chose ne fonctionne plus comme cela devrait fonctionner et qu'il faut basculer sur autre chose. Cette notion de bascule est très importante. La bascule est exécutée par les régions préfrontales latérales mais est fondé en partie sur l'estimation de la volatilité de l'environnement par les régions préfrontales médianes.

Évidemment, il faut une estimation appropriée de la volatilité pour quitter à bon escient des routines. La difficulté est que basculer continuellement d'une routine à l'autre empêche de se focaliser sur une routine ou une tâche, à l'adapter et à la mener à bien.

On sait également qu'on a tendance à surestimer la vraisemblance d'événements très peu probables et à sous-estimer en revanche la vraisemblance d'événements très probables. De même souvent on surestime le caractère incertain de l'environnement, c'est-à-dire qu'on considère que l'environnement est plus bruité qu'il ne l'est en réalité : on pense que si ses choix conduisent à des résultats inattendus, ce n'est pas tant qu'on a fait un mauvais choix ou que la situation a changé, mais que l'environnement est plus bruité. Ces diffé-

rents biais font que la volatilité perçue est souvent plus faible que la volatilité réelle, ce qui pousse les individus à persévérer dans des routines et procédures inappropriées.

L'absence de routine jugée fiable

Le cortex fronto-polaire peut "monitorer" simultanément la fiabilité de deux ou trois routines ou stratégies comportementales en plus de celles effectivement utilisées dans le comportement en cours. Cependant que se passe-t-il lorsqu'aucune de ces routines n'apparaît fiable dans une situation donnée ?

La fonction frontale et plus précisément la fonction fronto-polaire semble conçue pour faire face à ce genre d'événement en enclenchant un processus d'exploration de la mémoire à long terme ou profonde.

Dans ce processus, le contexte de l'action joue un rôle prépondérant. Ce sont les indices contextuels qui vont permettre à ce processus de retrouver une procédure ou une routine qui est adaptée à la situation. L'apprentissage des routines et des procédures "en contexte" semble donc être un facteur primordial permettant de retrouver au fond de sa mémoire les routines ou stratégies adaptées.

Le deuxième facteur prépondérant est la fréquence avec laquelle les routines et stratégies apprises sont remémorées et utilisées. Le processus d'exploration est biaisé vers les routines et stratégies fréquemment utilisés, ce qui peut avoir des effets bénéfiques mais dangereux aussi. Enfin ce processus de récupération en mémoire profonde est particulièrement bruité, favorisant des comportements exploratoires bénéfiques ou dangereux conduisant à la formation de nouvelles stratégies.

Différences individuelles

En matière de prise de décision c'est dans les situations changeantes, incertaines et ouvertes que les différences entre les individus deviennent patentes. Un premier axe de différentiation se fait entre les individus dits explorateurs et ceux dit exploiteurs.

Les explorateurs favorisent les processus d'exploration de la mémoire profonde plutôt que le "monitorage" des stratégies et routines pour faire face à une situation nouvelle. Ainsi les explorateurs tendent à faire des choix moins informés (sans monitorage) mais sur un large éventail d'options.

Les exploiteurs, en revanche, favorisent le "monitorage". Ils tendent à faire des choix plus informés mais sur un ensemble d'options plus restreint.

Un second axe de différenciation est la sensibilité au contexte. Pour certains les décisions dépendent plus du contexte que d'autres. Cette sensibilité au contexte est favorable lorsqu'on agit dans des contextes connus mais défavorable dans des environnements inconnus.

Il est possible, mais il n'y pas encore de preuve, que ces caractéristiques dépendent du génotype des individus.

ANNEXE 7 :
ENSEIGNER LA MÉCANIQUE DU VOL ?

Les débats du colloque ont mis en évidence que la méconnaissance de la Mécanique du Vol mettait quelquefois les pilotes dans des situations qu'ils n'avaient pas prévues ce qui les conduisait à des décisions inappropriées.

Suite à l'accident du vol AF447 Rio-Paris du 1er juin 2009, le BEA (Bureau d'enquête et d'analyses pour la sécurité de l'aviation civile) recommande que l'AESA (Agence européenne pour la sécurité aérienne), définisse des exigences de formation continue permettant de valider, par des exercices pratiques, l'assimilation de connaissances théoriques **notamment sur la mécanique du vol** [Recommandation FRAN-2012-041] (Rapport final du BEA de juillet 2012, page 215).

