



Université
de Toulouse

ANNEXES

THÈSE

En vue de l'obtention du
DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Université Toulouse 2 Le Mirail (UT2 Le Mirail)

Discipline ou spécialité :

Psychologie Ergonomie

Présentée et soutenue par :

Jean PINET

le : jeudi 30 juin 2011

Titre :

Traitement de situations inattendues d'extrême urgence en vol :
test d'un modèle cognitif auprès de pilotes experts

Ecole doctorale :

Aéronautique et Astronautique (AA)

Unité de recherche :

CLLE-LTC (UMR 5263), Université de Toulouse II - Le Mirail

Directeur(s) de Thèse :

Guy BOY, University Professor, Florida Institute of Technology
Claude NAVARRO, Professeur, Université de Toulouse II - Le Mirail

Rapporteurs :

René AMALBERTI, Professeur, Haute Autorité de la Santé, Saint Denis La Plaine
Patrick MILLOT, Professeur, LAMIH, Université de Valenciennes

Autre(s) membre(s) du jury

Eric RAUFASTE, Professeur, Directeur de CLLE-LTC, Université de Toulouse II - Le Mirail
Marc PELEGRIN, Docteur, Conseiller Honoraire de l'ONERA, Toulouse

**Traitement de situations inattendues d'extrême
urgence en vol: test d'un modèle cognitif
auprès de pilotes experts**

- Documents annexes à la thèse –

ANNEXE 1 - NOTIONS DE PILOTAGE DES AVIONS	3
ANNEXE 2 - ANALYSES DES 5 CAS CHOISIS	11
ANNEXE 3 - UTILISATION ET EXPLOITATION DE L'EXPERTISE	103
GLOSSAIRE	138

TABLE DES FIGURES

reproduites dans les Annexes

Annexe 1

Figure 16 : Equilibre des forces en vol rectiligne

Annexe 2

Figure 17 : Evolution de l'assiette apparente

Figure 18 : Séquencement du cas n°1

Figure 19 : Périodes d'assiette apparente positive

Figure 20 : Exemple de figuration sur PFD

Figure 21 : Séquencement du cas n°2

Figure 22 : Séquencement du cas n°3

Figure 23 : Tableau de bord d'avion de série – celui du prototype était très proche

Figure 24 : Exemples de positions de l'avion par rapport au Glide

Figure 25 : Schéma du profil d'un « down-draft »

Figure 26 : Avion FA-18

Figure 27 : Vol horizontal

Figure 28 : Accélération

Figure 29 : Montée vers palier en vol inversé

Figure 30 : Mise en palier en vol inversé

Figure 31 : Début de descente en vol inversé

Figure 32 : Manœuvre de roulis vers la droite pour un vol normal en virage à gauche

Figure 33 : Manœuvre de roulis vers la droite pour un virage vers la droite

Figure 34 : Schémas de la figure de voltige, en vert figure normale, en rouge figure réelle

Figure 35 : Tableau des paramètres observés

Figure 36 : Séquencement du cas n°4

Figure 37 : Séquencement du cas n°5

Figure 38 : Avion en approche – Eléments clés

Figure 39 : Avion au toucher des roues

Figure 40 : Début de déplacement intempestif du levier de poussée gauche

Figure 41 : Apparition de l'alarme « configuration »

Figure 42 : Oscillation pilotée en cap

Provenance des figures figurant dans les Annexes :

19 : Aéroconseil

17 : Air France

23 : Aéroformation

16, 24 à 33 : JC Wanner

38 à 42 : Airbus

ANNEXE 1

NOTIONS DE PILOTAGE DES AVIONS

COMPLEMENT DU CHAPITRE 2 DE LA THESE

1 - PRESENTATION OPERATIONNELLE CLASSIQUE

La présentation, classique pour les pilotes, de leur comportement opérationnel suit une classification définie de leurs tâches fondamentales comme les rappelle un pilote d'essais expérimental, ayant participé à l'expertise des analyses de la thèse :

« ... Ces tâches sont dans l'ordre :

1 - le contrôle des mouvements de l'avion autour de son Centre de Gravité (CG), et de sa vitesse au moyen des commandes de vol et des moteurs, actionnées par le manche, les pédales ou les manettes des gaz ; **c'est la tâche de pilotage à court terme** qui consiste à faire « voler » l'avion, c'est-à-dire à lui permettre de se sustenter en toute sécurité, d'évoluer vers le haut ou vers le bas, vers la droite ou vers la gauche ;

2 - le contrôle de la trajectoire de l'avion (c'est à dire de son CG), trajectoire définie par rapport à des repères sol (aérodromes, balises de navigation,...) ; **c'est le pilotage à plus long terme, ou tâche de navigation** ;

3 - la prise en compte de l'environnement atmosphérique : haute ou basse pression ayant des conséquences sur les vents, sur la lecture de certains paramètres de vol comme l'altitude barométrique, les orages, les précipitations, les turbulences, le givrage, les cisaillements de vents, les volcans (pour leur conséquences atmosphériques)... ;

- la prise en compte des éléments aéronautiques ; autres trafics potentiellement conflictuels (TCAS, ADS-B...), obstacles, reliefs (TAWS)... **C'est la tâche de surveillance** ;

4 - la prise en compte des autorisations du Contrôle aérien par communications vocales ou automatiques ; ces autorisations ou « clearances » transmises par le contrôle aérien (appelé couramment ATC) indiquent aux pilotes à quelle altitude ou cap ou sur quelle route voler, ou bien des ordres d'évitement si requis... les pilotes peuvent également demander au contrôle aérien des modifications de route ou d'altitude suivant les circonstances... **C'est la tâche de communication** ;

5 - la prise en compte du bon fonctionnement des divers systèmes permettant à l'avion de fonctionner correctement (électricité, hydraulique, air, pressurisation, carburant...) ; cette surveillance permet aux pilotes de réagir en cas de panne suivant des procédures préétablies et proposées. **C'est la tâche de management (gestion) des systèmes.** ».

Evidemment les courtes durées impliquées dans la thèse militeraient en faveur de cette classification en privilégiant la première catégorie, le pilotage à court terme. Malheureusement les analyses montrent que, même pour ces courtes durées, les autres catégories ont une influence non négligeable par leur environnement et leurs imbrications. On ne retiendra pas ici cette présentation classique.

On a donc choisi une autre forme de présentation montrant l'imbrication serrée d'un ensemble de « sphères d'influence » qui se recoupent et dont il faut tenir compte à chaque instant. Le pilote utilise de façon intégrée les paramètres provenant en gros de 6 sphères d'influence, de 6 systèmes différents.

2 – COMPLEMENTS AUX 6 SYSTEMES ADOPTES

La conduite du vol concerne 6 systèmes différents exposés dans le Chapitre 2.2 de la thèse, totalement interconnectés mais ayant chacun sa logique propre. Le pilote doit « intégrer » les particularités de ces 6 systèmes et les utiliser comme un tout, d'où la difficulté du pilotage d'un avion qui n'est pas comparable à la conduite « d'un autobus », même si conduire un véhicule terrestre nécessite déjà des modèles mentaux MM élaborés.

1^{er} système

L'avion en tant que mobile dans l'air

C'est le comportement aérodynamique de l'avion lui-même, c'est-à-dire son aptitude à évoluer dans l'air (en bougeant autour de son centre de gravité) et en s'y maintenant. Il est nécessaire de préciser de quoi il s'agit malgré sa complexité, toute physique d'ailleurs.

* Son élément essentiel est l'aile de l'avion avec les phénomènes aérodynamiques la concernant. Le fuselage est la partie « commerciale » transportant la charge marchande. L'empennage et l'aile supportent des organes (les gouvernes aérodynamiques) destinés à faire bouger l'avion autour de son centre de gravité pour modifier l'incidence de l'aile (en 2 parties de chaque côté du fuselage). Ces 3 éléments étant physiquement solidaires on ne parlera pas de l'aile seule mais de l'avion dans son ensemble.

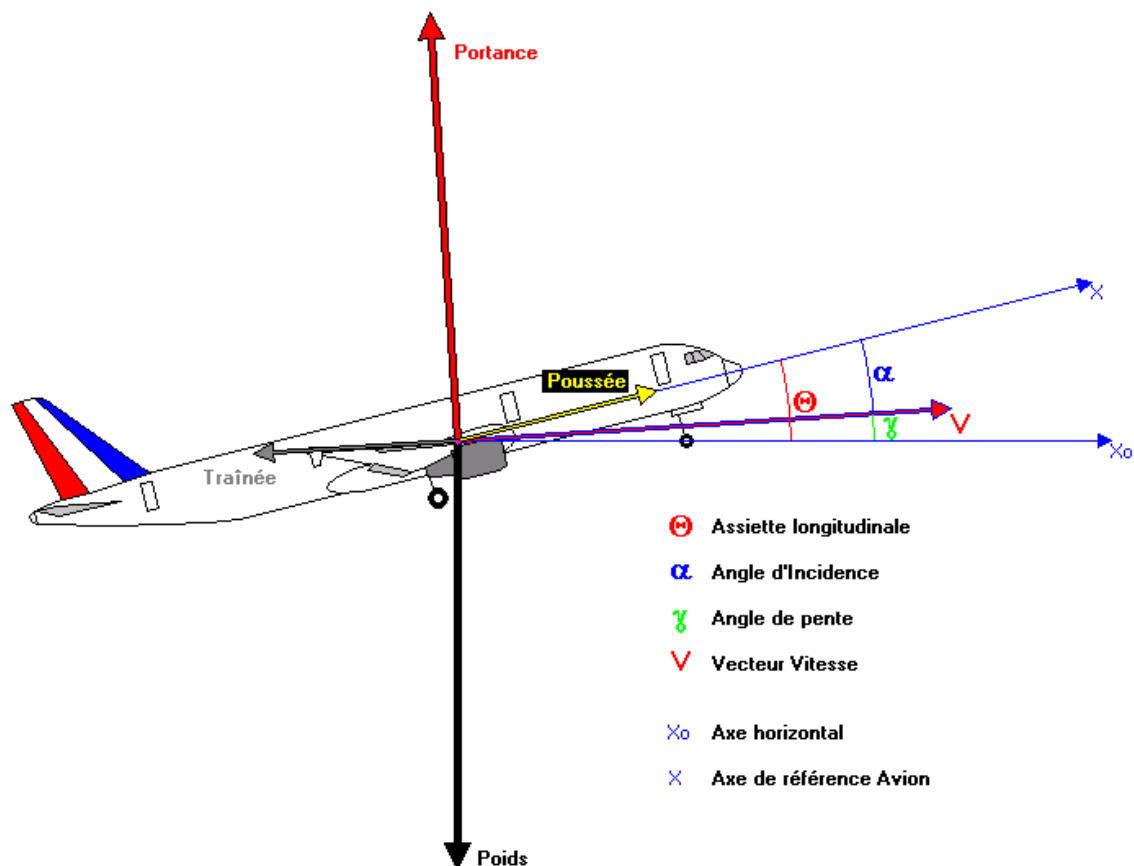


Figure 16 : Equilibre des forces en vol rectiligne

* L'incidence α est l'angle entre la référence de l'avion (une corde de l'aile) et la vitesse de l'air devant l'avion, ou à l'inverse entre la corde et le vecteur vitesse aérodynamique de l'avion. En vol normal ce vecteur-vitesse est pratiquement dans le plan de symétrie de l'avion.

Cette incidence crée des forces aérodynamiques sur toutes les surfaces de l'avion pouvant être représentées par une force unique dite « force aérodynamique » située dans le plan de symétrie et dont les 2 composantes sont, suivant le vecteur-vitesse V , une résistance à l'avancement appelée trainée (R_x), et perpendiculairement à ce vecteur une force de sustentation appelée portance (R_z). Ces 2 composantes augmentent avec l'incidence mais pas de façon identique. Elles sont données par les équations :

$$R_x = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V^2 \cdot C_x$$
$$R_z = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V^2 \cdot C_z$$

ρ étant la masse volumique de l'air (au sol $\rho_0 = 1,225 \text{ kg/m}^3$; à 11000 m d'altitude $\rho = 0,877 \text{ kg/m}^3$),

S étant la surface de référence de l'aile (de l'avion),

V étant la vitesse de l'avion par rapport à l'air,

C_x le coefficient de trainée,

C_z le coefficient de portance.

Les 3 variables α , C_x et C_z sont liées par une relation unique pour un avion donné, sa polaire.

Dans le plan de symétrie, R_z équilibre les forces de masse, de poids et d'inertie, perpendiculaires à la vitesse, essentiellement la composante du poids de l'avion augmenté de la composante de la force centrifuge en virage ou en ressource. Ainsi en vol rectiligne et horizontal R_z équilibre exactement le poids, et en virage horizontal R_z équilibre la somme du poids et de la composante de la force centrifuge sur le plan de symétrie, donc dans ce cas de virage il est nécessaire d'augmenter α , l'incidence, pour augmenter le C_z en virage afin d'équilibrer cette somme.

Physiquement la partie $\frac{1}{2} \rho \cdot V^2$ est mesurée par des différences de pressions sur le nez de l'avion et cette quantité est envoyée (directement ou non) aux instruments du pilote pour lui donner une **vitesse conventionnelle VC** à la place de la vitesse aérodynamique (vitesse V par rapport à l'air environnant ou V_{air}).

La vitesse conventionnelle est liée à la vitesse aérodynamique par la relation :

$$\frac{1}{2} \rho \cdot V^2 = \frac{1}{2} \rho_0 \cdot VC^2$$

Ainsi quelle que soit l'altitude

$$R_x = \frac{1}{2} \rho_0 \cdot S \cdot VC^2 \cdot C_x$$
$$R_z = \frac{1}{2} \rho_0 \cdot S \cdot VC^2 \cdot C_z$$

Cette VC donne au pilote une valeur de vitesse fictive liée directement à l'aérodynamique de l'avion et indépendante des valeurs de pression et de température variables dans l'atmosphère.

Pour une VC donnée, si l'on augmente le poids on est obligé d'augmenter le C_z donc α . Ou bien si l'on veut conserver une incidence de vol, un α donné, une augmentation de poids nécessite une augmentation de VC

En réalité entre les sondes de pression et les instruments de vol il existe une chaîne de transmission avec calculateurs corrigeant les différentes erreurs instrumentales et l'influence d'autres paramètres tels que la compressibilité.

Ainsi un avion ne peut voler que s'il se déplace dans l'atmosphère, il ne peut pas s'arrêter en vol quoi qu'il arrive.

Il faut bien noter que la vitesse conventionnelle VC définie ici par les relations aérodynamiques n'est pas la vitesse réelle de l'avion. C'est elle cependant ce qui est présentée au pilote car elle est directement liée aux phénomènes aérodynamiques. Facile à mesurer elle a été de facto jusqu'à présent le meilleur compromis entre le paramètre aérodynamique fondamental qu'est l'incidence α , à l'origine difficile à mesurer et à utiliser de façon dynamique, et le paramètre dynamique fondamental qu'est la vitesse réelle par rapport à l'air V_{air} , elle-aussi à l'origine difficile à mesurer. C'est donc un paramètre traditionnel.

Les variations d'incidence sont commandées par l'action aérodynamique des gouvernes situées sur l'empennage horizontal, elles-mêmes commandées par le mouvement longitudinal du manche pilote. Cette action des gouvernes modifie l'équilibre de l'avion autour de son centre de gravité, ce qui fait varier l'incidence α , c'est-à-dire l'angle entre la référence avion et le vecteur-vitesse V_{air} .

* Le coefficient de portance C_z a une valeur maximale associée à une valeur limite maximale d'incidence, au-delà de laquelle il s'effondre : c'est le décrochage, phénomène aérodynamique dangereux. Des protections et alarmes balisent l'approche de cette incidence dangereuse.

Cette valeur du coefficient de portance maximale, $C_z \max$, dépend de la configuration de l'aile. Des hypersustentateurs, bords de bord d'attaque et volets de bord de fuite, augmentent cette valeur de C_z lorsqu'ils sont braqués.

Ainsi pour un poids d'avion donné si le C_z augmente, la relation $R_z = \frac{1}{2} \rho_0 \cdot S \cdot VC^2 \cdot C_z$ montre que la vitesse correspondante nécessaire diminue, ce qui permet des vitesses réduites au décollage et à l'atterrissage, avec une VC minimale correspondant à un $C_z \max$ acceptable pour la sécurité et donc inférieur au $C_z \max$ de décrochage cité plus haut.

Les virages sont obtenus en inclinant latéralement l'avion par le braquage latéral du manche pilote commandant le braquage dissymétrique des ailerons ou des spoilers situés sur les deux parties gauche et droite de l'aile, dont l'action provoque des variations opposées d'incidence sur ces deux parties. L'avion étant incliné, le braquage en tangage des gouvernes de l'empennage, commandé par le manche pilote, initie le virage dont la force centrifuge combinée au poids est équilibrée par l'augmentation de la portance R_z due au braquage longitudinal en tangage du manche.

La dérive et les gouvernes dites de direction de l'empennage n'ont que des fonctions de stabilisation en lacet de l'avion et de compensation de la dissymétrie latérale entraînée par une panne de moteur.

* Ce système a des limitations, repérées dans le **domaine de vol** de l'avion dont la structure matérielle est de résistance limitée. Pour simplifier, ses 2 principales limitations structurelles sont : celle liée aux efforts aérodynamiques, associant une vitesse conventionnelle VC max pour chaque configuration d'hypersustentateur, et celle liée aux forces massiques, poids plus force centrifuge en virage ou en ressource.

D'autre part il y a la limitation de maniabilité déjà mentionnée liée au coefficient Cz max, qui impose des vitesses conventionnelles minimales, VC min, pour chaque configuration d'hypersustentateur.

2^{ème} système

La propulsion de l'avion

C'est l'ensemble propulsif, les moteurs, permettant à l'avion de se déplacer.

* Leur poussée équilibre la résistance à l'avancement, la trainée Rx, compense les variations d'énergie potentielle dues aux variations d'altitude, et celles d'énergie cinétique dues aux accélérations sur la trajectoire. Ceci signifie que lorsque le coefficient de trainée Cx, la vitesse (Vair ou VC) et l'altitude Z varient simultanément comme par exemple la stabilisation d'une altitude en cours de montée, la poussée nécessaire n'est pas aisée à déterminer exactement, d'autant plus qu'elle varie avec la densité de l'air.

On simplifie sa gestion par exemple soit en sélectionnant un régime moteur constant, et les autres paramètres vitesse conventionnelle VC, altitude Z, pente de trajectoire γ en découlent, soit en stabilisant VC, Z ou les 2 à la fois, soit aussi en stabilisant une pente de montée (ou de descente) γ et en ajustant la poussée correspondante manuellement, ou automatiquement avec le contrôle automatique de la vitesse, l'AT (Autothrust).

* L'énergie est fournie aux moteurs par le carburant, kérosène, stocké dans des réservoirs de capacité fixe, dont le niveau dépend de la mission. Cela signifie que la durée d'un vol est forcément limitée.

* Il y a aussi des limitations de poussée maximale liées à des critères de résistance des moteurs en fonction des régimes sélectionnés, par exemple : TOGA (Take-Off & Go-Around, Décollage et Remise de gaz) poussée maximale utilisable quelques minutes, MCT (maximum continu) poussée élevée inférieure à TOGA mais qui est le maximum utilisable sans contrainte de temps.

3^{ème} système

L'espace mobile environnant

Il est constitué de l'espace atmosphérique dans lequel l'avion se déplace, de sa trajectoire dans l'atmosphère avec toutes les caractéristiques de cette dernière, pression, température, phénomènes météorologiques, précipitations, turbulence, givrage, orages, etc.

* Cet espace se déplace par rapport à la terre ce qui donne naissance aux vents.

* Noter que les altitudes de référence Z sont liées à la pression atmosphérique au niveau de l'avion et non aux altitudes géométriques, ce qui donne parfois des différences notables entre les deux.

* Des profils opérationnels de vol sont définis pour la montée, la croisière, la descente, l'approche et l'atterrissage, sous forme de paramètres à stabiliser dans chaque phase de vol, par exemple vitesse conventionnelle VC, altitude Z, pente γ , nombre de Mach M, poussée, etc.

Ces profils sont à l'intérieur du domaine de vol comportant ainsi des limitations en altitude, en pente, en turbulence, etc.

4^{ème} système L'espace fixe géographique

C'est l'environnement géographique, lié à la Terre.

* Il impose le recalage des trajectoires dans l'air par rapport au sol pour que l'avion décolle d'un aéroport, bien localisé géographiquement, pour atterrir sur un autre aéroport lui aussi bien défini au sol, en suivant une route libre d'obstacles liés au relief.

* La vitesse réelle de l'avion par rapport au sol V_{sol} est la somme du vecteur-vitesse par rapport à l'air V_{air} , et de celui de la vitesse du vent V_w .

* Cet environnement comporte des éléments essentiels pour le pilote :

- le jour et la nuit
- la concrétisation des trajectoires par rapport au sol par les moyens radioélectriques, inertiels, ou satellites : routes aériennes, balisages, aides à l'atterrissage, etc
- les systèmes d'évitement d'obstacles au sol (EGPWS) ou en vol (TCAS)
- les relations vocales ou automatiques avec le contrôle de trafic aérien (ATC)

* Ce système introduit aussi des limitations incluses dans le domaine de vol, par exemple la limitation de vent de travers à l'atterrissage.

5^{ème} système Les autres mobiles et leur régulation

Un avion n'est pas seul dans l'espace. Il évolue au milieu d'autres, plus ou moins éloignés de lui.

* La sécurité impose une coordination des trajectoires en espace et en temps, et d'autre part la conscience de sa situation par rapport aux autres pour éviter les collisions.

La coordination des trajectoires est assurée par le contrôle au sol, l'ATC (Air Traffic Control) au moyen d'échanges d'informations orales ou alphanumériques (Datalink).
L'anti-collision est assurée par l'ATC à moyen terme et par des dispositifs internes à l'avion de détection des obstacles aériens proches (Traffic Collision Avoidance System, TCAS).
Le problème d'optimisation de l'ensemble des trajectoires et de la sécurité en découlant est aujourd'hui une préoccupation mondiale majeure.

6^{ème} système

L'avion interne, ses systèmes, la présence humaine

C'est l'intérieur de l'avion lui-même, ses équipements, ses systèmes avec la présentation de leurs informations pertinentes pour la conduite du vol, leurs procédures d'utilisation et leurs dysfonctionnements éventuels.

* Avec aussi les personnes s'y trouvant, et leurs problèmes éventuels. :

- les pilotes en équipage, au cœur de cette thèse, avec le partage des tâches et l'aide mutuelle ;
- le personnel commercial ;
- et bien sûr les passagers.

3 - COMMENT SE RACCORDENT CES 6 SYSTEMES

Dans une seule thèse il est malheureusement impossible de traiter même un minimum de combinaisons de situations concernant l'ensemble de ces systèmes, mais cette présentation a seulement pour objet de montrer combien il est difficile de traiter « simplement » et « de l'extérieur » le comportement des pilotes.

La partie la plus aisée est la combinaison des 4 premiers systèmes se présentant de façon scientifiquement très simple : au travers des équations de la mécanique du vol !

A titre d'exemple on en donne ici quelques éléments simples :

- les 2 équations de portance et de trainée déjà précisée dans le 1^{er} système,
- le vol rectiligne en montée, $P = R_z + T \sin(\alpha + \gamma)$, avec P le poids, la portance $R_z = \frac{1}{2} \rho_0 \cdot S \cdot V^2 \cdot C_z$, T la poussée des moteurs, α l'incidence et γ la pente de la trajectoire,
- le vol en virage et en ressource, $n \cdot P = R_z$, avec n le facteur de charge c'est-à-dire le rapport du poids apparent (somme du poids et des forces d'inertie) au poids de l'avion,
- vecteur $V_{sol} = \text{vecteur } V_{air} + \text{vecteur vent } V_w$, avec route $R = \text{cap } H + \text{dérive } d$.

Il n'est pas difficile de se rendre compte que les variables en cause ne sont pas toutes indépendantes et qu'en situation dynamique et rapidement évolutive il y a des transferts pouvant être complexes entre leurs valeurs instantanées et leurs influences, et il faut donc les rendre aisément perceptibles et compréhensibles au pilote.

L'introduction des autres systèmes sera faite au cas par cas.

ANNEXE 2

ANALYSE DES 5 CAS CHOISIS

COMPLEMENT DU CHAPITRE 5 DE LA THESE

1- PRELIMINAIRES

1.1 - Cas étudiés

Ils ont été choisis pour la même caractéristique commune concernant la thèse : combinaison de soudaineté, d'inattendu, de nécessité de réaction rapide, dans une situation dangereuse. D'après les statistiques d'accidents aériens ce genre de situations se retrouve à 80% au cours de vols près du sol. Dans une longue liste d'accidents et d'incidents on a choisi 5 cas (maximum compatible avec la gestion temporelle de la thèse) paraissant rassembler une grande diversité de causes et de contextes, afin de ne pas se consacrer à l'étude de situations identiques. De plus ces 5 cas présentent suffisamment d'informations pour une analyse correcte des comportements, même s'il est parfois nécessaire d'avancer plusieurs hypothèses pour expliquer ces comportements.

Noter un point essentiel : **il s'agit uniquement du comportement opérationnel et la durée moyenne de l'évolution des situations est de l'ordre de la minute, souvent inférieure, ce qui exclut toute possibilité pour le pilote sous stress d'une exploitation cognitive autre que celle de la situation présente, la concentration sur cette dernière étant ainsi par hypothèse supposée totale.**

Afin d'éviter une trop grande variabilité des paramètres d'analyse volontairement on n'a choisi que des cas où tous les systèmes avion fonctionnent de façon prévue (sans panne immédiate), où les pilotes ont la tâche immédiate de la conduite manuelle de l'avion, et ne montrent aucun signe apparent de fatigue ou de problème individuel.

1.2 - Utilisation d'un modèle pour l'analyse

Cette analyse est l'une des parties importantes de la thèse car tout en étant la base des recherches elle nécessite une grande acuité dans la traduction des comportements en termes cognitifs. Elle est le support indispensable à l'explication cognitive des comportements, et à la tentative de remédier aux résultats dangereux potentiels en découlant.

Pour l'effectuer on utilise le modèle présenté dans le Chapitre 3 de la thèse, ainsi que les informations sur le pilotage des avions données dans le Chapitre 1 de la thèse.

Enfin un glossaire contenu dans le chapitre 1.3 de la thèse peut être utilement consulté à la demande au fur et à mesure de la lecture de la présente Annexe 2.

1.3 - Présentation

La méthode utilisée est celle du Chapitre 4.7.

Chaque cas est défini par une succession de séquences de courtes durées, choisies en fonction de l'évolution de la situation.

Pour chaque séquence on adopte la présentation suivante en 4 points:

A : description de la situation ; il s'agit des faits observés ou enregistrés tirés des rapports;

B : action normale souhaitée (tâche à effectuer); c'est le comportement normalement approprié à la situation, en application du Chapitre 2 et des procédures courantes;

C : action effectuée ; soit observée, soit déduite de la meilleure connaissance des relations d'interface pilote-avion, en partie traitées dans le Chapitre 2 et d'après l'expérience personnelle;

D : actions cognitives élémentaires ; il s'agit là de la transcription des actions effectuées en mécanismes cognitifs du comportement d'un pilote d'après le Chapitre 4.

Les points C et D décrivent les mêmes choses de façons différentes.

1.4 – Utilisation des experts

Cette partie de la thèse a été utilisée pour vérifier la validité :

- des éléments techniques concernant la conduite des vols, équipements, automatismes, procédures, mécanique du vol ; ainsi l'avis des experts a permis de corriger certaines erreurs ou ambiguïtés dans la description des automatismes de systèmes dans les cas n°1 et 5.

- des hypothèses des analyses cognitives proposées, vues sous l'aspect opérationnel ; ainsi les experts ont permis d'ajouter des hypothèses supplémentaires dans les cas n°1, 2 et 3.

Huit experts ont présenté leurs opinions et critiques recueillies dans le Chapitre 6 « Exploitation de l'expertise » et l'Annexe 3. Ils ont coté les 35 séquences répertoriées dans la présente partie d'après une échelle de 4 valeurs :

- **1 étant l'adhésion complète**

- **2 étant l'acceptation avec des restrictions à expliciter**

- **3 étant le refus avec obligation d'en donner les motifs**

- **4 étant le rejet total.**

Ainsi 1 et 2 confirmaient l'acceptabilité, 3 et 4 le refus.

2 – ETUDE DES CAS

2.1 - Introduction

Ainsi que déjà dit, pour positionner cette thèse de façon concrète on a choisi 5 exemples de situations soudaines et dangereuses. Ils ont été pris dans une grande variété de situations, toutefois en éliminant les cas de pannes de systèmes avion, pour éviter de se concentrer sur quelques cas trop précis, en essayant de rencontrer le plus possible de paramètres influents. Evidemment ils ne peuvent pas représenter la totalité de ces derniers mais la diversité empêche une focalisation parasite de l'analyse.

On y trouve des accidents, ayant tous donné lieu à des rapports officiels et publics, des incidents rapportés dans des comptes-rendus de diffusion restreinte (parfois confidentiels) dans les entreprises considérées, des récits écrits par des témoins acteurs directs et des personnalités/experts dignes de foi. Des extraits ont été prélevés, ou des résumés sont présentés ici, sur les particularités intéressantes pour cette recherche. Tous ont été dé-identifiés dans le texte.

Un exemple a été pris dans un accident d'avion militaire monoplace pour sa particularité intéressante au point de vue cognitif.

Les phases « avant événement », « événement » et « après événement » sont bien repérées. L'absence de caractéristiques affectives marquantes (fatigue, difficultés particulières du vol, conflit au sein de l'équipage) a été vérifiée dans les phases « avant événement ».

Le problème de la compréhension des procédures, des équipements et automatismes, des appellations et des acronymes aéronautiques (différents en français et en anglais) est difficile à résoudre sans une extension à l'excès des textes explicatifs. Le **Glossaire** rassemble les appellations techniques et cognitives, et partout où cela est nécessaire des encarts tentent de préciser les particularités spécifiques.

L'analyse des caractéristiques communes est faite dans le Chapitre 7 de la thèse.

2.2 – Etude des cas choisis

1 – A330 – incident, approche, remise de gaz

Perte de contrôle en remise de gaz difficilement explicable, probablement due à une focalisation de l'attention sur le seul indicateur de vitesse.

1.A – Résumé du cas

Rapport interne compagnie

ATTENTION : ce Résumé est en totalité extrait d'un rapport officiel et sert de base à l'analyse du chapitre suivant

Circonstances

A330 en bonnes conditions.

PF Commandant de bord (CDB) avec 10 200 h de vol dont 400 sur A330. PNF copilote avec 4 000 h de vol dont 1 000 sur A330.

Vol retardé au départ de plus d'une heure pour des problèmes d'embarquement et d'ATC.

A la destination, après avoir évité des orages, en approche finale de nuit sur la piste 21, le CDB observe une composante de vent arrière supérieure à 10 kt et exécute une remise de gaz. A environ 1200 ft, à l'approche de l'altitude de remise de gaz affichée au FCU, l'assiette diminue au-delà de ce qui est nécessaire pour une mise en palier. L'avion redescend, des alarmes EGPWS « Pull-Up » se déclenchent et le copilote intervient. Le CDB réagit et reprend la montée vers 3000 ft. Une nouvelle approche et un atterrissage sont réalisés en piste 03. La perte d'altitude a été de 600 ft avec un point bas enregistré à 608 ft radioaltimètre au-dessus de la mer. L'assiette a atteint $-9,5^\circ$ et la vitesse verticale a dépassé 4 000 ft/mn.

Déroulement

« L'A330 quitte le parking avec un retard de 1h14 pour des problèmes d'embarquement (saturation filtre, parking au large...).

La météo prévue à l'arrivée indique une possibilité d'orages. Le CDB est PF aux commandes.

En fin de croisière, l'équipage reçoit le message d'information de l'escale accompagné du METAR signalant un vent du 200° pour 10 kt, une visibilité supérieure à 10 km et un TEMPO TSRA (orage). Le METAR suivant indique un vent du 90° pour 8 kt et un TEMPO TSRA (orage et pluie), météo confirmée par l'ATIS.

Après un palier d'environ une minute à 1600 ft, l'axe et le plan de descente de l'ILS 21 sont rejoints simultanément à la verticale de la balise d'entrée d'approche, train sorti, volets 3, puis Full (plein sortis) à la mise en descente.

Après la capture du glide, vers 1500 ft, l'altitude sélectionnée au FCU passe de 1600 ft à 1700 ft. Le pilotage est repris en manuel (AP et ATHR OFF) à 1400 ft.

Pendant la finale, le vent arrière enregistré est en moyenne 20 kt jusqu'à 200 ft puis diminue vers 10 kt à 100 ft. Une remise de gaz est initiée à 80 ft RALT (Radioaltimètre, soit 80 ft au-dessus du sol). La séquence est conforme à la procédure avec une prise d'assiette initiale vers 12,5°, un affichage de la poussée TOGA, la rentrée des volets vers 3 puis la rentrée du train.

La composante de vent arrière aurait augmenté la distance d'atterrissage sur la piste 21, d'où le choix normal d'atterrir au cap inverse sur la piste dont l'appellation devient alors la piste 03.

L'assiette est pilotée entre 12° et 14° jusqu'à environ 950 ft QNH puis diminue au moment de l'activation de l'alerte sonore « Altitude alert » et du passage en ALT* (capture d'altitude).

L'« Altitude alert » et le mode ALT* apparaissent très tôt en raison de l'altitude basse sélectionnée au FCU. Les manettes sont placées dans le cran CLB pendant 8 secondes puis sont avancées vers MCT ce qui entraîne l'apparition du message clignotant « LVR CLB » (mettre les leviers sur le cran montée, Climb) sur le FMA. L'altitude enregistrée atteint son maximum, 1220 ft et commence à diminuer. Les volets sont rentrés de 3 vers 1+F à l'approche de la VFE (vitesse limite des volets sortis). L'assiette continue à diminuer. L'enregistreur indique que les manettes sont dans le cran FLEX MCT. Sept secondes plus tard, à 970 ft QNH, les manettes sont sorties du cran FLEX MCT vers le plein réduit pendant deux secondes puis sont placées en butée TOGA au moment de l'activation d'alarmes EGPWS. Ces alarmes sont enregistrées pendant 13 secondes. Il s'agit probablement des alarmes « Sink rate », « Terrain » et « Pull Up ». Tandis que l'assiette atteint - 9,5° et que le variomètre dépasse 4 000 ft/mn, une première augmentation de l'assiette et du facteur de charge est enregistrée à 870 ft QNH, pendant 3 secondes avec un facteur de charge de 1,3. Puis la ressource est reprise franchement à 608 ft RALT ou 583 ft QNH, au dessus de la mer. Le facteur de charge atteint 1,87.

La poussée TOGA, affichée lors de la première ressource avec une assiette en augmentation mais encore faible, entraîne une croissance rapide de la vitesse indiquée qui dépasse la VFE volets 1 d'une dizaine de noeuds. L'avion est ensuite stabilisé en palier à 3000 ft. Le Cdb effectue une annonce aux passagers. Après une évaluation de la météo et du vent sur le terrain, l'équipage effectue une approche VOR DME puis un atterrissage en piste 03. Le copilote est PF aux commandes, conformément à la répartition des tâches recommandée en approche classique de nuit. »

Analyse (incluse dans le rapport)

L'approche avec capture simultanée des LOC et Glide à 5 nm laissait peu de temps pour stabiliser les paramètres en finale. La trajectoire était choisie en raison des échos orageux.

La composante de 20 kt en vent arrière justifiait la remise de gaz effectuée correctement. Cependant l'altitude sélectionnée sur le FCU, 1700 ft, était celle de fin de virage et non celle de Remise de gaz, 2200 ft, du fait d'une confusion de lecture de la carte d'approche. La prise automatique d'altitude par le FD a fait croire à un dépassement d'altitude.

L'enchaînement des informations de vitesses et leur dépassement, de sélections de poussée, de corrections d'assiette longitudinale, de perception des accélérations, des alarmes de vitesse, d'altitude et de proximité du sol, au-dessus de la mer et dans l'obscurité ont amené une grande confusion. Les bonnes réactions ont finalement prévalu grâce à l'intervention vigilante du PNF copilote.

La phase entre la remise de gaz et la reprise de contrôle a duré environ 1 min 30sec et l'altitude minimale a été de 600 ft.

Une importante source de confusion a été la sensation d'accélération dans la combinaison des accélérations de la pesanteur, du facteur de charge et de l'accélération longitudinale, altérant la perception physiologique des assiettes. Cette sensation a prévalu sur les indications réelles des instruments.

Cette analyse pourrait expliquer plusieurs accidents survenus dans des circonstances analogues.

Assiette perçue (verticale apparente) et assiette réelle

L'assiette "perçue" et l'assiette réelle restent approximativement parallèles jusqu'au moment où l'avion commence à redescendre. Les deux courbes divergent ensuite franchement avec l'augmentation de l'accélération longitudinale.

Lorsque l'assiette réelle approche -9° , l'assiette perçue est d'environ $+13^\circ$.

Ces courbes montrent à quel point une accélération longitudinale significative lors d'une mise en palier de nuit, sans horizon extérieur, peut "gommer" des échappées d'assiette très importantes.

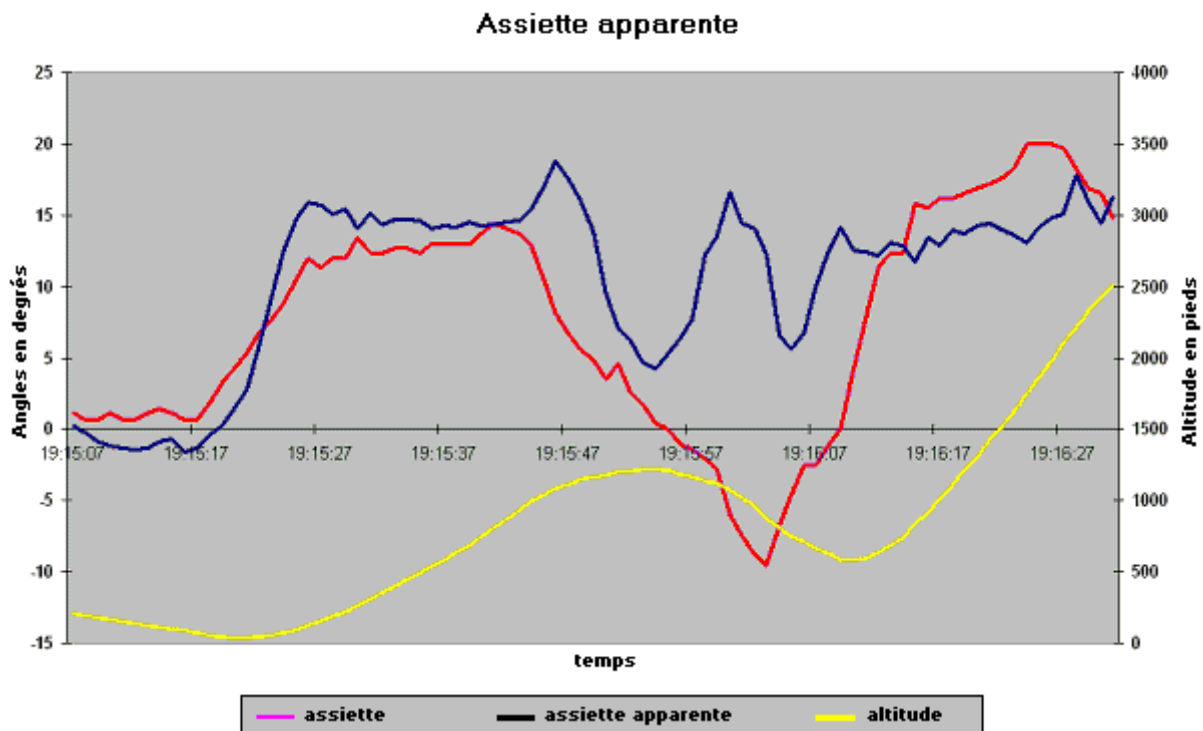


Figure 17 : Evolution de l'assiette apparente

1.B – Analyse

Cette analyse est celle de la thèse

1.B.1 – Choix de séquences

Elles sont extraites en grande partie du compte-rendu de la compagnie. Les durées des séquences sont vraies à +/- 1sec. L'origine 0 est prise à l'évènement déclencheur.

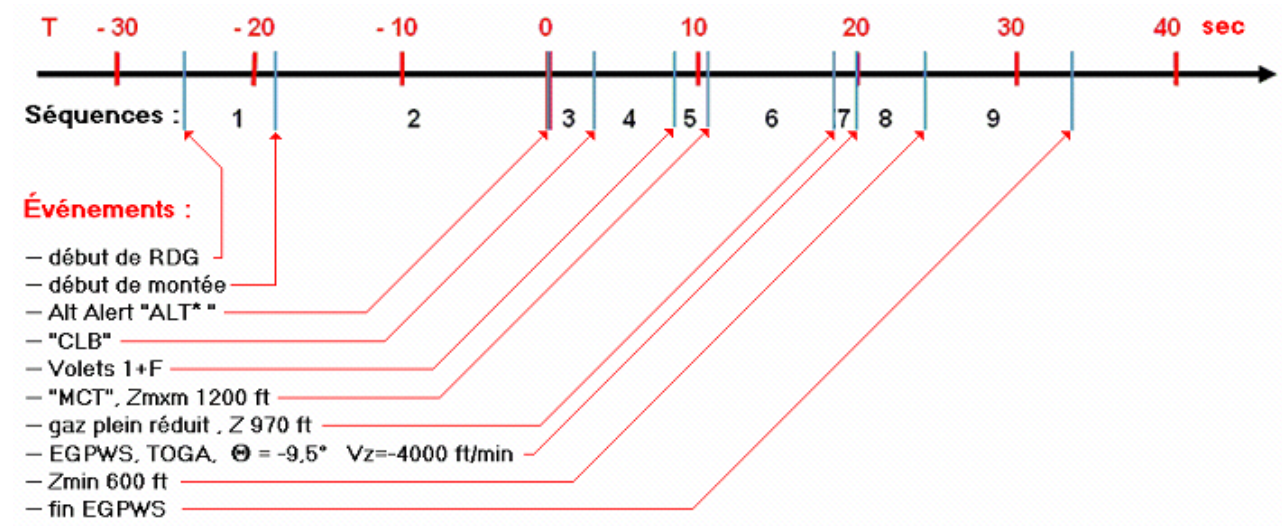


Figure 18 : Séquençage du cas n°1

1.B.2 – Analyse chronologique des séquences

Se reporter au Chapitre 2 pour la description des instruments de vol, pour le PFD en particulier.

Les séquences 1 à 9 ont été proposées à la cotation des experts (voir Chapitre 6).

Séquence 0 : fin de l'approche

A– description de la situation :

Le commandant de bord Cdb reconnaît le problème de vent arrière (un trop fort vent arrière augmente la distance d'atterrissage) et décide une remise de gaz, RDG.

B – action normale souhaitée :

La RDG est normale

C – action effectuée :

Correcte

D – actions cognitives élémentaires :

Sans objet

Séquence 1 : Remise de gaz (RDG) (7 sec)

A – description de la situation :

RDG dans l'axe de la piste avec l'intention de faire une approche sur l'axe inverse de la piste (au cap inverse, après virage de 180°). Visibilité extérieure correcte de la piste au début, puis nuit et obscurité au cours de la poursuite au-dessus de la mer.

B – action normale souhaitée :

Il s'agit d'interrompre la descente et de remonter pour effectuer une nouvelle approche. Par le PF (Cdb) application de la poussée maximale des moteurs, TOGA (Take-Off & Go-Around) avec la main droite. Ordre à cabrer sur le manche avec la main gauche de façon à afficher l'assiette longitudinale Θ sur la barre horizontale du FD (directeur de vol) sur l'instrument PFD (Primary Flight Display) et stabilisation de cette assiette Θ .

Le fait d'avoir placé les leviers de poussée sur le cran TOGA a déclenché un mouvement vers le haut de la barre horizontale du FD donnant une assiette Θ permettant au pilote de stabiliser en montée une vitesse constante autorisant une pente optimale de montée.

Dans la famille des avions Airbus, à partir de l'A320, les leviers de commande de poussée des moteurs se placent sur des crans permettant la sélection immédiate de la poussée :

- TOGA pour le décollage et la RDG
- MCT pour une poussée maximale sans limitation de temps
- CLB pour la poussée requise par une montée et pour toute poussée requise par les sélections automatiques de vitesse, ce qui est la procédure normale d'utilisation.

Dans ce dernier cas l'évolution de la poussée est indépendante de la position des leviers.

Cependant, si aucune vitesse n'a été sélectionnée via les automatismes, la commande directe des moteurs (de la poussée) est possible pour les pilotes s'ils quittent le cran CLB en faisant bouger les leviers entre ce cran et la position plein réduit. Ils peuvent alors ajuster manuellement la poussée à leur choix en fonction de la position des leviers.

Simultanément annonce de la remise de gaz RDG par le PF et demande de rentrée des volets sur la position 3. Immédiatement et successivement retrait des volets de la position 4 « FULL » vers la position 3 (réduction de la traînée) et rentrée du train (LG, Landing Gear) par le PNF (copilote). Annonce de la RDG à la tour de contrôle (ATC) par le copilote PNF.

C - action effectuée :

Correcte.

D – actions cognitives élémentaires :

Pour le **PF** :

- **AP1** : l'objectif est de remonter dans l'axe vers l'altitude de fin de RDG, sélectionnée par le PNF (*dont la valeur de 1700 ft au lieu de 2200 ft est affichée en attente par le PNF sur l'échelle des altitudes de l'indicateur Primary flight display PFD, valeur erronée suite à une mauvaise lecture d'une présentation ambiguë de l'altitude de RDG sur la carte d'approche*). Passage de la manœuvre à AG1.
- **AG1** : pilotage manuel. Balayage visuel sur le PFD, commun entre ses différentes fonctions cognitives FC utilisées.

AG1 utilise simultanément 2 fonctions cognitives FC différentes, l'une en tangage dans le plan vertical et l'autre en cap dans le plan horizontal ; cela est dû au fait que les humains se déplacent de façon différente dans ces 2 plans et que le vol amplifie ce phénomène, à tel point que la formation des pilotes a formalisé cette discrimination reflétée par la structure de la conduite des aéronefs avec schématiquement les commandes de vol en tangage pour les évolutions dans le plan vertical et celles en roulis et direction pour les évolutions dans le plan horizontal.

- **FC1 : pilotage manuel en tangage** (plan vertical): action en tangage sur le manche pour amorcer la montée, combinée avec, sur l'horizon artificiel (HA), l'interception de la barre horizontale du directeur de vol FD par le centre de la maquette. Utilisation du modèle mental MM requis en boucle fermée BF. Balayage visuel sur le PFD entre le HA et les échelles de vitesse VC et d'altitude Z pour contrôler les évolutions correctes des VC et Z.
- **FC2: pilotage manuel en cap** (plan horizontal): action en roulis pour conserver les ailes horizontales avec le centre de la maquette sur la barre verticale du FD pour rester sur le cap actuel (action en boucle fermée BF). Il est possible que l'échelle de cap au bas du PFD n'ait pas été consultée.
- **AG5** : communication interne : annonce de RDG au PNF avec demande de rétraction des volets d'un cran (de 4 vers 3).

Bien que non précisé dans le rapport ceci est la procédure normale et la suite du vol prouve que les actions ont été effectuées.

La permutation entre les parties délibérées conscientes de l'exploitation des paramètres lus au cours du balayage visuel des fonctions FC1 et FC2 et le passage au 2^{ème} plan en mise en action réflexe [automatique] des mêmes paramètres lors de cette permutation (voir Chapitre 2), s'effectue pendant la durée de rémanence sur la mémoire court terme Mct, avec cependant plus de temps alloué à la fonction FC1 en charge de l'objectif primaire qui est la remontée.

Action consciente simultanée de AG5, communication avec le PNF, d'après la possibilité d'actions conscientes simultanées des 2 modalités visuelle et verbale.

- **AG2** : observation visuelle extérieure : sans objet car nuit sur la mer.

Pour le **PNF** : positionne les volets sur 3, rentre le train, annonce la RDG à la tour de contrôle, et les positions du train et des volets au PF (remarque id° AG5).

Séquence 2 : montée (18 sec)

A– description de la situation :

Le directeur de vol FD indique une assiette Θ correspondant à la meilleure VC de montée, qu'il faut stabiliser jusqu'à l'interception de l'altitude sélectionnée. Le cap est constant. Obscurité totale sur la mer.

B – action normale souhaitée :

Le PF doit stabiliser Θ sur la barre du FD et vérifier la bonne concordance avec les paramètres VC, Z et Vz.

Le PNF vérifie l'ensemble des paramètres.

C – action effectuée :

Correcte.

D – actions cognitives élémentaires :

Idem séquence 2.

Séquence 3 : début d'interception d'altitude (3 sec)

A – description de la situation :

L'alerte sonore « Altitude alert » d'approche de l'altitude sélectionnée retentit.

Action normale. Cette alarme uniquement sonore a pour objet d'avertir les pilotes qu'ils s'approchent de l'altitude sélectionnée afin qu'ils débutent son interception en avance de phase ; elle survient comme rappel 750 ft avant l'altitude sélectionnée sur le FCU. Mais elle

survient aussi à titre de rappel lorsqu'on a dépassé par inattention ou maladresse l'altitude sélectionnée.

Cependant l'altitude sélectionnée n'est que 1700 ft au lieu de 2200 ft suite à la lecture erronée d'une information ambiguë de la carte du terrain. La vitesse verticale Vz est élevée. L'interception de l'altitude par le directeur de vol FD s'effectue avec l'apparition de l'indication ALT* sur le PFD, sur le bandeau Flight management annunciator FMA d'indication des modes automatiques.

Cette indication visuelle ALT s'inscrit sur le FMA du PFD conformément à l'indication des interventions des modes automatiques du système de pilotage; elle signifie que le FD a débuté le mode d'interception automatique de l'altitude sélectionnée et sa barre horizontale s'abaisse pour donner l'ordre au pilote de commencer à diminuer l'assiette Θ ; elle est indépendante du mode « Altitude alert » qui n'est qu'un rappel et non un ordre.*

Simultanément, lors de l'enclenchement de l'interception d'altitude (donc avec l'apparition de ALT), il y a apparition de l'indication « LVR CLB » sur la partie FMA du PFD, signifiant qu'il est nécessaire de placer les leviers de poussée sur un cran inférieur à ceux de « TOGA » (Take-off/Go around) ou de « MCT » (Maximum continu) afin de réduire la poussée en –dessous de la poussée maximum. La vitesse objectif est automatiquement avancée vers une valeur repérée G DOT (Green Dot) sur l'échelle des vitesses supérieure à celle de la limitation de vitesse imposée par la position des volets, dans le but d'accélérer l'avion. Ainsi le positionnement des leviers sur le cran LVR CLB assure une accélération vers la vitesse automatiquement sélectionnée, mais en nécessitant la rentrée des volets.*

Ces indications doivent être lues et rapportées par le PNF. Simultanément la barre du directeur de vol FD bouge vers le bas demandant ainsi au PF de diminuer l'assiette Θ jusqu'à sa valeur de stabilisation de l'altitude. Cette diminution d'assiette sans diminution suffisante de poussée provoque une accélération longitudinale jusqu'à la valeur de vitesse objectif automatiquement sélectionnée (G DOT). Cette accélération est vue sur l'échelle des vitesses et quantifiée par le vecteur jaune d'accélération apparaissant sur cette échelle. Les volets étant en position 3, la vitesse VC présente, en augmentation, est 10 kt en dessous de la limitation de vitesse VFE, colorée en rouge en haut de la même échelle indiquant la nécessité soit du positionnement des volets sur 2 ou sur 1+F, soit d'une réduction de la poussée afin d'arrêter l'accélération.

Si les leviers de poussée sont dans le cran CLB (LVR CLB) la poussée diminue automatiquement, éventuellement plein ralenti, pour éviter le dépassement de la limitation de vitesse VFE. Cette réduction n'est pas automatique sur la position TOGA ou sur MCT.

D'après le rapport d'incident la pente de montée, l'assiette longitudinale apparente ou verticale apparente, est perçue de façon corporelle par la combinaison de l'accélération de la pesanteur et de la forte accélération longitudinale, comme montré dans le schéma de trajectoire (la partie I encadrée rouge correspond aux séquences 3, 4 et 5,

les deux parties I et II repèrent les zones où l'assiette apparente (verticale apparente) perçue est en opposition avec la variation négative de l'assiette Θ de l'avion) :

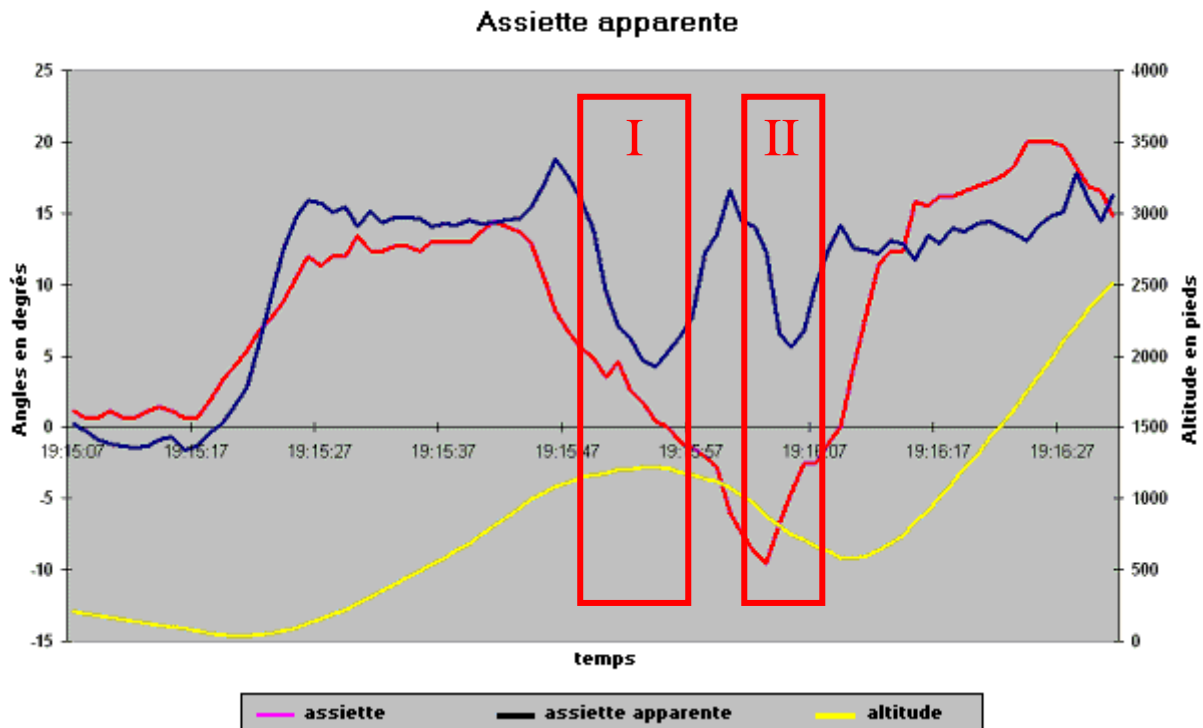


Figure 19 : Périodes d'assiette apparente positive

B – action normale souhaitée :

La manœuvre normale d'interception d'altitude, tirée du modèle mental MM requis extrait de la mémoire long terme Mlt, impose une coordination dans l'exploitation visuelle des informations suivantes : barre horizontale du FD qui est l'information de commande d'action à suivre exactement, ainsi que les autres paramètres dont la surveillance assure la conformité de l'action, c'est-à-dire l'assiette Θ , l'altitude Z avec l'indication de l'altitude cible sélectionnée, la vitesse verticale Vz, la vitesse VC avec l'exploitation de la longueur de la flèche jaune donnant la valeur de l'accélération longitudinale, la poussée EPR des moteurs. Cette coordination est basée sur 2 actions simultanées en boucle fermée (BF) : les actions manuelles, sur le manche et les leviers de poussée, et le balayage visuel sur le PFD, entre le FD, les échelles de Θ , de VC, de Z et de Vz, et sur l'écran ECAM placé au centre et en haut entre les deux panneaux pilotes, avec les indicateurs EPR de poussée. Ce balayage, dans le cas présent, doit être rapide, de l'ordre de la seconde ou moins pour chaque paramètre sans aller au-delà de 3 sec pour une information spécifique car il faut que la partie consciente de la manœuvre et de ses contrôles ne dépasse pas les 10 à 20 sec de capacité de la mémoire court terme Mct tout en exploitant simultanément l'ensemble des paramètres requis.

La mécanique du vol impose que le PF doive donc réduire la poussée et terminer la manœuvre d'interception d'altitude en contrôlant cette dernière sur l'échelle des altitudes Z. Le PNF doit positionner les volets sur 2 ou 1+F à la demande du PF.

C : – action effectuée :

Le rapport d'enquête signale que le PF a dit avoir cru, lorsque les alarmes sont survenues, qu'il avait dépassé l'altitude sélectionnée, cependant sans donner la cause de cette erreur. Cet élément donne le départ de l'analyse cognitive.

Il est probable qu'au cours de la séquence précédente l'attention du PF s'était portée sur autre chose que l'objectif d'interception de l'altitude de RDG, sans qu'on puisse déduire des faits ce qu'était cet « autre chose ». Apparemment il regardait les instruments « sans les voir », ou il regardait ailleurs, ou il s'occupait d'autre chose, par exemple de l'examen de la fiche d'approche du terrain concernant la piste nouvellement choisie. Il est rappelé que l'instrument principal est le Primary flight display PFD qui rassemble tous les paramètres nécessaires au pilotage à court terme, sauf les indicateurs de poussée situés sur l'ECAM à 20 cm du PFD. Pendant la séquence précédente le PF regardait forcément le directeur de vol FD puisque l'assiette Θ correcte était stabilisée. Cependant s'il avait porté attention à l'évolution du vol il y aurait inmanquablement noté que l'altitude d'alors était inférieure à l'altitude sélectionnée quelle qu'elle soit. Aussi la simultanéité de l'alerte sonore « Altitude alert » accompagnée de l'annonce déduite du rapport de ALT* (« alt star ») par le PNF est un réveil brutal sur une situation nouvelle et inattendue. Ce qui suit est une hypothèse possible, bien que surprenante, tirée des dires du PF, de la suite des événements observés, de la mécanique du vol et de l'affichage des instruments de vol. Il est bien évident que son comportement ne correspond à aucun critère opérationnellement logique.

Cette situation est analysée immédiatement par le PF sous l'intuition qu'il avait manqué une séquence ou des informations, avec l'exploitation apparente (logique dans l'erreur causée par cette intuition) de seulement 4 éléments parmi toutes les informations disponibles et claires concentrées sur le PFD :

- l'assiette longitudinale Θ est élevée et la vitesse verticale V_z est grande (vrai);
- ? ALT* signifie que l'altitude sélectionnée a été dépassée sans qu'on en ait eu conscience (faux);
- ? en conséquence l'alerte sonore « Altitude alert » signifie qu'elle a été dépassée pour la raison d'une vitesse verticale V_z élevée (faux);
- la barre horizontale du FD commande une diminution importante de Θ (vrai), donc l'altitude a bien été dépassée (faux).

La combinaison de l'altitude trop basse et de la vitesse verticale V_z élevée a entraîné une demande d'interception d'altitude rapide et soudaine (imprévue d'après la fausse intuition) se traduisant sur le PFD par le mouvement vers le bas de la barre horizontale du FD (l'ordre de diminuer l'assiette Θ). Bien que les ordres transmis par le manche n'aient pas pu être restitués il est probable que le PF pensait que l'altitude de stabilisation avait été dépassée et qu'il fallait donc suivre les ordres du FD pour descendre afin d'intercepter l'altitude manquée. Si le PF n'a pas instantanément réagi, le court délai de surprise est suffisant pour que la barre horizontale du FD aille vers sa position la plus basse pour l'interception, ce qui provoque une réaction d'amplitude plus

élevée que normale sur le manche en réduction de Θ . L'intuition d'avoir dépassé l'altitude devient alors une certitude et le PF peut juger inutile de vérifier exactement l'altitude, ce qui est confirmé par le fait que l'altitude réelle varie de façon inappropriée par rapport à la situation donnée par l'ensemble des paramètres de vol, alors que l'altitude sélectionnée se trouve portée en haut de l'échelle des Z et non en bas si elle avait été dépassée.

Cette forte diminution d'assiette provoque une augmentation rapide de vitesse, 10 kt en dessous de la VFE volets 3 au départ de la manœuvre, alors que le bandeau de limitation de vitesse est déjà apparent.

Le balayage visuel est ralenti par l'action d'analyse de situation altérée par la surprise et par le faux diagnostic.

A partir de ce moment la barre du FD et surtout l'échelle des vitesses VC deviennent les informations majeures pour le PF ce que tend à montrer l'évolution enregistrée du vol.

On ne voit pas comment la prise en compte consciente de l'altitude pourrait mener au scénario réel observé. Le PF place les leviers de poussée sur le cran CLB (Climb) suivant la procédure normale, ce qui diminue un peu la poussée mais la vitesse automatiquement sélectionnée G DOT est bien supérieure à la vitesse actuelle.

D- actions cognitives élémentaires :

Pour le **PF** :

- **AP1** : la simultanéité de l'alerte sonore « Altitude alert » et de l'indication ALT*, accompagnées par le brusque mouvement du directeur de vol FD en diminution de l'assiette Θ ont créé un état de surprise ayant provoqué la recherche d'un diagnostic de situation. La décision dictée par l'intuition fautive d'avoir manqué le passage par l'altitude sélectionnée a été de débiter l'interception d'altitude par le haut (altitude de départ plus élevée que celle sélectionnée) et non par le bas (altitude plus basse que celle sélectionnée, comme la situation réelle le dicterait) comme premier objectif avec l'agent AG1.

- **AP2** : le fait d'avoir simultanément l'indication d'avoir passé l'altitude (mauvaise interprétation de l'ensemble de l'alerte "Altitude Alert" et de l'indication ALT*) et celle de l'avoir beaucoup dépassée (mauvaise interprétation de "Altitude alert") reste une préoccupation forte et paraissant limiter la capacité mentale consciente comme le prouve la suite des actions : stress provenant de cette séquence manquée ?

- **AG1** : en vision de la barre du FD sur sa position basse :

La figure ci-dessous du PFD n'est pas conforme à la situation décrite mais elle montre clairement comment les présentations des paramètres primordiaux sont très proches les unes des autres : vitesse VC à gauche avec vecteur jaune d'accélération, assiette longitudinale et horizon (délimitant le ciel bleu et le sol brun) au centre avec en surimpression les barres perpendiculaires vertes du Directeur de vol, altitude et vitesse verticale, présentées à droite ici en montée. Ce qui rend le comportement du PF difficilement compréhensible.

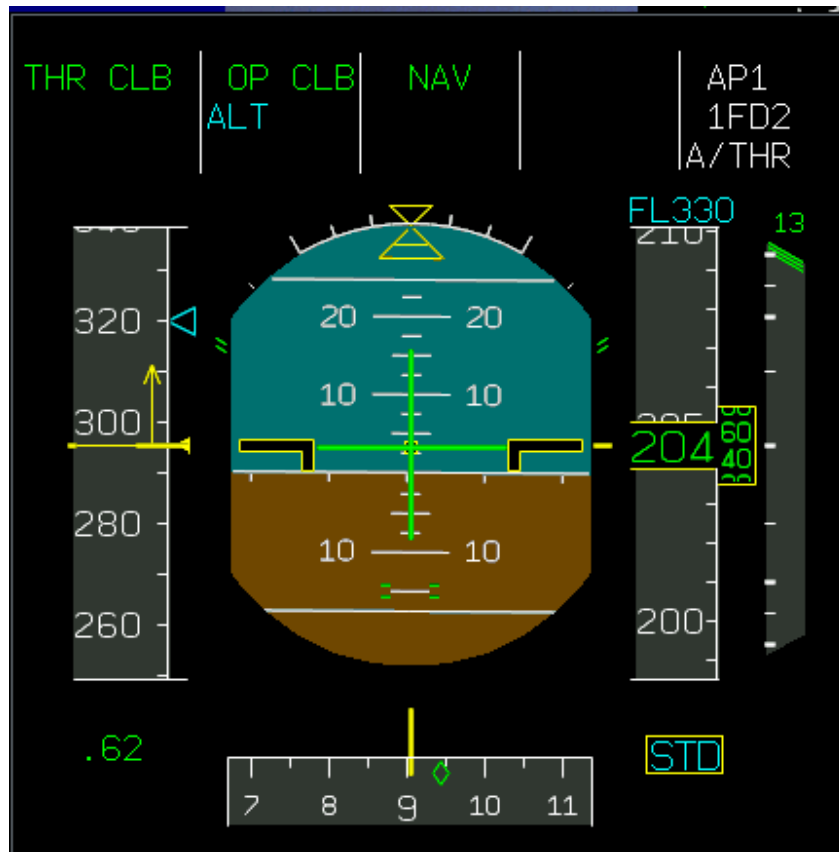


Figure 20 : Exemple de figuration sur PFD

- **FC1 : pilotage en tangage** : utilisation du modèle mental MM d'interception d'altitude extrait de la mémoire long terme MLT.

Cette FC est intéressante.

- Elle peut être prise en compte entièrement par les automatismes de bord lorsque la fonction « interception d'altitude » est sélectionnée avec la configuration suivante : pilote automatique (AP) enclenché, altitude de stabilisation sélectionnée, poussée automatique (ATHR) enclenchée, leviers de poussée sur le cran CLB (climb), vitesse de stabilisation en palier sélectionnée. Dans ce cas les équations correspondantes de la mécanique du vol sont « mécaniquement » résolues en mode continu par les équipements de l'avion.

- Elle peut n'être que partiellement prise en compte par les automatismes, avec une intervention limitée du pilote humain. C'est le suivi de la même fonction avec la même configuration, sauf que le pilote automatique n'est pas enclenché mais que le directeur de vol FD l'est. Dans ce cas le FD reçoit les mêmes ordres que recevrait l'AP, et les transmet via le PFD au pilote. Ce dernier assure donc en boucle fermée BF les mêmes fonctions que l'AP avec le transfert et le traitement des informations visuelles d'ordres aux pressions sur le manche (les mouvements du manche découlent des pressions qui sont les sensations quantitatives utilisés par les pilotes : résultat expérimental), lequel commande les mouvements de l'avion, ce qui ferme la boucle d'asservissement. On voit

donc la nécessité de bien suivre les indications du FD, le pilote n'étant plus qu'un élément dans la résolution des équations de la mécanique du vol.

- Elle peut être entièrement prise en compte manuellement par le pilote. Dans ce cas elle utilise un modèle mental MM permettant au pilote de résoudre directement les équations par combinaison (1) des perceptions visuelles des paramètres clés du PFD, Θ , VC et sa flèche de tendance, Z et sa Vz, (2) des sensations manuelles de pression sur le manche, (3) des perceptions manuelles de position des leviers de poussée, (4) des informations visuelles de poussée (EPR) données par l'ECAM, (5) le tout utilisé en boucles fermées BF d'asservissement. L'objectif est de stabiliser une vitesse VC sélectionnée à une altitude stabilisée sélectionnée. Cette procédure est utilisée depuis l'origine de l'aviation et enseignée comme basique en école de pilotage. Quel est le modèle MM correspondant ? Ce qui suit est le résultat d'années d'observation de centaines de pilotes, le plus souvent en formation.

De façon résumée la vitesse VC et son accélération (flèche jaune de tendance) sont surtout dépendantes de la poussée et de l'assiette Θ ; la vitesse verticale Vz est surtout dépendante de Θ et de la poussée ; Vz donne une bonne indication qualitative d'une approche stabilisée de l'altitude visée Z. Et l'ensemble de ces 6 paramètres est lié par la mécanique du vol. Il faut donc les traiter simultanément, avec les actions manuelles en découlant, dosées sur le manche et les leviers de poussée, en boucles fermées.

Les localisations visuelles sont sur le PFD : l'échelle des vitesses VC, celle de Θ sur l'horizon artificiel, l'échelle des Z et l'indication de Vz qui y est accolée ; sur l'ECAM, à environ 20 cm du PFD, se trouvent les cadrans d'EPR (poussée). Les informations du PFD sont utilisées à deux fins : vérification des résultats des actions lancées et prise en compte des nouvelles indications pour lancer les suivantes. Le canal visuel étant unique le balayage visuel entre tous les paramètres du PFD et ceux de l'ECAM est permanent. En fait la consultation des paramètres de poussée est moins fréquente que celle des paramètres du PFD car les ajustements normaux de poussée ont des répercussions relativement plus lentes que les autres (sauf s'ils sont de grande amplitude, ce qui n'est pas nécessaire si la manœuvre est conduite de façon continue).

Deux caractéristiques particulières de cette fonction cognitive FC sont à noter :

- la manœuvre correcte nécessite son « calcul », se jouant sur la mémoire court terme Mct car elle est rapide et continue, d'après l'ensemble des perceptions visuelles et tactiles. Bien qu'elle soit apprise et stockée en mémoire, son modèle mental MM ne peut être qu'un « schéma » car chaque nouvelle interception d'altitude possède ses particularités. Il oblige la fonction FC qui l'utilise à « essayer » de façon probabiliste des « dosages » d'actions de commande en fonction de la meilleure analyse des paramètres lus et utilisés en confrontation avec les expériences passées, et à rajuster ces actions en fonction des résultats observés.

- ce calcul oblige à des ajustements constants des actions à lancer d'après les résultats observés, donc à une lecture consciente des paramètres clés puisqu'il s'agit d'actions en boucle fermée. La fonction FC utilise donc son modèle MM de façon opportuniste en décidant la captation de la valeur du paramètre lui paraissant le plus pertinent pour l'ajustement décidé dans la manœuvre globale, avec un balayage visuel répondant à cet opportunisme. Ainsi la partie consciente de la FC est partagée sur la Mct en séquences rapides de traitements des 6 paramètres visuels, laissant successivement chacun d'eux en « automatique » sur la Mct lorsque le balayage passe sur un autre. On peut donc

avoir au sein de la même fonction FC des parties pouvant passer en automatique alors que l'ensemble de la FC fonctionne apparemment de façon consciente.

Action manuelle sur le manche d'amplitude importante pour rattraper la barre horizontale du directeur de vol FD.

Balayage visuel du PFD : il s'effectue entre la partie centrale (l'horizon artificiel et la barre du FD) et l'échelle de VC, l'altitude Z ayant été probablement observée en vision périphérique en tant que variant en montée rapide. Mais l'accélération longitudinale rapide vers la limitation de vitesse VFE volets sur 3 amène à considérer l'échelle des VC comme information immédiatement primordiale dont l'exploitation nécessite une réduction de poussée.

En conséquence les leviers de poussée placés sur le cran CLB devraient initier la réduction de vitesse, mais malheureusement cette action est insuffisante du fait de la valeur élevée de la vitesse objectif automatiquement sélectionné, donc l'accélération se poursuit jusqu'à la limite VFE avec probablement un dépassement temporaire. Le modèle MM associé au fonctionnement des sélections de modes de poussée par les leviers et les automatismes n'est pas exploité, car après la manœuvre sur CLB l'absence d'action sur les leviers de poussée montre que la gestion de la poussée passe en boucle ouverte BO, la partie consciente de AG1 étant orientée sur l'observation de l'échelle de vitesse. Cette incohérence apparente est prise en compte par AP1.

- **FC2 : pilotage en cap** : l'assiette latérale étant maintenue nulle, le cap n'évolue pas. La surveillance du cap est donc inutile, d'autant plus qu'une variation de quelques degrés est sans importance.

- **AG5** : pas d'information.

Pour le **PNF** : Il a probablement annoncé les informations ALT* et LVR CLB lues sur la partie supérieure du PFD (FMA, indication des modes automatiques du FD et de la poussée).

Séquence 4 : poursuite de la diminution d'assiette Θ (5 sec)

A- description de la situation :

La diminution de l'assiette Θ est rapide et sa commande pilotée reste à la diminution. La variation d'altitude diminue mais vers une altitude de stabilisation bien inférieure aux 1 700 ft sélectionnés.

La poussée n'ayant pas fortement diminué l'accélération longitudinale reste importante et malgré la diminution de la pente de montée la composante longitudinale d'accélération donne une impression de montée continue.

La barre horizontale du directeur de vol FD est passée de la position basse à la position haute, demandant ainsi une reprise de la montée vers l'altitude sélectionnée.

Le PF continue de commander une diminution de Θ .

La vitesse VC atteignant sa limite VFE volets en position 3, le PF demande le positionnement directement sur 1 (ou exactement 1+F ce qui est équivalent, c'est-à-dire volets en position 1 et becs de bord d'attaque sortis) exécuté par le PNF.

Noter que la fonction automatique de poussée réduit la poussée à l'atteinte de VFE, probablement vers le plein réduit compte tenu de la forte diminution de Vz.

B– action normale souhaitée :

Le positionnement des volets sur 1 (1+F) est correct.

La reprise du contrôle de la situation aurait imposé simultanément le suivi en Θ de la barre du FD pour continuer la montée interrompue, et la réduction de la poussée, c'est-à-dire en plaçant les leviers en arrière du cran CLB de façon à ajuster la vitesse VC ou en sélectionnant une vitesse inférieure à G DOT au panneau de sélection FCU.

C – action effectuée :

Le balayage visuel privilégie l'échelle de vitesse VC avec une certaine focalisation de l'attention. Ainsi le passage de la barre du FD de la position basse à la position haute (pour indiquer la nécessité de reprendre la montée) est soit passé inaperçu, même en vision périphérique, soit considéré incompréhensible compte tenu du faux diagnostic du dépassement de l'altitude sélectionnée. Si l'échelle d'altitude Z est visionnée ce n'est que de façon fugitive en ne retenant que sa variation encore vers la montée.

Le retrait direct des volets vers 1 (1+F) est correct.

D – actions cognitives élémentaires :

Pour le **PF** :

- **AP1** : Trois hypothèses.

Les 2 premières sont celles du rédacteur.

1 - La durée importante de l'arrêt du balayage visuel sur l'échelle de vitesse VC n'a pas permis d'observer le passage vers le haut de la barre du directeur de vol FD. L'analyse de la situation est donc confuse car non conforme au modèle clé, le modèle MM normal : un regard vers l'horizon artificiel HA ne permet pas de retrouver la barre du FD où elle était située d'après la mémoire court terme Mct (elle est désormais en haut et non en bas).

2 - Ou la barre est bien vue en position haute mais on n'en tient pas compte car cela n'est pas conforme au diagnostic.

Cependant cette incohérence est perçue par AP2 et se traduit par une préoccupation diminuant la capacité de traitement conscient de la situation.

Dans les 2 cas on n'enregistre pas que l'assiette Θ diminue fortement ; les variations de vitesse soumises aux effets inverses de la réduction automatique de poussée à l'arrivée sur la limitation VFE et à la forte diminution de vitesse verticale Vz sont difficilement analysables; l'analyse tronquée des informations visuelles ne menant à aucun diagnostic cohérent on s'en remet « en dernier ressort » aux (fausses) informations corporelles montrant qu'on est toujours en montée. Cependant aucun balayage visuel conscient vers l'échelle des altitudes Z n'est commandé (car l'évidence s'imposerait), probablement par focalisation sur la vitesse.

Finalement ce dernier diagnostic est retenu : on est encore en montée.

Les variations d'assiette sont très importantes, ce qui semble montrer une mauvaise formation initiale (sous l'effet du stress, on revient aux comportements initiaux même si on les a corrigés par la suite).

- **AG1** : l'objectif majeur devient le contrôle de la vitesse, tout en continuant de diminuer la pente.

En revanche le pilotage en tangage a pour objectif de réduire l'assiette apparente en ignorant le directeur de vol FD et l'assiette réelle.

En mécanique du vol les variations de vitesse dépendent de plusieurs paramètres :

- la poussée,

- la traînée aérodynamique,

- la pente de la trajectoire (dont la vitesse verticale V_z est le reflet).

Visiblement le PF a oublié ce dernier paramètre.

- **FC1 : pilotage en tangage** : double objectif.

La perte apparente du FD et/ou la fausse incohérence observée amènent le désintérêt pour l'horizon, et on exploite l'impression de pente continue de montée. D'où la commande persistante de diminution de Θ , le pilotage en tangage ayant pour objectif de réduire l'assiette apparente. En revanche l'arrivée rapide sur la visible limitation de vitesse VFE déclenche une focalisation visuelle sur l'échelle de VC et la demande correcte de diminution rapide du braquage des volets. La vision périphérique n'est plus exploitée. Le partage de l'attention ne fonctionne plus. L'échelle d'altitude Z est ignorée en mode conscient.

3 – Cette hypothèse est proposée par deux experts de façon non concertée.

Il y a toujours focalisation sur l'échelle de vitesse mais le bandeau rouge et noir de limitation des vitesses VFE (lié à la position des volets) apparaissant au sommet de cette échelle quand la vitesse augmente pourrait être interprété alors comme une injonction à diminuer l'altitude qu'on pense avoir dépassé, ou à diminuer l'assiette ce qui va dans le même sens. Ainsi il y aurait transposition de l'idée de ces diminutions sur celle de diminution de la vitesse sur la même échelle, celle des vitesses, mais en gérant le tout non avec une commande de vitesse (leviers de poussée) mais avec le manche commandant la diminution d'assiette/altitude. Cela signifierait qu'il y aurait mélange d'interprétation des perceptions visuelles avec un modèle mental MM altéré par une erreur d'assimilation de la présentation de la limitation en position haute de la vitesse VFE à une altitude ou à une assiette à décroître impérativement. Ce serait une perte de conscience de situation (avec une présentation très ergonomique normalement sans ambiguïté sur le PFD) par mélange erroné d'interprétation des perceptions visuelles sous stress, par intuition erronée forcée par la présentation sur l'échelle des vitesses ?

- **AG1** : l'objectif majeur devient le contrôle d'une « diminution » (de la vitesse, de l'altitude, de l'assiette, de leur mélange ?).

Le pilotage en tangage a pour objectif de réduire à la fois la vitesse et l'altitude sur la même échelle des vitesses, par action sur le manche, ce qui crée une confusion inévitable car vitesse et assiette/altitude varient en sens inverse. On ignore l'assiette réelle Θ en ignorant le directeur de vol FD et l'horizon immédiatement à côté.

- la **FC1, pilotage en tangage**, n'utilisant que les informations de l'échelle des vitesses avec un modèle mental MM restreint à la correspondance position du manche/ assiette longitudinale est forcément incohérente et inadaptée.

- **FC2 : pilotage en cap** : Le cap n'est pas surveillé.

-**AP2** : la recherche d'une cohérence prend la presque totalité de l'attention mentale et ne laisse pas de place à une recherche de solution sur la mémoire court terme Mct.

- **AG5** : demande de la position 1 (1+F) au PNF.

Pour le **PNF** : positionnement des volets et annonce au PF.

Séquence 5 : confusion (3 sec)

A – description de la situation :

La variation en montée de l'altitude diminue et cette dernière passe par son maximum de 1 220 ft. L'assiette Θ passe par 0 sans qu'on s'en aperçoive. Malgré cela la poussée est augmentée vers le maximum continu (cran FLEX/MCT). Il y a apparition du message « LVR CLB » clignotant sur le FMA du PFD pour rappeler que les leviers doivent être positionnés sur une poussée moindre. Ce message doit être lu et rappelé au PF par le PNF (l'est-il ? on n'a pas l'enregistrement des conversations).

La vitesse continue d'augmenter, mais la limitation de VC est repoussée vers celle de la configuration 1 (1+F) des volets, le bandeau rouge disparaissant.

B – action effectuée :

Les manœuvres souhaitées sont celles de la séquence précédente.

C – action effectuée :

La focalisation sur l'indication de vitesse, mal interprétée, a éliminé tout autre élément de la mémoire à court terme Mct (*ne pas confondre avec la poussée MCT, Maximum continue thrust*). Il y a saturation de la partie consciente (stress ?) qui, d'après les actions observées, ne propose aucune action pertinente. Le balayage visuel conscient ne semble pas fonctionner. Le mouvement des leviers de poussée en augmentation aberrante de poussée est un signe de cette confusion.

Il pourrait être provoqué en réaction soit à l'observation d'une variation de la vitesse en diminution lors de la réduction automatique de poussée au passage de VFE (volet sur 3), soit à la conscience des moteurs sur ralenti pour la même raison.

D– actions cognitives élémentaires :

Pour le **PF** :

- **AP2** : perçoit une incohérence de la situation sans en donner d'explication.

- **AP1** : admet l'incohérence mais est incapable d'exploiter les perceptions ni de récupérer dans la mémoire long terme Mlt un modèle MM adapté, ni d'en concevoir un nouveau (stress ?). La focalisation sur l'échelle des vitesses a éliminé les autres informations de la mémoire court terme Mct. Le passage des leviers de poussée sur le cran FLEX/MCT est un geste automatique, dicté par une observation, soit de la vitesse, soit du ralenti des moteurs, mais déconnectée du contexte réel.

Cependant la disparition du bandeau rouge et noir de limitation de vitesse VFE par le nouveau positionnement des volets sur 1 devrait retirer la tendance mentionnée dans l'hypothèse 3 de la séquence précédente, à prendre l'échelle des vitesses comme référence à « diminuer ». Ce qui ne semble pas être le cas.

Pour le **PNF** : annonce le message « LVR CLB » apparu sur le FMA.

Séquence 6 : essai de récupération (7 sec)

A : – description de la situation :

La descente inconsciente est débutée avec une assiette Θ devenant négative. La vitesse augmente et l'accélération longitudinale donne à nouveau une fausse impression de montée (partie II du schéma de trajectoire).

La rentrée des volets a provisoirement enlevé la limitation de vitesse.

B– action normale souhaitée :

Les manœuvres souhaitées sont celles des 2 séquences précédentes.

C – action effectuée :

La saturation mentale est installée avec focalisation sur l'échelle de vitesse. Un simple regard sur l'horizon du PFD, à moins de 4 cm, aurait décelé la position immanquable du secteur coloré en brun des assiettes Θ négatives, donc aurait signalé le danger immédiat. Le plus extraordinaire est l'absence de réaction du PNF pendant cette amorce de descente rapide probablement occupé à vérifier les messages de positionnement des volets et à comprendre pourquoi est apparu le message « LVR CLB ».

D – actions cognitives élémentaires :

Pour le **PF** :

- **AP1** : Aucun balayage visuel conscient n'est demandé laissant ainsi la situation se détériorer par manque d'information traitée de façon consciente. Il est important de constater qu'aucune action inconsciente ou automatique de correction de situation n'est activée.

La vitesse augmentant rapidement avec la rentrée automatique des volets au passage de VFE (1+F) cela débloque la conscience qu'il faut la diminuer et surtout, avec réapparition du modèle MM de contrôle de poussée (l'influence de la pente est toujours

ignorée), qu'il y a urgence à réduire à fond les leviers de poussé, à les positionner sur « Idle » (plein réduit).

Séquence 7 : début de réduction de vitesse (2 sec)

A– description de la situation :

La poussée est finalement réduite, mais sans que la descente soit arrêtée. L'altitude est de 970 ft en diminution.

B – action normale souhaitée :

Il serait nécessaire d'accompagner cette réduction d'une ressource immédiate pour arrêter la descente et regagner de l'altitude.

C– action effectuée :

Pour le **PF** :

les ressources mentales conscientes fonctionnent en s'accommodant des incohérences de la situation et sans abandonner le faux diagnostic initial, par effet tunnel sur cette erreur et sans pouvoir l'abandonner alors qu'il suffirait de quitter visuellement de quelques cm l'échelle de vitesse, sur laquelle il y a focalisation avec le champ de vision focal de 3° (c'est-à-dire sur le PFD un cercle de 3 cm de diamètre) avec exclusion des perceptions périphériques, pour immédiatement avoir tous les éléments cohérents de la situation, surtout la position très inhabituelle du secteur coloré d'assiettes □ négatives de l'horizon montrant un trajectoire très rapidement descendante.

Pour le **PNF** :

ses tâches de surveillance des messages du PFD, de maniement des volets et des rapports qui y sont rattachés ne lui ont pas fait suivre les péripéties du vol (tout cela n'a duré que 20 sec), mais la vue de l'emballement du PFD l'alerte.

Par vision périphérique ou directe, il voit (d'après le rapport) sur la droite et au-delà de l'obscurité des lumières de la côte, et perçoit alors la situation anormale et dangereuse de descente. Il réagit et demande fermement au PF de remonter immédiatement.

D – actions cognitives élémentaires :

Voir séquence précédente.

Séquence 8 : ressource (4 sec)

A – description de la situation :

L'alarme EGPWS auditive d'approche rapide du sol résonne en demandant une ressource immédiate. L'altitude est d'environ 800 ft, l'assiette Θ est de $-9,5^\circ$, la vitesse verticale est $-4\ 000$ ft/min (la poursuite aurait causé la catastrophe 12 sec plus tard).

Pratiquement en même temps le PNF demande la remontée.

Il n'est pas exclu que ce soit le PNF qui aurait initié la ressource.

Le PF met les leviers de poussée sur TOGA et débute la ressource avec un facteur de charge de 1,3 (1,3 fois l'accélération g de la pesanteur).