Nombreux sont ceux qui pensent qu'enseigner la mécanique du vol c'est couvrir le tableau noir d'équations, différentielles de préférence ce qui fait plus sérieux, et que la comprendre, c'est savoir résoudre ces équations.

Il n'en est rien. Rappelons la pensée d'Évariste Galois "*il faut substituer les idées au calcul".*

L'usage des mathématiques est utile à l'ingénieur de conception pour prévoir les performances d'un avion en projet ou à l'ingénieur d'essais pour analyser les résultats d'un vol.

Mais comprendre la mécanique du vol pour un pilote c'est savoir expliquer qualitativement à l'aide de modèles rigoureux le comportement de l'avion suite à ses actions sur les commandes et sur les automatismes ou suite à des évolutions de l'atmosphère.

Le mouvement du centre d'inertie de l'avion est celui d'un point matériel ayant la masse de l'avion, soumis à la résultante de toutes les forces appliquées. Cela ne signifie pas que l'on réduit l'avion à un point et que l'on ramène toutes les forces sur ce point ! C'est un théorème rigoureux et non une approximation plus ou moins valable. Or nous avons rencontré quelques élèves acceptant l'application du théorème du centre d'inertie pour une mouche, à la rigueur pour un petit avion mais la trouvant douteuse pour un avion de transport, vraiment trop gros pour être réduit à un point!

Il est également important de montrer que la modélisation des forces agissant sur l'avion comporte des approximations et ne sont valables que dans un domaine qu'il est fondamental de préciser. Il faut en outre insister sur le fait que cette modélisation n'est qu'un moyen commode pour expliquer le comportement de l'avion. **Tout se passe comme si l'avion était réduit à un point**, les forces aérodynamiques réduites à leur résultante sous forme d'une portance et d'une traînée, les forces de propulsion réduites à la poussée, les forces de masse réduites au poids, mais toutes ces forces ne sont que des **modèles** et n'ont pas de réalité physique.

Cette notion de modélisation des forces n'est pas facile à faire comprendre. Nous avons vu des élèves constater que dans certains cas on représente les forces aérodynamiques par une force unique, dans d'autres cas par ses deux composantes sur la vitesse et la normale à la vitesse ou encore par trois forces, les résultantes des forces aérodynamiques sur l'aile, sur le fuselage et sur l'empennage ou encore par une force indépendante de l'incidence située au centre d'inertie et une force dépendant de l'incidence située au foyer. Ils se demandaient laquelle était le plus proche de la réalité! Ils n'avaient pas compris que chaque représentation est utile pour comprendre le comportement de l'avion dans des conditions différentes mais que chacune est licite dans un domaine à préciser de vitesse, d'incidence, d'altitude, etc.

Lors des premières heures d'entraînement, on montre au jeune pilote qu'en poussant sur le palonnier gauche l'avion s'incline à gauche et vire à gauche. Cela lui semble normal puisqu'il agit sur la gouverne de "direction", mais il ne sait pas pourquoi. Il est indispensable de décortiquer pour lui le phénomène :

- mise en dérapage sous l'effet des forces aérodynamiques sur l'empennage vertical, (théorème du moment cinétique) ;
- déséquilibre des forces aérodynamiques agissant sur les deux demi-ailes soumises à des écoulements différents du fait du dérapage (effet dièdre expliqué par la différence des incidences locales) ;
- mouvement de roulis provoqué par ce déséquilibre (théorème du moment cinétique) ;
- inclinaison à gauche conduisant à une composante horizontale à gauche de la résultante des forces aérodynamiques ;
- virage à gauche (mouvement du centre d'inertie) par courbure de la trajectoire sous l'effet de la composante de la force normale à la trajectoire.