Cependant la poussée étant forte et la ressource insuffisante, la limitation VFE volets 1+F est dépassée de 10 kt avec l'alarme sonore correspondante.

La hauteur minimum au cours de la ressource est 600 ft.

B– action normale souhaitée :

La manœuvre est correcte mais cependant le facteur de charge est insuffisant, bien qu'assurant une bonne marge avec la mer, car l'accélération longitudinale est encore importante.

C et D – action effectuée et actions cognitives élémentaires :

Pour les deux dernières séquences l'analyse cognitive séparée n'offre pas d'intérêt.

Mais cette séquence est intéressante car pour le PF l'alarme EGPWS associée à la demande ferme du PNF de remonter immédiatement est un évènement inattendu associé à un danger immédiat.

Alors que dans les 20 sec précédentes il avait fait un faux diagnostic à la suite d'une fausse intuition, suivi d'un effet tunnel sur l'erreur aggravée par une focalisation, le tout ayant amené la saturation de son mode conscient, cette fois-ci il réagit correctement et immédiatement, utilisant de façon appropriée les bons modèles mentaux MM stockés dans sa mémoire long terme Mlt.

Etait-ce une action mentale automatique ?

Ce type de réaction aux alarmes auditives du système de sécurité EGPWS est enseigné au simulateur de vol et rappelé en séances de recyclage et d'entretien.

En cas d'alerte « Pull up » le pilote est tenu de tirer au maximum sur le manche, les protections automatiques empêchant l'avion d'atteindre des facteurs de charge dangereux pour la structure.

Cependant le fait qu'il ne tire pas suffisamment sur le manche pour avoir le facteur de charge maximum et qu'il laisse ainsi à nouveau « échapper » la vitesse pourrait indiquer que l'initiation de la récupération est plutôt en mode réflexe (appris en formation) pas très conscient.

Autre explication : les pilotes de ligne n'ont pas l'habitude des facteurs de charge importants ce qui expliquerait la résistance « à tirer trop fort ». On a aussi vu qu'il n'est pas exclu que ce soit le PNF qui aurait initié la ressource.

Peut-être l'agent AP2, vigilance et détection d'incohérence du PF, avait-il mis en attente active l'AP1 à toutes fins utiles, ce dernier s'étant immédiatement recalé sur la réalité en utilisant un modèle MM basé sur une action réflexe apprise et stockée en mémoire long terme Mlt?

Séquence 9 : fin de récupération (9 sec)

A : – description de la situation :

La ressource est poursuivie avec une augmentation du facteur de charge, à 1,9 jusqu'à l'extinction de l'alarme.

B– action normale souhaitée :

Action correcte.

C et D – action effectuée et actions cognitives élémentaires :

L'alarme sonore de VFE semble avoir définitivement placé le PF en mode d'actions conscientes. L'augmentation du facteur de charge montre qu'il a à nouveau intégré la nécessité de piloter Θ en tangage comme paramètre de contrôle de la vitesse à poussée constante.

Suite du vol

La suite du vol s'est déroulée correctement et sans problème, après cette perte de contrôle d'environ 20 sec. L'équipage a donc récupéré toutes ses facultés opérationnelles.

Cependant les pilotes ont demandé une suspension temporaire de leurs tâches (mise en repos).

2 – A321 – incident : arrêt décollage

Interruption du décollage après la vitesse limite autorisée, due à la dérive des tâches hors de celles prescrites suite à la crainte d'une collision aviaire.

2.A – Résumé du cas

(extrait du compte-rendu de la compagnie)

ATTENTION : ce Résumé est en totalité extrait d'un rapport officiel et sert de base à l'analyse du chapitre suivant 2.B

Scénario

Il pleut sur l'aérodrome. Des travaux au seuil de la piste en service ne permettent pas de l'utiliser sur toute sa longueur. Le décollage est effectué en « rolling take off » (*sans arrêt d'alignement au début de l'accélération*) et en pleine poussée depuis la bretelle 'D'. Pendant la phase d'accélération l'équipage aperçoit des oiseaux en train de s'envoler au dessus de la piste devant l'avion. Un bruit d'impact est entendu dans le cockpit. Le Commandant de bord initie un arrêt décollage. L'avion s'immobilise sur la bretelle A.

Analyse

Ce vol est le dernier tronçon d'une rotation matinale de quatre étapes. Le Commandant de bord, est instructeur mais n'a pas de tâche d'instruction sur le vol. Le copilote est aux commandes (PF). Les pilotes sont tous deux habitués à la desserte du terrain. Les conditions de vent, l'infrastructure, les instructions du contrôle et les limitations de décollage calculées par l'équipage autorisent un décollage en piste 20. L'ATIS écouté par l'équipage, tant à l'arrivée qu'au départ, ne mentionne pas la présence d'oiseaux.

La pluie est intense pendant le temps d'escale au point que l'équipage envisage un calcul des limitations de décollage en « piste contaminée » (*c'est-à-dire une piste couverte de pluie, de neige ou de verglas*). A la fin de l'embarquement, la pluie diminue. Un décollage en pleine poussée est alors décidé avec des paramètres de décollage établis pour une piste « mouillée » et une composante de vent arrière de 5 KT. Des travaux en cours au seuil de la piste 20 neutralisent les 265 premiers mètres de la piste et nécessitent un alignement au niveau de la bretelle « D ». Pour le calcul des performances décollage, l'équipage a deux options: utiliser la documentation disponible à bord dans les classeurs qui présentent des performances calculée pour un décollage depuis la bretelle « C » ou celle disponible dans le Chapitre 5e vol avec des performances tenant compte des travaux établis pour un décollage depuis la bretelle « D ». L'équipage a été surpris de découvrir que les performances de décollage présentes à bord étaient plus pénalisantes que celles tenant compte des travaux. L'équipage décide d'utiliser les performances les plus pénalisantes, avec une composante de vent arrière de 5 kt, tout en prévoyant de décoller au niveau de la bretelle D pour disposer de la plus grande longueur de piste.

Après une attente sur la bretelle D, l'alignement est effectué à partir de cette dernière et un rolling take off est initié. L'accélération est forte (près de 6 kt/s). Le commandant de bord et

l'OPL (*OPL : Officier pilote, copilote*) ont aperçu des goélands qui s'envolent au dessus de la piste vers la trajectoire de l'avion. La vitesse augmente rapidement.

La CAS (*CAS : Calibrated airspeed, VC*) étant enregistrée une fois par seconde, les CAS indiquées ci-dessous, correspondent au CAS enregistrées dans la seconde où se sont produits les événements enregistrés par le CVR (*Cockpit voice recorder, enregistreur audio du cockpit*).

Les éléments ci-dessous ont été reconstitués par les experts du BEA.

A 12 h 01 min 01,3 s :	Bruit similaire à un mouvement de manettes
A 12 h 01 min 04.9 s :	OPL : « MAN TOGA SRS ATHR bleu »
A 12 h 01 min 06.9 s :	CDB: "Vérifié" ...
A 12 h 01 min 15.9 s :	CDB: "Cent noeuds". La CAS est alors de 109 kt. ...
A 12 h 01 min 17.6 s :	OPL : « On continue ». La CAS est de 119 kt.
A 12 h 01 min 18.9 s :	CDB : « On continue ouais ». La CAS est de 125 kt.

Le bruit d'impact et l'annonce par le CDB (*ou Cdb, Commandant de bord*) « V1 » se font dans la même seconde à 12 h 01 min 21 s. Compte tenu de l'échantillonnage de l'enregistreur de paramètres il n'est pas possible de leur faire correspondre une CAS. Néanmoins, on peut dire que le bruit d'impact et l'annonce V1 correspondent à une CAS comprise entre 134 et 138 kt soit entre V1 + 8 kt et V1 + 12kt.

A partir de 12 h 01 min 22 s, l'action sur les freins, l'annonce « Stop », et la réduction de poussée se sont déroulées dans la même seconde. Il est difficile de déterminer exactement cette séquence d'initiation de l'arrêt du décollage compte tenu toujours de l'échantillonnage de l'enregistreur. La CAS pendant cette seconde est alors comprise entre 138 et 143 kt. L'action sur les freins semble toutefois se produire juste avant l'annonce et la réduction de poussée. Elle entraîne un désarmement de l'autobrake (*système de freinage automatique, enclenché par la réduction des leviers de poussée, permettant l'efficacité maximale de freinage*).

La réduction des manettes de poussée, le déverrouillage des réverses, la sortie automatique des spoilers et la pleine poussée réverses sont obtenus dans les 3 secondes suivant la première action sur les freins. Le freinage obtenu à travers les pédales de freins est tout d'abord irrégulier. La position angulaire des pédales varie entre 54 et 78 sur une échelle allant de 0 à 78. L'application continue du freinage maximum (78) n'est observée que 8 secondes après de début de la manœuvre d'arrêt. Il est maintenu ensuite jusqu'à une vitesse sol de 30 kt.

La décélération enregistrée est en moyenne de 0,28 g. ce qui correspond à un freinage supérieur à une position de freinage à l'atterrissage « Medium » de l'autobrake. Un début de virage vers la droite est enregistré à 60 kt et pendant le reste de la décélération. L'avion quitte la ligne centrale vers la bretelle de dégagement 'A' située à l'extrémité de la piste. L'accélération latérale maximale pendant le virage est de 0,25g. La pleine poussée reverse est maintenue jusqu'à une vitesse sol d'environ 10 kt.

2.B – Analyse

2.B.1 – Choix des séquences

Les durées des séquences sont tirées du compte-rendu et sont précises à +/- 0,5 à 1sec.

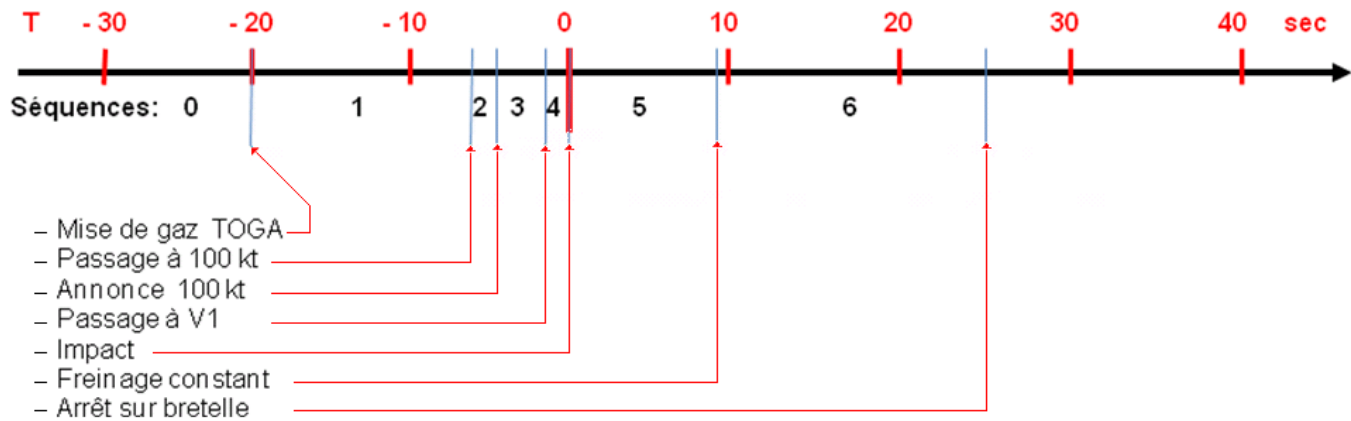


Figure 21 : Séquencement du cas n°2

2.B.2 – Analyse chronologique des séquences

Les séquences 0 à 5 ont été proposées à la cotation des experts (voir Chapitre 6).

Séquence 0 : alignement au décollage

A : description de la situation

Il fait jour et la visibilité est bonne. Il a plu.

Le copilote est le PF et le CDB est PNF.

Le briefing « avant décollage » au sein de l'équipage a été effectué, sans qu'on sache si la présence possible d'oiseaux sur la piste ait été évoquée. Cependant le rapport d'incident mentionne que cette présence aurait été détectée par l'équipage après le début de l'accélération.

L'alignement se fait sans arrêt préalable aligné sur la piste, en « rolling Take-off », procédure admise.

La piste est fortement mouillée, le vent est arrière de force 5 kt, et les paramètres de décollage en tiennent compte, avec en cas d'arrêt une longueur de freinage plus longue qu'avec piste sèche et un vent nul.

L'alignement s'effectue en roulant, moteurs près du ralenti.

B : action normale souhaitée

Avec une piste fortement mouillée il est recommandé de s'arrêter aligné avant le début d'accélération.

C : actions effectuées

Le PF dirige l'avion de la bretelle d'accès au centre de la piste.
Le PNF surveille la manœuvre.

D : actions cognitives élémentaires

Pour le **PF** copilote :

AP1 : l'objectif est l'alignement de l'avion au centre de la piste. Délègue aux agents AG1 (pilotage) et AG2 (surveillance extérieure) en action coordonnée.

AG1 et AG2 ensemble :

- **FC10 : contrôle de l'avion au roulement.** Utilisation du MM correspondant. Pieds sur le palonnier, main droite sur le volant de commande en direction au sol de la roue avant, main gauche sur les leviers de poussée, il coordonne en BF (Boucle fermée) les mouvements avec la vision extérieure de la piste, de la bande jaune tracée au sol montrant la trajectoire à suivre, dosant la poussée et le taux de virage de façon à ne pas dépasser la vitesse de 15 kt afin de ne pas déraper sur le sol mouillé. Balayage visuel sur la piste, sur la GS (Ground speed, vitesse sol) du ND (partie supérieure gauche), éventuellement sur les indicateurs de poussée de l'ECAM. La fin de la manœuvre est l'alignement au centre de la piste.

AP2 : mise en mémoire de travail MT des procédures de décollage et d'arrêt en urgence.

Pour le **PNF** :

AP1 : surveillance du mouvement de l'avion et de la piste vis-à-vis d'obstacles éventuels.

AP2 : mise en mémoire MT des procédures de décollage et d'arrêt en urgence.

AG5 : annonce le décollage à l'ATC et au PF.

Séquence 1 : accélération jusqu'à 100 kt (13,5 sec)

A : description de la situation

Accélération sans problème avec la poussée maximale (TOGA) et non la poussée réduite classique (FLEX Take-off) du fait de la longueur réduite de la piste (travaux) et de son état mouillé.

Des oiseaux (goélands) sont vus s'envolant au-dessus de la piste devant l'avion par les 2 pilotes.

B : action normale souhaitée

Procédure normale.

La procédure normale de la compagnie est la suivante :

- *La mise de gaz TOGA est effectuée par le PF. Cependant si celui-ci est le copilote la conduite de la poussée reste de la responsabilité du commandant de bord CDB même si ce dernier est PNF, compte-tenu des éventuelles conséquences d'une décision prise dans un instant critique. Ainsi, dès la mise en poussée annoncée par le PNF, le copilote PF retire sa main gauche des leviers de poussée et se consacre entièrement à la seule conduite de la trajectoire de l'avion. Le CDB PNF place alors sa main droite sur les leviers de poussée, prêt à les réduire en cas de nécessité.*
- *Les alarmes sont inhibées dans l'exécution de la check-list avant décollage de façon à ne pas perturber une prise de décision par une panne mineure. Seules les alarmes de pannes pouvant mettre en cause le vol sont maintenues jusqu'à 100 kt, vitesse où un arrêt ne présente pas de risque.*
- *Le PF se consacre à la surveillance extérieure de la trajectoire sur piste, de son maintien au centre, de la détection de tout obstacle ou anomalie extérieurs, avec un balayage visuel à l'extérieur sur la piste vers l'avant, ainsi que de temps en temps à l'intérieur sur l'échelle des vitesses du PFD, et avec de brefs contrôles des indicateurs de poussée sur l'ECAM.*
- *La tâche du PNF est la surveillance interne de la bonne marche des systèmes et la détection de toute anomalie ou panne, et l'annonce au PF de tout message apparaissant sur le FMA.*

C : action effectuée

Mise de gaz TOGA par le PF, qui retire sa main des leviers de poussée lorsque la poussée est établie après 3 à 4 sec.

Le PNF place sa main droite sur les leviers et annonce les messages apparus sur le FMA :

- MAN : vol sans automatisme,
- TOGA : poussée établie,
- SRS : « Speed reference system » armé, en attente après la rotation d'envol.
- ATHR bleu : Autothrust armé, en attente.

Le SRS donne, au cours de la rotation de décollage, l'assiette Θ à respecter pour un décollage sûr par le positionnement de la barre horizontale de l'horizon artificiel du PFD.

A la mise de gaz le PF retire sa main droite du volant de commande de la roue avant et la pose sur le manche auquel il imprime un déplacement vers l'avant jusqu'au passage d'environ 80 kt, puis le garde au neutre. Il contrôle la position de l'avion sur l'axe de la piste à l'aide du palonnier, ce qui est aisé avec une poussée symétrique et en l'absence de vent de travers.

Le PNF contrôle par balayage visuel le Primary flight display PFD pour l'accélération observée sur l'échelle des vitesses, et les paramètres de poussée sur l'ECAM. Il annonce « poussée établie (ou disponible) » au PF. Normalement il n'a pas à s'inquiéter de l'extérieur dont la surveillance est dévolue au PF, mais étant le CDB et donc ayant la responsabilité de la sécurité de l'avion, il surveille aussi l'extérieur compte tenu de la menace aviaire décelée pendant l'accélération, ce qui l'amène à ne pas détecter immédiatement le passage à 100 kt. Une autre hypothèse avancée par un expert est que cette surveillance du passage de la vitesse à 100 kt, destinée à confirmer la cohérence des indications sur les deux PFD Cdb et

copilote, est fréquemment effectuée avec retard car non immédiatement essentielle à la sécurité du roulage.

D : actions cognitives élémentaires

Pour le **PF** : après l'établissement de la poussée.

AP1 : l'objectif primaire est le décollage, donc la poursuite des séquences prévues et mémorisées en mémoire long terme Mlt. L'agent AG1 est l'acteur primaire.

AP2 : cependant la probabilité d'une interruption est une préoccupation.

AG1 et AG2 en coordination : contrôle de la trajectoire de l'avion par vision extérieure.

- **FC11 (contrôle de l'accélération et du maintien de l'axe)** : utilisation du modèle mental MM correspondant stocké en Mlt. Prise en compte manuelle du manche, et contrôle latéral par petites impulsions sur le palonnier avec balayage visuel de l'extérieur, de l'échelle de vitesse sur le PFD, et des indicateurs de poussée sur l'ECAM le tout en boucle fermée BF. Cependant la mise en mémoire de la présence des oiseaux laisse encore plus privilégier la vision extérieure vis-à-vis des autres paramètres.

Pour le **PNF** :

AP1 : l'objectif primaire de décollage avec la tâche de surveillance des paramètres internes est altéré par **AP2** avec le sentiment d'une probabilité élevée d'une collision avec des oiseaux, et de sa responsabilité de décision de commandant de bord CDB dans un tel cas.

AG1 : c'est la partie passive du contrôle de pilotage par surveillance des paramètres clés de vitesse et de poussée, ce qui lui permet avec

AG5, d'annoncer « poussée disponible (ou établie) » vers 70 kt.

Mais AP2 a intellectuellement armé la possible décision d'interrompre le décollage. Sous son influence la tâche primaire :

- **FC12 : de surveillance interne** est remplie de façon fréquemment interrompue et placée alors en mode mental automatique ;

AG2 : surveillance extérieure activée par AP2 ; AG1 et AG2 se partagent la capacité cognitive consciente et donc la mémoire court terme Mct en alternance, avec un balayage visuel de grande amplitude entre le PFD, la vision extérieure et éventuellement l'ECAM. Ce qui laisse passer de 1,5 sec la détection immédiate de l'étape « 100 kt » et son annonce. Ou qui néglige de l'annoncer avec précision en temps.

Séquence 2 : délai d'annonce de 100 kt (1,5 sec)

A : description de la situation

L'accélération se poursuit avec la détection tardive de 100 kt et son annonce à 109 kt. On peut noter la valeur élevée de l'accélération (0,32 g) et la nécessité d'une grande vigilance associée à des réactions rapides car 1,5 sec n'est pas un délai important en soi.

B : action normale souhaitée

Le fait d'avoir eu ce retard dans l'annonce aurait dû faire prendre conscience de la nécessité d'une attention accrue pour ne pas manquer la vitesse V1 compte tenu du danger potentiel.

C : action effectuée

Apparemment la prééminence de la vision externe persiste pour les 2 pilotes.

D : actions cognitives élémentaires

Pour le **PF** : Idem séquence 1.

Pour le **PNF** :

AP2 : l'accélération importante amène rapidement l'avion vers l'endroit où les oiseaux ont été vus, ce qui donne une augmentation de la vigilance vis-à-vis de tout signe témoignant d'un problème en relation avec eux. Une interruption de décollage à l'extrême limite de vitesse V1 est une action que redoute tout pilote même s'il y a été entraîné.

Séquence 3 : accélération vers V1 (3,5 sec)

A : description de la situation

Poursuite de l'accélération.

B : action normale souhaitée

Procédure normale.

A l'annonce de « 100 kt » par le PNF le PF doit annoncer la vitesse qu'il lit sur sa propre échelle des vitesses afin de détecter un désaccord éventuel entre les 2 indicateurs.

Alors le CDB précise que l'accélération est poursuivie par l'annonce « on continue ».

Entre 100 kt et V1 on ne considère que 3 motifs d'arrêt compte tenu des dangers d'une interruption à grande vitesse : une perte significative de poussée détectée par l'observation des instruments moteurs sur l'ECAM (la vitesse de rotation N1), une alarme « feu », ou la certitude de ne pas pouvoir se maintenir en vol (problème structural).

V1 est la plus grande vitesse où l'on peut encore interrompre le décollage, mais au-delà de laquelle on ne peut que continuer et décoller. Pour éviter toute tendance à s'arrêter au-delà, le CDB doit retirer sa main des leviers à l'annonce « V1 ».

La répartition des tâches est inchangée : PF en charge du pilotage, la poussée restant à son maximum sélectionné, PNF surveillant les instruments.

C : action effectuée

L'annonce « 100 kt » est faite par le PNF CDB avec 1,5 sec et 9 kt de retard. Cependant le PF n'y fait pas réponse. Au lieu de cela 1,7 sec plus tard il interroge « on continue ? », ce que le CDB aurait dû préciser. Ce dernier « se réveille » et répond « on continue, oui ». Il semble y avoir là une inattention du PNF vis-à-vis de sa tâche primaire et un doute du PF sur la poursuite du décollage, ou au moins une demande de confirmation. L'approche de V1 avec la possibilité d'un danger aviaire provoque une préoccupation altérant le processus conscient normal (stress ?). Cette préoccupation conduit le PNF à surveiller l'extérieur en plus du contrôle de ses instruments. Il est probable que le PF a vu les oiseaux assez proches et s'en inquiète.

D : actions cognitives élémentaires

La répartition des rôles des agents et fonctions cognitives des 2 pilotes est la même que dans la séquence 2, avec cependant le sentiment de la probabilité augmentant d'une collision aviaire, et d'un arrêt décollage comme conséquence. Cela se traduit cognitivement

- pour le **CDB/PNF** par l'intuition qu'il lui faudra agir peut-être aussi tard que V1. Et il s'y prépare.

- **AP1** : l'objectif est toujours de décoller, mais sous l'influence d'AP2 un autre objectif jusqu'à présent latent s'y surimpose : réussir l'interruption de décollage si elle devenait nécessaire. Désormais il y a probablement délégation à 3 agents :

- **AG1**, avec la tâche normale de surveillance des paramètres internes,

- **AG2**, avec la surveillance extérieure de la possibilité d'une collision aviaire,

- **AGx**, avec la mémorisation des actions à effectuer en cas d'incident à V1, peut-être avec une sorte de simulation mentale pouvant remonter au briefing avant décollage.

Ces 3 agents se partagent en séquences la partie consciente du processeur opérationnel PO, c'est-à-dire sa capacité mentale, mais avec AG2 et AGx y prenant le plus de place. Les paramètres lus par AG1, la vitesse en particulier, sont placés dans la Mct mais probablement pas de façon prioritaire.

Séquence 4 : dépassement de V1 (1,5 sec)

A : description de la situation

V1 est dépassée sans annonce.

B : action normale souhaitée

Voir séquence 3.

C : action effectuée

Dépassement de V1 de 10 kt et de 1,6 sec.

La surveillance extérieure par le PNF et sa préparation mentale à l'imminence d'un possible danger, utilisent une part importante de sa capacité cognitive consciente. Le balayage visuel

interne en découlant lui fait soit détecter une vitesse supérieure à V1 sur son échelle de vitesse, soit lui a fait détecter V1 en temps voulu mais l'information a été placée en mémoire court terme Mct. Il prend alors conscience de l'annonce différée.

D : actions cognitives élémentaires

Idem « D » de la séquence précédente avec pour le CDB l'armement inconscient d'une réaction à un incident possible prête à s'extérioriser au moindre signe. Cet armement, un modèle mental passé de la mémoire de travail MT à la mémoire court terme Mct et provoqué par une intuition forte, ne peut s'effacer que si un signe probable de l'évènement redouté n'a pas lieu, s'il n'est pas utilisé. En revanche son effacement n'est pas instantané car trop intense.

Séquence 5 : impact, décision d'arrêt, lancement des actions (9 sec)

A : description de la situation

Il s'agit d'un enchaînement d'actions.

Dans un intervalle de 0,5 sec il y a successivement l'impact d'un oiseau sur le moteur droit puis l'annonce « V1 » par le PNF CDB, puis dans la seconde suivante le début du freinage, l'annonce « stop » par lui, la réduction des leviers de poussée et leur passage en position de réversion de poussée maximale, établie en 3 sec.

A l'impact la vitesse avait dépassé V1 de 10 kt environ, donc n'autorisait plus l'arrêt sur la piste.

Lors de la réduction de poussée aucun dommage moteur n'a été recherché ou n'aurait pu être constaté si les instruments moteurs avaient été consultés.

L'action rapide de freinage sur les pédales a immédiatement déconnecté le freinage automatique armé avant la mise de gaz. Désormais seul le freinage aux pédales est possible. Normalement il doit s'effectuer pédales enfoncées à fond. Cependant pendant les premières secondes elles n'étaient enfoncées qu'entre 70 et 100%, pour se stabiliser sur 100% 8 sec après le début des actions.

Le copilote, désormais PNF, annonce l'interruption du décollage à l'ATC.

B : action normale souhaitée

Le décollage aurait dû se poursuivre et les dégâts causés par l'impact de l'oiseau n'auraient pas amené des problèmes sérieux.

C : action effectuée

Les actions observées signifient que le pilotage de l'avion est entièrement passé au CDB qui devient alors PF, le copilote devenant PNF et prenant à sa charge les annonces vers la tour de contrôle, l'ATC.

Leur observation permet d'en traduire plusieurs choses :

- l'annonce de V1 0,5 sec après le bruit de l'impact peut signifier soit que le CDB ait attendu ce dernier pour enfin annoncer V1, ce qui semble improbable, soit que le bruit ait « réveillé » la perception de V1 gardée inconsciemment en mémoire court terme Mct, soit que l'annonce de V1 tardive pour quelque raison que ce soit était « lancée » indépendamment du bruit, en coïncidence ;
- le début des actions d'arrêt 1 sec après semble accréditer la dernière hypothèse ;
- on peut se demander si le CDB avait conscience de l'importance du danger de débiter l'arrêt à plus de 10 kt au-dessus de V1. Il faut d'abord se poser la question : avait-il vraiment conscience de l'écart de vitesse ? Si oui il aurait fait une impasse de joueur en tablant sur des marges cachées de calcul de V1. Ou bien le danger d'un tel écart était moins important pour lui que se trouver en vol avec une grande probabilité d'importants dégâts. S'il n'avait pas conscience de l'écart de vitesse cela ne pouvait être dû qu'à l'inhibition de cette limite de V1 par la mise en place mentale du processus d'arrêt. On prend cette dernière hypothèse comme la plus probable :
- le bruit d'impact a été le déclencheur des actions, annihilant toute décision basée sur la procédure enseignée, c'est-à-dire continuer le vol car il était normalement trop tard pour s'arrêter ;
- la décision soudaine était basée sur l'intuition que si un signe quelconque survenait, bruit par exemple, cela signifiait l'évidence d'une collision aviaire ;
- le lancement des actions simultanément ou presque avec la décision elle-même traduit le déclenchement d'un « scénario » cognitivement préparé. Cependant ce scénario d'urgence ne correspond pas exactement à ce qu'il aurait dû être : le CDB n'utilise pas l'efficace freinage automatique. Ou bien il l'oublie dans le feu de l'action et il revient en mémoire dans ses débuts de formation aux arrêts-décollages où le freinage automatique n'existait pas. Ou bien il ne fait pas confiance à l'automatisme compte-tenu du dépassement de V1 et préfère agir lui-même en freinage direct. Les hésitations du début amènent à préférer la première hypothèse, avec peut-être à l'instant du début de pression sur les pédales le sentiment qu'il aurait dû laisser agir l'automatisme (d'où les hésitations sur l'enfoncement des pédales), mais c'était trop tard.

D : actions cognitives élémentaires

Pour le **CDB devenu PF** :

Dans le paragraphe « C » on a évoqué plusieurs combinaisons de scénarios possibles. L'acteur majeur était évidemment son processeur opérationnel conscient PO décidant sur intuition le processus d'arrêt et l'exécutant. Il n'y a pas qu'un scénario possible, mais on va suivre celui semblant le plus probable.

PO : on reprend l'analyse de la séquence 3 avec une situation s'étant transformée à l'approche rapide de V1 :

AP1 : l'objectif est moins de décoller, mais de se préparer à ce qui semble inévitable : réussir l'interruption de décollage si elle devenait nécessaire.

AP2 : en attente d'un « signe » d'anomalie.

Il y a toujours délégation à 3 agents :

- **AG1**, avec la tâche normale de surveillance des paramètres internes,
- **AG2**, avec la surveillance extérieure de la possibilité d'une collision aviaire,

- **AGx**, avec la mémorisation des actions à effectuer en cas d'incident à V1, peut-être avec une sorte de simulation mentale.

Ces 3 agents se partagent en séquences la partie consciente du processeur opérationnel PO, c'est-à-dire sa capacité mentale, avec AG2 et de plus en plus avec AGx, qui y prennent le plus de place. Les paramètres lus par AG1, la vitesse en particulier, sont placés dans la mémoire court terme Mct mais probablement pas de façon prioritaire.

En fait, entre le passage à V1 et son annonce il ne s'est passé que 2 sec, mais avec une accélération inhabituelle car la grande partie des décollages normaux s'effectuent à poussée réduite (FLEX Take-off) pour économiser les moteurs. L'utilisation de la poussée TOGA était exceptionnelle et due à la neutralisation du début de la piste pour travaux et à son état mouillé. Et dans ces 2 sec le dépassement en vitesse a été de 13 kt (*cela pour insister sur la nécessité d'un suivi rapide et précis par les pilotes des paramètres primordiaux pour la sécurité*).

Au bruit de l'impact la situation était la suivante :

- **AG5** : le séquençage avec les 2 autres agents AGx et AG1 autorise enfin l'annonce en mémoire court terme Mct de V1. Cependant, alors que cette annonce est «cognitivement lancée », ½ sec avant sa formulation orale il y a perception du bruit d'impact, mais trop tard pour l'annuler.

- Le **PO** immédiatement diagnostique par intuition « en attente » la collision aviaire et décide de passer les actions à **AGx (arrêt d'urgence)**.

- **AGx** : dans la seconde qui suit la fonction cognitive en attente est lancée :

- **FCx** : **procédure d'arrêt** : utilise un bloc de MM retiré des mémoires long terme Mlt ou mis en attente dans la mémoire de travail MT suite au briefing avant décollage.

- début de freinage : enfoncement des pédales (intempestif mais probablement dû à la persistance mnémotique des enseignements antérieurs à l'utilisation de l'A321) ce qui enlève l'automatisme de freinage de façon involontaire,

- annonce de la manœuvre par AG5 avec l'annonce vocale « Stop » ; remarquer le retard de AG5 de ½ sec sur le lancement de l'action alors que l'annonce aurait dû arriver simultanément ou très légèrement avant. Ceci est à rapprocher de l'annonce retardée de V1 et pourrait signifier que le processus cognitif d'annonce vocale prend plus de temps que celui des actions corporelles.

- actions manuelles avec réduction des leviers de poussée (la main droite était déjà sur les leviers) et passage en réversion maximum d'un seul mouvement.

- la main gauche est placée en attente sur le volant de commande de la roue avant.

- **AG1** : reprise après le lancement de l'arrêt-décollage :

Découvre que la manœuvre lancée de freinage, conforme à un MM appris mais ancien, ne correspond pas à celle apprise pour le type d'avion présent utilisant le freinage d'urgence automatique. Après quelques secondes d'hésitation se traduisant par un enfoncement irrégulier des pédales, il réalise qu'il est trop tard pour changer et il enfonce à fond les pédales de façon permanente. Cette hésitation pourrait aussi correspondre à la recherche d'une position corporelle adaptée à la situation inhabituelle de positionnement des pieds (sur le haut des pédales ou en position normale ?), que le freinage automatique ait été ou non oublié.

Utilisation du palonnier pour rester au centre de la piste.

- **AG2** : surveillance de la piste pour rester au centre et pour évaluer le point d'arrêt.

Pour le **copilote devenu PNF** :

- **AG1** : surveillance des paramètres moteurs et de la régression de vitesse.
- **AG5** : annonce de la décision d'arrêt à l'ATC ;

Annonce au PF des positions des réverses, des paramètres moteurs correspondants, des vitesses.

Séquence 6 : freinage et arrêt (16 sec)

A : description de la situation

Le freinage est stabilisé à 100%. Pour éviter la fin de la piste, le virage vers la bretelle de dégagement est débuté à 60 kt, toujours en freinant et avec les moteurs en réverses maximales. C'est le début de la séquence d'évitement de la fin de la piste. L'arrêt s'effectue sur la bretelle.

Les dégâts observés plus tard sur le moteur droit sont minimes.

B : action normale souhaitée

Correct.

C : action effectuée

Le fait que l'avion ne dépasse pas la limite de la piste est dû à plusieurs facteurs favorables : l'action des réverses, utilisées ici à leur maximum de bout en bout, n'est pas prise en compte dans le calcul des limitations d'arrêt décollage ; l'avion a dégagé avec une vitesse non négligeable vers la bretelle de dégagement ; les réactions du CDB ont été très rapides.

Durée de l'incident :

De la mise de gaz à l'arrêt l'incident a duré 45 sec dont environ 30 sec d'activité cognitive intense

3 – Concorde – incident en approche

Atterrissage dans des conditions extrêmes, dans un phénomène météorologique dangereux alors inconnu, suite à la décision de ne pas utiliser toutes les aides à l'atterrissage disponibles.

3.A – Résumé du cas

(compte-rendu)

ATTENTION : ce Résumé est tiré du compte-rendu d'un acteur principal et sert de base à l'analyse du Chapitre suivant.

Circonstances

Mission spéciale prioritaire.

Concorde prototype.

Equipage de conduite : 2 pilotes d'essais PF/CDB et PNF, 1 mécanicien navigant d'essais MNE.

Vol supersonique d'Orly à la destination. Terrain de déroutement possible mais éloigné et sans l'accueil technique nécessaire.

Prévision d'orages à l'arrivée en milieu d'après-midi.

Lors de la descente observation d'une cellule orageuse sur l'île de destination. Les conditions de visibilité et de plafond donnés par le contrôle sont supérieures à celles que l'équipage s'est fixé pour ce vol car l'avion prototype n'a pas encore fait l'objet d'essais particuliers d'approche automatique en conditions limites.

Décision en équipage de continuer avec des conditions se détériorant lentement. Décision prise d'effectuer une approche ILS en pilotage manuel, mais l'ILS du terrain n'étant pas homologué pour des minima faibles de visibilité elle sera aussi guidée par GCA, à l'aide de directives données par un contrôleur radar au sol, précisant toute déviation par rapport à la trajectoire idéale (procédure militaire connue des 2 pilotes).

Trois minutes avant l'approche finale les conditions de vol se détériorent soudain : pluie intense et obscurité mais sans turbulence. Les conditions météorologiques sur piste données par le contrôle (plafond 200 ft, visibilité 500 m sous pluie, vent faible) sont proches des minima fixés par l'équipage.

L'approche est débutée sans problème, tous paramètres stabilisés. Vers l'altitude de 1000 ft il y a incohérence entre les indications du GCA, celles de l'ILS et les paramètres de vol stabilisés. L'avion paraît suivre une trajectoire en dessous la pente normale de descente et l'écart observé augmente rapidement. Le PF croit surtout en ses paramètres stabilisés et soupçonne des fausses indications du GCA et une imprécision de l'ILS. Le PNF ayant la tâche de la surveillance des paramètres de vol observe une homogénéité entre les indications du GCA et celles de l'ILS, alors que les paramètres avion sont corrects, avec une vitesse verticale constante, mais amenant l'avion sous la pente normale. Il en déduit que l'avion est réellement sous la pente normale, ce que le PF a déjà débuté de corriger, et à

500 ft d'altitude (au-dessus du niveau de la mer) le PNF intervient de façon verbale mais ferme pour demander au PF une correction rapide vers le plan de descente, ce que fait immédiatement ce dernier en augmentant l'assiette longitudinale et la poussée des moteurs. Les hauteurs au-dessus du sol lues sur le radioaltimètre « bondissent » de 500 ft à 100ft lorsque l'avion passe du dessus de la mer au dessus de la côte très proche de la piste. A la hauteur de décision la correction est presque totale, la rampe d'approche est vue, l'avion est exactement sur l'axe, mais la piste non balisée sur son axe central n'apparaît que peu de temps avant la hauteur d'arrondi. L'atterrissage est ferme, pratiquement sur le tout début de la piste. La visibilité sur la piste inondée est d'environ 150 m. Le freinage est effectué à son maximum, sans hydroplanage. L'avion arrive à l'aire de réception sous un véritable déluge.

Analyse

Le terrain, en bordure de côte, n'ayant pas de système d'approche pour de faibles visibilitées la décision de combiner ILS et GCA était judicieuse, ce qui a permis un diagnostic correct de la déviation de pente.

Cette déviation survenant de façon rapide et inattendue alors que l'approche avait débutée sans turbulence et tous paramètres stabilisés a déconcerté l'équipage. Le PF, qui avait décidé de ne prendre en compte que les indications du GCA, a eu alors tendance à croire que les indications extérieures étaient erronées. Le PNF a diagnostiqué le danger et la coopération en équipage a jouée efficacement, le résultat n'ayant été qu'un incident. Les circonstances de la mission imposaient un certain dépassement des limites normales de visibilité et de hauteur de décision (pour une remise de gaz), que pouvait se permettre un équipage entraîné d'essais en vol. Une remise de gaz aurait sérieusement compromis le déroulement de cette mission.

Le dangereux phénomène atmosphérique rencontré était peu connu à l'époque : « down-draft » ou cisaillement de vent, intervenant sous des orages violents. Il est dû à la descente au sein du cumulonimbus d'une colonne d'air froid se répandant tout autour sur le sol et engendrant ainsi d'importantes variations dans l'intensité et la direction des vents. Ce phénomène a été mieux connu à la suite de nombreuses catastrophes aériennes avec des avions de transport subsoniques, plusieurs années après cet incident. Les caractéristiques particulières du Concorde avec sa grande réserve de poussée à l'atterrissage et son contrôle précis de pilotage ont permis une récupération à temps, cependant sans que l'équipage ait eu conscience du phénomène réel.

3.B – Analyse

3.B.1 – Choix des séquences

Les durées des séquences sont évaluées à +/- 5 sec, sauf les séquences 5 et 6 à +/- 1sec.

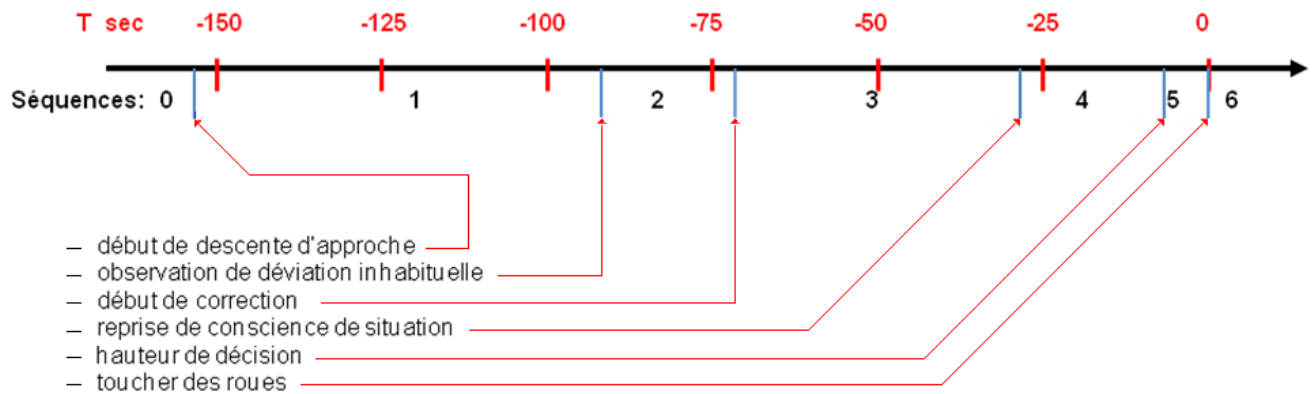


Figure 22 : Séquencement du cas n°3

3.B.2 – Analyse chronologique des séquences

Les séquences 0 à 6 ont été proposées à la cotation des experts (voir Chapitre 6).

Remarque sur l'équipage de conduite

Il était composé de 2 pilotes d'essais expérimentaux et d'un mécanicien navigant d'essais. Tous trois connaissaient très bien leur avion et en maîtrisaient ses caractéristiques. Ils étaient habitués à travailler ensemble et avaient une confiance mutuelle dans leurs capacités professionnelles.

L'une de leurs caractéristiques professionnelles, celle de la profession des essais en vol, est une capacité de réaction rapide à toute nouvelle situation, basée sur leur diagnostic de la situation et sur l'urgence décelée. Les réactions de type réflexe automatique leur sont rares : leur grande rapidité de réaction est basée sur leur faculté d'analyse rapide duale, celle de la situation **et** celle de l'urgence d'une réaction. Si le temps leur est accordé ils privilégient la première pour en déduire la seconde. En revanche si la deuxième prévaut ils agissent suivant des plans d'actions « de sécurité » stockés en mémoire suivant des schémas (des modèles mentaux MM) prioritaires.

Séquence 0 : début d'approche

A : description de la situation

L'avion est entré dans la partie basse du cumulo-nimbus. La visibilité est nulle, obscurité comme dans la nuit. La pluie est intense et le bruit très fort. L'avion est préparé pour l'atterrissage : le nez est baissé, le train est sorti, les essuie-glaces fonctionnent, les phares d'atterrissage sont allumés.

L'équipage a effectué son briefing d'avant-atterrissage : le PF commandant de bord est à gauche et a choisi de guider manuellement l'avion en vol aux instruments basiques sans directeur de vol, la vitesse VC sélectionnée au panneau FCU étant pilotée par la commande

automatique de poussée (ATHR). L'altitude est de 2000 ft au réglage altimétrique donné par l'ATC.

L'avion est autorisé à atterrir et est seul dans le circuit. Les conditions météo annoncées sur la piste sont : plafond 200 ft sous la pluie, Visibilité 500 m, vent faible.

Il est sous contrôle radar et le guidage final au GCA est accepté. La raison de cette acceptation était la précision inconnue de l'ILS du terrain.

GCA, Ground controled approach : guidage radar précis à partir du sol par un contrôleur donnant des ordres au PF pour rester sur l'axe d'approche finale, dans l'alignement de la piste et sur une pente de descente de 3° ; ces ordres sont donnés verbalement sous la forme de corrections à apporter en distances verticales en pieds (feet) et en degrés de cap par rapport à l'axe ; ce guidage précis était classique chez les militaires, mais le résultat dépendait beaucoup de l'habileté du pilote.

Les instruments du Concorde étaient électromécaniques et disposés sur les tableaux pilotes (voir photo) avec, contrairement aux présentations sur écrans d'aujourd'hui, des cadrans différents pour chacun des paramètres, la vitesse VC, l'altitude Z, le cap, la vitesse verticale Vz, l'incidence α (paramètre particulier à Concorde), les paramètres des 4 moteurs. L'horizon artificiel, bien qu'électromécanique, était très précis en assiette longitudinale Θ et portait toutes les informations paramétriques qu'on trouve aujourd'hui sur les PFD modernes, en particulier les écarts par rapport à l'axe ILS. Le pilotage de l'avion était très précis et confortable.



Figure 23 : Tableau de bord d'avion de série – celui du prototype était très proches

Etonnamment la turbulence est très faible.

Le GCA prend en compte l'avion après avoir vérifié cap et altitude avec le PNF.

B : actions normales souhaitées

Ce sont celles décrites en A, avec la stabilisation de la vitesse d'approche avant le début de descente

VC = 160 kt avec une incidence α de 14°.

Les 2 récepteurs ILS PF et PNF sont réglés sur la fréquence de l'ILS du terrain dont la réception est vérifiée.

Le réglage altimétrique QNH donné par l'ATC est ajusté sur les altimètres PF et PNF. Ainsi ces instruments donnent l'altitude l'avion au-dessus de la mer, celle de la piste étant de 160 ft.

Ayant décidé en équipage de poursuivre avant une remise des gaz jusqu'à une hauteur au-dessus du sol de 100 ft si le plafond venait à descendre au cours de l'approche, l'altitude de décision est réglée à 100 + 160 = 260 ft. Ceci sachant que le radioaltimètre ne sera éventuellement utilisable que pour l'arrondi avant le toucher des roues, le relief variant avant la piste de 0 à 55 m (160 ft) en environ 10 sec de vol.

C : actions effectuées

Ce sont celles décrites en B. Les tâches ont été définies au cours du briefing : le PF exécute une approche manuelle aux instruments basiques sous le contrôle du GCA ; le PNF contrôle l'ensemble des paramètres de vol et d'approche et assure les liaisons radio ; il regardera à l'extérieur avant l'altitude de décision pour apercevoir la piste et l'annoncer pour que le PF assure l'arrondi et l'atterrissage ; le mécanicien navigant MNE surveille les moteurs et les systèmes et annonce pour information les radioaltitudes lues en-dessous de 100 ft.

D : actions cognitives élémentaires

Elles sont gérées par les agents classiques de pilotage.

Cependant, eu égard à l'importance de la mission et à sa difficulté finale, l'AP2 de chacun des pilotes est en vigilance accrue. Alors que leur AP1 de gestion du pilotage fonctionne à un niveau de capacité maximal correct.

Séquence 1 : début de descente (63 sec)

A : description de la situation

Le GCA a annoncé l'ordre de début de descente et a précisé « ne répondez plus à mes instructions » ce qui signifie que les pilotes se concentrent uniquement sur les ordres reçus et les appliquent. Cette instruction coïncide avec la prise du « Glide » de l'ILS sur l'horizon artificiel HA, montrant la coïncidence des indications GCA et ILS donc l'identité des plans de descente du GCA et de l'ILS. La vitesse de 160 kt a été sélectionnée sur le panneau FCU et

est stabilisée par la commande automatique de poussée ATHR, ce qui donne une incidence de vol de 14° montrée sur l'indicateur d'incidence placé près du HA.

Le PF prend un angle de descente de 3°, ce qui donne une assiette longitudinale Θ de 11° lue sur le HA, et place son index sur 11°.

La relation de mécanique du vol est, en absence de vent, ou dans le système 3 du Chapitre 2 (Evolutions dans le système atmosphérique) :

Θ assiette longitudinale = α incidence + γ pente de trajectoire(ici négative)

Soit dans le cas présent : $11^\circ = 14^\circ - 3^\circ$

L'incidence était maintenue constante par la vitesse stabilisée VC. Mais le pilotage sur le plan de descente imposait de petites variations de Θ (de l'ordre de quelques 1/10^{èmes} de degré) autour d'une valeur moyenne élevée. Pour obtenir cette précision en pilotage manuel le pilote pouvait placer un index spécial très précisément sur l'échelle des Θ du HA.

L'absence annoncée de vent notable et l'absence de turbulence laissent prévoir une approche parfaitement stabilisée malgré la pluie en déluge.

Les instruments des moteurs montrent leur indifférence à l'eau ainsi absorbée.

Les 30 premières secondes sont pilotées avec précision et le GCA ne demande que de faibles corrections en cap (de l'ordre du degré) et en pente (des écarts de l'ordre de +/- 10 ft).

Puis, alors que les paramètres de vol sont parfaitement stabilisés le GCA mentionne des écarts augmentant vers une position de l'avion sous le plan normal de descente : 20ft, puis 30 ft, demandant de revenir sur ce plan de descente.

Simultanément sur le HA l'indicateur ILS de Glide montre une position passant sous le plan normal ILS, vers 1 point sous la pente normale, (environ 0,5°)

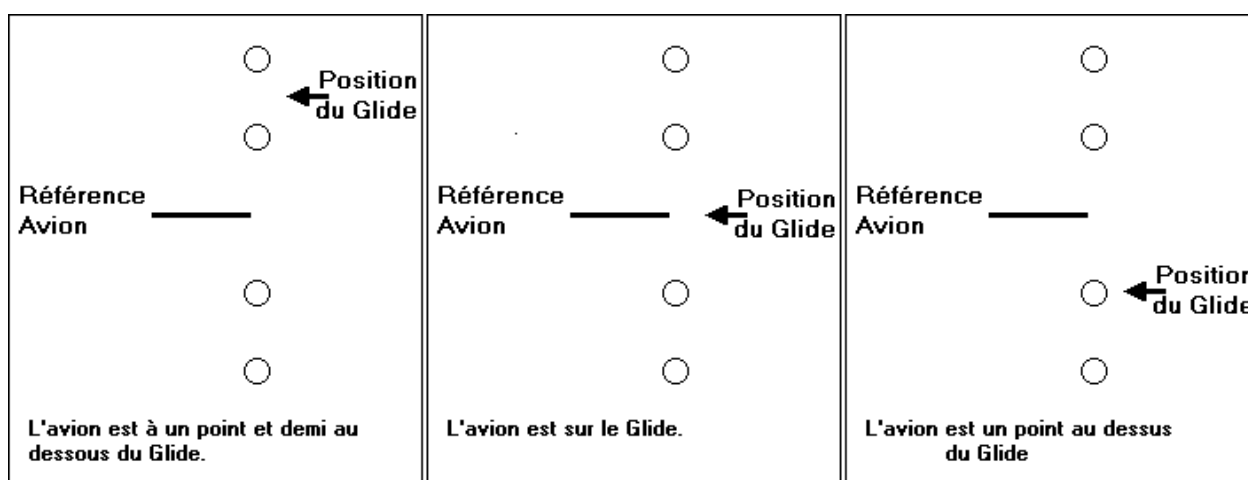


Figure 24 : Exemples de positions de l'avion par rapport au Glide

B : action normale souhaitée

La procédure normale est d'obéir aux instructions du GCA, quels que soient les paramètres de vol.

C : action effectuée

Les 30 premières secondes ont permis au PF de parfaitement stabiliser son approche, ce qui lui permet de penser que cette situation se prolongera tout au long de la descente. Il maîtrise ses paramètres de vol à l'aide de très faibles corrections de l'assiette Θ . Le cap ne bouge pratiquement pas. La vitesse verticale V_z est de 800 ft/min. L'annonce par le GCA d'une augmentation des écarts de trajectoire vers le bas est mise sur le compte de son imprécision. Le PF ignore les indications ILS ainsi qu'il en avait décidé au départ de l'approche.

Le PNF observe la cohérence des écarts lus sur l'échelle ILS du HA avec ceux annoncés par le GCA. Cependant la précision du pilotage et le maintien des paramètres clés ne l'incitent pas encore à abandonner l'idée que l'approche est parfaite.

D : actions cognitives élémentaires

Pour le **PF** :

AP1 : l'objectif est l'atterrissage et la concentration est maximale sur la précision du pilotage en fonction des indications du GCA.

- **FC1, pilotage longitudinal** : il y a balayage visuel entre l'assiette longitudinale Θ sur le HA, la vitesse VC sur l'indicateur de vitesse, la vitesse verticale V_z sur son indicateur. Dès le début de l'approche on a appliqué la relation $\Theta = \alpha - \gamma$. L'incidence α et la vitesse VC ont été vérifiées stables et Θ est le paramètre clé de travail en fonction des indications d'écarts linéaires (xx ft) du GCA qu'on interprète en $1/10^{\text{èmes}}$ de degrés de corrections de Θ , d'après le modèle mental MM d'approches GCA. Ces corrections sont transmises au manche sous forme de pressions de la main gauche. La main droite est sur les leviers de poussée, en attente dans le cas où l'automatisme se déconnecterait. Noter que FC1 coordonne en boucle fermée BF les perceptions visuelles et les perceptions auditives avec le résultat observé conforme à la mécanique du vol. L'objectif de FC1 est de maintenir les indications du GCA sur 0 d'écart.

Après environ 40 sec le GCA annonce une augmentation de l'écart en-dessous du plan de descente. L'avion étant stable et les paramètres inchangés, une correction classique de faible amplitude est effectuée.

- **FC2, pilotage en cap** : il ya balayage visuel sur l'indicateur de cap. Les écarts donnés par le GCA en degrés sont corrigés par de légères inclinaisons en roulis imprimées sur le manche par la main gauche. Les corrections en cap étant moins fréquentes que celles en longitudinal et l'avion étant stable en mouvement latéral, FC2 passe fréquemment en mode automatique inconscient.

AG5 et AG6, communications internes et externes : fonctionnent en réception, avec l'équipage et avec le GCA.

AP2 : la vigilance est maximale compte tenu de l'importance de la mission.

Pour le **PNF** :

AP1 : contrôle de l'ensemble des instruments de vol et des instruments moteurs. Ces derniers ne montrent aucun signe de problème dû à l'ingestion d'eau. Contrôle de la configuration d'atterrissage. Les essuie-glaces fonctionnent correctement. Le train d'atterrissage est en position basse. Le nez est sur la position d'atterrissage et les phares d'atterrissage sont sur marche. La fréquence et le bon fonctionnement de l'ILS sont vérifiés. Rapport en est donné au PF.

Contrôle du suivi du vol.

- **FC1 et FC2** : suivi des indications du GCA et des corrections exercées par le PF. Cependant en parallèle on observe la corrélation entre les indications GCA et celles données par l'ILS. Cette corrélation est bonne et en faveur de la fiabilité de l'ILS.

AG5 : l'ensemble des paramètres étant stables il n'y a pas lieu de rapporter le faible décalage du Glide, le PF étant attentif à suivre les indications du GCA.

Pour le **MNE**, mécanicien navigant :

Surveillance étroite de tous les systèmes, des moteurs en particulier.

Séquence 2, prise de conscience d'une situation inhabituelle (20 sec)

A : description de la situation

La trajectoire de l'avion paraissant stabilisée le GCA indique des écarts croissants en dessous du plan de descente, les corrections normales d'assiette longitudinale n'étant pas suffisantes pour revenir sur ce plan. L'écart Glide de l'ILS croît de façon identique.

Il n'y a pas de turbulence et le cap est stable.

Le GCA indique des écarts allant au-delà de 50 ft et demande de remonter vers le plan de descente. L'ILS montre un écart approchant de 2 points sous le plan.

La vitesse verticale Vz, stabilisée en début d'approche sur 800 ft/min en descente (taux normal) reste stable.

B : action normale souhaitée

La procédure normale est de revenir vers le plan de descente. Comme il reste environ 1000 ft de descente la correction peut se faire sans urgence en conditions normales.

C : action effectuée

Aucune perturbation sensible n'ayant été perçue par l'équipage la tendance est de penser que le guidage du GCA manque un peu de précision, mais on a le temps d'agir. Cependant l'attention augmente car la tendance des écarts à augmenter devient préoccupante.

D : actions cognitives élémentaires

Pour le **PF** et le **PNF** les agents AP1, AG1, AG5 et AG6 fonctionnent de façon identique à la séquence précédente. Cependant leurs **AP2** sont en vigilance accrue.

Séquence 3, prise de conscience de l'anomalie (43 sec)

A : description de la situation

Au passage à l'altitude de 1000 ft, l'écart est toujours de 50 ft avec une tendance à augmenter, et approche de 2 points d'ILS, la vitesse verticale V_z est toujours autour de 800 ft/min, vitesse VC et incidence α stables, assiette Θ autour de 11 à 12° avec les corrections. Cependant désormais il devient important de corriger l'écart qui ne semble plus venir d'une erreur du GCA, le PNF annonçant les écarts concomitants de l'ILS. Θ est doucement amené vers 13° ce qui arrête la progression négative des écarts et commence à les diminuer, suivant l'injonction pressante du GCA qui, avec l'annonce d'écarts diminuant, signale « vous vous rapprochez du plan de descente, continuez à corriger ».

En fait, beaucoup plus tard lorsque dans le monde aéronautique le phénomène météorologique a été reconnu et analysé après avoir causé plusieurs accidents, on a réalisé que Concorde s'est trouvé dans le phénomène de « down draft » causé par le cumulo-nimbus, ce qui a permis d'estimer les perturbations rencontrées et d'expliquer a posteriori le comportement inhabituel de l'avion dans une situation inconnue alors.

B : action normale souhaitée

La manœuvre requise alors est une augmentation rapide d'assiette longitudinale Θ avec augmentation de poussée pour éviter de perdre de la vitesse. Dans le cas présent le contrôle automatique de la poussée ATHR prenait en compte cette dernière nécessité.

« Down-draft »

Dans l'évolution d'un cumulo-nimbus la phase succédant à la montée de l'air est celle de sa retombée avec les précipitations, en s'étalant sur le sol. Ainsi un avion se déplaçant au travers de cette colonne d'air rencontre d'abord un fort vent de face, puis une zone de calme et enfin un fort vent arrière. Ce phénomène a causé de nombreux accidents.

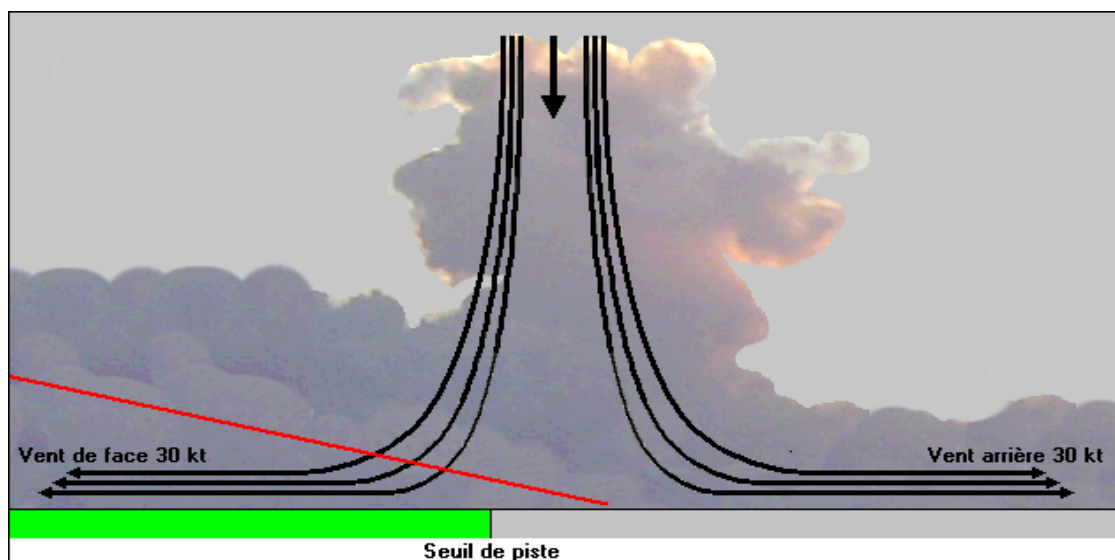


Figure 25 : Schéma du profil d'un « down-draft »

Dans le cas traité il est probable que Concorde s'est trouvé dans la zone repérée par la ligne rouge sur le schéma avec un vent de face pendant l'approche et que l'atterrissage s'est effectué dans la zone de calme puisque la tour de contrôle ne signalait qu'un vent faible. Cette alternance rapide de vitesse cause d'importantes et dangereuses perturbations de trajectoire.

Un calcul basé sur les paramètres observés montre que l'intensité moyenne de ce vent subi était de l'ordre de 30 kt (15 m/sec). Ce vent n'avait pas de composante transversale car les écarts en cap signalés par le GCA et l'ILS étaient très faibles.

L'explication du phénomène de Down-draft nécessite de faire appel au Principe d'Inertie de la Mécanique Rationnelle et ne relève pas du simple bon sens.

Suivant ce Principe, lorsqu'un mobile est soumis à des forces dont la résultante est nulle, il se déplace à vitesse constante par rapport au sol, la Terre constituant un système d'axes fixes dit système absolu (le Principe d'Inertie ne s'applique que dans un système absolu). C'est le cas de l'avion volant en palier avec une portance aérodynamique équilibrant le poids et une poussée des moteurs équilibrant la traînée aérodynamique.

Si en revanche la poussée des moteurs est supérieure à la traînée aérodynamique le déséquilibre provoque une accélération le long de la trajectoire et la vitesse sol augmente. Si la portance est inférieure au poids, le déséquilibre courbe la trajectoire vers le bas. Attention, il s'agit bien d'une courbure de la trajectoire et non d'une chute de l'avion, comme on le lit souvent dans la presse non spécialisée !

La vitesse de l'avion par rapport à l'air est la vitesse dite relative (la masse d'air constitue un système d'axes relatif se déplaçant par rapport au sol avec une vitesse, dite vitesse d'entraînement, égale à la vitesse du vent).

La vitesse par rapport au sol (vitesse absolue) est donnée par la loi de composition des vitesses

Vitesse absolue = Vitesse relative + Vitesse d'entraînement

Vitesse sol = Vitesse air + Vent

Ainsi vers le milieu de l'approche la vitesse par rapport à l'air étant de 160 kt et la vitesse du vent de 30 kt de face (vitesse d'entraînement de – 30 kt) la vitesse sol n'est que de 130 kt. (au voisinage du sol la vitesse conventionnelle VC et la vitesse aérodynamique sont sensiblement égales).

Supposons, pour simplifier le raisonnement, que l'avion vole en palier et que la vitesse du vent chute brutalement à zéro. La vitesse absolue, c'est-à-dire la vitesse sol n'en est pas instantanément modifiée puisque les forces agissant sur l'avion sont inchangées. Ainsi la vitesse par rapport à l'air s'en trouve-t-elle modifiée et réduite à 130 kt. La force de portance fonction du carré de la vitesse s'en trouve réduite dans le rapport de 130/160 au carré, soit sensiblement 0,66.

L'équilibre poids / portance est rompu et la force résultante, poids – portance, incurve la trajectoire vers le bas. La pente vers le bas augmente. Pour maintenir l'avion sur l'axe

d'approche le pilote doit compenser la perte de portance due à la chute de la vitesse aérodynamique par une augmentation d'incidence (donc d'assiette) pour rétablir l'équilibre poids / portance.

Bien entendu le phénomène réel est plus complexe, puisque l'avion est en descente, que l'équilibre poussée / traînée est également modifié par la diminution de vitesse et par le contrôle automatique de la poussée ATHR et que la chute de vitesse du vent est progressive, rapide mais non instantanée. Mais sa description exacte nécessiterait des développements mathématiques hors de propos ici.

Retenons que l'évolution d'un vent passant de vent de face à vent arrière se traduit par un déséquilibre poids/portance nécessitant une augmentation d'assiette de la part du pilote sous peine de voir la trajectoire dangereusement courbée vers le sol.

Ainsi le maintien de l'assiette (donc de l'incidence) qui assurait une trajectoire correcte sur le glide en début de descente s'est traduit, lorsque le vent de face a faibli, par une excursion sous le glide avant que l'équipage ne prenne conscience de la situation.

C : action effectuée

Le PF et le PNF ont du mal à réaliser ce qui se passe. Cette brutale descente au-dessous du plan de 3° alors que tout était parfaitement stabilisé, en dehors du problème de diagnostic de la cause exacte pose celui du diagnostic de la situation. L'accentuation apparente de la descente devrait pour eux s'accompagner d'une augmentation de la vitesse verticale Vz, ce qui n'est pas le cas. Ils en viennent à traiter l'urgent sans comprendre la cause. Pour le PF qui ignore l'ILS pour se fier entièrement au GCA (choix délibéré depuis le début), même si ses indications pouvaient être imprécises leur persévération dans le sens des écarts vers le bas ne peut plus être ignorée, et une correction prudente est débutée. Pour le PNF la concordance des indications GCA et ILS ne laisse aucun doute sur la réalité du fait, même si les paramètres de vol n'indiquent aucune anomalie de pilotage. Un début de correction importante est initié.

D : actions cognitives élémentaires

Pour le **PF** :

AP2 utilise une part des actions mentales conscientes, en essayant de comprendre la cause d'une accentuation de la descente alors que les paramètres de pilotage, la vitesse verticale VZ en particulier, n'en donnent aucune indication. Cependant la concomitance des écarts linéaires donnés par le GCA et des écarts ILS annoncés par le PNF, signifie la nécessité d'obéir au GCA même s'il y a un doute sur sa précision.

AP1 prend donc en compte la correction nécessaire et en charge AG1. Il est probable que les annonces du PNF concernant les écarts du Glide ont amené le PF à les consulter en renfort des indications du GCA.

AG1 : l'objectif est la diminution des écarts donnés par le GCA.

- **FC1, pilotage longitudinal** :

Cette FC est intéressante. Faisant appel à la mécanique du vol elle peut être considérée de plusieurs façons.

- En mode de conduite automatique de l'avion en approche, le pilote automatique effectuant toutes les actions requises, en intégrant les actions (voir Chapitre 1) dans 2 systèmes, le 3 (pilotage par rapport à l'atmosphère) et le 4 (pilotage par rapport au sol). Le résultat est un asservissement continu et précis aux axes définis par l'ILS quel que soit le vent. Ce mode est utilisé dans les approches de précision Catégories II et III par très faible visibilité. En fait il résout « mécaniquement » les équations concernées de la mécanique du vol. A l'époque Concorde n'avait pas encore cette possibilité reconnue d'atterrissage entièrement automatique.

- En mode semi-automatique : les mêmes calculateurs utilisant les mêmes informations avion et ILS envoient les ordres de pilotage non au pilote automatique mais au directeur de vol FD placé sur l'horizon artificiel HA. Le PF suit ces ordres et les traduit manuellement sur le manche, en boucle fermée BF avec le FD, et en vérifiant la bonne concordance avec les paramètres usuels, VC, Θ , Z, Vz, cap, indications ILS. La fonction ATHR pilote la poussée des moteurs. Cependant ce mode avec FD n'est pas jugé d'une précision suffisante pour les approches en très faible visibilité (brouillard par exemple).

- En mode manuel sans FD : le pilote utilise une fonction cognitive FC complexe dont le cadre (et/ou le schéma) est un modèle mental MM assurant la combinaison des équations concernées de la mécanique du vol, assimilées par leur connaissance théorique et surtout par la pratique. Dans le cas traité la conduite de la poussée des moteurs assurant la constance de la vitesse VC était confiée à l'automatisme de l'ATHR, ce qui introduisait une simplification libérant une partie de la capacité mentale.

Des relations mentalement simples sont utilisées comme bases à partir desquelles on procède par ajustement à la réalité observée grâce à la perception des informations fournies par les instruments.

Ainsi dès le début de la descente on adopte une assiette longitudinale Θ correspondant à la relation $\Theta = \alpha$ (incidence) – γ (en général 3°), et on la corrige en fonction de la valeur moyenne obtenue en suivant les indications de l'ILS. Ceci est obtenu par des actions dosées sur le manche, avec des valeurs de pressions de type probabilistes tirées de l'expérience, en exploitant les informations de mouvement de l'avion en boucle fermée BF. Cette valeur de Θ sera prise ensuite comme base des corrections en boucle fermée BF pour maintenir un écart ILS nul.

Ce pilotage est une succession d'actions conscientes d'après le balayage visuel des informations prises sur les instruments clés, écarts ILS sur le HA, Θ sur le HA, α sur l'indicateur d'incidence, VC sur l'indicateur de vitesse, Z sur l'altimètre, Vz sur l'indicateur de vitesse verticale, la poussée des moteurs d'après les indicateurs de vitesse de rotation N2.

Chacun de ces paramètres est choisi pour l'opportunité d'une nécessaire correction exercée manuellement sur le manche, dont le résultat est vérifié en boucle fermée BF sur les instruments, les autres étant laissés en mode mental automatique sur la mémoire court terme MCT avant d'être repris plus tard en mode conscient.

Vz est estimée mentalement grâce à une relation numérique simple lorsque la pente est de 3° (c'est-à-dire 5%) :

$Vz \text{ ft/min} = VC \text{ kt} \times 5$, dans le cas présent $Vz = 160 \times 5 = 800 \text{ ft/min}$.

Remarques : - Ce pilotage en approche utilise simultanément la fonction cognitive FC de pilotage longitudinal et celle de pilotage latéral en cap, avec le balayage visuel de l'écart latéral ILS sur l'horizon artificiel HA, le cap sur l'indicateur de cap, et l'inclinaison latérale en roulis sur le HA, ces prises d'informations venant en supplément des précédentes en longitudinal.

- Les écarts donnés par le GCA sont linéaires et indépendants de la distance à la piste. Cela facilite le dosage des corrections. En revanche, les écarts ILS étant angulaires la précision des corrections associées augmente lorsque la distance à la piste diminue, et il est difficile d'évaluer la correspondance linéaire des écarts.

Conformément au modèle décrit cette fonction FC a été « étalonnée » en début de descente et l'hypothèse de vent violent n'a pas été prise en compte du fait de la concordance de l'information ATC de vent faible et de la pente observée de 3°. Cependant l'AP2 autorise l'AP1 et ses FC à prendre en compte la réalité des écarts. Une correction est introduite avec prudence et précision car la vitesse verticale Vz ne varie pas et ne donne aucun signe d'augmentation de la pente. Le PF est très précis dans le dosage de ses actions manuelles de pilotage.

Cette correction diminue la valeur des écarts donnés par le GCA sans les supprimer, mais amène l'information « vous vous rapprochez du plan de descente ».

- FC2, pilotage latéral en cap : les écarts donnés par le GCA sont peu nombreux et faibles. Le pilotage latéral n'est donc pas préoccupant.

Pour le **PNF** :

AP2 : les écarts croissants sont préoccupants et on ne s'occupe plus de la Vz qu'on ne comprend pas. La priorité est à la réduction des écarts entendus et observés car à 1000 ft d'altitude il ne reste que 840 ft à descendre jusqu'au sol, une minute de vol.

AP1 : le suivi des paramètres de vol passe en priorité sur l'assiette longitudinale Θ , les écarts ILS et l'incidence α . La vitesse verticale Vz devient un paramètre observé mais incompris auquel on ne s'attache plus. Les écarts ILS sont périodiquement annoncés au PF.

AG5 : l'objectif est de communiquer les écarts ILS au PF.

Séquence 4, correction (22 sec)

A : description de la situation

A 500ft, soit à moins de 30 sec du toucher, l'écart est toujours de 1 point de Glide et le GCA annonce une stabilité de 20 ft en dessous de la pente, en demandant de se rapprocher du plan de descente. L'assiette Θ est maintenue autour de 13° par le PF.

L'urgence d'une accentuation de la correction est donnée par le PNF qui annonce de façon forte « 500 ft, 1 point sous le Glide, **remonte !** ».

Le PF augmente rapidement Θ à cabrer, vers 14 à 15°. Le GCA annonce une diminution rapide de l'écart et vers 250 ft d'altitude : « bon en cap, vous arrivez au plan de descente, à vous pour l'atterrissage ».

A 360 ft d'altitude, le PNF ayant constaté la réduction rapide de l'écart ILS, désormais de l'ordre de ¼ de point et diminuant, regarde à l'extérieur pour annoncer la vue de la piste.

La hauteur lue au radioaltimètre varie rapidement en passant à 300 ft sans coïncider avec l'indication de l'altimètre, suivant ainsi le profil de la côte précédant la piste haute de 160 ft au dessus de la mer.

B : action normale souhaitée

La correction, d'amplitude correcte, est effectuée et l'équipage s'attend à une visibilité suffisante, même si elle est probablement descendue en dessous des 500 m annoncés.

C : action effectuée

La priorité a été placée sur l'annulation des écarts GCA et ILS. Le dosage précis de la correction en Θ est abandonné au profit de l'urgence et bien que contrôlée l'amplitude de cette correction est désormais nettement plus grande que les quelques $1/10^{\text{èmes}}$ de degrés requis dans une approche stabilisée. De ce fait l'avion revient rapidement sur le plan de descente et s'y trouve pratiquement à l'altitude de décision.

D : actions cognitives élémentaires

Pour le **PF** :

AP1 : la piste s'approchant rapidement l'objectif est l'annulation de l'écart donné par le GCA. Peut-être aussi celui du Glide de l'ILS (?), ce qui est sans importance puisque la concordance des deux est avérée.

AG1 : l'objectif est l'annulation rapide des écarts avant l'altitude de décision proche.

- **FC1, pilotage longitudinal** : une correction de grande amplitude en Θ , de 1 à 2° est lancée, en boucle fermée BF avec les annonces du GCA pour éviter un dépassement au-dessus du plan de descente.

Ceci est effectué avec précision en atteignant des écarts nuls à la hauteur de décision.

- **FC2, pilotage en cap** : maintien du cap actuel.

AG5 et AG6 : écoute des annonces GCA, et du PNF, altitudes et écarts ILS.

Pour le **PNF** :

AP2 : en attente des 360 ft pour regarder à l'extérieur.

AP1 : surveillance serrée de l'altitude et de sa variation rapide observée. Surveillance de la diminution rapide de l'écart ILS et de la stabilité du cap.

AG5 : annonces au PF du passage à 400ft et à 360 ft.

AG2 : à 360 ft recherche de la vision de la piste. Cependant les lumières de la rampe d'approche ne sont aperçues qu'environ une seconde plus tard, juste avant 260 ft.

Séquence 5, atterrissage (7,5 sec)

A : description de la situation

La visibilité réelle est bien en dessous des 500 m annoncés, et à l'altitude de décision retenue de 260 ft, soit une hauteur au-dessus de la piste de 100 ft, on ne voit pas encore cette dernière mais on se trouve au-dessus du tapis lumineux de la rampe d'approche qu'on voit parfaitement, exactement aligné sur l'axe de la piste, mais sans repère certain de la hauteur.

Juste après le passage à 360 ft le PNF annonce « en vue » lorsqu'il perçoit très bien la rampe d'approche mais sans encore distinguer la piste elle-même. Cette dernière est cependant devinée grâce à la barre de lumières rouges balisant son extrémité.

On sait cependant qu'on est très proche du plan de descente sinon sur lui. On continue donc.

La piste ne possède pas de balisage axial qui pourrait être vu suffisamment loin, mais simplement un balisage sur ses bordures gauche et droite, qu'on n'aperçoit pratiquement que lorsqu'on en est très proche.

Le MNE annonce les hauteurs lue sur le radioaltimètre à 100 ft, puis à 50 ft, 40ft, 30, 20 et le toucher survient alors, pratiquement sur la limite de la piste aperçue lorsque sa barre de lumières rouges passe sous le nez de l'avion. L'atterrissage est « franc » suivant la terminologie aéronautique et le fait que les tuyères des moteurs n'aient pas touché le sol alors que les amortisseurs de train étaient comprimés montre qu'au toucher l'assiette Θ était au maximum de 12°.

B : action normale souhaitée

Le passage de l'extrémité de piste est normalement effectué à 50 ft de hauteur.

L'atterrissage de Concorde se fait avec un « arrondi » débuté à 40ft donnés par le radioaltimètre suivi d'une réduction de poussée débutée à 20 ft.

C : action effectuée

En pilotage manuel l'arrondi d'atterrissage est effectué en vue de la piste, d'après les indications du radioaltimètre et ensuite en évaluant visuellement la hauteur. Dans le cas présent le radioaltimètre donnait des variations rapides de hauteur rendant difficile leur exploitation auditive non corrélée par la vision. Car la vision de la piste n'était donnée que par son balisage rouge de début, alors que le pilotage, désormais à vue, se poursuivait sur la rampe d'approche, précis en cap mais imprécis en hauteur. De plus les essuie-glaces ne parvenaient pas à donner une vue nette devant l'avion.

Il est possible que l'assiette Θ n'était plus contrôlée de façon serrée, la concentration consciente se portant sur la recherche d'une vision précise de la piste au travers d'un pare-brise imparfaitement libéré de la pluie. Ou tout aussi probable sinon plus, la précision des contrôles d'approche des GCA et ILS n'était pas suffisante pour des visibilités inférieures à 500 m, amenant la zone de toucher plus en avant que prévu. Ou bien on avait la combinaison des deux possibilités.

L'annonce 40 ft de hauteur du radioaltimètre n'a pas donné lieu à un arrondi suffisant car la vision de la piste était imparfaite. Cependant sans arrondi la vitesse d'impact aurait été trop

forte, de 4 m/sec en descente, et aurait causé des dégâts sur le train d'atterrissage, ce qui n'était pas le cas.

D : actions cognitives élémentaires

Pour le **PF** :

AP1, son objectif est désormais l'atterrissage, l'annonce « en vue » signifiant que la poursuite du vol peut se faire et doit se faire en vue de l'extérieur. Cependant le regard s'étant porté vers l'extérieur la vision réelle n'est pas celle imaginée. Il y a certes une vision parfaite du tapis lumineux de la rampe d'approche et de son axe, sur lequel l'alignement est parfait, mais la piste est devinée par son balisage rouge d'extrémité, sans la vue de sa surface, les essuie-glaces n'arrivant pas à donner une vue nette au travers du pare-brise.

AG1 est prioritaire et doit s'adapter aux circonstances avec l'objectif d'un atterrissage correct sur la piste. C'est donc sa FC3 qui mène l'action.

- **FC3 (pilotage de la phase finale et de l'arrondi)** : l'ensemble constitue une succession d'actions complexes, dont le cadre (ou le schéma) est mémorisé sous forme d'un ensemble de MM (une MMP) dans la Mlt.

Cette fonction FC3 traduit un ensemble d'actions sur l'avion amenant sa trajectoire descendante à tangenter le sol pour débiter la décélération en roulant sur la piste. Ici aussi il s'agit d'un ensemble de combinaisons d'équations de mécanique du vol. On peut considérer cette FC de 2 façons.

- En atterrissage entièrement automatique les calculs sont effectués par des calculateurs exploitant les données captées sur les équipements avion : écarts ILS, VC, Z, Vz, hauteur radioaltimètre, incidence α , assiette Θ , cap, etc. Ces calculateurs donnent au pilote automatique AP et à la commande automatique de poussée ATHR des ordres tels que l'arrondi et le toucher des roues se fassent de façon sûre là où les performances d'atterrissage sont les meilleures pour la décélération sur la piste, sans aucune intervention des pilotes. Il faut dire cependant que les lois d'automatismes retenues proviennent en grande partie de l'expérience acquise au cours des atterrissages manuels. Le positionnement par rapport à la piste est donné par les signaux radioélectriques de l'ILS. Le mouvement de l'arrondi est commandé en fonction de la vitesse et de la hauteur mesurée par le radioaltimètre.

- En atterrissage manuel, après avoir stabilisé la vitesse et l'assiette Θ sur leurs valeurs d'atterrissage, le pilote agit sur le manche et dose ses pressions manuelles en fonction de l'exploitation des perceptions visuelles de la piste, des vitesses de rapprochement horizontale et verticale, de sa position par rapport à la piste (hauteur, axe, repères de distances, texture des surfaces, etc), des perceptions de vision latérale (défilement). La réduction de poussée s'effectue en arrêtant le contrôle automatique de poussée ATHR et en positionnant les leviers sur la position ralenti. Par rapport à l'atterrissage entièrement automatique, qui remplace désormais le plus souvent l'atterrissage manuel, le pilote agit à la fois comme les calculateurs et le pilote automatique, mais avec des perceptions totalement différentes bien que dans les 2 cas il s'agisse de la même mécanique du vol appliquée au même avion.

Pour le pilote le positionnement par rapport à la piste est d'abord visuel, exploitant des repères extérieurs, avec cependant l'exploitation auditive des annonces des hauteurs

mesurées par le radioaltimètre. Ses actions de commande sont dictées par l'exploitation consciente d'un balayage visuel, passant de celui des paramètres lus sur les instruments de vol à celui de l'ensemble des éléments à l'extérieur de l'avion, choisis pour le dosage convenable des actions sur les commandes de vol donnant le mouvement relatif désiré de l'avion par rapport au sol de la piste.

Avant l'annonce « en vue » par le PNF, le pilotage de l'assiette Θ a porté cette dernière autour de 13 à 14° et cette valeur est gardée sur sa mémoire court terme Mct. La Mct garde aussi en mémoire que le plan de descente a été rejoint mais rapidement avec peut-être une possibilité de le dépasser.

La vision extérieure est prioritaire et on s'efforce d'exploiter les éléments visuels disponibles. L'axe de la rampe montre que l'avion est bien sur l'axe de la piste, mais cette dernière n'est devinée que grâce à la barre rouge signalant son extrémité, le tout au travers d'un pare-brise non entièrement dégagé par les essuie-glaces. La seule hypothèse valable est que l'avion suive bien le plan de descente avec les paramètres actuels qu'il faut conserver. Mais il faut diminuer légèrement Θ pour avoir la valeur correcte de début d'arrondi, en dessous de 12°. Comme prévu les indications radioaltimètre se succèdent plus rapidement que d'habitude et l'indication 40 ft arrive avant qu'on ait vraiment une vision correcte de la piste qui est une surface sombre derrière la barre rouge, ne donnant aucun repère de hauteur. L'arrondi est débuté en boucle ouverte.

Le toucher des roues survenant lorsque les lumières rouges passent sous le nez de l'avion est une surprise.

Pour le **PNF** :

Après l'annonce « en vue » il essaie comme le PF de discerner la piste dont seule la signalisation d'extrémité est visible. Aucune référence sol ne peut donner une indication valable de hauteur. L'annonce 50 ft donnée avant la barre de lumières rouges montre que l'avion est plus bas que dans une approche normale mais la perception du rapprochement rapide de la barre laisse penser que le toucher se produira juste après sur la piste.

L'impact survenant au passage de la barre sous le nez de l'avion est une surprise.

Pour le **MNE** :

Comme prévu les indications du radioaltimètre varient rapidement en-dessous de 500 ft d'altitude. Il annonce le passage à la hauteur lue de 100 ft, puis 50 ft, 40, 30 et 20.

Séquence 6, roulement sur piste

A : description de la situation

Dès le toucher des roues il y a réduction de la poussée et passage en réversion de poussée, la roue avant est abaissée sur la piste et le freinage est actionné à son maximum.

L'avion est contrôlé au centre de la piste, entre les balisages gauche et droit de la piste. Ce balisage est assuré par des lumières (pas très fortes) distantes de 50 m. La visibilité ne permet d'en voir que 3 à la fois dans leur défilement rapide, ce qui donne une visibilité horizontale d'environ 150 m sous la pluie diluvienne.

La piste est inondée mais le toucher franc a permis d'éviter le phénomène d'hydroplanage et le freinage est efficace. Les moteurs ne montrent aucune perturbation due à l'ingestion d'eau. L'avion quitte normalement la piste par un taxiway indiqué par l'ATC.

B : action normale souhaitée

Procédure normale, car la piste ne comporte aucune indication de distance disponible restante.

C : action effectuée

Dès le toucher et sans délai la procédure d'arrêt est engagée, sur une piste dont on ne discerne au centre et juste devant l'avion que les lignes blanches peintes et, de chaque côté, que 3 des balises dans leur défilement rapide. Poussée en réversion et freinage maximum sont utilisés en l'absence d'indication de distance disponible pour l'arrêt.

Les valeurs en décroissance de vitesse VC sont données et la réversion de poussée est retirée à 80 kt. Dès le début l'annonce du toucher est donnée à l'ATC qui donne des instructions de dégagement par un taxiway.

D : action cognitives

Pour le **PF** :

AP2, conscient de l'atterrissage court, ce qui l'amène à indiquer par radio l'atterrissage court à l'ATC.

AP1, enchaîne la procédure d'arrêt, l'objectif étant une décélération rapide suite au diagnostic rapide de piste inondée (donc avec coefficient de freinage réduit) et d'absence de marquage de distance disponible restante avec :

AG1 : guidage de l'avion avec l'objectif d'un arrêt rapide.

- FC4 (décélération et arrêt sur piste) :

Guidage sur piste en boucle fermée BF visuelle et action sur le palonnier ;

Décélération contrôlée en BF d'après les indications verbales du PNF, de vitesse VC et de la poussée en réversion.

AG6 : message à la tour de contrôle, ATC, sur les conditions du toucher. (noter que la simultanéité des actions verbales et visuelles n'altère pas la capacité mentale totale).

Pour le **PNF** :

AP1 : applique la procédure normale d'observation et d'annonce des paramètres de décélération sur piste.

Durée de l'incident

Entre la 1^{ère} détection d'anomalie et le toucher des roues il s'est écoulé une minute et demie.

4 – F/A-18 – accident en meeting aérien

Accident en voltige aérienne dû à l'accumulation de deux incidents amenant l'effacement en action consciente d'une séquence de figure aérienne.