Il est fondamental qu'un pilote comprenne que ce n'est pas l'effet direct de la gouverne qui provoque le virage mais l'effet du dérapage par l'intermédiaire de l'effet dièdre. En effet le même résultat, mise en virage, peut être obtenu par un déséquilibre de poussée entre les moteurs d'un bimoteur, ce qui explique qu'il faille, en cas de panne moteur, incliner latéralement l'avion pour ramener la portance dans le plan vertical et maintenir le vol rectiligne. On peut se contenter de la règle bien connue, "on incline l'avion du côté du "bon" moteur". Mais nous avons vu cette règle mal comprise, appliquée à tort, dans le cas d'un vol avec un missile sous une seule aile sous la forme "on s'incline du côté du "bon" missile"!

Ces explications seront facilitées par des présentations sur PC de schémas de préférence animés, avec la possibilité pour l'élève de répéter les expériences en faisant varier quelques paramètres.

Citons un autre exemple d'interprétation erronée de la transposition mathématique des modèles. Interrogé sur le palier accéléré, l'élève précise que l'incidence diminue lorsque la vitesse augmente puisque le coefficient Cz doit diminuer lorsque V augmente comme l'indique l'équation $mg = \frac{1}{2} \boldsymbol{\rho} S V^2 C_z$. Mais il est incapable d'expliquer que c'est le pilote (ou le pilote automatique) qui agit sur l'incidence par l'intermédiaire de la commande de

tangage pour respecter le palier et il pense que c'est l'avion qui, dans sa grande sagesse, diminue de lui-même l'incidence par respect de l'équation de portance.

L'enseignement de la mécanique du vol classique doit être complété par un enseignement sur le fonctionnement des automatismes. Il n'est pas question d'utiliser les fonctions de transfert mais de montrer que les automatismes agissent sur les commandes de vol comme le ferait un pilote humain et qu'ils le font plus rapidement, sans fatigue et en contrôlant plusieurs paramètres simultanément (ce que ne peut faire l'opérateur humain).

Nous avons vu ainsi un pilote s'étonner de voir le pilote automatique réduire progressivement les gaz au cours d'une mise en palier après montée. Nous lui avons alors demandé de réduire en manuel la pente pour mettre l'avion en palier en demandant au copilote de contrôler la vitesse en agissant sur la poussée moteur. Il a ainsi pu constater que le Pilote Automatique exécute simultanément ce que font les deux pilotes et ce qu'un pilote seul fait très difficilement.

Les modes de réversion du pilote automatique sont la bête noire des pilotes en formation, sans doute parce qu'ils sont expliqués par des spécialistes des systèmes et non par des opérationnels.

Au cours d'un vol en montée à pente constante, à vitesse conventionnelle donnée, la poussée nécessaire pour maintenir la pente est pratiquement constante. Or la poussée à régime fixe fournie par la motorisation diminue sensiblement comme la masse volumique de l'air. Le PA doit donc augmenter le régime lorsque l'altitude augmente pour maintenir l'équilibre poussée nécessaire, poussée fournie. Il y a ainsi une altitude où la poussée maximale disponible est atteinte. L'automatisme ne peut plus assurer sa fonction de maintien simultané de la pente et de la vitesse. Il y a donc obligation de changement de mode (réversion) pour passer en mode Open Climb maintenant seulement la vitesse conventionnelle constante.

Un petit programme sur PC permettrait de suivre l'évolution du régime et de la poussée fournie au cours de la montée et de constater, de façon naturelle, la nécessité du changement de mode (en particulier en choisissant différentes valeurs de pente et de vitesse).

Au cours d'une montée en mode *Open Climb* à vitesse conventionnelle donnée, le nombre de Mach augmente comme il est facile de le constater en lisant l'abaque VC, Mach, Altitude. Il arrive donc une altitude où le nombre de Mach maximal autorisé est atteint ce qui impose un changement de mode pour passer en mode *Open Climb* à Mach constant. Là encore un programme sur PC permettrait de suivre sur l'abaque l'évolution du Mach avec l'altitude et de constater la nécessité de changement de mode.

Nous pourrions compléter ces exemples par ceux concernant la compréhension des systèmes de propulsion.

De nombreuses fausses idées sont monnaie courante en la matière. Par exemple "la poussée augmente parce que le régime de rotation augmente". Or, lorsque l'on pousse sur la manette, c'est parce que le débit de combustible brûlé augmente que, et la poussée et le régime de rotation augmentent. Ces augmentations sont toutes deux des conséquences et l'une n'est pas la cause de l'autre.