4.A – Résumé du cas

ATTENTION : ce Résumé est tiré de l'analyse d'un accident survenu au cours d'un meeting aérien, mentionnée en 1989 dans la publication officielle de la SETP, Society of Experimental Test Pilots. Il sert de base à l'analyse du Chapitre suivant

Circonstances

Au cours d'un meeting aérien un F/A-18 percute le sol de façon inexplicée, la figure d'acrobatie ayant été déjà effectuée auparavant plusieurs fois sans problème par le même pilote sur le même avion.

Le pilote, compétent et expérimenté, est sauf mais souffre d'amnésie partielle. L'avion est détruit mais l'enregistreur du viseur HUD permet la reconstitution du vol.

Le F/A-18 Hornet est un avion de chasse américain de la classe Mach 2, ayant une grande maniabilité aux faibles vitesses. La poussée de ses 2 moteurs est importante, ce qui lui permet, avec des caractéristiques aérodynamiques exceptionnelles, une grande manœuvrabilité en tangage à faible vitesse dans le plan vertical. La manœuvrabilité en roulis nécessite une vitesse minimale légèrement supérieure.

Le maximum de poussée est obtenu en utilisant le supplément de poussée donné par la post-combustion (« afterburner »).

Ses caractéristiques aérodynamiques sont obtenues grâce à l'absence de décrochage aérodynamique à des incidences allant jusqu'à des valeurs supérieures à 40°, même en vol inversé. A ces incidences la valeur indiquée de la vitesse obtenue par des capteurs de pression n'est plus valable au-dessus de 33° et elle doit être corrigée par la centrale à inertie. Cependant au cours de manœuvres dynamiques rapides il se peut que cette correction puisse ne pas être effectuée.

Il est équipé d'un viseur de tir servant aussi à présenter les principaux paramètres de vol, le « Head up display » ou HUD. Entre autres y sont présentées la vitesse conventionnelle (VC), l'altitude, l'assiette longitudinale (tangage), l'assiette latérale (roulis) dans toutes les positions de l'avion. Les présentations des paramètres sont focalisées à l'infini pour éviter les problèmes d'accommodation visuelle. Le HUD permet ainsi d'observer l'extérieur sans avoir à regarder les instruments à l'intérieur du cockpit, ce qui est primordial pour un pilote de chasse.

La conduite normale de l'avion en utilisant le HUD est l'exploitation des valeurs numériques lues grâce à la vision centrale de l'œil et à l'exploitation simultanée des repères extérieurs avec la vision périphérique.



Figure 26 : Avion FA-18

La figure normale consistait en la succession des phases suivantes, chacune durant quelques secondes :

- arrivée en vol horizontal à l'altitude de 500 ft et à une vitesse voisine de la vitesse cible de 275 kt, train d'atterrissage sorti,

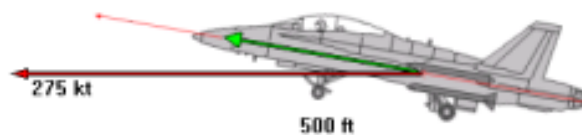


Figure 27 : Vol horizontal

- poussée des moteurs à son maximum avec allumage de la post-combustion,

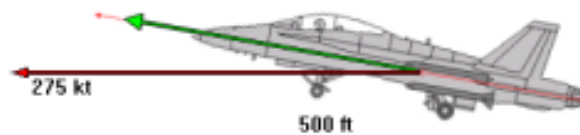


Figure 28 : Accélération

- montée dans le plan vertical de façon à se trouver en vol inversé (points 1 à 3 du schéma présenté plus loin, page 222) vers 2500 ft et 100 kt ;

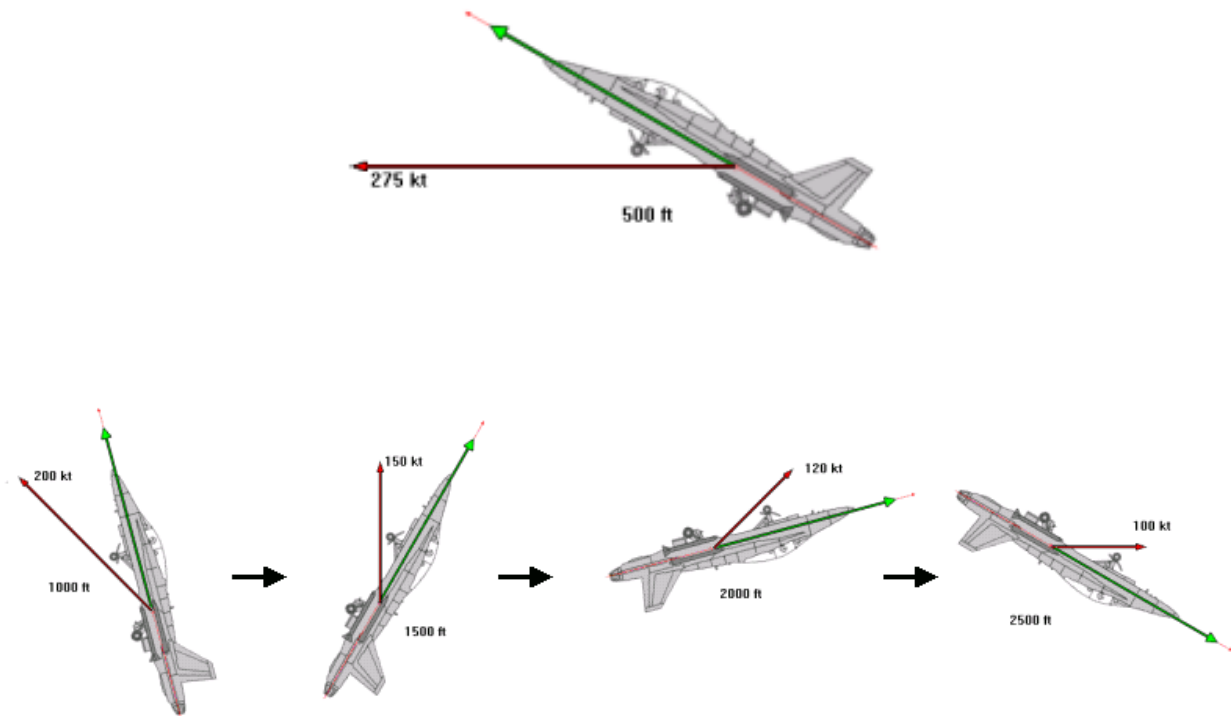


Figure 29 : Montée vers palier en vol inversé

Cette montée est continue, en tirant sur le manche comme pour exécuter une boucle, avec une incidence positive jusqu'au sommet de la trajectoire. C'est le début d'une figure appelée Immelman.

- mise en vol horizontal inversé puis accélération vers environ 120 kt pendant 1,5 à 2 sec (points 3 à 4);

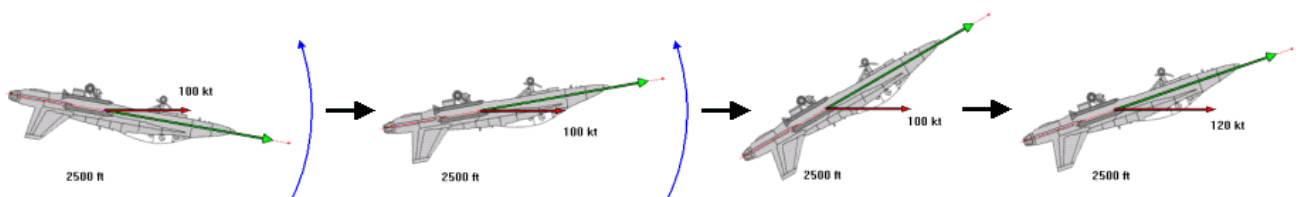


Figure 30 : Mise en palier en vol inversé

Au sommet de la trajectoire le vol inversé est maintenu en stabilisant l'altitude. Pour cela l'incidence de l'avion doit être négative pour que la résultante aérodynamique (négative par rapport aux références avion) équilibre le poids. A cet effet le pilote en situation inversée doit pousser sur le manche pour équilibrer l'avion.

- début de descente en vol inversé jusqu'à une assiette négative de tangage d'environ -10° pour gagner une vitesse de 150 kt permettant des caractéristiques correctes de roulis (points 4 à 5), la nécessité d'avoir cette vitesse est une limitation en maniabilité de l'avion ;



Figure 31 : Début de descente en vol inversé

Ce début de descente est effectué en vol avec une portance nulle, avec une incidence nulle. Ainsi le poids imprime une trajectoire descendante à 0 g. Pour cela le pilote relâche la pression sur le manche qui revient en position neutre. La trajectoire théorique dans cette configuration est une parabole orientée vers le sol.

- roulis vers la droite en descente en amorçant un virage vers la gauche et en rétablissant un vol horizontal (points 5 à 6) ;

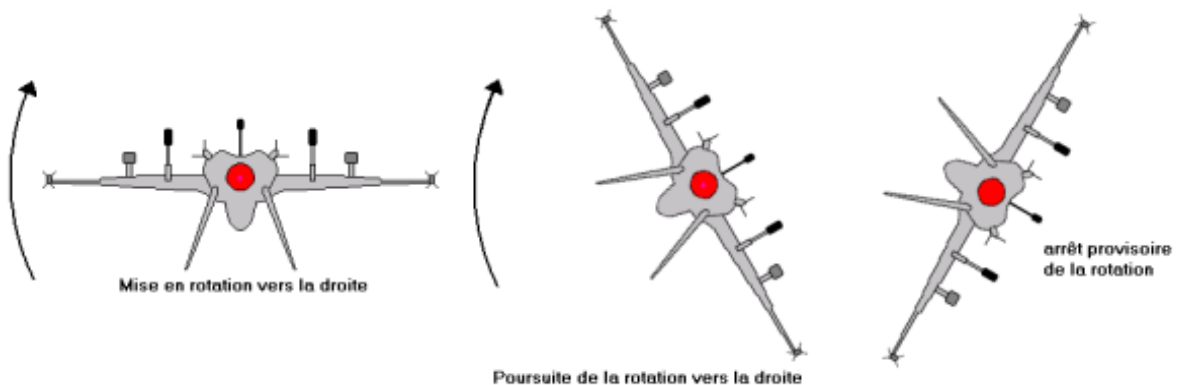


Figure 32 : Manœuvre de roulis vers la droite pour un vol normal en virage à gauche

Cette manœuvre complexe permet à l'avion, et à son pilote, de reprendre un vol normal à incidence positive avec le maximum de manœuvrabilité, avec une portance positive par rapport aux références avion. Elle est effectuée à une vitesse aérodynamique suffisante pour avoir une bonne efficacité en roulis (ici environ 150 kt), et à une pente de trajectoire pas trop importante (ici environ -10°) pour avoir une marge de ressource suffisante au-dessus du sol dans l'enchaînement de la manœuvre suivante.

Elle consiste en la combinaison d'une rotation en roulis pour revenir en vol normal, de l'arrêt provisoire de la rotation avec une assiette latérale à gauche pour effectuer un virage d'environ 90° vers la gauche et d'une franche ressource positive en tirant sur le manche pour stabiliser un vol horizontal à l'altitude de la séquence suivante.

- exécution du virage à gauche puis reprise de la rotation à droite jusqu'à une assiette latérale à droite permettant d'effectuer un virage serré en vol horizontal d'environ 270° vers la droite pour reprendre le cap initial de début de la figure (point 6 et au-delà).

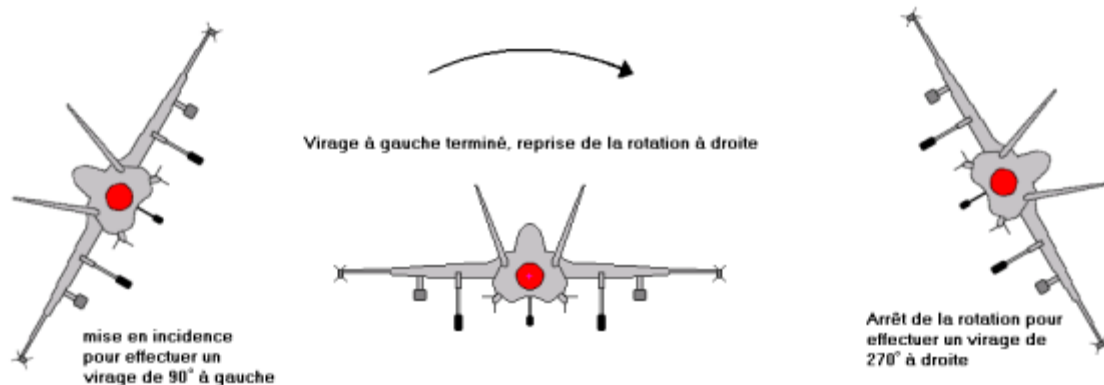


Figure 33 : Manœuvre de roulis vers la droite pour un virage vers la droite

Le virage initial vers la gauche a permis à l'avion de s'éloigner du plan de la figure acrobatique et le virage serré horizontal à droite permet de reprendre l'axe de début de la figure pour continuer la présentation en vol.

Avant le vol le pilote se prépare mentalement au séquençage de la figure, en fixant dans sa mémoire les gestes, les repères à contrôler, les temps à respecter. Il prévoit aussi les ajustements nécessaires en cas de variation des paramètres essentiels en cours de manœuvre. Il en effectue une simulation mentale.

Pendant le vol le déroulement des séquences et les gestes appropriés sont rejoués de façon automatique (« subconscient ») d'après le schéma mentalement enregistré, mais contrôlés de façon consciente.

De plus les paramètres clés sont surveillés de façon consciente afin d'intervenir si une correction s'avérait nécessaire.

La figure acrobatique est schématisée ci-après d'après le compte-rendu, avec sa version normale (entourée de vert) et celle de l'accident (entourée de rouge). Le haut du schéma représente l'hypothèse retenue des passages alternatifs des actions conscientes (« cognitives ») aux actions inconscientes automatiques (« subconscient ») avec les temps associés.

A titre de comparaison un tableau donne les paramètres relevés sur l'enregistreur du HUD pour les 2 vols précédant l'accident et pour celui de l'accident (en rouge sont les paramètres anormaux). Ce sont ceux que le pilote a pu lire au cours des 3 vols.

F-18 Airshow Accident

Thought Control Time Line Study

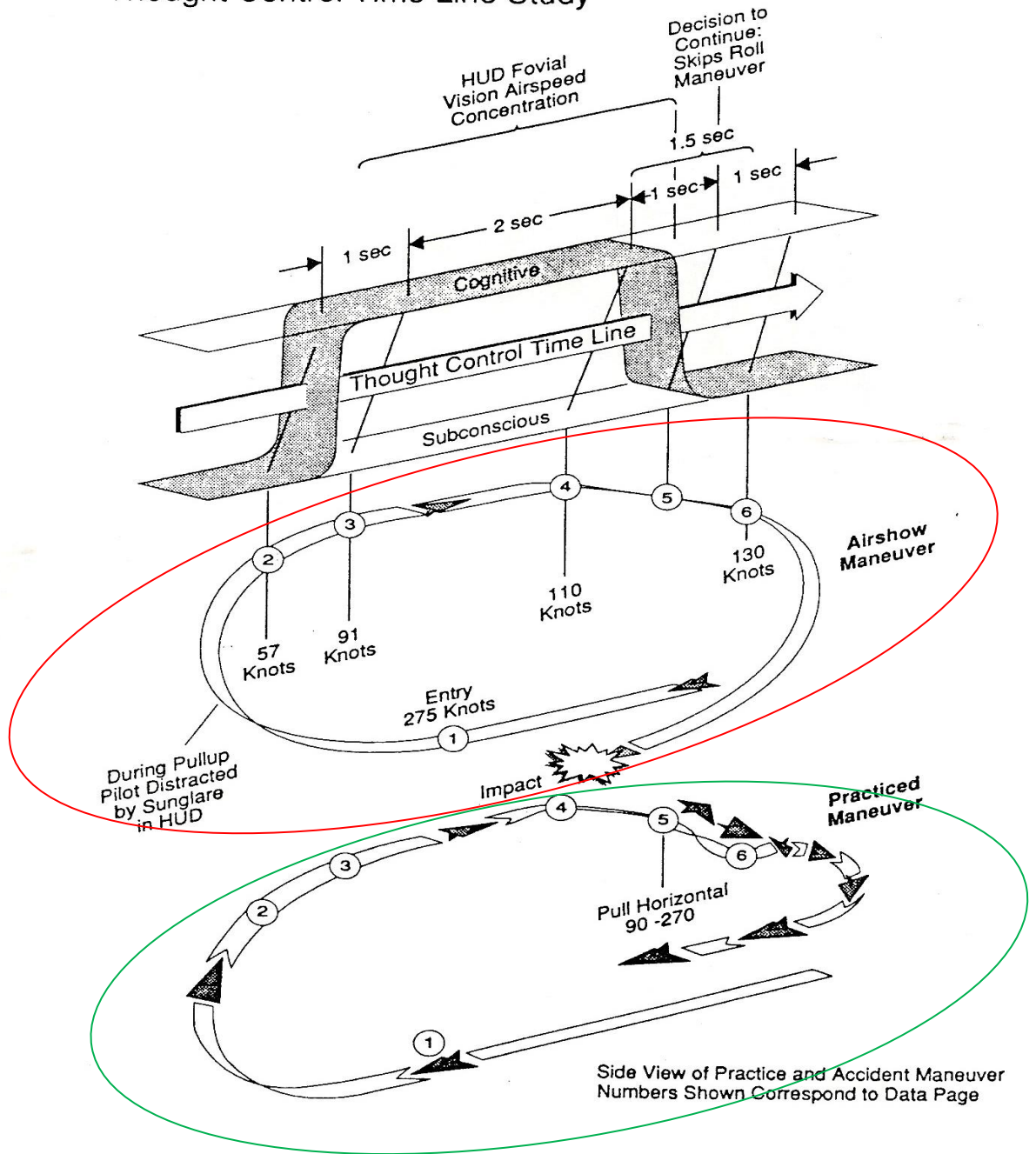


Figure 34 : Schémas de la figure de voltige, en vert figure normale, en rouge figure réelle

F/A-18 HUD VIDEO DATA			
POINT ON DRAWING (Référence sur schéma)	PRACTICE 21 April	PRACTICE 22 April	ACCIDENT DAY 24 April
1. Airspeed at Pullup (VC à la ressource)	290 kt	268 kt	275 kt
1. Altitude at Pullup (Z à la ressource)	490 ft	520 ft	490 ft
3. Level inverted A/S (VC vol inversé)	122 kt	97 kt	91 kt
2. Lowest Indicated A/S (VC minimum indiquée)	111 kt	92 kt	57 kt
3-2. A/S error (Erreur sur VC)	11 kt	5 kt	34 kt
2. Max AOA (Incidence maximum)	42°	44°	48°
3. Altitude on top (Altitude au sommet)	2800 ft	2380 ft	2150 ft
3. Horizon display (Indication de l'horizon HA)	-3°	-7°	-7°
3-4. Level inverted (Temps de vol inversé)	1.5 sec	2.0 sec	1.5 sec
4. Altitude (Altitude fin de vol inversé)	2780 ft	2350 ft	2150 ft
3-4. Altitude lost (Perte d'altitude)	20 ft	30 ft	30 ft
4. Airspeed (VC)	130 kt	120 kt	100 kt
4. Pitch rate (Vitesse de tangage)	5°/sec	7°/sec	7°/sec
3-4. Accel rate (neg G) (Taux d'accélération, g négatifs)	10 kt/sec ²	10 kt/sec ²	10 kt/sec ²
4-5. Accel rate (zero G) (Taux d'accélération zéro g)	20 kt/sec ²	20 kt/sec ²	20 kt/sec ²
4-5. Time to roll (Délai pour début de roulis)	1.0 sec	1.0 sec	NO ROLL
4-6. Time to pull (Délai pour début de ressource)	-----	-----	1.5 sec
5. Speed at roll (VC au début du roulis)	150 kt	150 kt	155 kt
6. Pitch angle (Assiette de tangage)	-----	-----	-17°
6. Pitch angle (+1 sec) (Assiette de tangage à +1 sec)	-----	-----	-35°
6. Slice turn angle (Angle partiel de virage)	-35°	-40°	-----

Figure 35 : Tableau des paramètres observés

Analyse de l'accident (extrait du compte-rendu)

Le jour de l'accident les perturbations suivantes ont été à l'origine des évènements anormaux :

- la post-combustion s'est allumée tardivement, cet élément contribuant à une vitesse inférieure à celle prévue, mais la marge était suffisante pour que cela ne soit préjudiciable à la poursuite de la figure en toute sécurité tant qu'il ne s'agissait pas d'effectuer une boucle;
- lors de la montée le soleil a introduit un reflet dans le HUD rendant impossible l'observation de l'évolution des paramètres pendant plusieurs secondes ;
- à la reprise de vision, en début de vol inversé, la vitesse lue est 57 kt, bien au-dessous de la vitesse cible de 100 kt, ce qui est préoccupant.

En fait cette indication de 57 kt est erronée car due à une pression aberrante mesurée par le capteur de pression dynamique du fait du dépassement de la valeur maximale tolérable de l'incidence entraînant un écoulement d'air très perturbé autour du capteur.

Cette erreur est démontrée par l'impossibilité physique qu'aurait eu l'avion d'accélérer de cette valeur de 57 kt à la suivante de 91 kt lue sur l'enregistreur 1 sec plus tard.

- son attention entièrement captée par la manœuvre délicate de stabilisation d'altitude en vol inversé, le pilote n'a pas lu la vitesse d'alors qui passait par 91 kt, mais immédiatement après lorsqu'il a regardé l'indication de vitesse celle-ci était déjà passée à 110 kt. Ce passage très rapide de 57 à 110 kt était inexplicable, donc préoccupant.

Le scénario retenu est le suivant :

- La vitesse en vol inversé est un paramètre important pour la poursuite de la figure et le fait qu'elle surgisse du voile lumineux avec la valeur de 57 kt impose au pilote qu'il corrige cet élément, en accélérant en vol inversé.
- Alors qu'il accélère ainsi son attention est focalisée sur la vitesse. L'accélération est effectuée en mode conscient.
- Pendant ce temps les autres actions **prévues conscientes** en pilotage inversé, qui devraient partager ce temps de conscience en « time sharing » sont délaissées au profit de la surveillance consciente de la vitesse. Ainsi **le pilotage inversé est laissé en mode « subconscient », mental automatique**. Cependant le vol inversé est bien stabilisé (différence d'altitude observée de 30 ft seulement au cours de la manœuvre).
- Le temps de réaliser et de contrôler que la vitesse a regagné une valeur acceptable, 110 kt, il s'est passé 1 à 1,5 sec de plus que le temps alloué dans le schéma mémorisé pour le vol inversé. Cependant le mode automatique « subconscient » a continué de fonctionner comme prévu et la manœuvre de début de descente a été effectuée.
- Pendant le délai de concentration sur la vitesse, la vision s'est focalisée sur sa valeur sur le HUD. Or en acrobatie la vision périphérique est essentielle pour contrôler le positionnement par rapport aux repères extérieurs, le sol en particulier. Cette vision périphérique est à nouveau exploitée dès que les craintes sur la vitesse ont disparues, c'est-à-dire après le début de la descente commandée de façon mentale automatique.
- Mais cette reprise des actions conscientes se produit dans le temps au moment où le virage vers la gauche devrait débuter après la manœuvre en roulis de mise en vol normal, ce

qui signifie que cette manœuvre en roulis de reprise du vol normal à incidence positive a été oubliée.

- En même temps que le virage est initié de façon erronée, le pilote rétablit sa vision périphérique et réalise qu'il est encore en vol inversé avec une pente de allant vers -80° , trop importante pour reprendre le fil de l'acrobatie et prend la seule solution encore possible : tirer sur le manche pour continuer une ressource en essayant d'éviter le sol. Mais l'altitude est trop basse et l'avion impacte le sol.

Voici ce que dit le compte-rendu sur les causes de l'accident :

« Col. XXX remembers that he knew the airspeed was going to be slow on top because of late afterburner engagement, however, the 57 kts IAS was much slower than anticipated. Therefore the following chain of events began:

(1) The cognitive decision to extend for airspeed caused an unpracticed interruption of practiced subconscious program.

(2) Confusion due to an impossible acceleration rate (57-91 kts/1 sec.) required cognitive time to resolve problem airspeed.

(3) Foveal vision concentrating on digital airspeed required cognitive attention until satisfied with airspeed, and negative G relaxes in preparation to roll.

(4) Due to foveal vision, when cognitive mind returns control to practiced subconscious with roll yet to come, they were not time synchronized.

(5) The practiced subconscious is one step ahead of cognitive mind in the program; just beyond roll, therefore, the pull for the 90-270 degree turn is erroneously oriented in the vertical.

(6) As peripheral vision returns, the cognitive mind comprehends the situation and commands an effort to minimize impact.

Because this is an unpracticed interruption of the subconscious program, an error of omission occurred where a critical section of 1 maneuver was left out, not an intentional square loop that appeared to the uninformed observer. »

Analyse de l'accident propose par l'expert n°5

Cette analyse est faite de façon classique. On donne ici les points principaux.

- *« Cet accident est un grand classique des risques liés aux présentations en vol à très basse hauteur.*
- *Curieusement le rapport d'enquête ne comporte aucun commentaire concernant l'état psychologique et physiologique du pilote le jour du meeting fatal ; or ces deux facteurs ont un poids considérable sur la sécurité lors du déroulement d'une séance*

de voltige à très basse hauteur dans le cadre d'un meeting aérien. En l'absence d'informations officielles, force est de considérer que le pilote était ce jour là en pleine possession de ses moyens physiques et psychiques.

- Une présentation en vol à très basse altitude a pour but de mettre en valeur l'aptitude d'un avion à évoluer dans une portion d'espace aérien aussi réduite que possible. Dans le cas d'un avion de chasse, le pilote est ainsi conduit à exécuter le maximum de figures de voltige aérienne en un temps très court, généralement de l'ordre de cinq à sept minutes (décollage et atterrissage compris). Durant ce type d'exhibition très spécial le pilote est amené à frôler en quasi permanence les limites du domaine de vol autorisé par les caractéristiques techniques de son appareil, alors que, pour ajouter encore à la difficulté il est obligé d'évoluer dans un environnement hostile : présence du sol, présence du public, exigüité du volume autorisé d'évolution à l'intérieur duquel le pilote doit composer en permanence avec des éléments extérieurs d'importance majeure conditionnant la réussite de sa démonstration (vitesse et direction du vent, conditions de visibilité horizontale et verticale, présence d'obstacles massifs ou virtuels déformant anarchiquement le volume réglementé d'évolution. Dans ce contexte, le lecteur comprendra aisément que le pilote soit soumis avant et pendant la démonstration à une énorme tension psychique, aggravée pendant le vol par une très forte pression physique, puisque les accélérations verticales qu'il subit sont comprises entre + 8 g et - 3 g et les taux de rotation latérale peuvent dépasser 300°/s.

- Donc, le pilote désigné pour une présentation en vol à basse hauteur doit faire:
VITE – BIEN – EN SECURITE.

Il n'a aucun droit à la fantaisie, peu à l'erreur. Le schéma de vol établi au préalable doit être intégralement et littéralement respecté, sans introduction volontaire de déviation de trajectoire de dernière minute. L'improvisation est proscrite ; elle est exceptionnellement réservée aux manœuvres échappatoires nécessaires à la sortie de situations de vol critiques aux conséquences presque toujours fatales. Il est par conséquent vital pour assurer la sécurité de la démonstration, que l'exécutant ait globalement imaginé l'inimaginable avant le vol, ait sélectionné les points-clés à respecter impérativement et qu'il ait enfin répertorié les manœuvres échappatoires vitales à effectuer en cas de sorties involontaires du schéma de vol initial. En général, les points-clés sont définis par des positions dans l'espace, auxquelles sont associées des combinaisons de valeurs minimales de vitesse, de hauteur et de configuration de l'avion à respecter impérativement.

- Point 1). Début de la première manœuvre verticale.
Paramètres-clés. Hauteur de vol : 500 ft (hauteur minimale généralement autorisée pour ce genre d'exercice). Vitesse : 275 kt (celle retenue (?) par le pilote). Poussée des réacteurs : maximale (règle de l'art).

La hauteur de vol en départ d'évolution verticale.

Par mesure de cohérence avec la réalité de ce type de vol, la valeur de 490 ft doit être attribuée à l'événement 1, le départ en boucle.

Cette hauteur de vol peut être considérée comme **suffisante** puisque très proche, même si elle lui est inférieure de 10 ft, du plancher de l'espace aérien autorisé.

La vitesse de vol.

Elle était de 275 kts lors du vol de l'accident le 24 avril, soit 15 kts en dessous de celle obtenue le 21 avril au même instant et de 07 kts au dessus de celle du vol de la veille de l'accident.

Cette valeur peut être considérée comme **acceptable** pour assurer la sécurité de la suite du vol.

La poussée des réacteurs.

Règle de l'art : la poussée des réacteurs doit être établie au maximum de sa valeur avant d'entamer une évolution serrée. Cette précaution est un principe de base des démonstrations en vol à très basse hauteur, ceci afin d'éviter de possibles problèmes d'allumage de la post-combustion sous fortes incidences de vol et de pouvoir disposer d'une réserve d'énergie totale importante à l'entrée d'une figure serrée de voltige dans le plan vertical ou horizontal.

Ce paramètre clé **n'est pas respecté**; le déficit de vitesse obtenu en haut de boucle peut être partiellement expliqué par ce manque d'énergie disponible au départ de la boucle. Il est étonnant qu'un pilote exercé et connaissant bien son appareil puisse rater à un moment aussi crucial, un geste aussi mécanique et simple que celui qui consiste à avancer à fond les leviers de puissance des moteurs jusqu'à ce que l'allumage des deux post combustions soit réalisé, d'autant que ce geste simple est répété des milliers de fois par le pilote au cours de sa carrière sur le type d'avion.

Il y a là une première manifestation d'insuffisance de concentration de la part du pilote, peut-être due :

- à un événement extérieur fortuit mais dérangeant (communication radio avec le contrôle (?),),
- à un état psychologique du pilote partiellement dégradé en début du vol (mais pour quelle raison (?)), dégradation assez significative cependant pour perturber l'adéquation de sa mémoire à court terme avec sa mémoire de travail.

En bref, ce pilote semble être en retard dès le début du vol sur le déroulement de la mission.

- Point 1'). Instant du vol situé entre le départ en boucle et l'arrivée en position verticale nez haut. (Non représenté sur le schéma de la Commission d'Enquête / Illumination du H.U.D. par le soleil).

La commission d'enquête semble attacher une grande importance à ce phénomène d'illumination très temporaire du H.U.D. alors qu'elle ne dit rien concernant la cadence (nombre de g. encaissés) du départ en boucle. C'est pourtant la cadence qui conditionne la hauteur du vol dos stabilisé et la vitesse de l'avion dans cette position. En l'absence momentanée d'informations H.U.D., il est fort probable que le pilote se soit fondé sur ses seules sensations physiques pour entamer la boucle. Cette phase de vol, exécutée « à l'aveugle » à l'aide seule de sa mémoire long terme, peut conduire à deux situations extrêmes qui toutes deux sont critiques pour la suite du vol, selon que le pilote tire trop ou pas assez sur le manche:

- une cadence trop faible (le pilote ne tire pas assez), détermine une trajectoire très ample et une hauteur de vol importante sur le dos ; la vitesse de l'avion peut alors rester notablement élevée si la poussée des réacteurs est importante.
- une cadence trop forte (le pilote tire trop) casse la trajectoire ; la hauteur de vol en position dos est faible, la vitesse de vol résultante est faible par suite de l'augmentation importante de la traînée induite par un facteur de charge élevé.

Dans le cas d'accident qui nous intéresse la dernière hypothèse peut être retenue comme plausible, en l'absence d'informations plus complètes.

- Point 3). Vol inversé stabilisé.

Le point n° 3 est l'instant critique du vol car c'est là que le pilote doit prendre LA bonne décision pour ce qui concerne la sécurité du vol, en se fondant uniquement sur l'analyse des valeurs de deux paramètres vitaux :

- la hauteur de vol,
- la vitesse de l'avion en position inversée.

La hauteur de vol.

*Elle est considérablement **plus basse** qu'au cours des deux vols précédents : 2.150 ft le jour de l'accident, soit 650 ft de moins que le 21 avril, 230 ft de moins que le 22 avril ; cet écart important ne place pas le pilote en bonne position pour exécuter la succession des manœuvres serrées à effectuer à la suite : demie boucle en descente couplée avec un virage par la gauche de type John Derry pour reprendre le vol horizontal. Si tout est conforme par ailleurs, ces quelques centaines de pieds manquantes sont déterminantes en fin d'évolution.*

La vitesse en vol inversée.

*Elle est malheureusement **très faible** (91 kts à comparer aux 122 kts du 21 avril et aux 97 kts du 22 avril) et l'avion va entamer ses évolutions de descente avec finalement un déficit de 20 kts par rapport au dernier vol ; cette vitesse faible ne va pas permettre d'engager la manœuvre suivante avec la cadence nécessaire pour un retour en sécurité en vol horizontal.*

La simultanéité de ces déficiences ne permet plus la poursuite du vol en toute sécurité, tel que le schéma de la démonstration a été établi.

Le déficit de hauteur en vol inversé est la cause principale de l'accident, celui concernant la vitesse de vol dans cette phase est une cause aggravante.

La seule décision saine qu'aurait du prendre le pilote était de maintenir le cap, de revenir en vol ventre et de retrouver un régime de vol (assiettes, vitesse, accélérations) normal.

Le pilote était – il capable de prendre cette décision ? La réponse est bien entendu oui à la condition d'abandonner les éléments de sa mémoire de travail »

4.B – Analyse

4.B.1 – Choix des séquences

Ce sont celles du compte-rendu, avec les temps mentionnés.

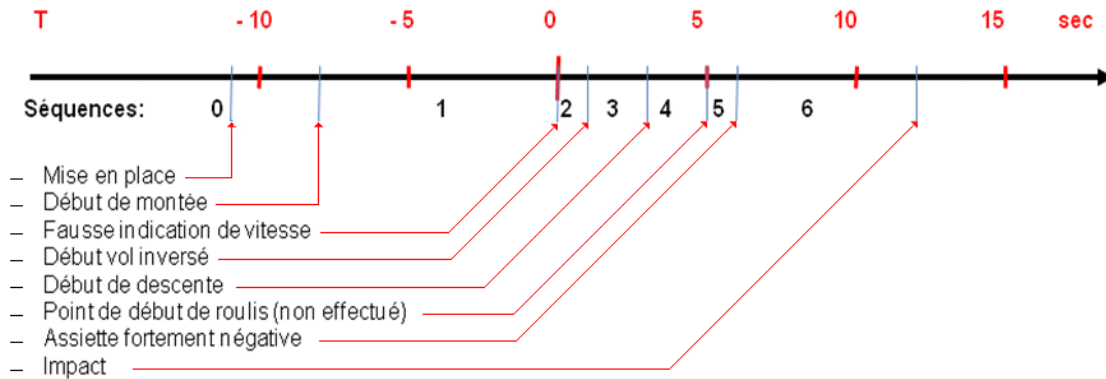


Figure 36 : Séquençage du cas n°4

4.B.2 – Analyse chronologique des séquences

Les séquences 0 à 6 ont été proposées à la cotation des experts (voir Chapitre 6).

Cette analyse suit celle du compte-rendu avec cependant quelques différences dans les hypothèses utilisées.

Dans ce cas choisi il s'agit essentiellement d'une gestion « manuelle » de mécanique du vol suivant un schéma préétabli.

Comme dans toute voltige professionnelle le pilote simule mentalement sa figure avant le vol, il en place les séquences et leurs repères sur sa mémoire long terme Mlt sous forme d'un schéma codé, un réseau (pattern) de modèles mentaux MMP.

Lors de l'exécution le MMP schématisant la figure acrobatique est placé sur la mémoire de travail MT et le pilote lance mentalement les séquences légèrement en avance sur les actions automatisées jouées d'après la MT, tout en contrôlant l'action passée en boucle fermée BF. Cette avance de phase est variable suivant la séquence et est de l'ordre de la seconde.

Séquence 0, mise en place

A : Description de la situation

L'avion se place sur le plan de la présentation, en vol horizontal, train sorti, à la vitesse (VC) de 275 kt. La post-combustion est enclenchée mais le régime des moteurs (80%) est insuffisant pour son allumage.

B : Actions normales souhaitées

Le régime des moteurs devrait être de 100%.

C : Actions effectuées

L'ensemble est correct sauf le régime des moteurs.

D : Actions cognitives élémentaires

Le pilote a répété mentalement les séquences à effectuer. Son processeur opérationnel **PO** a placé le réseau MMP de la figure à effectuer sur sa mémoire de travail MT.

AP1 : son objectif est de suivre le MMP correspondant. Il en confie l'exécution à AG1.

AP2 : se met en mode de vigilance sur les paramètres clés choisis pour le contrôle de trajectoire.

AG1, pilotage manuel : il a placé l'avion dans la configuration et dans la situation souhaitée. Hypothèse : cependant le contrôle de la bonne vitesse de début (vitesse limitée train sorti) l'a peut-être amené à légèrement réduire la poussée des moteurs. A noter l'erreur consécutive, ou un oubli du pilote sur le modèle de fonctionnement des moteurs. Il semble avoir oublié la nécessité d'avoir un régime de 100% avant d'enclencher la post-combustion.

Séquence 1, montée (8 sec)

A : description de la situation

La montée est amorcée. Le pilote s'apercevant de l'absence de post-combustion place les leviers de poussée sur la position de poussée maximum et l'allumage se produit. Cependant ce retard d'allumage cause un léger déficit d'énergie totale (énergie potentielle, altitude + énergie cinétique, vitesse), qui se retrouvera en fin de montée.

La montée s'effectue sous facteur de charge positif. La manœuvre est le début d'une figure appelée Immelman.

En cours de montée le soleil provoque un reflet sur le HUD rendant impossible le contrôle de l'évolution des paramètres clés, en particulier la vitesse et l'assiette longitudinale en fonction de l'altitude.

B : action normale souhaitée

Poursuite de la manœuvre en boucle ouverte BO jusqu'à la reprise d'une vision normale des paramètres.

C : action effectuée

Correction de la poussée et poursuite des actions programmées.

D : actions cognitives élémentaires

AP1 : l'objectif est d'arriver à l'altitude cible avec la vitesse minimum prévue pour la poursuite des actions.

AP2 : un déficit de vitesse est anticipé suite à l'allumage tardif de la post-combustion. Son contrôle est donc impératif.

AG1 : le reflet sur le HUD ayant rendu impossible le contrôle conscient en boucle fermée BF de la trajectoire, il continue la montée en boucle ouverte BO en dosant ses actions sur le manche d'après les paramètres antérieurs stockés sur sa mémoire de travail MT et à la mémorisation du déroulement du réseau de modèles MMP stocké sur la MT, et en surveillant l'horizon extérieur. Ses actions conscientes se partagent entre le dosage des efforts sur le manche, la perception de l'horizon terrestre, et en guettant la réapparition des paramètres sur le HUD.

L'évolution de la situation est placée sur la mémoire court terme Mct.

Séquence 2, fin de montée (1 sec)

A : description de la situation

A la reprise de vision sur le HUD la vitesse indiquée est de 57 kt, largement insuffisante. Cependant 1 sec plus tard elle est de 91 kt, valeur faible mais acceptable. Le saut de 34 kt ne peut pas s'expliquer par la seule accélération de l'avion arrivant à son altitude de rétablissement. On a vu précédemment que la valeur de 57 kt était erronée et due à une incidence excessive.

B : action normale souhaitée

Continuer la manœuvre.

C : action effectuée

La valeur de 57 kt de la vitesse est lue juste avant le début du vol inversé. On passe du pilotage à facteur de charge positif à celui de pilotage en mode inversé et en stabilisant l'altitude atteinte ce qui est désormais possible avec le HUD. L'avion accélère en vol inversé.

D : actions cognitives élémentaires

Le **PO** doit gérer ses tâches conscientes, en priorité stabiliser le vol inversé et faire un diagnostic pour décider de la suite, tout en contrôlant l'accroissement de vitesse.

AP1 : l'objectif est de récupérer la vitesse en accélérant à altitude constante. L'action est confiée à AG1.

AG1 : stabilisation de l'altitude en passant en vol inversé. Pour ce faire la vitesse est abandonnée au profit de l'altitude et de l'assiette longitudinale perçue numériquement sur le HUD et avec la vision périphérique par rapport à l'horizon terrestre (ainsi le passage à 91 kt n'est pas vu).

AP2 : l'altitude et la vitesse sont nettement en dessous de celles souhaitées. Que faire ensuite?

A noter une erreur sur le modèle de fonctionnement du système anémométrique. Le pilote semble ignorer qu'il se peut que l'indication de vitesse soit erronée dans le cas de vol à forte incidence.

Séquence 3, vol inversé (2 sec)

A : description de la situation

Le vol inversé est stabilisé et la vitesse augmente.

B : action normale souhaitée

Idem séq.2.

C : action effectuée

Idem séq.2.

D : actions cognitives élémentaires

Le **PO** ayant confié la tâche de pilotage à AG1, AP1 se consacre au diagnostic.

AG1 : utilise sa mémoire de travail MT pour effectuer les manœuvres de stabilisation du vol inversé. Cette stabilisation délicate en vol inversé et à incidence négative est menée correctement en priorité (erreur d'altitude de 30 ft seulement) donc en boucle fermée BF, avec partage du temps avec les autres actions conscientes : observation de la vitesse et recherche d'un diagnostic confiées à AP1.

AP1 : altitude et vitesse étant plus basses que prévues l'objectif est de décider de continuer ou d'interrompre la figure, sachant que la cause initiale du problème est le déficit initial de poussée. Un diagnostic de la situation est nécessaire mais pour cela l'observation de l'évolution de la vitesse est primordiale. Cependant l'apparition de la valeur 57 kt et le passage quasi immédiat à 100/110 kt restent incompris et compliquent le problème. Désormais il est probable que le temps passé en actions de AP1 est plus important que celui alloué à AG1.

A noter une erreur de diagnostic de la part du pilote qui attribue au retard d'allumage de la post-combustion (incompris par ailleurs) la diminution anormale de la vitesse.

La méconnaissance du modèle de fonctionnement du système anémométrique, signalée plus haut, ne lui permet pas de comprendre cette accélération inattendue de 57 à 110 kt.

Séquence 4, début de descente (2 sec)

A : description de la situation

La descente est amorcée après 1sec de vol inversé à la vitesse de 100 à 110 kt. Elle est poursuivie au-delà de 1 sec, temps où devrait débiter la manœuvre de roulis ramenant l'avion en vol normal. Au bout de 2 sec la vitesse est de 130 kt en accélération rapide et l'assiette longitudinale est de -17° , ce qui correspond à une évolution à portance nulle.

B : action normale souhaitée

La vitesse de début de descente, amorcée dans le temps prévu pour la figure, est 20 à 30 kt en dessous de celle prévue, la descente ayant été débutée trop tôt vis-à-vis de la vitesse. Il aurait été normal d'attendre 1 sec de plus en vol inversé pour obtenir la bonne vitesse de début de descente. La manœuvre en roulis amenant l'avion à la séquence suivante prévue en vol normal à incidence positive aurait dû débiter 1 sec après la mise en descente, à une assiette longitudinale de -10° . Cependant ce déficit de vitesse ne met pas la sécurité en jeu si la figure se poursuit comme prévu avec un rétablissement en vol normal pour la ressource.

C : action effectuée

Le temps en vol inversé de 1 sec correspond à celui des 2 séances précédentes. La descente est amorcée en n'exerçant pas d'effort sur le manche, donc en laissant l'avion avec une incidence voisine de 0 et une portance nulle. L'avion se met sur une trajectoire de type balistique dite à zéro g.

D : actions cognitives élémentaires

Plusieurs hypothèses sont possibles pour les actions du **PO** :

- a- Il utilise sa capacité de conscience en totalité pour résoudre le problème de vitesse en focalisant son attention sur la figuration de la vitesse du HUD et laisse la partie « subconscient » automatique prendre en charge la séquence de la figure stockée en mémoire de travail MT, ce qui amène à débiter la descente en temps enregistré en mémoire mais sans considération de vitesse (hypothèse du compte-rendu).
- b- La séquence précédente montre que le difficile vol inversé s'est effectué en boucle fermée avec obligatoirement exploitation d'autres paramètres que la vitesse, tels que l'altitude et l'assiette longitudinale. Cette action était donc consciente. Mais le passage soudain de 57 à 100/110 kt pose problème et accapare l'attention à temps plein, laissant de façon consciente AG1 poursuivre seul l'enchaînement des séquences en mental automatique, sans avance de phase ni contrôle.

On prend l'hypothèse b paraissant un peu meilleure que la a.

* 1^{ère} phase, concentration sur la vitesse :

AP1 : après avoir laissé AG1 continuer seul la séquence en boucle ouverte BO, suivant le schéma préétabli sur la mémoire MT, il essaie de résoudre le problème de l'augmentation

soudaine de vitesse. Il se concentre sur le HUD et la perception visuelle s'y focalise au détriment de la vision périphérique.

AG1 : l'enchaînement est simple, en mode mental automatique, avec l'abandon de l'action à pousser sur le manche qui est placé au neutre. Ainsi l'avion passe en vol à zéro g.

* 2^{ème} phase, reprise de contrôle de AG1 :

AG1 : la poursuite en mental conscient est restée sur la séquence de vol inversé. La situation exacte est différente car la descente est amorcée : pour enchaîner sur la séquence suivante, la remise en vol normal par une évolution en roulis qui, dans la MT est une manœuvre délicate demandant en particulier d'atteindre une vitesse minimum et d'appliquer des mouvements coordonnés du manche, AG1 a besoin d'un ordre conscient pour reprendre le vol avec avance de phase.

AP1 : il constate que la vitesse augmente et arrive au environ de 150 kt, vitesse de début de la séquence combinée roulis, virage et ressource. Il abandonne le problème de la vitesse qui n'est plus préoccupant et reprend le contrôle de AG1, mais sans réaliser que AG1 a déjà agi en séquence mémorisée.

Séquence 5, reprise consciente (1 sec)

A : description de la situation

L'avion étant en descente zéro g, le pilote tire sur le manche et l'assiette longitudinale passe de -17° à -35° en 1 sec, sans roulis.

B : action normale souhaitée

Il aurait fallu effectuer le roulis nécessaire à la reprise du vol normal avant de tirer sur le manche.

C : action effectuée

Au lieu d'effectuer la manœuvre planifiée de roulis avant de tirer sur le manche pour simultanément virer et stabiliser l'altitude, le pilote tire énergiquement sur le manche ce qui a pour conséquence l'augmentation rapide de l'assiette négative de l'avion au lieu d'une diminution.

D : actions cognitives élémentaires

Ici aussi on peut considérer 2 hypothèses :

- a- Le pilote reprend la gestion consciente du pilotage. Cependant il se trouve en retard sur l'action effectuée en automatisme (« subconscient ») de 1 à 1,5 sec. Ce retard est dû à la focalisation sur la vitesse et sur le fait que les actions conscientes sont en léger retard sur celles inconscientes. En reprise consciente le pilote entame la séquence suivant le vol inversé, c'est-à-dire la descente en vol inversé, sans s'apercevoir qu'elle a déjà été effectuée par l'enchaînement inconscient automatique enregistré en mémoire MT. Cette action s'ajoute

à cette dernière amenant un piqué trop important pour amorcer la manœuvre prévue de roulis. Il n'a pas encore exploité sa vision périphérique.

- b- Le pilote reprend la gestion consciente du pilotage. Le fait d'avoir désormais atteint la vitesse de sortie de la manœuvre de roulis l'amène à penser qu'elle est déjà effectuée et qu'il se trouve prêt au début de virage, ayant laissé d'après sa mémoire court terme MCT le pilotage en boucle ouverte BO dont le temps écoulé et la vitesse lui laissent à penser que le **séquencement** s'est bien effectué. Il n'attend pas la confirmation de sa vision périphérique et enchaîne sur le virage en tirant sur le manche. Or le pilotage en mental automatique a attendu l'ordre de débuter une séquence de coordination difficile, obligatoirement donné par la partie consciente, et de plus le retour de l'action d'exploitation de la vision focalisée à l'action de reprise en main du pilotage coûte quelques 1/10èmes de sec supplémentaires. L'avance de phase consistant à agir en légère avance sur le scénario prévu est perdue et il faut se synchroniser à nouveau.

On développe l'hypothèse « b » retenue par le compte-rendu d'accident bien que la « a » soit la plus probable et la plus simple de compréhension.

AP1 : le problème de vitesse ne présentant plus de danger l'objectif est d'enchaîner sans attendre sur la manœuvre semblant la plus appropriée au temps passé et à la poursuite du scénario passé en mode automatique 3 sec auparavant. La vitesse de 150 kt confirme ce diagnostic. On a perdu assez de temps pour attendre une confirmation quelconque. AG1 est repris en mains. Les actions précédentes n'ont pas été mémorisées sur la mémoire court terme Mct, sauf l'évolution correcte de la vitesse. Il y a effacement de l'obligation de la séquence « manœuvre en roulis » de la Mct ou plutôt cette obligation n'a jamais été retirée du réseau de modèles MMP stocké en mémoire de travail MT car le processus de gestion des séquences en avance de phase a été interrompu par la mobilisation de la capacité totale consciente du PO pour résoudre le problème de la vitesse. La nécessité vitale de ne pas perdre de temps supprime volontairement le contrôle positif de la réalité de la situation.

AG1 : l'objectif fixé est le rétablissement en vol horizontal avec l'hypothèse (non confirmée par les perceptions réelles) que la manœuvre de roulis a été effectuée. On tire donc énergiquement sur le manche comme le veut la séquence adoptée stockée sur la MT. On n'exploite pour cela que les paramètres lus sur le HUD. Physiquement le pilote, qui déjà ne ressentait plus de g négatif au début de la manœuvre, ressent à présent l'effet des g positifs dus à la force centrifuge, donc dans le bon sens.

Cette description des actions mentales prend des minutes pour en écrire le texte alors qu'elles se déroulent en réalité en quelques dixièmes de seconde.

Séquence 6, manœuvre terminale (6 à 7 sec)

A : description de la situation

2 sec plus tard l'avion se trouve avec une assiette négative d'environ -80°. Le pilote poursuit la manœuvre dans le même sens, comme dans la fin d'une boucle verticale. La marge avec le sol étant insuffisante l'avion impacte ce dernier. Par chance le pilote est sauf.

B : action normale souhaitée

Manœuvre de détresse.

C : action effectuée

La manœuvre de ressource débutée lors de la séquence précédente est effectuée « la tête en bas » et non en vol normal, ce qui amène très rapidement, environ 3 sec après avoir commencé à tirer sur le manche, à une assiette longitudinale de -80° , très près de la verticale, avec une vitesse augmentant rapidement et seulement 1000 à 1200 ft restant au-dessus du sol.

La vision périphérique étant revenue avec la vision de la position inversée de l'horizon réel, le pilote réalise sa situation dramatique et exécute la seule manœuvre encore possible, même si l'issue est improbable : continuer à tirer sur le manche pour essayer d'éviter le sol.

D : actions cognitives élémentaires

AP1 : la perception de la vision périphérique redevient normale et on est surpris de constater que l'horizon réel est inversé et que l'assiette négative avoisine la verticale. L'exploitation de cette situation inattendue et son diagnostic prennent 1 à 2sec et la décision de continuer la manœuvre est prise avec AG1.

AG1 : jusqu'à l'exploitation de la position inversée de l'horizon réel l'objectif était de tirer sur le manche pour stabiliser une altitude. Ensuite est venu l'objectif d'éviter le sol bien en vue en continuant de tirer sur le manche au maximum des possibilités de l'avion.

Durée de la présentation

La durée totale de la figure avortée est de 20 à 25 sec.

5 – A310 – accident à l’atterrissage

Accident au roulage d’atterrissage, dû à l’absence de décélération suite à la mise de gaz du moteur gauche par l’entraînement involontaire et non décelé de son levier de poussée au cours de la commande du mouvement du levier de réversion du moteur droit. Absence de contrôle normal par le copilote.

5.A – Résumé du cas

ATTENTION : ce Résumé est tiré du document officiel analysant un accident survenu au cours du roulage au sol après le toucher des roues à l’atterrissage. Il sert de base à l’analyse du Chapitre suivant.

Circonstances

Résumé.

Un A310 atterrit sans problème sur une piste mouillée avec un vent de 5 m/sec à 20° de l’axe de la piste (1,7 m/sec travers gauche, faible). Visibilité 3500 m avec légère pluie. Le freinage automatique (Autobrake) est enclenché et sélectionné sur la position LOW (freinage normal).

Suite à des ennuis du système de réversion de poussée au cours des vols précédents la réverse gauche est neutralisée et inopérante. Seule la réverse droite peut être utilisée.

Il fait nuit mais la visibilité est bonne et l’éclairage de la piste fonctionne.

Le PF, au siège de gauche, est le commandant de bord avec 10600 heures de vol dont plus de 1000 sur A310, le copilote est PNF avec 9700 heures de vol dont 160 sur A310.

Après avoir réduit les 2 moteurs, leviers sur plein réduit, et dès le toucher des roues le PF actionne le levier de la réverse du moteur 2 (droit) avec sa main droite. Les spoilers sont déployés et l’Autobrake se met en fonctionnement.

Le système de réversion est commandé par un levier situé devant le levier de poussée directe du moteur et articulé sur lui, et qui ne se déverrouille que lorsque ce dernier est sur la position plein réduit et que l’avion est au sol. Déverrouillé, il est amené vers le haut par la main du pilote ; d’abord ce mouvement commande le déverrouillage et la mise en place des obstacles de jet, puis le mouvement continuant vers le haut le régime du moteur augmente en fonction de la position du levier jusqu’à un régime maximum correspondant à la poussée maximum de réversion ; le mouvement inverse vers le bas diminue le régime, donc la poussée inversée, jusqu’à l’effacement des obstacles et le retour du régime moteur au ralenti en jet direct.

L’atterrissage se déroulant de nuit, les paramètres étant normaux et la longueur de piste étant suffisante le PF décide d’annuler la réverse, probablement pour réduire le bruit autour du terrain, et il place le levier de réverse sur sa position de ralenti. Le revêtement de la piste est inégal ce qui provoque des oscillations importantes dans le cockpit.

Une simulation a montré que si la configuration de l’avion était restée ainsi il se serait arrêté bien avant la fin de la piste.

Le levier de poussée du moteur 1 (gauche) se déplace vers l'avant en même temps que la réverse droite est placée sur ralenti, et la poussée du moteur augmente en jet direct (vers l'avant), ce qui arrête la décélération de l'avion à une VC de 89 kt.

Une enquête a montré que les tolérances de friction du levier étaient respectées et que la décélération de l'avion ne pouvait pas être la cause du déplacement. D'autre part les automatismes de poussée, ATHR, étaient bien déconnectés.

On ne peut mettre de la poussée reverse que lorsque les « obstacles » sont bien positionnés, ce qui est mis en évidence par l'allumage de voyants verts qui doit être annoncé par au moins un des deux pilotes.

Pendant le roulement au sol le PNF doit s'assurer que le levier de poussée du moteur non en réverse reste bien sur la position plein réduit, et doit surveiller les paramètres moteurs pour détecter toute anomalie.

Le PF corrige la dissymétrie de poussée tendant à faire virer l'avion vers la droite par des actions simultanées sur le palonnier et sur les freins, ce qui débranche le freinage automatique.

La vitesse augmentant (la poussée du moteur 1 atteignant 60% du maximum en jet direct) les automatismes interprètent la situation comme un début de décollage sans la configuration correcte. Les spoilers rentrent (diminuant ainsi la trainée) puis l'alarme « Take-off Configuration » apparaît avec sa sonnerie audio.

L'état de la piste passe de « wet » (mouillée au début de la piste) à « contaminated » (mince couche d'eau en fin de piste) du fait de sa légère pente et de la pluie.

La vitesse est observée augmentant et le PF, toujours en freinant et essayant de corriger la tendance à virer vers la droite, essaie de remettre la réverse droite. Mais la position avancée du levier du moteur 1 droit, signifiant une tentative de décollage, interdit une mise en réverse.

L'avion sort de la piste en son extrémité à la vitesse d'environ 97 kt (180 km/h), entre en collision avec une barrière de béton et des bâtiments et prend feu.

Il a été possible d'avoir la transcription en anglais des conversations dans le cockpit.

Analyse (extrait du rapport d'accident)

L'atterrissage s'est déroulé normalement sur une piste mouillée.

La mise en réversion du moteur droit s'est effectuée normalement, mais la main du PF a appuyé involontairement sur le levier gauche (moteur gauche). Dans les mouvements du cockpit dus à la mauvaise condition du revêtement de la piste le mouvement vers l'avant et vers le bas du levier de réverse droit (réduction de la poussée en réversion) a entraîné celui vers l'avant du levier gauche resté en poussée directe. Ce fait n'a été observé ni par le PF ni par le PNF.

L'augmentation importante de la poussée directe du moteur gauche a empêché le ralentissement de l'avion et au contraire l'a accéléré. Le PF ne s'est jamais aperçu de cette anomalie de poussée et a essayé de corriger la tendance à virer et à accélérer de l'avion par une action sur le palonnier et les freins. L'action sur les freins a supprimé le freinage automatique. D'abord les spoilers rentrent supprimant ainsi leur fonction de ralentissement.

La vitesse dépassant la limite de vitesse au sol avec un moteur dont la poussée est hors ralenti, les automatismes ont réagi avec leur logique de détection d'une accélération de

décollage sans avoir la bonne configuration. Le levier poursuivant sa course vers l'avant, l'alarme Take-off Configuration est enclenchée alertant le pilote sur cette anomalie. Cette alarme a été probablement perçue par les pilotes comme anormale puisqu'ils atterrissaient et ils n'y ont pas réagi. Ils n'ont réalisé que trop tard qu'ils allaient sortir de la piste, apparemment toujours sans s'apercevoir de la poussée du moteur gauche.

A la sortie de la piste le PF ordonne la coupure des moteurs, mais l'action n'a pas été effectuée.

Il faut noter que le PF avait été formé sur des avions de transports russes où les tâches de surveillance et de contrôle des moteurs étaient exercées par un mécanicien navigant.

L'accident aurait pu être évité même si les pilotes n'avaient réagi que tardivement pour réduire la poussée du moteur gauche.

Le rapport officiel rapporte ceci sur les pilotes :

- pour le copilote : manque d'expérience adéquate ; sensibilité élevée aux effets de l'environnement et instabilité dans les réactions émotionnelles ;
- pour le commandant de bord : ses tests psychologiques montraient qu'une soudaine situation grave aurait pu déclencher une réaction où seulement des actions simples et des habiletés hautement automatiques auraient pu être effectuées.
- dans une certaine mesure l'équipage aurait été dans une condition de « premature mental demobilization » avec une diminution de vigilance à la suite d'un long vol de nuit et de l'atterrissage sur leur « home airport ».

5.B – Analyse

Ce chapitre est celui de la thèse

5.B.1 – Choix des séquences

Elles sont extraites en grande partie du compte-rendu officiel. Les durées des séquences sont à +/- 1sec. L'origine est prise à l'évènement déclencheur.

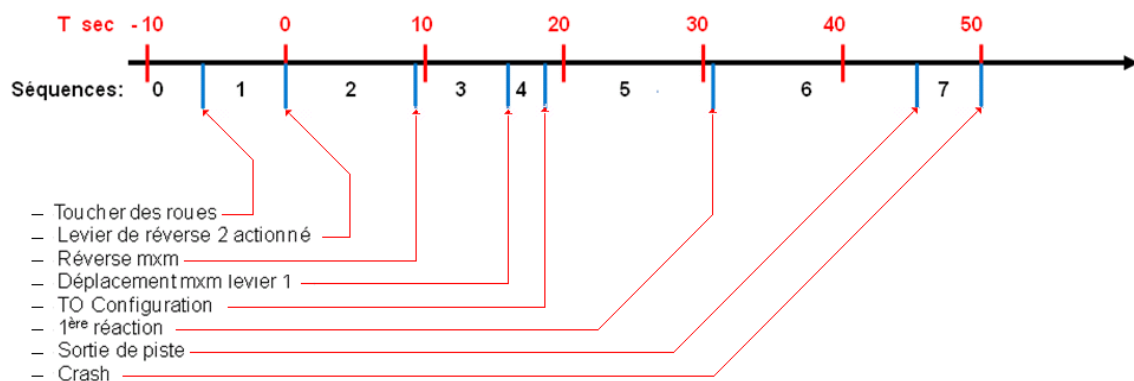


Figure 37 : Séquencement du cas n°5

5.B.2 – Analyse chronologique des séquences

Les séquences 1 à 6 ont été proposées à la cotation des experts (voir Chapitre 6).
Les images sont tirées d'une animation vidéo d'Airbus.



Figur

e 38 : Avion en approche – Eléments clés

Vue avant l'atterrissage, avec les 2 leviers de poussée directe ; et en avant (à gauche sur le dessin) les 2 leviers de réverses en position de repos, neutralisés car l'avion est en vol. Les manettes à droite du dessin ne servent qu'à bouger les leviers de poussée directe par action de l'arrière, par exemple par le PNF.

Une animation de l'atterrissage a été reconstituée dont certaines images sont présentées ici.

Séquence 0 : arrondi d'atterrissage

A – description de la situation :

Mancœuvre sans problème

B – action normale souhaitée :

Arrondi normal

C – action effectuée :

Correcte

D – actions cognitives élémentaires :

Sans objet

Séquence 1 : début de roulage au sol (6 sec)

A : description de la situation

Le Cdb PF termine le toucher des roues. Il a réduit les 2 moteurs au ralenti avec la main droite et placé la roue avant sur la piste avec la main gauche sur le manche.
Les spoilers sont sortis.

B : action normale souhaitée

Manœuvre normale.
Le PNF doit annoncer la sortie des spoilers.

C : action effectuée

Correcte, mais pas d'annonce.

D : actions cognitives élémentaires

Pour le **PF** :

Son **PO** agit conformément à l'habitude et aux procédures :

AP1 : l'objectif est le ralentissement de l'avion en conservant l'alignement au centre de la piste. Délègue aux agents AG1 (pilotage) et AG2 (surveillance extérieure) en action coordonnée.

AG1 et AG2 ensemble :

- **FC10 (contrôle de l'avion au roulement)**. Utilisation du modèle mental MM correspondant. Pieds sur le palonnier, main gauche inactive après avoir placé la roue avant sur le sol avec le manche, main droite sur les leviers de poussée placés au plein réduit, il coordonne en boucle fermée BF les mouvements avec la vision extérieure de la piste, en particulier les repères d'axe de piste. Balayage visuel sur la piste.

Pour le **PNF** :

Aucune indication précise sur ses actions. Quelques paroles inintelligibles.

Séquence 2 : début de décélération (9 sec)



Figure 39 : Avion au toucher des roues

A : description de la situation

Mise en fonction des dispositifs de freinage :

Autobrake en fonction, levier de réverse moteur droit actionné vers le maximum. Fonctionnement correct du moteur droit dont le régime augmente et atteint le maximum. Décélération correcte, avion axé sur la piste. Oscillations importantes dans le cockpit dues au mauvais revêtement de la piste.

Cependant le levier du moteur gauche se déplace légèrement du ralenti.

B : action normale souhaitée

Actions correctes. Cependant le levier de poussée du moteur gauche aurait dû rester sur la position ralenti.

Le PNF doit annoncer les mouvements des obstacles de réverse et les régimes des moteurs ainsi que le fonctionnement de l'Autobrake. Il doit aussi s'assurer que le levier de poussée gauche reste sur la position ralenti.

C : action effectuée

Les actions du PF sont correctes mais sa main droite (ou son poignet droit) appuie involontairement sur le levier du moteur gauche.

Pas d'annonce intelligible du PNF.

D : actions cognitives élémentaires

Pour le **PF** :

Actions normales du **PO** pour un atterrissage avec une seule réverse.

AP1 : exécution de la procédure extraite de la mémoire long terme Mlt avec le modèle mental MM correspondant exigeant la coordination d'actions. Délègue à AG1 et AG2.

AP2 : vigilance accrue sur le maintien de l'axe compte-tenu du mauvais revêtement et de la piste mouillée, cependant aucune préoccupation vis-à-vis des moteurs qui fonctionnent correctement.

AG2 : la vision extérieure est primordiale pour coordonner en boucle fermée BF la conduite sur l'axe de la piste. Le mauvais revêtement demande une vigilance accrue.

AG1 : C'est l'action sur le palonnier qui assure le guidage, surtout avec la poussée dissymétrique due à la seule réverse. L'action manuelle sur la réverse droite est donc exécutée en boucle ouverte BO.

Le « retour d'asservissement » est normalement établi par les annonces du PNF concernant la position des réverses et les régimes des moteurs visionnés sur la partie centrale du panneau pilote.

Le mouvement manuel du levier de réverse du moteur droit induit un appui involontaire de la main sur le levier gauche, passé inaperçu au milieu des oscillations dans le cockpit. Mais le mouvement vers le haut et surtout vers l'arrière n'a pas d'influence majeure.

Les mouvements du cockpit sont perturbateurs, sans plus.

Pour le **PNF** :

Pas d'annonce intelligible du PNF.

Séquence 3 : augmentation de la poussée directe du moteur 1 (7sec)



Figure 40 : Début de déplacement intempestif du levier de poussée gauche

A : description de la situation

Le PF place la réverse droite au ralenti. Mais le mouvement vers l'avant et le bas du levier entraîne involontairement celui vers l'avant du levier de poussée directe du moteur gauche par appui de la main droite (ou du poignet).

La tendance à virer vers la droite est corrigée par action sur le palonnier (segment vert en bas à droite), et sur les freins (segments rouges en bar à droite) ce qui déconnecte l'Autobrake. Les spoilers rentrent.

La vitesse minimum d'environ 89 kt est atteinte et ne diminue plus.

B : action normale souhaitée

Malgré les mouvements dans le cockpit dus au mauvais revêtement de la piste, au moins le PNF devrait s'apercevoir de l'augmentation intempestive du régime du moteur gauche et donc le réduire en replaçant son levier sur ralenti, ce qui rétablirait immédiatement la quasi-symétrie de poussée, et permettrait une fin de course normale.

C : action effectuée

Le PF essaye de garder une trajectoire au centre de la piste en corrigeant avec palonnier et freins. Sa main droite est sur le levier de réverse moteur droit et a entraîné le levier de poussée directe du moteur gauche vers un régime d'environ 60% du maximum. Il n'a pas la perception de ce toucher intempestif probablement à cause des mouvements oscillatoires importants dans le cockpit.

Il est difficile de dire ce que fait le PNF ; il regarde probablement vers l'extérieur. Le bruit du moteur gauche n'est pas perçu ou reconnu.

D : actions cognitives élémentaires

Plusieurs hypothèses pourront être retenues dans les autres séquences de ce dramatique scénario. La présente séquence initie la confusion, mais l'hypothèse retenue est la seule envisageable.

Pour le **PF** :

Le **PO** a pour objectif de poursuivre normalement l'atterrissage et la dissymétrie le surprend mais il la corrige sans trop de problème. Les mouvements dans le cockpit sont gênants.

AP1 : d'après le compte-rendu l'objectif serait de réduire le bruit dû à la réverse, tout en conservant le cap de l'avion, la dissymétrie de la réverse à son régime maximum étant compensée par une action vers la gauche du palonnier. La suppression de la réverse aura l'avantage d'annuler cette dissymétrie.

AP2 : toujours vigilance pour le maintien de l'axe avec la piste mouillée, aucun souci pour les moteurs qui ont déjà bien fonctionné.

AG2 : reste en vigilance sur la vision extérieure de la piste,

AG1 : la main droite repousse le levier réverse du moteur gauche vers l'avant et le bas (les oscillations du cockpit empêchent de percevoir qu'elle touche le levier gauche en l'entraînant vers l'avant en poussée directe). AG1 réduit ainsi le régime réverse vers le ralenti (tout en augmentant involontairement la poussée directe du moteur gauche) puis la supprime, et pilote l'avion en boucle fermée BF avec le palonnier par rapport à l'axe de la piste.

Pour le contrôle sur la piste, voir **FC10** dans les séquences précédentes.

Pour le **PNF** :

Aucune action n'est perceptible. Il doit probablement regarder vers l'extérieur, l'atterrissage s'étant bien déroulé jusqu'à présent, donc la situation n'offrant aucun signe d'une possible détérioration.

Séquence 4 : début de l'accélération involontaire (3sec)

A : description de la situation

La réverse est sur arrêt. Le levier de poussée directe gauche est au-delà de la détection de poussée minimale autorisée en roulage et les logiques interprètent le mouvement comme une tentative de décollage. Les spoilers sont déjà rentrés, supprimant ainsi la résistance à

l'avancement qu'ils génèrent. Le PF agit sur le palonnier et les freins. Malgré les actions de freinage maximum aux pédales l'avion accélère.

Puis les logiques constatent que malgré une poussée directe d'un moteur la configuration de l'avion n'est pas celle prévue pour un décollage, en particulier la position des hypersustentateurs, et actionnent l'alarme « Take-off configuration (TAKE-OFF CONFIG) » en lecture et en signal audio.

B : action normale souhaitée

Au moins le PNF aurait dû s'apercevoir de la montée en puissance du moteur gauche montrée sans ambiguïté sur l'ECAM du panneau central et aurait dû le réduire en l'annonçant au PF. L'incident était encore sans gravité à ce stade.

C : action effectuée

Le PF freine au maximum et essaye de corriger la tendance à virer à droite par le braquage à gauche du palonnier.

Le PNF est muet.

D : actions cognitives élémentaires

Pour le **PF** :

C'est le début d'une grande confusion pour son **PO**, s'attachant à la tâche la plus immédiatement importante : le maintien de l'axe de la piste. Cette tâche, par sa difficulté d'exécution, lui prend la part la plus importante de sa capacité consciente.

AP1 : entièrement pris par le contrôle de tenue de l'axe en BF avec la vision de la piste.

AP2 : Hypothèse : la piste mouillée et la composante du vent venant de la gauche sont pris comme cause de la difficulté à maintenir l'axe et à s'opposer au freinage.

AG2 : la vision extérieure est privilégiée sans aucun coup d'œil sur les instruments ;

AG1 : essaie de maintenir l'axe de la piste en BF avec palonnier et freins. Voir **FC10**.

Pour le **PNF** :

Aucune action perceptible. Il doit continuer de regarder à l'extérieur sans parler.

Séquence 5 : confusion « tranquille » (12 sec)



Figure 41 : Apparition de l'alarme « configuration »

A : description de la situation

L'alarme TAKE-OFF CONFIG persiste quelques secondes. Le levier de poussée directe du moteur gauche est à son point de déplacement maximum observé vers l'avant et celui de la réverse droite, désactivée, est en position basse. L'avion accélère lentement.

Le freinage aux pédales est au maximum bien que modulé par les corrections en cap.

Le PNF contacte la tour de contrôle pour annoncer l'heure de l'atterrissage (32 sec après le toucher des roues).

B : action normale souhaitée

L'action nécessaire évidente serait de réduire la poussée du moteur gauche.

C : action effectuée

Le PF corrige la tendance à virer vers la droite par une combinaison de braquage du palonnier et de dosage des enfoncements des pédales de frein. La correction en boucle fermée BF avec la vision extérieure induit une oscillation pilotée en cap d'environ 5 à 6 sec de période et +/- 1 à 3° d'amplitude

Ce point important n'est pas signalé dans les rapports officiels et autres. Il est déduit de la vidéo de l'animation. Bien que l'oscillation ne soit pas d'amplitude constante, une corrélation directe apparaît clairement sur les enregistrements entre les mouvements en cap et les actions additionnées du palonnier et des freins. Elle ne semble n'avoir pas été exploitée dans le rapport officiel. La période de 5 à 6 sec est expérimentalement connue dans les cas de résonance pilotée pilote-avion en latéral. Au début, avec de grandes amplitudes de commandes, l'oscillation est maintenue dans des amplitudes de +/- 1° à 3° en cap, puis diverge vers la fin. Ce phénomène semble permettre une interprétation logique d'un comportement du PF apparaissant aberrant dans les rapports. Cependant il n'est décelable que sur l'observation détaillée des évolutions en cap et des corrélations d'actions sur le palonnier et sur les freins, avec l'ensemble non présenté ici de l'animation continue reconstituée.

Apparemment sa main droite reste sur le levier de réverse droite en position basse, en s'appuyant (avec le poignet ?) sur le levier gauche.

L'alarme TAKE-OFF CONFIG ne semble pas avoir eu de signification pour les 2 pilotes. Le PNF a certainement regardé l'écran où l'alarme est signalée mais n'a pas perçu la différence de régime des moteurs. Il ne s'intéresse qu'au banal message radio à transmettre à la tour concernant l'heure d'atterrissage.

Seul le guidage de l'avion sur la piste est pris en compte consciemment par le PF. La vitesse, détectée visuellement par le défilement de la piste, est prise en compte pour la nécessité de freiner.

D : actions cognitives élémentaires

Pour le **PF** :

Pour le **PO** la situation se trouve dans le contexte d'un atterrissage. Ses diagnostics se placent dans ce contexte et il n'a pas de temps disponible pour une analyse poussée car sa capacité mentale disponible est entièrement dévolue au maintien de l'axe et à calmer les oscillations en cap. Il est évident que la perturbation vient de la gauche par l'obligation du braquage du palonnier vers la gauche. Cependant la cause de cette perturbation n'est pas diagnostiquée. Le PF pense-t-il à un vent de travers, ou simplement à une perturbation initiale due à la dissymétrie de réverse qu'il corrige mal, ceci étant amplifié par l'état mouillé de la piste ?

AP2 : la situation présente est celle d'un atterrissage. L'alarme TAKE-OFF CONFIG est saugrenue et probablement interprétée comme une fausse alarme.

Cependant elle induit une préoccupation utilisant une part de la capacité mentale consciente, sans établir une liaison concrète avec les problèmes auxquels AP1 est aux prises.

Le bruit du moteur gauche n'est pas perçu, peut-être noyé dans les bruits de cockpit générés par le mauvais revêtement de la piste ?

AP1 : L'objectif est de rester sur la piste en latéral.

- **FC12 (gestion de la vitesse au sol)** : Hypothèse : le maintien d'une vitesse ne voulant pas décroître est préoccupant mais on pense que l'état de la piste mouillée (baisse du coefficient de frottement) est la cause de ce maintien, et par expérience on sait que les freins auront finalement raison de cette baisse d'efficacité. A cet effet la pression sur les pédales de freins est maximale.

- **FC10 (maintien de l'axe au sol)** : utilisation d'un modèle mental MM avec l'objectif de maintenir l'avion sur l'axe de la piste. Pour cela il y a bouclage entre les perceptions visuelles de la position du pilote par rapport à la ligne repérant l'axe (et de sa dérivée, vitesse de déplacement vers la droite ou vers la gauche) et les ordres de déplacement donnés par le pilote au travers du braquage du palonnier et du dosage des pressions sur les pédales de freins (ce qui amène à moduler cette pression en-dessous du maximum, interférant avec FC12). *Hypothèse* : le maintien de l'axe s'avère difficile et la combinaison du braquage du palonnier et du dosage différentiel des freins induit, en boucle fermée BF avec la vision extérieure, une oscillation pilotée (observée, de +/- 1° à 3° d'amplitude et 5 à 6 sec de période, sensible dans le cockpit par les déplacements latéraux induits) difficilement maîtrisable, prenant en habileté la quasi-totalité de la capacité mentale consciente.

Pour le **PNF** :

AP2 : Comme pour le PF la situation présente est celle d'un atterrissage. Ce contexte est celui du PF et l'alarme TAKE-OFF CONFIG est saugrenue et interprétée probablement comme une fausse alarme. Elle disparaît au bout de quelques secondes, probablement arrêtée par lui. Il a aussi probablement regardé l'écran de l'ECAM mais sans percevoir l'anormalité de la différence de régime des moteurs.

Contrairement aux procédures il n'annonce rien au PF.

AG6 : Il contacte la tour de contrôle pour donner l'heure de l'atterrissage, ce qui semble prouver qu'il n'a pas de préoccupation majeure.

Séquence 6 : confusion totale (14 sec)



Figure 42 : Oscillation pilotée en cap

A : description de la situation

Dans les 3 sec qui suivent les pilotes échangent quelques paroles :

- PNF : "What is this ? We do not loose speed" (Qu'est-ce ceci? Nous ne décélérons pas)
- PF: « Again reverse. We will overrun! » (Réverse à nouveau. Nous allons dépasser la fin de la piste).

Le PF (ou peut-être le PNF) actionne le levier de la réverse droite vers son maximum, mais sans résultat car les sécurités (levier de poussée du moteur gauche au-delà du seuil de 22°), ayant (à tort) détecté un début de décollage, interdisent la mise en réverse du moteur.

L'oscillation en cap augmente alors en amplitude pour atteindre +/- 10°. La diminution du coefficient de frottement de la piste avec sa condition « contaminated » par l'eau de pluie participe probablement à cette augmentation en diminuant l'amortissement mécanique.

Curieusement le mouvement vers le haut et l'arrière du levier de réverse droit n'entraîne pas vers l'arrière le levier gauche de poussée directe qui reste à peu près à sa position précédente en avant.

La vitesse de l'avion est stabilisée autour de 97 kt.

8 sec après et 5 sec avant le dépassement du bout de la piste a lieu le dialogue suivant :

- PNF : « Why ? » (Pourquoi ?)
- PF : « I don't know » (Je ne sais pas)
- PNF : "Oh my- "(Oh mon-)
- PF: « We shut down the engines » (Nous coupons les moteurs)

Cependant les moteurs ne sont pas arrêtés et le PF se bat toujours avec le contrôle latéral.

B : action normale souhaitée

A ce stade la sortie de piste était inévitable mais la coupure des moteurs aurait peut-être évité l'incendie immédiat, et amené un meilleur contrôle final de tenue de l'axe vis-à-vis des obstacles en supprimant la perturbation dissymétrique et l'oscillation en cap.

C : action effectuée

Les pilotes réalisent enfin l'anormalité de la situation, sans toujours en diagnostiquer la cause. Probablement le PNF voyant le défilement de la piste a regardé l'indicateur de vitesse et constaté la vitesse élevée, ce qui l'a finalement alarmé.

Le PF essaie toujours de régler son problème de tenue de piste et simultanément son problème de vitesse en pensant à la réverse, les freins semblant inefficaces.

Il commande l'arrêt des moteurs, mais étant habitué (éducation de base) à ce que cette action soit effectuée par un autre membre d'équipage, et étant lui-même trop occupé, il en a laissé le soin au PNF totalement inefficace.

D : actions cognitives élémentaires

Dès le début de cette séquence les 2 pilotes réalisent le problème de l'approche à grande vitesse de la fin de piste.

Cependant ils restent bloqués sur leur contexte d'atterrissage avec les 2 moteurs placés sur ralenti à l'arrondi, ce qui était vrai. Ce contexte les a amenés à refuser tout ce qui était contraire à la configuration correspondante et donc à ne pas imaginer la perturbation

ultérieure d'un moteur se mettant « de lui-même » en poussée directe. Ce qui suit en est la conséquence.

Pour le **PF** :

Le **PO** enregistre le problème de la vitesse, mais pris dans son contexte d'atterrissage laisse de côté la notion basique que la vitesse est gérée au sol par la poussée, ou plutôt il n'en utilise que l'aspect « réduction » grâce à la réverse. Sa tentative de réflexion utilise une part importante du temps partagé avec les agents d'action, AP1 en particulier, ce qui diminue rapidement l'efficacité des actions de maintien de l'axe et amène la divergence en cap, augmentant ainsi la charge de travail du maintien de cap :

AP2 : la vision du bout de piste se rapprochant rapidement rappelle le problème de gestion de la vitesse et interpelle AP1. L'apparition à nouveau de l'alarme TAKE-OFF CONFIG est ignorée comme précédemment mais probablement introduit cependant une perturbation mentale supplémentaire dans les traitements conscients (diminution des capacités mentales).

AG5 : simultanément le PF constate la pertinence de la remarque du PNF et y répond.

AP1 : AP2 dicte la nécessité d'utiliser simultanément FC12 et FC10.

Considérations sur les agents AP1 et AP2, sur les fonctions cognitives FC10 et FC12 et sur les modèles mentaux MM utilisés :

*Le PF et le PNF sont dans un contexte de roulage au sol à l'atterrissage, au cours duquel on n'augmente **jamais** la poussée, où l'on s'efforce de diminuer la vitesse mais **jamais** de l'augmenter. Le cas d'augmentation de poussée n'est pas trouvé en mémoire long terme Mlt et ne peut donc pas être traité. Pour cela il faudrait bâtir un modèle mental MM nouveau à partir des éléments perçus, dans la mesure où l'on peut s'extraire du contexte classique de roulage à l'atterrissage.*

La difficulté de maintenir l'axe est probablement mise au compte de la perturbation initiale causée par l'action dissymétrique de la réverse, aggravée par l'état mouillé de la piste. Peut-être aussi sur le compte d'un hypothétique vent de travers. L'utilisation de la fonction FC10 (maintien de l'axe de piste) ne laisse que peu de place dans la capacité des traitements cognitifs conscients hors de cette FC10, en particulier pour essayer de diagnostiquer l'origine de la perturbation. D'autant plus que l'état de la piste mouillée peut laisser penser à de l'hydroplanage s'opposant à l'action des freins, hypothèse probablement privilégiée.

Cependant, à partir du moment où l'absence de décélération est perçue, on s'occupe de faire diminuer la vitesse, sans pouvoir penser que quelque chose tend à l'augmenter, donc sans imaginer que la poussée a augmenté. Si les freins sont inopérants, à cause de l'hydroplanage, le seul moyen restant est la réverse, d'où l'essai de la reprendre, c'est à quoi s'emploie la fonction FC12 (gestion de la vitesse).

Mais à partir de l'instant où consciemment on s'efforce de prendre en compte le problème de la vitesse, cette action cognitive de la FC12 prend sur le temps où agit la FC10 qui, elle, utilisait à plein temps la capacité cognitive consciente de AP1 à cause de la difficulté à stabiliser l'oscillation en cap. Ceci implique qu'une partie des actions de FC10 passe en mode inconscient automatique, en boucle ouverte BO. L'ennui est que le bouclage devient plus lâche, avec augmentation des déphasages entre la perception des positions de l'avion et les actions sur les commandes palonnier et freins, ce qui amène la divergence de l'oscillation en cap.

Comment le PF aurait-il pu sortir de ce contexte ? D'abord si le PNF avait exécuté ses tâches, car l'observation des instruments aurait immédiatement montré le problème du moteur gauche. Ensuite si une alarme significative pertinente avec le contexte de roulage à l'atterrissage l'avait tiré du modèle classique obligé « d'impossibilité d'avoir autre chose qu'une décélération à l'atterrissage ». Pourquoi l'alarme TAKE-OFF CONFIG est restée sans effet ? Elle était hors contexte et n'indiquait pas explicitement qu'il y avait accélération dans un moment où son exploitation demandait un temps d'assimilation et de réflexion que la difficulté de tenue de cap ne pouvait pas céder.

Lorsqu'on regarde le temps pendant lequel s'est déroulé le scénario on peut se dire que le PF avait tout son temps pour observer, analyser et réagir. Sauf qu'il utilisait la totalité de ce temps à quelque chose qu'il considérait comme primordial, malheureusement à tort.

- **FC12 : gestion de la vitesse** : l'impression de grande vitesse est confirmée par une vision rapide de l'indicateur de vitesse. Rapidement (2 à 3 sec) il y a analyse des moyens destinés à diminuer la vitesse, ce qui est l'objectif. Ces derniers sont ainsi estimés :

- les freins ne paraissent pas efficaces, probablement à cause de l'eau sur la piste,
- seul moyen restant disponible, la réverse qui a été annulée précédemment ; il faut donc la remettre.

D'où commande de la réverse droite par son levier immédiatement placé sur le maximum.

Rien ne se passe car la position du levier de poussée gauche interdit le fonctionnement des réverses. Le PNF aurait dû annoncer l'anomalie.

A noter que si le levier gauche a été entraîné vers l'avant par la main droite (ou son poignet) lors de la sélection de la réverse sur ralenti, l'inverse ne s'est pas produit. Le mouvement de la réverse droite sur son maximum vers le haut et l'arrière n'a pas amené le levier gauche vers l'arrière, vers le ralenti. Ceci est probablement dû au mouvement rapide de la main se passant de tout support.

- **FC10** : c'est le même processus que dans la séquence précédente. Cependant l'intervention de FC12 oblige à partager les actions avec cette FC. Ceci impose que pendant le traitement de cette dernière les actions de FC10 passent en boucle ouverte BO, en mental automatique (inconscient).

Ainsi, alors que l'oscillation en cap était pratiquement maîtrisée, pendant ce passage en mental automatique les actions de correction par le braquage du palonnier sont maintenues un peu plus longtemps que nécessaire, ce qui introduit un déphasage déstabilisant dans la boucle fermée BF perception-commande. De ce fait l'oscillation en cap augmente en amplitude, phénomène aggravé par la diminution du frottement des pneus sur la piste due à l'eau s'y trouvant. L'amplitude atteint 10° et les dépasse, ce qui est la fin du contrôle de l'avion.

AP2 à nouveau : la conscience de l'inévitable dicte au PF l'ultime recours de détresse : celui de couper les 2 moteurs.