L'évocation du premier principe de la thermodynamique doit se faire sous la forme "toute augmentation du débit de combustible se traduit par une augmentation sensiblement proportionnelle de la poussée".

Enseigner la mécanique du vol c'est mettre dans la tête des futurs pilotes des modèles rigoureux, simples si possible mais pas simplistes, expliquant **physiquement** le comportement de l'avion tout en les mettant en garde sur leurs limites éventuelles de validité.

Contrôler les connaissances des élèves en la matière, c'est vérifier qu'ils utilisent les bons modèles et non qu'ils ont appris, par cœur, les réponses à des QCM.

ACRONYMES ET ABREVIATIONS

ACRONYMS AND ABBREVIATIONS

AAE	Académie de l'Air et de l'Espace, Air and Space Academy
ADREP	Accident/incident Data Reporting System
AESA	Agence Européenne de Sécurité Aérienne (EASA)
AOA	Angle of attack
ASIAS	Aviation Safety Information, Analysis and Sharing System (FAA)
BEA	Bureau d'Enquêtes et d'Analyses
CBT	Competency Based Training
CCQ	Cross Crew Qualification
CRM	Crew Resources Management
DGAC	Direction Générale de l'Aviation Civile (France)
EASA	European Aviation Safety Agency (see AESA)
EBT	Evidence Based Training
ECAST	European Commercial Aviation Safety Team
ECCAIRS	European Coordination Center for Accident and Incident Reporting System
EGAST	European General Aviation Safety Team
EHEST	European Helicopter Safety Team
EPR	Engine Pressure Ratio
ESSI	European Strategic Safety Initiative
FAA	Federal Aviation Administration
FAR	Federal Aviation Regulations
FCL	Flight Crew Licence
FD	Flight Director
FFS	Full Flight Simulator
FMA	Flight Management Annunciator
FOR-DEC	Facts, Options, Risks and benefits – Decision, Execution, Check
HUD	Head-Up Display
IATA	International Air Transport Association
ICAO	International Civil Aviation Organization (see OACI)
KSA	Knowledge-Skill-Attitude
LOFT	Line Oriented Flight Training
LOSA	Line Operational Safety Audit
MPL	Multi-crew Pilot Licence
ND	Navigation Display
N-SEEV	Noticing-Salience, Effort, Expectancy, Value
NTSB	National Transportation Safety Bureau
OACI	Organisation de l'Aviation Civile Internationale (voir ICAO)

PF	Pilot flying, Pilote en function
PFD	Primary Flight Display
PNF	Pilot not flying (Pilot monitoring), Pilote non en fonction
QCM	Questions à Choix Multiples
QT	Qualification de Type (voir TR)
RRLOE	Rapidly Reconfigurable Event-Set Based Line-Oriented Evaluations
RT	Recurrent Training
SBT	Scenario Based Training
SRK	Skill-Rules-Knowledge
TOP	Technique d'Optimisation du Potentiel
TR	Type Rating (see QT)
TRTO	Type Rating Training Organization
VC	Vitesse conventionnelle, Conventional airspeed

Le colloque organisé en 2011 par l'AAE sur le thème "Pilotes de transport aérien face à l'imprévu" a montré l'importance majeure du comportement opérationnel humain dans le traitement des situations imprévues en vol.

En effet, contrairement à ce qu'on pense souvent, l'imprévu est le lot quotidien des aviateurs et non l'exception.

À partir des présentations et discussions du colloque, ce dossier est donc consacré à l'étude des situations imprévues, inattendues, surgissant par surprise, et aux moyens de résoudre les problèmes de sécurité associés. Il a pour objet d'ouvrir une réflexion vers des voies de progrès possibles, afin de compléter, voire améliorer, les pratiques actuelles.

ACADÉMIE DE L'AIR ET DE L'ESPACE
AIR AND SPACE ACADEMY
Ancien Observatoire de Jolimont
BP 75825 - 31505 Toulouse cedex 5 - France
Tel : +33 (0)5 34 25 03 80 - Fax : +33 (0)5 61 26 37 56
contact@academie-air-espace.com - www.academie-air-espace.com

ISBN 2-913331-53-X
ISSN 1147-3657

15 €