Malheureusement l'action correspondante n'a pas été effectuée :

- le PF luttait toujours avec le contrôle de l'avion en cap,

- son éducation de base comportait une répartition des tâches en équipage où la gestion des moteurs était confiée à un autre membre.

Pour le **PNF** :

La vision extérieure lui dicte de regarder l'indicateur de vitesse d'après lequel il constate que la vitesse n'a pas diminué. Il l'indique au PF qui annonce la reprise de la reverse.

Le PNF n'annonce pas que les obstacles de reverse ne se sont pas positionnés. Peut-être l'alarme TAKE-OFF CONFIG l'a-t-elle perturbé dans cette tâche ?

Il ne comprend pas la situation et demande pourquoi, alors qu'il a devant les yeux la cause évidente, mais il regarde à l'extérieur.

L'ordre audio du PF de couper les moteurs n'atteint pas sa compréhension consciente.

Séquence 7 : le crash (5 sec)

Cette séquence n'apporte rien de nouveau sur le comportement des 2 pilotes.
Avion détruit. 123 morts.

Remarques

Au total le scénario a duré 57 sec du toucher des roues au crash et 46 sec du début de la perturbation à la sortie de piste.

Le PF s'est battu jusqu'au bout, mais malheureusement sans avoir diagnostiqué correctement la situation.

Le PNF était « inexistant ».

ANNEXE 3

UTILISATION ET EXPLOITATION DE L'EXPERTISE

COMPLEMENT DU CHAPITRE 6 DE LA THESE

Remarques préliminaires

1. *Les opinions des experts sont exprimées de façon complète et les textes reflètent principalement l'aspect remarques, critiques et objections, car les parties confirmant leur accord sur les analyses présentées ne nécessitent pas d'explication. Or, dans la cotation demandée aux experts opérationnels, **cet accord a atteint 99%**, chiffre qu'il faut garder en mémoire à la lecture de ce qui suit, orienté vers l'analyse des critiques et non vers le bilan positif réel.*
2. *Les documents soumis aux experts étaient des Dossiers B, C et D dans leurs versions initiales, correspondant aux chapitres 2, 3, 4, 5 et leurs annexes de la thèse. Les remarques ont permis l'amélioration des présentations et des textes, et **les présents chapitres 2, 3, 4, 5 et leurs annexes sont donc des versions les ayant incorporées***

1 – UTILISATION DE L'EXPERTISE

Cette thèse repose essentiellement sur l'exploitation de l'expertise, en particulier celle du rédacteur/chercheur :

- Education de base : Ingénieur Arts et Métiers et Supaéro, Formation Armée de l'Air (US Air Force), EPNER;
- Pilote de chasse, Pilote d'essais expérimental, Ingénieur navigant d'essais, Pilote de ligne instructeur;
- 6.000 heures de vol sur une centaine de types d'avions, principalement Mystère IVA, F104G Starfighter, Caravelle, Concorde, tous types d'Airbus jusqu'au A340 ; essentiellement en essais en vol et en instruction ;
- Exercice de la profession de pilote : 41 ans ;
- Fondateur et administrateur-gérant du centre de formation Airbus, Aeroformation aujourd'hui Airbus Training Center ;
- Concepteur et utilisateur des méthodes et programmes de formation des pilotes de Concorde et de tous types d'Airbus, de l'A300 à l'A340 ;
Jusqu'en 1994 (prise de retraite) le centre Aeroformation a, entre autres, formé environ 20.000 pilotes de tous horizons et de toutes cultures sur les avions Concorde et Airbus, formation à laquelle il a activement participé comme instructeur pilote.
- Président et chercheur dans l'institut d'ingénierie cognitive EURISCO jusqu'en 2002.
- Cofondateur du comité ICARUS, « Think tank » de la Flight Safety Foundation.

La recherche dans cette thèse repose évidemment sur l'exploitation des avancées en psychologie, dont les principales références utilisées sont mentionnées dans le Chapitre 2, mais aussi sur les multiples observations effectuées au cours du parcours professionnel, autant en essais en vol qu'en formation des pilotes. C'est ainsi que l'exploitation de l'expertise a pu compenser l'absence de recours à un laboratoire et à l'observation contrôlée de sessions spécialisées.

Cependant la crédibilité de cette expertise, et surtout celle des résultats en découlant, devaient être confirmées. Les Directeurs de thèse ont donc demandé la validation des hypothèses d'analyse de comportement dans les accidents et incidents, base de la construction de la thèse, par d'autres experts professionnels, navigants et pilotes comme le rédacteur, dans le double but de confirmer les parties techniques opérationnelles et l'acceptation par des opérationnels des hypothèses adoptées dans la méthode d'analyse utilisée.

Huit experts opérationnels ont été consultés, pour un nombre minimum souhaité de 6.

Cependant, indépendamment des avis des experts opérationnels, deux autres experts ont été intéressés par l'analyse conduite et l'ont commentée de façon générale. Ce sont :

- un professeur de neurologie,
- une psychologue ayant l'expérience de l'analyse des comportements des pilotes.

Un point remarquable de cette recherche de validité par le jugement d'experts est qu'elle a permis d'aller au-delà de la confortation de cette validité, en corrigeant, complétant et renforçant le thème de recherche ainsi qu'on le verra plus loin.

2 – METHODE UTILISEE AVEC LES EXPERTS OPERATIONNELS

Il s'est agi essentiellement de rassembler en les triant les commentaires enregistrés, écrits et verbaux, des experts opérationnels sélectionnés pour leur aptitude à juger les comportements de pilotes, et pour la diversité dans leurs expériences opérationnelles. La difficulté majeure rencontrée a été leur disponibilité et non leur intérêt qui a été positif.

Un ensemble de 5 documents leur a été fourni dans leurs versions initiales, chacun des documents pouvant faire l'objet de leurs critiques :

A – expliquant ce qu'on attend d'eux

B – donnant un résumé des questions techniques évoquées par la suite, essentiellement le Dossier B « Le pilotage » (devenu, amendé, le Chapitre 2 et son Annexe 1),

C – présentant un minimum d'éléments relevant de la psychologie afin de leur permettre de comprendre les analyses des incidents et accidents, essentiellement le Dossier C « Mécanismes cognitifs » (devenu, amendé, le Chapitre 3),

D - document principal, le Dossier D, présentant les analyses effectuées sur les 5 cas d'accidents et d'incidents retenus (l'Annexe 2),

G – un glossaire définissant les termes techniques utilisés. Ce document initialement inclus dans le document D en a été séparé suite aux remarques de l'expert n°1.

L'objectif principal, défini avec les Directeurs de thèse, était de voir si ces experts partageaient ou non les hypothèses et commentaires portés dans le document D.

Avec leur accord un premier expert a été interviewé afin de mettre au point la méthode à utiliser avec les suivants. L'objectif était de ne pas orienter leur opinion tout en donnant un minimum d'informations leur permettant de comprendre le but des analyses cognitives et

ainsi de pouvoir juger celles-ci d'après leur propre expertise. Le « cobaye » était l'expert présenté avec le n°1, interviewé sans question ni contrainte. Son opinion a été prise en compte au même titre que celle des autres experts car les ajustements découlant de l'interview ne portaient que sur des problèmes de présentation

Après l'interview de ce premier expert, pour être plus précis qu'avec un commentaire pouvant éventuellement être qualifié de subjectif, il a été demandé à tous de coter chaque analyse cognitive sur une échelle de 1 à 4 :

- 1 étant l'adhésion complète
- 2 étant l'acceptation avec des restrictions à expliciter
- 3 étant le refus avec obligation d'en donner les motifs
- 4 étant le rejet total.

Ainsi 1 et 2 confirmaient l'acceptabilité, 3 et 4 le refus.

Pour ces experts les documents B, C, D et G ont été légèrement amendés pour tenir compte des critiques de forme du n°1. Et le document D comportait à chaque pas de l'analyse, en fait à chaque séquence de déroulement de l'action, l'échelle de cotation de 1 à 4. Pour tous, les documents étaient de la même version initiale.

Lorsqu'ils étaient prêts les experts ont été interviewés en les laissant parler librement sans les interroger et, lorsqu'ils posaient des questions on ne leur donnait que des précisions figurant déjà sur les documents en leur possession.

10 experts, pilotes et navigants, ont été contactés :

2 n'ont pas accepté à cause de leur charge de travail ou de leurs occupations,

1 a servi de cobaye pour la définition de la procédure, mais son opinion est parfaitement exploitable,

1 a accepté mais n'a pu exploiter qu'un seul des 5 cas étudiés,

4 ont exploité l'ensemble des documents,

1 a exploité 4 cas sur 5,

1 a exploité 2 cas sur 5.

Volontairement leur nom n'est pas cité. En revanche un bref aperçu de leurs compétences est donné en tête de chacun de leurs rapports.

En complément de ces opérationnels deux personnalités, un neurologue et une psychologue, ont été amenés à consulter les mêmes documents et ont donné leurs opinions sur la validité de la méthode d'analyse adoptée. Elles ont été prises en compte dans le champ de leurs expertises personnelles.

3 – INTERVIEWS DES EXPERTS OPERATIONNELS

Chaque fois que l'emploi du temps de l'expert le permettait l'interview était enregistrée sur magnétophone. Ceci n'a pas pu l'être pour des conditions de disponibilité physique avec les experts n° 3 et 5 qui ont fourni un document écrit.

Dans l'exploitation des commentaires on est passé rapidement sur ceux en complet agrément avec l'analyse présentée (cotation 1), n'offrant aucun argument supplémentaire d'acceptation, sauf lorsqu'une remarque les accompagnait. En revanche on s'est attaché à mentionner et à analyser en détail les remarques et objections formulées.

Les documents finaux présentés dans la thèse prennent en compte les différentes remarques faites par les experts.

Expert n°1

Interview d'une durée de 2 heures enregistrée le 01/12/2009.

1 – Présentation

- Environ 20.000 heures de vol.
- Ingénieur ENSEM, Formation Armée de l'Air.
- Expérience : - militaire, pilote de chasse sur Mystère IV, SMB2
 - civile, pilote de ligne, copilote puis commandant de bord sur DC3, Caravelle, B707, B747, hélicoptères, Canadair, Falcon 50, ATR, avions légers et planeurs.
- Instructeur pilote de ligne.
- Pilote inspecteur à l'Organisation du Contrôle en Vol (OCV, organe d'inspection de la DGAC).
- Employeurs : Armée de l'Air, Air France, Aérospatiale/ATR.
- Enquêteur d'accidents aériens.

2 – Méthode utilisée

Comme déjà dit cette interview a servi à la mise au point des interviews suivantes. L'intéressé en était informé et l'avait accepté. Ainsi, bien que valable, l'exploitation de ses commentaires ne suit pas exactement le schéma adopté pour les autres experts, schéma défini après avoir écouté ce n°1.

Les documents suivants ont été mis à sa disposition : Dossiers B (Le pilotage des avions), C (Mécanismes cognitifs), D (Analyse de 5 cas d'incidents et d'accidents), dans leur version de novembre 2009, c'est-à-dire avec le glossaire inclus dans D.

L'interview a été menée après la lecture des documents s'étant échelonnée sur plusieurs semaines. Elle a été enregistrée sur magnétophone.

Aucune consigne n'a été donnée, ni aucune information ou orientation d'aucune sorte. On l'a laissé parler librement.

Les 3 documents B, C et D ont été successivement commentés page par page.

3 – Résultats

Résumé des commentaires

Cinq sortes de commentaires ont émergé de leur ensemble :

- 1 - les plus nombreux : les ambiguïtés de forme, les erreurs de présentation, d'orthographe et de ponctuation ;
- 2 - la difficulté à utiliser et à rechercher les définitions des éléments cognitifs, à la lecture de B, en les recherchant dans C ou dans le glossaire de D, puis à la lecture de D, essentiellement pour des problèmes de consultation dans les documents ;
- 3 - le besoin d'exemples explicitant et renforçant ces définitions dans C, ainsi que des schémas explicitant les notions de mécanique du vol dans B ;
- 4 - les remarques ponctuelles sur les 5 cas présentés ;
- 5 - l'avis sur la compréhension de la démarche.

Commentaires 1

Les points litigieux ont été notés au fur et à mesure¹.

Commentaires 2

La difficulté concernait surtout les termes cognitifs décrivant les comportements, tels que les agents, les fonctions cognitives, les modèles mentaux, termes inhabituels dont il était nécessaire de connaître la signification. Aucun problème pour les termes aéronautiques. Au début il était nécessaire de faire de nombreux aller/retour entre le texte lu et celui expliquant ces notions nouvelles dans le document C ou dans le glossaire du D. Cependant, dès qu'elles étaient assimilées cette contrainte disparaissait. Il faut trouver un moyen simple et direct pour pallier cette difficulté².

Noter une confusion entre les mémoires de travail et long terme et une incompréhension du terme « dynamique » dues à une mauvaise rédaction du texte³.

Commentaires 3

Les descriptions et explications données dans les documents B et C sont bonnes, mais quelques schémas et/ou exemples faciliteraient leur assimilation.

En revanche le schéma « Fonctionnement des fonctions cognitives d'un agent » porté en fin du document C n'a pas été compris⁴ alors que le texte ne posait aucun problème.

Commentaires 4

¹ Les documents présentés aux autres experts ont été amendés dans la forme pour corriger ces défauts.

² Le glossaire a été ensuite fourni comme document séparé, document G, ainsi utilisable directement à la demande.

³ Même remarque que 1

⁴ Le schéma était fait pour faciliter la compréhension..! Il a été supprimé par la suite.

Il s'agissait de points dont la rédaction méritait une meilleure présentation.

A noter la nécessité de mieux expliquer les figures du cas n°5 qui sans explication sembleraient en contradiction avec le texte (oscillation en cap et position)⁵.

Commentaires 5

Une fois les documents B et C assimilés, surtout C, la lecture de D n'a posé aucune difficulté de compréhension.

L'analyse portant sur la mécanique du vol est correcte, et celle sur le comportement paraît pertinente, n'offrant aucune critique. Le jugement sur l'ensemble est bon.

Interrogation sur des cas vécus

Après les commentaires sur les documents de la thèse, on a demandé s'il avait vécu des situations analogues par leur soudaineté et leur danger.

Il a cité plusieurs cas :

- un problème de train d'atterrissage ne sortant pas complètement sur SMB2 avec très peu de combustible restant, cas traité sous stress (choix du crash ou de l'éjection) avec conséquence positive suite à une ultime tentative réussie de sortie de train,
- une explosion de moteur au décollage sur B707, traité sans problème « je savais ce qu'il fallait faire », avec atterrissage sur 3 moteurs,
- en simulation de panne à l'atterrissage d'un ATR, avec blocage d'un moteur plein gaz, un atterrissage réussi mais avec une procédure n'étant pas la meilleure,
- une brutale perte d'altitude en fin d'approche ILS à 100 ft à l'atterrissage en B747 (problème de météo), avec l'acte réflexe de remettre les gaz, ce qui a permis un toucher des roues sans excès de vitesse verticale, avec le second réflexe de réduire à fond dès le toucher pour poursuivre l'atterrissage.

Ces cas très différents traités avec succès dénotent une bonne faculté de réactivité, mais montrent aussi la difficulté d'adopter soudainement la bonne solution.

Question finale

Elle a été posée par l'expert : « A quoi vont servir ces analyses ? ».

Conclusions

Les remarques se rapportent essentiellement à des problèmes de présentation des textes qui ont été amendés en conséquence.

Après assimilation des notions précisées dans les documents présentés B, C et D, il n'y a eu aucun problème de compréhension ni aucune critique sur le fond ou sur les notions présentées, avec un pilote sachant bien juger les faits.

La présentation directe aux experts du document D (les 5 cas analysés) n'est pas parue possible. Une introduction avec les documents B et C amendés a été nécessaire. Pour des pilotes l'ordre de lecture des documents doit être : C-B-D. Un document « Glossaire », indépendant des B, C et D mais pouvant être utilisé lors de la lecture de n'importe lequel d'entre eux, a été une solution acceptable.

L'écoute des commentaires, libres et non orientés, sur les 3 documents semble être une bonne procédure.

⁵ Même remarque que 1

Expert n°2

Interview enregistrée, d'une durée d'environ 1h 15 min, en commentant un document de commentaires écrits.

1 – Présentation

- Education professionnelle de base : Ecole Polytechnique, Formation pilote Armée de l'Air
- Nombre d'années d'exercice de la fonction de navigant : 39 ans
- Heures de vol : 18.000
- Qualifications :
 - Pilote de ligne
 - Pilote instructeur examinateur

- Principaux types d'avions :
 - Avions à hélice : SIPA 11 et 12, North American T6, Caudron Goéland, DC 3, Constellation, Super Constellation, Vickers Viscount, Fokker 27, Twin Otter
 - Avions à réaction : T 33, Vampire, Mystère II, Caravelle, Mercure, Boeing 727, 707, 747, 6h de vol sur Concorde
- Fonctions exercées :
 - Air France : Pilote de ligne, Instructeur, Examineur
 - DGAC : pilote inspecteur et examinateur, participant aux enquêtes accidents, en charge de la certification opérationnelle du Mercure et, partiellement du Concorde
 - Chargé de mission, représentant la DGAC pour l'élaboration de la réglementation européenne des licences de pilote.

2 – Remarques sur la forme

Ces remarques concernent la lecture des documents par des personnes n'étant pas familières avec l'aéronautique ou avec les concepts cognitifs. Elles précisent les endroits où des compléments sont nécessaires dans les documents B et C: schéma explicitant les forces, altitudes et hauteurs, automanette, coefficient Cz, agents et fonctions cognitives, ajouts dans le glossaire, positions relatives du texte et des figures, référence à l'accident du Mont Sainte Odile⁶, etc.

Intérêt à présenter chaque cas en dossier séparé.

Pour le cas n°2 un schéma de la piste serait utile.

Précision à donner sur différence entre hauteur (au-dessus du sol) et altitude (référence barométrique au-dessus du niveau de la mer).

⁶ La référence à cet accident a été retirée par la suite car n'apportant pas d'élément pertinent pour la thèse.

3 – Commentaires sur les analyses de cas

Cas n°1

Séquence 1 :

Remarques sur des éléments de rédaction du chapitre A, tiré du compte-rendu officiel, verticale apparente ou assiette perçue, piste 03 inverse de la 21.

Cotation 1

Séquence 2 :

Cotation 1

Séquence 3 :

Argument pour ceux qui pensent que les manettes de poussée immobiles sont sources d'erreur.

Cotation 1

Séquence 4 :

Remarque : « le pilote effectue des variations d'assiette très importantes, ce qui semble montrer une mauvaise formation initiale (sous l'effet du stress, on revient aux comportements initiaux même si on les a corrigés par la suite) »⁷

Cotation 2

Séquence 5 :

Remarque : « Il semble qu'on n'ait pas les données de l'enregistreur de conversation. Le comportement du pilote fait penser à Ste Odile où le pilote a fait rentrer les volets en approche finale parce qu'il arrivait au placard volets sans s'apercevoir que sa Vz était aberrante. »

Cotation 2

Séquence 6 :

Cotation 1

Séquence 7 :

Remarque : « cette interprétation est-elle corroborée par le rapport d'incident ? Peut-être que l'ensemble des paramètres pente, assiette, Vz et altitude l'ont alarmé. »

Cotation 2

Séquence 8 :

Remarque : « Le pilote augmente la poussée avant de modifier l'assiette en contradiction avec la procédure classique faisant partie de la formation de base, appliquée lors de la remise de gaz en fin d'approche, ce qui a pour résultat d'augmenter la perte d'altitude. Ceci confirme mon observation précédente. Il serait intéressant de connaître le parcours de formation initiale du pilote. »

Cotation 2

⁷ Dans tous les cas et pour toutes les séquences concernées les cotations « 2 » sont principalement dues à l'incompréhension de l'expert pour le comportement décrit, mais il admet que l'analyse offre une explication acceptable sans qu'il puisse en donner une autre.

Séquence 9 :

Cotation 1

Cas n°2

Utile de préciser que dans ce cas $V1=VR$. Expliciter la signification de ces vitesses (glossaire). On n'est pas *autorisé* de s'arrêter après $V1$, même si cela est rarement possible comme dans ce cas.

« En principe le briefing avant décollage implique un rappel de la procédure d'arrêt-décollage au plus tard avant la mise en vitesse ».

Séquence 1 :

Remarque : en fait hésitation entre 2 ou 3, au motif que l'analyse serait à revoir (cotation 3) si la menace aviaire était avérée à la mise de gaz car les consignes compagnies sont claires dans ce cas, il ne faut pas décoller avant que les autorités portuaires aient pris les mesures correctes de dispersion des oiseaux⁸.

Cotation 2

La cotation 2 est conservée du fait de l'anomalie constatée du comportement du Cdb vis-à-vis du danger potentiel. Elle est conservée tout au long de l'analyse pour la même raison.

Séquence 2 :

Cotation 2

Séquence 3 :

Remarque : la simulation mentale de l'arrêt pendant le décollage se situe probablement plus tôt, au moment du début de l'accélération.

Cotation 2

Séquence 4 :

Cotation 2

Séquence 5 :

Cotation 1

Cas n°3

Séquence 0 :

Cotation 1

Séquence 1 :

⁸ Après l'interview une discussion a permis de préciser que, le compte-rendu de la compagnie faisant foi en précisant les faits observés, ce compte –rendu mentionne : « Après une attente sur la bretelle D, l'alignement est effectué à partir de cette dernière et un rolling take off est initié. L'accélération est forte (près de 6 kt/s). Le commandant de bord et l'OPL (OPL :Officier pilote, copilote) ont aperçu des goélands qui s'envolent au dessus de la piste vers la trajectoire de l'avion. La vitesse augmente rapidement. ». Ce qui montre que les oiseaux sont aperçus après le début d'accélération, donc après la mise de gaz, confirmant l'analyse.

Cotation 1

Séquence 2 :

Remarque : « On voit naître une des erreurs définies par JC Wanner : le PF se focalise sur la stabilité de la descente et la cohérence Vz/pente désirée et oublie (ou refuse) de prendre en compte les écarts signalés par le glide et l'opérateur GCA. »

Cotation 2

Séquence 3 :

Remarques : - « Le PF se rend aux observations du PNF plus convaincantes peut-être que celles du contrôleur GCA.

- On n'insiste pas assez dès le début sur la variation de vitesse du vent (gradient) maintenant bien connu et qui a plus d'importance que la composante verticale *down draft*. ...Un gradient de vent très fort peut entraîner une variation de vitesse indiquée telle que la poussée disponible ne permet pas de rétablir la situation. On demande maintenant aux pilotes qui disposent d'une indication de vitesse sol de majorer leur vitesse en approche pour que la vitesse sol ne tombe pas en dessous de celle qui est souhaitable au seuil de piste compte tenu du vent au sol annoncé.

- Observation personnelle : dans un cas pareil où l'on a des doutes sur la qualité de l'ILS, un pilote de ligne aurait tendance à suivre l'ILS en demandant au GCA de surveiller son plan de descente. »

Cotation 2

Séquence 4 :

Cotation 1

Séquence 5 :

Cotation 1

Séquence 6 :

Cotation 1

Cas n°4

Aucun commentaire, l'expert n'ayant pas d'expérience de voltige en présentation.

Cas n°5

L'accident est à rapprocher d'autres de même nature.

« L'accident échappe à toute logique car, s'il est vrai que, dans le cas d'hydroplaning la décélération est faible, on n'a jamais vu la vitesse augmenter sans augmentation de poussée. »

Séquence 1 :

Cotation 1

Séquence 2 :

Remarque : « On pourrait dire quelque part qu'on ne peut mettre de la poussée reverse que lorsque les « obstacles » sont bien positionnés, ce qui est mis en évidence par l'allumage de voyants verts qui doit être annoncé par au moins un des deux pilotes. Ceci est la norme pour tous les atterrissages et évite, en particulier, au PF de mettre une poussée asymétrique si l'un des obstacles (coquille) n'est pas en place. »

Cotation 1

Séquence 3 :

Cotation 1

Séquence 4 :

Cotation 1

Séquence 5 :

Cotation 1

Séquence 6 :

Remarque : « L'analyse montre que la suite inimaginable d'erreurs est due en grande partie à un manque de compétence dû à une mauvaise formation individuelle et à une absence de « travail en équipage ». Le passage d'équipage à 3 à équipage à 2 n'a pas été digéré. »

Cotation 1.

4 – Commentaires de fond

« Remarques sur les figurations : la concentration des informations a un inconvénient, le rétrécissement du champ visuel actif amenant le pilote à être moins réceptif aux informations extérieures. »

« Réflexion personnelle inspirée des travaux de JC Wanner et de mon expérience personnelle : L'homme ne peut, en général, pas faire plusieurs choses à la fois sauf si certaines tâches sont devenues « automatiques » ; Il les fait l'une après l'autre en séquence qui peut être très rapide. Quand on est fatigué, la rapidité diminue. Dans le cas d'une collecte d'information, cela conduit facilement à « sauter » une information ce qui peut se traduire par la dérive d'un paramètre de pilotage. Il m'est arrivé, par exemple, à l'issue d'un vol très fatigant d'effectuer une approche manuelle de précision parfaite ... avec une vitesse que je ne contrôlais plus et qui s'éloignait de la valeur de référence. Mon copilote est alors intervenu pour me le signaler.

D'autre part, j'ai toujours accordé beaucoup d'importance à la répétition mentale et éventuellement gestuelle d'actions très rarement nécessaires exigeant une réponse rapide : la remise de gaz et l'arrêt décollage. On trouve mention de l'efficacité de cette répétition utilisée par tous les sportifs de haut niveau dans des documents très anciens cf « le tir à l'arc » des maîtres Zen. »

« La vision périphérique est très importante même si elle est inconsciente lorsqu'on est en conditions de vol à vue. La perte de cette vision peut être à l'origine d'accidents (voir cas n° 4 ?) »

« La description de l'accident n°5 met en évidence les effets pervers de certains automatismes lorsque l'on sort de leur domaine normal d'utilisation. »

« La régression (mentionnée dans la séquence 5 du cas n°2) vers une procédure utilisée antérieurement est évoquée. Elle intervient très souvent quand on est en état de stress même dans des activités ludiques comme le ski ou le tennis. »

Expert n°3

Du fait de sa forte occupation professionnelle les remarques de l'expert ont été transmises par document (en grande partie rapporté ci-après pour la densité de ses commentaires) et il n'y a pas eu d'interview directe.

1 – Présentation

- Education de base : Ecole de l'Air, Sup Elec, EPNER
 - Heures de vol :
 - Qualifications : Pilote militaire d'avions de transport
Pilote d'essais expérimental
Instructeur pilote de ligne
 - Types principaux d'avions : Jaguar, tous Airbus
 - Fonctions exercées : chef du programme Jaguar indien, « project pilot » A340/A330 à Airbus, Groupe de liaison opérationnelle Airbus-Cies aériennes-organismes professionnels, créateur du « Airbus Human Factor Group », « Senior Director Training Policy », Chargé des liaisons Airbus-compagnies aériennes-training-organismes internationaux (FSF, IATA, SAE, IFALPA).
- En exercice.

2 – Remarques sur la forme

Dans le document C « il serait judicieux de le commencer par les Modèles mentaux. Ce qui faciliterait la compréhension des sous-paragraphes précédents, puisque, semble-t-il, ces modèles mentaux permettent de lancer les actions pertinentes, et les fonctions cognitives. »⁹
Pour le document D : « j'ai du mal à voir en quoi l'assignation un peu artificielle de certaines tâches à AP1 ou AG5 etc...amène une rationalité à une analyse HF de l'événement ; en effet, il faut en tout état de cause passer par les séquences A, B , C, pour en déduire D ; le gros de l'analyse est faite en réalité dans la séquence C, et D ne fait que traduire C dans un vocabulaire « cognitif ». »^{10 11}

⁹ Modification effectuée.

¹⁰ Ici les appellations A, B, C et D ne concernent pas les documents fournis aux experts ainsi que mentionné au début du chapitre mais concernent la désignation des paragraphes des analyses des séquences des cas d'accidents et d'incidents.

¹¹ Il est exact que la partie D de l'analyse d'une séquence est une conséquence directe de la partie C la précédant, mais sa présence est volontaire car elle est orientée vers l'analyse fine des comportements alors que la partie C relève de l'observation globale classique assez peu précise.

3 – Commentaires sur l'analyse des cas

Cas n°1

La partie technique est critiquée par un expert en matière d'automatismes des avions Airbus, ce qui confirme la nécessité des analyses psychologiques effectuées par des experts autant techniciens que psychologues.¹²

« - *Inexactitudes techniques*¹³:

- 1- *confusion entre la fonction ALT ALERT et le mode ALT* (capture d'altitude) ; en page 9, il est indiqué que l' ALT ALERT « survient en avance d'une valeur d'autant plus grande que la vitesse verticale est grande ». Ceci est inexact : quand l'avion est en montée convergente vers une altitude objectif sélectionnée sur la FCU, en vol manuel l'ALT ALERT apparaît et sonne à 750ft de cette altitude objectif, pour la première fois. Le mode ALT*, mode FG, lui s'engage bien sûr avec un écart d'altitude par rapport à l'altitude objectif fonction de la V/S actuelle. Il est alors dit que « la vitesse verticale VZ étant élevée, l'interception de l'altitude par le FD s'effectue quasi simultanément avec l'apparition de l'indication ALT* sur le PFD »... ??? Une fois qu'ALT* apparaît sur le FMA, la capture est immédiatement active, et la VZ n'a rien à voir là dedans...⁽²⁾*
- 2- *il est fait mention ça et là, de sauts de la barre FD vers le bas ou vers le haut. Ceci ne correspond à rien de réel ; dans le cas présent, dès qu'ALT* s'engage la barre FD commande seulement un ordre de diminution d'assiette (et de plus LVR CLB apparaît simultanément au FMA, ce qui n'est jamais mentionné dans le texte). Si le pilote tarde à obéir à cet ordre, l'ordre de diminution d'assiette va aller croissant. Si par contre, le pilote réagit, diminue l'assiette de l'avion et ce au-delà de l'ordre FD, le symbole avion sera en dessous de la barre du FD et celle-ci seulement se mettra à monter sans faire de sauts. Tout ceci est toujours progressif,¹⁴*
- 3- *si au cours de l'ALT* le pilote garde les leviers de puissance en TOGA, et ne les met pas dans le cran CLB, l'avion va se mettre à accélérer comme un dard (à moins que le pilote ne maintienne une assiette de 17°ou plus, à la masse où ils devaient être < MLW),*

¹² La rectification des détails techniques pouvait amener à d'autres hypothèses de comportement, cependant sans que la méthode utilisée soit en cause. Mais ces erreurs techniques constatées ont empêché la cotation puisque d'autres hypothèses étaient à envisager. Dans les faits la rectification n'a modifié ni l'analyse des comportements, ni ses résultats.

¹³ Les erreurs techniques mentionnées dans ce texte, provenant d'une mauvaise interprétation de documents opérationnels, ont été corrigées par la suite sans que les hypothèses utilisées dans l'analyse du comportement en aient été notablement modifiées.

¹⁴ Il s'agit là dans la thèse d'une interprétation de la rapidité d'évolution de la barre horizontale du directeur de vol FD : la barre évolue certes seulement mais son mouvement de bas en haut est cependant rapide et se situe nettement à l'intérieur de la durée de 5 sec pendant laquelle s'est produite la focalisation sur la vitesse. Pour éviter l'ambiguïté le terme « saut » a été supprimé par la suite.

- 4- lorsque ALT* s'engage LVR CLB apparaît au FMA et la vitesse target saute à G.DOT sur l'échelle de vitesse, en Go Around. Donc quand le pilote place la manette des gaz dans le cran CLB, l'ATHR s'engage et la puissance ne diminue pas (contrairement à ce qui est dit), puisque le mode SPEED est alors actif et que la vitesse avion est inférieure à G.DOT. (p11, 13 & 14),
- 5- l'avion accélérant, la vitesse va approcher de VFE ; mais l'ATHR va alors diminuer la puissance jusqu'à IDLE si il le faut, pour éviter d'overshooter VFE,
- 6- en remise des gaz, la Configuration est 3 ; lorsque la vitesse avion dépasse F speed en accélération, le PF commande FLAP1 (voir p10) et la configuration obtenue est 1+F avec VFE 215Kts ; lorsque l'avion atteint 210Kts, les volets s'« autoretractent » vers 1 avec VFE 230Kts. Les volets ne ressortent pas si la vitesse chute en dessous de 215Kts ; il est donc impossible que l'alarme VFE 1+F réapparaisse.

Si tu considères la mécanisation réelle de tout cela, tu verras que l'analyse présentée devient très discutable...¹⁵

- Hypothèse discutable¹⁶

« à partir de ce moment, la barre FD et surtout l'échelle de vitesse VC deviennent les informations majeures pour le PF ce que prouve l'évolution enregistrée du vol » (bas de la p11) ; et en P13 « la partie consciente d'AG1 étant orientée sur l'observation de la vitesse ». Sincèrement, cette hypothèse me paraît gratuite, d'autant plus que juste avant, il est affirmé que le pilote a estimé que l'altitude target avait été dépassée...l'altitude doit être un élément clé dans son esprit. Et d'ailleurs le pilote diminue alors l'assiette de l'avion (sans doute en overshootant, peut être parce que dans cette configuration la barre FD ne donne pas d'ordre d'assiette amenant l'avion à descendre) ; la vitesse avion approche rapidement de VFE 3 ; mais comme les manettes sont dans le cran CLB, l'ATHR va commander IDLE (contrairement à ce qui est sous-jacent p13).

Y-a-t-il vraiment eu une alarme VFE3 ? ce n'est pas mentionné dans le descriptif de l'incident !

Dans la suite du descriptif, l'assiette de l'avion est dite être de plus en plus négative, ce qui tend à montrer que la descente est primordiale dans l'esprit du pilote... mais il met les manettes en MCT... est-ce parce que les moteurs étaient en IDLE par l'ATHR (volets en 1+F et grosse accélération), mais sûrement pas à cause de la vitesse qui devait alors être proche de la target G.DOT, sinon au dessus... »

Cas n°2

Quelques remarques générales impliquant la nécessité d'être plus précis dans les descriptions :

« Dans l'analyse, il n'est pas fait mention de l'annonce « THRUST SET » qui doit avoir lieu avant 80Kts ; oubli ?¹⁷

Piste mouillée, composante vent arrière au T/O, décollage d'une intersection : rolling T/O curieuse décision : quasiment non mentionné dans l'étude¹⁸ ;

¹⁵ Voir 24

¹⁶ La séquence et en fait les plusieurs possibilités citées ici n'expliquent pas le comportement du pilote. Là aussi on est confronté à des actions apparemment incohérentes pour un professionnel.

¹⁷ Rien n'est mentionné dans le compte-rendu d'incident servant de base à l'étude.

MAN TOGA veut dire : poussée manuelle commandée à TOGA. TOGA ne veut pas dire poussée TOGA établie, comme indiqué dans le texte¹⁹;

Dans les procédures Airbus, quand le PNF annonce « 100Kt », le PF répond « checked », mais jamais « continue » et n'annonce pas sa vitesse, contrairement au texte²⁰;

Enfin pendant la course au décollage, le PF est tête haute (qu'il y ait des oiseaux ou pas)...
Alors qu'il est dit « la mise en mémoire de la présence d'oiseaux laisse encore plus privilégier la vision extérieure vis à vis des autres paramètres » ! »

Séquence 0 :

« D'ACCORD MAIS... Il n'est pas fait mention du rolling T/O sur piste mouillée, vent AR, intersection »²¹

Cotation 2

Séquence 1 :

« PAS D'ACCORD, l'annonce de 100Kt est faite à 109Kt, soit env 1.5sec après le passage à 100Kt. Le fait est qu'il y a un retard dans l'annonce mais peut être pas, ou même sans doute pas dans la détection. Or le retard dans l'annonce est courant dans la vie de tous les jours. »²²

Cotation 3

Séquences 2, 3, 4 :

Cotation 1

Séquence 5 :

Remarques : - « D'ACCORD MAIS..., quand IAS>100Kt, l'avion est dans le « High Speed régime » du T/O, et naturellement le pilote est « Go Minded ». La présence d'oiseaux peut certes lui amener à l'esprit un doute sur la poursuite du décollage, mais je ne pense pas que son esprit bascule dans un schéma d'arrêt.

- L'enfoncement des pédales pour une accélération-arrêt est une action réflexe due au fait que les pilotes de ligne en font très peu ; ceci explique aussi le non enfoncement complet des pédales de freins, position rarement atteinte en exploitation en ligne. Plus tard le pilote les pousse à fond tout simplement parce qu'il voit le bout de piste arrivé !

- Quant à l'action qui arrive avant l'annonce, c'est classique ! Le plus important dans l'esprit du pilote est l'action, l'annonce est secondaire... »

Cotation 2

Cas n°3

« Quelques remarques :

Dans le descriptif des circonstances et l'analyse, il est étonnant de constater que pour une approche qualifiée de précaution (orages, déroutement éloigné, ILS non homologué...) l'équipage choisit de voler une approche manuelle en Raw Data, sans DV, tout en se fixant des minimas de type CAT2 (« altitude de décision réglée à 100+160=260ft »); par contre à juste titre, l'équipage demande une assistance GCA.

¹⁸ Mentionné dans la séquence 0.

¹⁹ Si le CDB annonce « vérifié » on peut supposer que la poussée est alors établie.

²⁰ Les procédures de la compagnie diffèrent de celles d'Airbus.

²¹ C'est mentionné dans la séquence 0.

²² C'est en effet possible, mais ce n'est qu'une autre hypothèse.

Mais il est encore plus curieux de constater que le PF se fie plus à la stabilisation de ses paramètres qu'aux données combinées G/S et GCA, pour son positionnement par rapport au plan de descente : « le PF a eu alors tendance à croire que les indications extérieures étaient erronées »... »

Séquence 0 :

« D'ACCORD MAIS... rien n'est mentionné sur le choix de voler l'approche manuellement sans directeur de vol, avec une météo diminuant rapidement vers les minima CAT1 (visi<500m) »²³

Cotation 2

Séquence 1 :

Cotation 1

Séquence 2 :

« D'ACCORD MAIS... rien n'est mentionné sur le choix de voler l'approche manuellement sans directeur de vol, avec une météo diminuant rapidement vers les minima CAT1 (visi<500m) »²⁴

Cotation 2

Séquence 3 :

« D'ACCORD... idem ci-dessus ! De plus ayant traversé plusieurs downdrafts sur Airbus, je dois dire que ces traversées se sont toujours accompagnées à un moment ou à un autre de variations significatives de la V/S pour maintenir la pente nominale. »

Cotation 2

Séquence 4 :

« D'ACCORD...l'altitude de décision est-elle de 360ft ou de 260ft comme indiqué au début de la description de l'événement ? »²⁵

Cotation 2

Séquence 5 :

« D'ACCORD... l'altitude de décision est-elle de 360ft ou de 260ft comme indiqué au début de la description de l'événement ? »²⁶

Cotation 2

Séquence 6 :

Cotation 1

Cas n°4

Remarque d'ensemble :

« Cet événement donne lieu à bien des interprétations ou hypothèses, qui démontrent la part importante de subjectivité dans l'analyse d'un incident; d'ailleurs, toutes les hypothèses pourraient s'avérer valables : par exemple, le pilote est aveuglé en début de manœuvre au HUD, puis tout d'un coup il voit et constate que la vitesse est de 57Kts ; surpris, il considère à nouveau cette information et lit 110Kts. On peut interpréter cela comme dans ton texte : il ne peut s'expliquer ce saut de badin ou bien il peut se dire que, sortant d'un aveuglement, il ne croit pas sa première lecture... »

²³ Mentionné dans la séquence 0.

²⁴ Idem 23

²⁵ C'était bien 260 ft.

²⁶ Idem 25

Le déficit de badin dû à l'allumage retardé de la post-combustion est sans doute une erreur de diagnostic, néanmoins allant dans le sens de la réalité puisque l'incidence max et l'altitude max au sommet était significativement différentes des jours précédents (+2°, -230ft à -650ft).

Quant aux 2 hypothèses (b) que tu privilégies en séquence 4 et 5, elles se justifient peut être, mais les 2 hypothèses (a) se justifient également. Une chose me paraît certaine, c'est que dans les démos, le pilote est très « prisonnier » du déroulement du schéma de la démo qu'il a en mémoire dans les moindres détails de son déroulement ; il faut une « sérieuse raison » pour l'en sortir, comme par exemple l'approche d'une limite d'altitude, de vitesse, limites qui sont également mémorisées. »

L'interprétation retenue découle du compte-rendu initial de l'évènement.

Toutes séquences :

Cotation 1 : « compte-tenu des hypothèses b retenues ».

Cas n°5

« Quelques précisions:

sur l'ECAM du 310, il n'ya pas d'indications de poussée; le N1 ou l'EPR sont fournis sur des cadrans placés entre les 2 écrans de l'ECAM ;

il est demandé au PNF d'annoncer la sortie des Ground spoilers, l'allumage des 2 voyants verts Reverse, et du voyant vert Decel de l'A/BRK si sélectionné ; il n'est pas demandé de surveiller la position des leviers de poussée, ou l'extinction des voyants reverse en tout cas dans nos SOPs.

Je crois enfin que l'on ne peut pas se permettre de dire : « les automatismes ayant (à tort) détecté un début de décollage »²⁷ ce qui interdit le passage d'un moteur en reverse. Le « à tort » est superflue à mon sens : un moteur plein pot et l'autre en reverse, ce n'est vraiment pas une situation d'avenir...

Une remarque : ce qui est fou, c'est qu'après 43 sec environ, « les pilotes réalisent enfin l'anormalité de la situation... »... qu'ils n'aient rien diagnostiqué, passe encore ; mais 100Kts après 43 sec quasiment pleins freins sans y trouver d'anomalie ... »

Séquences 0, 1, 2 :

Remarque : « Pour info sur A310, la dissymétrie de poussée due à la reverse déployée sur un moteur seulement est très faible ; très peu de rudder pedal est requis d'autant plus que très rapidement le steering entre en jeu (IAS<100Kts). »

Cotation 1

Séquence 3 :

« D'ACCORD MAIS... que veut dire «AP1 : l'objectif est de réduire le bruit dû à la reverse » ?²⁸ Si le pilote sélectionne le ralenti reverse, c'est parce que l'avion approche de la vitesse recommandée pour cela. En fait la seule anomalie dans cette Séquence est l'augmentation involontaire de la poussée sur le moteur gauche. »

Cotation 2

Séquence 4 :

²⁷ En fait il s'agit d'une détection mécanique de position du levier de poussée du moteur gauche.

²⁸ L'hypothèse de réduction de bruit est mentionnée dans le rapport officiel.

« D'ACCORD MAIS... j'ai un doute quant à l'hypothèse prêtée à AP2 sur la difficulté de la contrôlabilité latérale du fait de la piste mouillée, et pour AG2 que la vision extérieure ait été privilégiée sans coup d'œil sur les instruments...pendant un landing roll out, le PF pilote essentiellement tête haute ; donc rien ici n'est privilégié... »²⁹

Cotation 2

Séquence 5 :

« D'ACCORD MAIS... pour l'AP2 du PNF il est dit : « contrairement aux procédures il n'annonce rien au PF, alors qu'au dessus il est mentionné qu'il n'a rien remarqué... ! et d'ailleurs il donne l'heure d'atterrissage à la tour (bizarre à ce moment du roll out...). »

Cotation 2

Séquence 6 :

Cotation 1

4 – Commentaires de fond

Document B (Le pilotage) :

La rédaction du document B a été spécifiquement orientée vers l'explication technique des cas analysés dans le document D. Cependant l'expert propose une rédaction plus opérationnelle et peut-être plus proche de l'explication du comportement opérationnel des pilotes.

La référence à l'accident du Mont Sainte Odile est à supprimer car elle amènerait à une description longue et complexe, inutile dans ce texte³⁰.

« C'est en principe une explication « simple » des fonctions du pilote, pour en déduire ce dont il a besoin pour exécuter ses tâches.

Si l'idée des 6 éléments est séduisante, elle est ici compliquée et touffue, faisant appel dans la première partie à des équations, et dans d'autres à des explications très succinctes ; de tout cela on ne tire pas de notion structurée du pilotage d'un avion commercial.

Pourquoi donc ne pas être plus pragmatique et décrire le pilotage comme l'imbrication des tâches fondamentales naturellement ordonnées. Ces tâches sont dans l'ordre :

- le contrôle des mouvements de l'avion autour de son Centre de Gravité (CG), et de sa vitesse au moyen des commandes de vol et des moteurs, actionnées par le manche, les pédales ou les manettes des gaz ; c'est la tâche de pilotage à court terme qui consiste à faire « voler » l'avion, c'est-à-dire lui permettre de se sustenter en toute sécurité, d'évoluer vers le haut ou vers le bas, vers la droite ou vers la gauche ;
- le contrôle de la trajectoire de l'avion (c'est à dire de son CG), trajectoire définie par rapport à des repères sol (aérodromes, balises de navigation,...) ; c'est le pilotage à plus long terme, ou tâche de navigation ;
- la prise en compte de l'environnement atmosphérique : haute ou basse pression ayant des conséquences sur les vents, sur la lecture de certains paramètres de vol comme l'altitude

²⁹ Difficulté à admettre des comportements aberrants.

³⁰ Voir commentaire 18

barométrique, les orages, les précipitations, les turbulences, le givrage, les cisaillements de vents, les volcans (pour leur conséquences atmosphériques)... ;

- la prise en compte des éléments aéronautiques ; autres trafics potentiellement conflictuels (TCAS, ADS-B...), obstacles, reliefs (TAWs)... C'est la tâche de surveillance ;

- la prise en compte des autorisations du Contrôle aérien par communications vocales ou automatiques ; ces autorisations ou « clearances » transmises par le contrôle aérien (appelé couramment ATC) indiquent aux pilotes à quelle altitude ou cap ou sur quelle route voler, ou bien des ordres d'évitements si requis... les pilotes peuvent également demander au contrôle aérien des modifications de route ou d'altitude suivant les circonstances... C'est la tâche de communication ;

- la prise en compte du bon fonctionnement des divers systèmes permettant à l'avion de fonctionner correctement (électricité, hydraulique, air, pressurisation, carburant...) ; cette surveillance permet aux pilotes de réagir en cas de panne suivant des procédures préétablies et proposées. C'est la tâche de « management des systèmes ».

De là il est facile de décrire les informations requises pour exécuter ces tâches...

A chaque instant du vol, le pilote doit percevoir l'ensemble de la situation dans laquelle évolue l'avion pour pouvoir exécuter ses tâches, en faisant la synthèse des informations fournies :

- sur le PFD pour le pilotage à court terme (moteurs compris au travers de l'accélération matérialisée par le vecteur VC trend),

- sur le ND pour le pilotage à long terme ou la navigation, qui de plus informe le pilote sur :

a/ les conditions atmosphériques grâce aux échos radar matérialisant les masses nuageuses positionnés par rapport à la position de l'avion et de sa trajectoire prédite,

b/ les conditions aéronautiques grâce aux plots matérialisant les trafics conflictuels, ou les zones colorées matérialisant les reliefs et leur hauteur relative à celle de l'avion, tous deux positionnés par rapport à la position de l'avion et de sa trajectoire prédite,

- sur la DCDU ou la « Mailbox », pour les tâches de communication automatique avec l'ATC (data link), sur lesquels sont affichés les messages du contrôle aérien (ATC) ; si les communications avec l'ATC sont vocales, les « clearances » sont immédiatement traduites par le pilote en objectifs (« targets ») pour le pilote automatique, ou en modifications de plans de vol insérées dans le calculateur de navigation, sur l'ECAM pour la tâche de management des systèmes avion.

C'est la synthèse de toutes ces informations qui permet au pilote de se créer sa perception de la situation dans laquelle se trouve l'avion, d'où il déduit les actions de pilotage à court et moyen terme requises, ou les procédures à appliquer.

Je pense qu'un schéma d'explication des tâches assignées au pilote et des informations requises pour les exécuter comme celui ci-dessus, est plus facilement compréhensible par un néophyte.

A la fin de la partie B tu te réfères à l'accident du Mt St Odile où tu affirmes que l'attention du pilote s'est focalisée sur la navigation latérale alors que le PFD lui aurait indiqué la gravité de la situation, que « l'agent copilote » a aggravé la situation au lieu de jouer le rôle qui lui était dévolu, le contrôle de la situation », etc...or tout ceci, pour le moins discutable et nouveau dans ce paragraphe, n'est là que pour illustrer le phénomène de focalisation. Quant aux problèmes de navigation latérale et verticale, il est illusoire de l'aborder en quelques lignes

pour un néophyte : en effet, il est certain que le problème du suivi des « trajectoires » latérales et verticales est beaucoup plus aisé sur un ND de type carte 3D avec les reliefs et obstacles que sur un ND + VD (ce dernier apportant très peu de valeur ajoutée, et ne permettant que de se rendre compte que l'on « fonce droit dans le mur », mais n'offrant aucune solution alternative). Le problème « du vertical » sur nos avions est bien plus la gestion de l'énergie de l'avion : « est ce que ça passe ou ça ne passe pas ? ». Or ce point est à mon sens trop complexe à aborder dans un si court paragraphe. »³¹

Document C (Mécanismes cognitifs) :

Certaines références sont critiquées car sans lien apparent avec le pilotage.

Une possible homogénéité entre les pilotes est critiquée :

« Dans un sous paragraphe, tu mentionnes : « De quels pilotes s'agit-il ? » et tu dis : « il y a des différences culturelles ... mais on constate une certaine homogénéité de base, sanctionnée par des licences professionnelles équivalentes ». L'expérience m'a montré qu'il n'y a pas d'homogénéité, sinon dans la performance obtenue le jour des tests ; le comportement des individus dans les moments intenses est très varié, souvent déroutant, voir inexplicable. Je supprimerais ce sous-paragraphe ».³²

Il y a difficulté à percevoir un modèle d'analyse au milieu des notions semblant « très artificielles » d'agents et de fonctions cognitives.

Expert n°4

Interview enregistrée le 26/05/2010, durée 1h 40min.

1 – Présentation

- Education professionnelle : Ecole Polytechnique, Supaéro, CHEAR, EPNER
 - Heures de vol : 18.000
 - Qualifications : Pilote d'essais expérimental
Instructeur pilote de ligne
 - Types d'avions : environ 300 différents
 - Fonctions exercées : Directeur de la division Essais avions au CEV, Directeur de la Division des vols et Chef pilote d'essais à Airbus, Directeur de « Airbus Training and Flight Operations Support ».
- En exercice en tant qu'auditeur dans le cockpit de compagnies aériennes.

³¹ Les choix sont justifiés dans le Chapitre 2.

³² Oui mais, disons qu'il y a moins d'inhomogénéité dans la population des pilotes que dans l'ensemble des humains. Et l'un des objectifs de la thèse est de savoir si l'inhomogénéité naturelle se constate aussi dans les réactions subites.

2 – Remarques sur la forme

Dans la thèse il y a cohabitation entre deux « discours » différents qui devraient être communs : l'opérationnel, compris des pilotes, et le psychologique, compris des psychologues. Comment faire pour que chacun des discours soit compréhensible à tous ?

Côté opérationnel les analyses sont bien conduites mais difficilement assimilables pour des psychologues. Il faut les simplifier en explicitant les faits originels, en soulignant dans les textes les points marquants afin d'attirer l'attention sur eux.

La lecture du document C, « Mécanismes cognitifs », est difficile pour des pilotes. En revanche, après la revue des analyses de cas on comprend mieux la signification des concepts. Le glossaire est utile.

On note qu'à la lecture du document D on oublie que la première partie de présentation des cas est un compte-rendu extérieur à l'analyse.

Des suppléments de textes explicatifs à l'intention des non initiés à la technique aéronautique peuvent être distrayants aux initiés.

Ambiguïté de rédaction concernant les vitesses (Green dot) dans le paragraphe A de la séquence 3.

3 – Commentaires sur l'analyse de cas

Cas n°1

C'est le plus difficile.

L'option adoptée dans le compte-rendu d'incident de penser que la verticale apparente, ou l'assiette longitudinale perçue ce qui est équivalent, ait pu jouer un rôle majeur dans les erreurs constatées est contestée. Cependant on ne trouve pas d'explication logique à l'écart aberrant constaté de 20° dans l'assiette longitudinale (« que pilotait le PF ? »), ce qui fait accepter le choix de l'analyse présentée avec focalisation sur l'échelle des vitesses, l'autre option très improbable (mais qui aurait pu être mentionnée) étant le « black-out » mental. Cette absence de logique apparente de comportement alors que les présentations des paramètres clés se trouvent côte à côte sur le PFD (vitesse, assiette longitudinale, vitesse verticale) amène à *coter 2 la séquence 3*. Une figuration du PFD serait utile pour montrer ce point. Sinon *les autres séquences sont cotées 1*.

Cas n°2

Remarques : - Sur la procédure mentionnée sur le compte-rendu d'incident : la réplique « on continue » par le PF à l'annonce « 100 kt » par le PNF n'est pas celle recommandée par Airbus, qui est « checked ».

- La vérification et l'annonce par le PNF du passage à V1 sont primordiales, donc le PNF n'a pas exécuté correctement sa tâche de surveillance de vitesse. C'est un problème de discipline surtout lorsque le PNF est le CDB mais cependant avec une leçon à tirer : dans certains cas les tâches de PNF ne sont peut-être pas compatibles avec les responsabilités de CDB qui doit veiller à tout, à l'intérieur du cockpit et à l'extérieur.

- Le retard dans l'annonce de V1 a une cause différente de celle ayant provoqué la réduction des moteurs à la perception du bang de la collision avec les oiseaux malgré leur quasi simultanéité. Bien les différencier.

Toutes les séquences sont cotées 1.

Cas n°3

Remarque : - le PF avait volontairement choisi d'ignorer l'ILS, donc de ne pas regarder les indications du Glide, probablement par excès de confiance en soi, sinon il aurait vu rapidement l'augmentation alertante (vue par le PNF) de la déflexion angulaire du glide au fur et à mesure de l'approche de la piste alors que les indications linéaires d'écart lus par le GCA ne donnaient pas cette indication progressivement alertante.

Cotation 1 pour toutes les séquences.

Cas n°4

Difficulté à saisir la partie cognitivement escamotée au cours de la fin du palier inversé, bien que comprenant très bien ce phénomène observé personnellement dans son expérience professionnelle en voltige aérienne. Explication reprise car les schémas seuls ne sont pas très explicites : « Au cours du palier inversé deux comportements ont cohabité simultanément. L'un conscient en boucle fermée pendant le vol inversé tentant de comprendre les variations brutales de vitesse. L'autre inconscient en boucle ouverte prenant en compte les séquences enregistrées dans la mémoire de travail MT. L'inconscient a initié la descente inversée à zéro g comme programmé, sans que le pilote en ait conscience. Après avoir résolu consciemment le problème de la vitesse le pilote a amorcé la descente comme mémorisé sans réaliser qu'elle était déjà bien en cours. Cette action consciente de descente ajoutée à celle inconsciente, alors qu'il aurait fallu effectuer le roulis de récupération, a amené l'avion dans une situation irrécupérable. »

Cotation 1 à toutes les séquences.

Cas n°5

Contestation en séquence 6 de l'impossibilité de passer la réverse droite, d'où *cotation 2*.³³

Toutes les autres séquences cotées 1.

³³ En fait cela est bien spécifié dans le compte-rendu d'accident : "At 22:44:21 the crew (most probably the co-pilot) tried once again to deploy the thrust reverser on the right engine, for which he moved the RTL of the engine over to maximum reverse thrust but, per design, the location of the TCL for the left engine in a mode higher than 22° TLA (more than 55° on the FDR) prevented the operation, and the thrust reverser doors failed to unlock. The right engine remained at idle forward thrust."

4 – Commentaires de fond

L'analyse est bonne et en général exacte mais on se pose la question de savoir où l'on désire en venir au-delà des analyses de cas, considérés comme des préliminaires à autre chose. Quel est l'objectif exact de la thèse ? On est intéressé par cette suite.

En matière d'analyse des comportements, des facteurs humains, on a deux populations très spécialisées possédant chacune ses techniques et ses jargons le plus souvent imperméables à l'autre, les psychologues et les pilotes. La thèse est un moyen de permettre la liaison qui n'existe pas entre les deux spécialités. Il est donc indispensable de simplifier les exposés pour les rendre assimilables aux deux.

Expert n°5

Interview le 19/01/2010 non enregistré sur les commentaires d'un document écrit.

1 – Présentation

- Education professionnelle : Ecole de l'Air, EPNER
- Heures de vol : 12.000
- Qualifications : Pilote de chasse
Pilote d'essais expérimental
Instructeur pilote de ligne
- Principaux types d'avions : parmi 152 types différents, Mirage 2000, Mercure, Falcon 50, tous Airbus jusqu'au A340
- Fonctions exercées : Commandant d'escadrille au 2/5, Chef pilote au CEV/Istres, Directeur adjoint de l'EPNER, Directeur de la formation à Aeroformation, Directeur du centre de formation Airbus en Chine.
- Autres activités : certification des avions Mercure, Falcon 50, A300FFC, A300-600, A310.

2 – Commentaires généraux

Ce sont les plus importants car s'adressant directement à l'objet de la thèse et reflétant une opinion de doute sur la possibilité d'atteindre ses objectifs. Une partie importante concernant ce point est reportée dans le Chapitre 6 et l'Annexe 2.

L'expert doute de la possibilité de trouver des éléments communs de comportement du fait de la grande diversité des causes humaines induisant les comportements. Il doute qu'on tire des conclusions logiques des analyses du fait de « l'irrationalité » des réactions humaines.

3 – Commentaires sur les analyses de cas

Pour des raisons d'occupations personnelles **seul le cas n°4**, présentation en voltige aérienne a été analysé. C'est l'analyse d'un professionnel menée avec les méthodes d'un

analyste d'accidents aérien. Elle montre comment peuvent être disséqués les séquences d'un tel accident. Elle ne contredit pas l'analyse de la thèse, mais en revanche elle présente un intérêt d'expertise méthodologique classique en vigueur, uniquement basée sur la non-conformité aux procédures admises, et à titre d'exemple elle est reportée en partie dans la description du cas n°4 (Annexe 2).

Cependant elle ignore les analyses cognitives de la thèse et elle pourrait être équivalente à celles des paragraphes C des séquences, « actions effectuées ».

L'opinion est que les cas présentés concernent des pilotes insuffisamment préparés pour affronter les situations auxquelles ils ont été soumis.

L'expert met en lumière les contraintes subies dans le cas n°4 et les erreurs effectuées :

- tension psychique importante et grandes contraintes physiques (accélérations)
- poussée des moteurs insuffisante au départ
- hauteur de vol inversé trop basse
- vitesse alors trop basse
- « *Le déficit de hauteur en vol inversé est la cause principale de l'accident, celui concernant la vitesse de vol dans cette phase est une cause aggravante.* »

D'où : « *La seule décision saine qu'aurait du prendre le pilote était de maintenir le cap, de revenir en vol ventre (vol normal) et de retrouver un régime de vol (assiettes, vitesse, accélérations) normal.* » .

Expert n°6

Interview de 2h enregistrée le 03/06/2010.

1 – Présentation

- Education de base : Ecole Polytechnique, Supaéro, Formation pilote Armée de l'Air, EPNER
 - Qualifications : - Pilote militaire
 - Ingénieur navigant d'essais
 - Heures de vol : 1500
 - Fonctions : Sous-directeur technique CEV/Istres, Chef Etudes générales STAé, Directeur technique ONERA, Directeur adjoint DRET, Ingénieur conseil en ergonomie/facteurs humains.
- Professeur de mécanique du vol et de propulsion (Centrale, ENAC, Ecole de l'Air, ENSICA, ETACA)
- En exercice comme analyste de facteurs humains.

2 – Remarques sur la forme

Nécessité de rigueur et de soin dans la présentation des textes.

Plutôt qu'utiliser des sigles et des abréviations écrire les mots et expressions en totalité.

Dans les analyses parler de « mode mental cognitif » pour éviter l'ambiguïté avec les modes automatiques des systèmes.

3 – Commentaires sur les analyses de cas

Accord sur les analyses. *Cotation 1 partout.*

4 – Commentaires de fond

Demande de différencier les modes mentaux automatiques inconscients autonomes, donc avec boucles fermées (pilotage à vue, conduite automobile, vélo) des modes mentaux automatiques inconscients semi-permanents de type différés (vol aux instruments avec balayage visuel), ces derniers n'étant pas autonomes et fonctionnant en boucle ouverte.

Expert n°7

Interview de 2 heures enregistrée le 01/07/2010

1 – Présentation

Education de base : Ingénieur ENSICA

Heures de vol : 11.000 en 23 ans

Qualifications : Pilote de ligne

Pilote d'essais

Pilote instructeur - Examineur

Principaux types d'avions : tous ATR, tous Airbus

Fonctions exercées : Directeur de la formation et des opérations aériennes de ATR et Ai(R)

Directeur de la formation et des opérations aériennes d'Airbus.

En exercice.

2 – Commentaires sur la forme

Lecture difficile du document C « Mécanismes cognitifs », même si la base a été comprise. Quelques corrections d'erreurs de frappe.

3 – Commentaires sur les analyses de cas

Les analyses ont été soigneusement critiquées.

Cas n°1

L'expert a fait de nombreux commentaires techniques confirmant ceux de l'expert n°3, rectifiant ainsi les erreurs dans le fonctionnement des automatismes. Cependant, contrairement à l'expert n°3 il n'a pas jugé que ces erreurs entachaient les analyses de comportement. Simplement il a coté « 2 » les séquences en causes pour montrer les erreurs techniques tout en étant d'accord sur les hypothèses et analyses adoptées.

Il a ajouté une hypothèse complémentaire à celle de la focalisation sur la vitesse : le bandeau supérieur rouge et noir de limitation de vitesse (limitation de configuration des volets) apparaissant sur l'échelle des vitesses aurait pu être interprété comme une limite supérieure en altitude (confusion des paramètres) dont on ne pouvait échapper qu'en descendant, d'où inutilité et oubli de consulter l'horizon artificiel.

Séquence 1 :

Remarque sur les probabilités évoquées de consultation des Vz et cap.

Cotation 1

Séquence 2 :

Cotation 1

Séquence 3 :

Remarques techniques sur le positionnement des volets, sur le mot alarmes, sur la possibilité de la consultation de documents d'approche avant « Alt alert », sur l'accélération normale vers la vitesse « Green dot », sur la présence de l'indication d'accélération (flèche jaune de tendance) sur l'échelle des vitesses.

Cotation 2

Séquence 4 :

Remarques sur le séquençage automatique des poussées, des vitesses, des rentrées de volets.

Cotation 2

Séquence 5 :

Remarques sur une incohérence dans le texte concernant l'annonce par le PNF, et sur la rétraction automatique des volets.

Cotation 2

Séquence 6 :

Remarque sur le titre « récupération »

Cotation 1

Séquence 7 :

Cotation 1

Séquence 8 :

Remarque sur l'insuffisance de la ressource : un pilote de ligne n'a pas tendance à forcer sur le facteur de charge.

Cotation 2

Séquence 9 :

Même remarque.

Cotation 2

Cas n°2

Séquence 0 :

Remarques sur les conditions de virage à l'alignement.

Cotation 2

Séquence 1 :

Remarques sur la qualification exacte de la piste (contaminée), sur qui annonce les indications du FMA.

Cotation 1

Séquence 2 :

Cotation 1

Séquence 3 :

Remarque sur le jugement d'une différence d'indication de vitesses de 9 kt au cours d'une accélération rapide : doit-on arrêter ?

Cotation 2

Séquence 4 :

Cotation 1

Séquence 5 :

Considérations sur le positionnement des pieds du PF et du PNF pouvant avoir une influence sur qui a provoqué le début de freinage.

Cotation 2

Séquence 6 :

D'accord.

Cas n°3

Séquence 0 :

Cotation 1

Séquence 1 :

Remarque sur le texte au sujet de suivre le GCA ou l'ILS.
Il faudrait évoquer l'excès de confiance du PF.

Cotation 2

Séquence 2 :

Cotation 1

Séquence 3 :

Remarque sur le calcul de la pente.

Cotation 1

Séquence 4 :

Cotation 1

Séquence 5 :

Remarques sur la vitesse d'impact, sur la variation d'assiette longitudinale.

Cotation 1

Séquence 6 :

Remarque sur le message du PF au contrôle.

Cotation 1

Cas n°4

Remarque sur la présentation ambiguë des maquettes en vol inversé.

Séquence 0 :

Cotation 1

Séquence 1 :

Cotation 1

Séquence 2 :

Remarque sur l'absence de vision de l'indication 91 kt.

Cotation 1

Séquence 3 :

Cotation 1

Séquence 4 :

Cotation 1

Séquence 5 :

Cotation 1

Séquence 6 :

Cotation 1

Cas n°5

Remarque sur la rédaction du résumé de compte-rendu officiel : vérifier la logique des positions de leviers de poussée, de rétraction de spoilers et de déconnexion du freinage automatique sur l'A310.

Autre remarque : sur l'A310 ne peut-on pas envisager comme source de panne l'engagement involontaire de la palette de remise de gaz située sur le levier de poussée ? A vérifier, mais non pris en compte par la commission d'enquête.

Séquence 1 :

Cotation 1

Séquence 2 :

Cotation 1

Séquence 3 :

Cotation 1

Séquence 4 :

Remarque sur l'hypothèse de la cause de difficulté à maintenir l'axe de piste : c'est peut-être aussi la sélection asymétrique de réverse.

Cotation 2

Séquence 5 :

Pour le PNF l'arrêt de l'alarme « TAKE-OFF CONFIG » pourrait être un acte réflexe.

Cotation 1

Séquence 6 :

Remarque sur l'inefficacité du PNF : si l'accident s'est produit en Russie, le rôle des copilotes y est très limité et ne comporte que peu de temps de vol comme PF, donc leur expérience est limitée.

Cotation 1

4 – Commentaires sur le fond

La méthode d'analyse cognitive proposée est une bonne mise en forme rationnelle des analyses de comportement et on y adhère sans problème.

Les objections formulées sont de 2 types :

- essentiellement des corrections techniques n'altérant pas les analyses,
- et quelques hypothèses supplémentaires de possibilités ne remettant pas en cause celles présentées.

Expert n°8

Interview enregistrée le 07/07/2010 de 1h 50mn.

1 – Présentation

Education de base : ENAC, SFACT

Heures de vol : 12.000

Principaux types d'avions : N262, Corvette, Mystère 20, B737, B747, A320, A330, A340

Qualifications : Pilote de ligne

Instructeur

Fonctions exercées : Analyse des vols, cours FH (facteurs humains) et CRM (Crew resources management), Responsable de la prévention et de l'analyse des incidents et accidents à Air France.

Membre de l'Icarus Committee (FSF).

En exercice.

2 – Commentaires sur les documents fournis et sur le fond

La démarche suivie est innovante. Elle est structurée et on y trouve de nombreux éléments utilisés en matière de facteurs humains en aéronautique, par exemple le concept SRK (skills, rules, knowledge) de Rasmussen.

La limitation précisée en début d'étude (soudaineté, dangerosité, temps limité de réaction) permet une introspection valable limitée à l'opérationnel et au temporel.

Il y a un besoin de progression dans ce champ des connaissances cognitives, et la lecture du document C (Mécanismes cognitifs) est passionnante bien que difficile (utilité du glossaire).

Rapprochement avec le concept de « confiance » (*Amalberti*), lié à la capacité à résoudre un problème entre « 2 points de contrôle » plus ou moins espacés, donc nécessitant plus ou moins de ressources mentales. Pourrait être relié à la probabilité subjective évoquée.

A voir : possibilité de comparaison avec une méthode Boeing (*Pitt, Moody*) d'examen des écarts par rapport aux procédures définies.

Remarque sur la saturation consciente : elle peut interférer avec les possibilités des automatismes mentaux qui ne sont pas entièrement autonomes.

Les modèles mentaux peuvent être assimilés de façon générale à des « équations mentales ».

Remarque sur « l'avance de phase », simulation ou anticipation ?

Le stress participe à la fixation en mémoire longue.

3 – Commentaires sur les analyses de cas

Le taux d'occupation professionnelle de l'expert ne lui a pas permis d'analyser l'ensemble des 5 cas proposés, et il s'est concentré sur les 2 premiers, se contentant de lire les 3 autres.

Cas n°1

L'expert connaît bien ce cas pour y avoir enquêté. L'absence d'enregistrement des positions des manches de commandes de vol a laissé quelques doutes sur le partage entre les actions manuelles et celles des équipements automatiques et entre le PF et le PNF.

Ainsi la description officielle de l'incident (celle mentionnée dans la thèse) est la meilleure possible avec les éléments rassemblés, y compris les déclarations des pilotes.

Remarques : - les conditions de vol étaient de nuit et sans phénomène météo pendant l'approche et la remise de gaz,

- l'équipage avait dû effectuer une approche particulière pour éviter des orages, d'où une certaine charge mentale préliminaire.

Les problèmes en remise de gaz sont nombreux dans l'ensemble des flottes mondiales et font l'objet de réflexions à l'échelle mondiale.

Séquence 1 :

Remarque sur la FC2 : en fait plutôt qu'un pilotage en cap il s'agit ici d'un pilotage en roulis pour garder les ailes horizontales.

Cotation 1

Séquence 2 :

Cotation 1

Séquence 3 :

Remarques : - dans le paragraphe A le terme « simultanément » utilisé pour la barre du FD est ambigu vis-à-vis des causes de mouvement ;

- le maintien du cap reste en mode en mode mental automatique ;

- la logique des automatismes des vitesses est à revoir (même remarque qu'avec les experts 3 et 7).

Cotation 2

Séquence 4 :

Remarques : - une autre hypothèse du maintien d'une action de diminution d'assiette longitudinale serait le maintien inconscient d'une pression résiduelle à piquer sur le manche ;

- plutôt qu'inaperçue la barre du FD n'a pas pu être traitée ;

- cela permet d'évoquer un problème de formation : l'enseignement du pilotage en suivant les indications du directeur de vol FD fait oublier le pilotage de base fondamental à l'assiette longitudinale, d'où peut-être l'oubli inconscient de regarder la position de l'horizon sur le PFD, le FD étant devenu l'élément essentiel sur l'instrument mais ayant disparu.

Cotation 2

Séquence 5 : Remarque importante : l'expert met en avant une hypothèse déjà avancée par

l'expert n°7, mais au lieu de la considérer comme supplémentaire comme ce dernier, il la place en priorité devant celle mentionnée dans l'analyse proposée.

Il s'agirait de l'assimilation de l'apparition du bandeau rouge et noir de limitation de vitesse (due à la position des volets) sur la partie haute de l'échelle des vitesses à l'obligation de descendre parce qu'on croit qu'on a dépassé l'altitude sélectionnée. C'est la juxtaposition mentale des échelles d'altitude et de vitesse. Cette hypothèse pourrait avoir d'importantes conséquences sur les présentations visuelles de paramètres.

Cotation 3

Séquence 6 :

Remarque : un doute existe sur qui a initié l'action de récupération, le PF ou le PNF ?

Cotation 1

Séquence 7 :

Cotation 1

Séquence 8 :

Cotation 1

Séquence 9 :

Cotation 1

Cas n°2

Toutes séquences :

Cotation 1

Remarque : suite aux incidents de délais d'annonce de V1 par le PNF, son annonce automatique a été placée sur les avions long courriers.

Cas n°3, 4, 5

Ils ont été lus rapidement sans provoquer de remarque particulière.

4 – AUTRES AVIS

4.1 – Professeur de neurologie

1 – Présentation

Professeur Agrégé de médecine
Professeur de neurologie, ancien Chef du service de Neurologie du CHU de Toulouse
Directeur de la Capacité de Médecine Aéronautique et Spatiale

2 – Commentaires sur le fond

Les points suivants ont émergé des commentaires libres exprimés (entretien du 27/07/2010).

- Sur la méthode

* Le fractionnement temporel de l'analyse, en brèves séquences de quelques secondes au cours desquelles on analyse un comportement immédiat (en définissant par l'expertise ce qu'il pourrait être d'après les données objectives constatées : « Qu'auriez-vous fait à sa place ? Etes-vous d'accord avec l'hypothèse ou les hypothèses avancées ? »), constitue une avancée originale, rigoureuse et efficace dans les méthodes d'analyse des comportements opérationnels.

* Les concepts de base (agents, fonctions cognitives, modèles mentaux) dérivés de notions admises en psychologie ne sont pas discutables car appartenant au « contrat » de base de la méthode utilisée dans la thèse.

* Ces concepts sont issus de la psychologie et de l'informatique. Intellectualisés dans la thèse il ne faut pas considérer leur combinaison « mécanique » comme une réalité intangible. Ils sont vraisemblablement l'une des expressions actuelles de l'évolution des connaissances sur les comportements. Ils relèvent peut-être de la tautologie mais donnent un éclairage original à la méthode. On commence à connaître les supports cérébraux impliqués mais le sujet est en évolution permanente.

* Les notions en question listées dans le document C « Mécanismes cognitifs » sont interdépendantes et les relations entre les concepts de base utilisés sont des postulats dont la thèse ne peut pas offrir une vérification expérimentale. Cependant les analyses « subjectives » ainsi conduites recèlent une objectivité indéniable car confrontées à l'expérience.

* La référence au nombre de traitements neurologiques impliqués dans une action cognitive n'est pas appropriée car il est aujourd'hui impossible de le dire. En revanche on peut maintenant commencer à y associer les zones cérébrales impliquées, en situation, nature et étendues.

* Le résultat de 73% de réponses sans objection des avis des experts opérationnels pourrait signifier que les $\frac{3}{4}$ des pilotes se comportent de la même façon.

- Sur les paramètres affectifs

* Il est nécessaire de mieux expliciter les paramètres affectifs, psychologiques, dans la thèse. Un individu ayant eu une réaction donnée à un jour donné, n'aurait pas eu forcément la même réaction un autre jour. Les problèmes physiologiques et psychologiques influent sur les décisions. Il faut en parler.³⁴

* Le stress nécessite aussi une référence plus conséquente alors qu'il est présent dans tous les cas étudiés. Il bouscule les processus cérébraux. L'anxiété diminue l'attention.

* Les types de comportements sont à citer, impulsif, obsessionnel, psychasthénique, car influant sur les réactions aux situations critiques. Sans qu'ils soient caractérisés de façon « pathologique » ils peuvent donner des tendances dans le comportement opérationnel et influencer sur les décisions. Faudrait-il les déceler lors de la sélection de base des pilotes ?

- Sur les paramètres cognitifs

* L'aptitude à changer d'objectif d'attention (shift), l'inverse de la focalisation de l'attention, est une fonction essentielle du lobe frontal du cerveau. Elle agit sur les choix. Une meilleure connaissance de ce point serait utile à la thèse.

* La fatigue influe sur la réduction du champ de vigilance, sur la baisse de perception de signaux dans l'environnement immédiat, sur le phénomène de focalisation visuelle.

* Dans l'utilisation de moyens technologiques nouveaux (automatismes par exemple) il est nécessaire d'abandonner des modèles mentaux « périmés » pour utiliser des nouveaux les remplaçant. Cet exercice est d'autant plus difficile que l'habitude les a stabilisés en mémoire.

* L'âge, le vieillissement du cerveau, a une influence certaine sur l'utilisation de la mémoire et l'aptitude au changement. Cependant une baisse d'aptitude au changement peut être compensée par l'habitude aux changements, par exemple dans le nombre de types d'avions pilotés.

3 – Commentaires sur la forme

* La rédaction du document C « Mécanismes cognitifs » est trop dense. Il faut « l'aérer » et la rendre plus assimilable. Les dernières pages sont trop complexes.

* Dans le glossaire et ailleurs éviter les groupes d'abréviations. Donner les mots entiers avec leurs abréviations.

4 – Commentaires sur une suite

Certains concepts, certaines hypothèses de la thèse pourraient être validés grâce à l'IRM fonctionnel. Cette piste est à explorer.

³⁴ Dans les faits la méthode d'analyse utilisée s'affranchit d'une connaissance a priori de ces paramètres qui deviennent une conséquence, une interprétation des résultats de l'analyse.

4.2 – Spécialiste en facteurs humains

1 – Présentation

Docteur en sociologie.

Parcours professionnel de psychologue.

18 ans de pratique de formation des pilotes à Aeroformation/Airbus en définition et exécution de cours de Crew Resource Management et de Facteurs Humains.

Directeur des Facteurs Humains dans le département Product Safety d'Airbus.

2 – Commentaires

Les points suivants ont émergé d'une conversation libre (entretien du 02/09/2010)

Les commentaires sont pour la plupart liés à la difficulté d'accepter que la méthode d'analyse proposée puisse s'affranchir des remarques classiques telles que :

- un évènement soudain n'exclut pas le recours à la mémorisation de situations analogues vécues, les pilotes s'y préparant mentalement,
- le temps interne est très variable suivant les motivations,
- on ne voit pas comment les combinaisons temporelles d'agents et de fonctions cognitives pourraient être déterminées par une analyse externe à l'individu,
- les hypothèses des experts ne peuvent être que personnelles et pourraient ne pas expliquer les comportements réels observés de l'extérieur,
- comment connaître la véritable interprétation individuelle de la conscience de situation ?³⁵

On admet cependant que le recours à des séquences temporelles de faible durée permet une meilleure maîtrise de l'analyse des comportements.

Au sujet des seuils de perception des mouvements on rappelle qu'il y a des seuils de perception physiologique en fonction de la vitesse de variation des mouvements (perception de l'oreille interne).

Sous stress il y a le retour aux apprentissages anciens, une régression.

3 – Utilisation de la méthode dans les enquêtes d'accidents

L'opinion n'est pas très optimiste :

- Les méthodes d'analyse sont imposées par les Bureaux d'enquêtes officiels.
- Les experts ont leurs thèmes préférés pour expliquer les comportements.

³⁵ L'évocation de ces points essentiels traités dans les chapitres 3 à 7 montre la nécessité de mieux expliciter leur présentation et leur traitement.

GLOSSAIRE

Abréviations, symboles, définitions

1 - Partie avion/environnement

- **AP** : (Auto pilot), pilote automatique de l'avion.
- **Assiette longitudinale, Θ** : angle entre la référence longitudinale de l'avion et l'horizon. En vol sans virage il existe une relation entre les angles Θ , α l'incidence et γ la pente: $\Theta = \alpha + \gamma$.
- **ATHR** : (Auto-Throttle ou auto-Thrust), contrôle de poussée maintenant la vitesse constante ou permettant l'interception et la stabilisation d'une vitesse présélectionnée.
- **ATC** : (Air Traffic Control), contrôle du trafic aérien. Cette abréviation est adoptée dans tout le chapitre pour indiquer le contrôle au sol, y compris celui de la tour de contrôle des aéroports.
- **ATIS** : système audio automatique d'informations aéronautiques locales.
- **Auto-brake** : système de freinage automatique agissant sur les freins des roues, permettant un freinage s'adaptant automatiquement aux conditions de frottement de la piste ; il s'enclenche avant la mise des gaz au décollage en restant en attente d'une réduction de poussée signifiant un arrêt du décollage, ou bien avant le toucher des roues à l'atterrissage en attente des paramètres signifiant que l'avion est sur la piste.
- **CAS** : (Calibrated Airspeed) ou VC, vitesse aérodynamique (voir VC).
- **CDB ou Cdb ou Commander** : Commandant de bord, peut être PF ou PNF (voir plus loin) mais a toujours la responsabilité du commandement du vol.
- **CLB** : (Climb), indication de réduction de poussée après décollage ou remise de gaz, cran de positionnement des leviers de poussée.
- **Cockpit** : Poste d'équipage.
- **CRM** : (Crew Resources Management), formation psychologique des pilotes enseignant le travail en équipage intégré et l'aide réciproque dans le cockpit.
- **décrabe** : manœuvre latérale à l'arrondi d'atterrissage destinée à positionner l'axe de l'avion sur l'axe de la piste au contact des roues avec cette dernière.
- **ECAM** : (Electronic Centralized Aircraft Monitor), écran de présentation du fonctionnement des systèmes.
- **égocentrique** : (vue égocentrique), figuration donc l'axe est celui de l'avion.
- **EGPWS** : (Enhanced Ground Proximity Warning System), système d'alarme auditive d'approche d'un obstacle de relief.
- **EPR** : (Engine Pressure Ratio), paramètre de conduite des moteurs lié directement à la poussée des moteurs, lu sur l'écran central de l'ECAM. Pour certains types de moteurs l'EPR est remplacé par la vitesse de rotation N1 du mobile basse-pression ou N2 du mobile haute-pression.
- **exocentrique** : (vue exocentrique), figuration dont l'axe est différent de celui de l'avion.
- **FCU** : (Flight Control Unit), panneau de commande des automatismes de pilotage.
- **FD** : (Flight Director), directeur de vol, donnant la position des assiettes longitudinale et latérale à respecter.
- **FMA** : (Flight Management Annunciator), partie supérieure de l'indicateur PFD résumant l'état des modes automatiques utilisés.
- **ft** : (foot/feet, pied), unité de longueur, 1ft \approx 0,305 m, utilisée pour les altitudes.
- **GCA** : (Ground Controlled Approach), système d'atterrissage de précision utilisé par les militaires ; un contrôleur au sol donne au pilote des indications d'écart (en degrés pour le cap et en pieds, feet, dans le plan vertical) entre la position réelle de l'avion vue au radar et la position idéale sur un axe d'approche vers la piste ; ce sont des ordres de correction.
- **Go-around** : remise de gaz.
- **GS** : (Ground Speed), vitesse par rapport au sol.
- **HA** : horizon artificiel.
- **HUD** : (Head-Up Display), viseur placé devant les yeux du pilote permettant la vision directe de l'extérieur vers l'avant, et présentant de façon symbolique certains paramètres de conduite, projetés optiquement à l'infini, tels que vitesse, hauteur, assiettes, vecteur vitesse, etc.

- **ILS, LOC et Glide** : système radio électrique d'approche définissant un axe descendant vers la piste d'atterrissage. Le LOC est la trace horizontale de l'axe et le Glide sa trace dans le plan vertical.
- **kt** : (knot, nœud), unité de vitesse, $1 \text{ kt} = 1,852 \text{ km/h} \approx 0,51 \text{ m/s}$.
- **LOFT** : (Line Oriented Flight Training), méthode d'enseignement au simulateur de vol, mettant un équipage en situation réaliste d'un vol complet, avec l'introduction de situations opérationnelles délicates et imprévues.
- **MCT** (Maximum Continuous Thrust): (moteurs) poussée maximum continue ; ou **FLEX MCT** choisie en fonction des conditions de décollage.
- **METAR** : bulletin d'observation météorologique.
- **MNE** : mécanicien navigant d'essais.
- **ND** : (Navigation Display), écran de navigation montrant la projection horizontale de la trajectoire.
- **N1** : vitesse de rotation du mobile basse-pression des moteurs, directement liée à leur poussée ; lue sur l'écran central de l'ECAM ; pour certains types de moteurs N1 est remplacé par l'EPR comme indicateur de poussée.
- **N2** : vitesse de rotation du mobile haute-pression des moteurs, directement liée à la poussée.
- **OPL** : (Officier pilote), copilote.
- **pente γ** : angle entre le vecteur vitesse de l'avion et le plan horizontal.
- **PF** : (Pilot Flying ou Pilote en fonction), pilote dont la tâche est le pilotage manuel ou automatique de l'avion.
- **PFD** : (Primary Flight Display), écran de pilotage à court terme.
- **PNF** : (Pilot Not Flying ou Pilote non en fonction), pilote en charge des autres tâches de contrôle et de gestion du vol.
- **QNH** : réglage de pression de référence altimétrique pour une altitude 0. L'altimètre indique alors sensiblement l'altitude au dessus du niveau de la mer.
- **Qualification de type** : formation sur un type d'avion particulier.
- **RALT** : (radio altimètre), donne la hauteur de l'avion au-dessus du sol.
- **RDG** : (remise de gaz), voir Go-around.
- **Réverse ou réversion de poussée** : système placé sur les tuyères d'éjection des gaz des moteurs permettant grâce à l'introduction d'obstacles dans le jet de diriger ce dernier vers l'avant, ce qui donne une poussée contrant le mouvement de l'avion, s'ajoutant aux forces de freinage.
- **RETARD** : annonce vocale automatique pendant l'arrondi d'atterrissage demandant de positionner les leviers de poussée sur la position ralenti.
- **Spoilers** : volets situés sur les ailes, augmentant la traînée et diminuant la portance lorsqu'ils sont sortis.
- **Standard Operative Procedures SOP** : procédures opérationnelles définies pour l'utilisation d'un type d'avion.
- **Take-off** : décollage.
- **TOGA** : (Take-off and Go-around), poussée maximum de décollage et de remise de gaz.
- **trim** : système permettant l'équilibre de l'avion en un point de vol sans intervention du pilote. Sa commande peut être manuelle ou automatique.
- **Vair** : vitesse de l'avion par rapport à l'air, vitesse aérodynamique.
- **VC** : (Vitesse conventionnelle) ou CAS. C'est un paramètre affiché sur le tableau de bord, utile pour le pilotage de l'avion, calculé à partir des pressions mesurées par les sondes anémométriques. A ne pas confondre avec la vitesse aérodynamique (vitesse de l'avion par rapport à l'air) ou avec la vitesse sol (Ground speed) (vitesse de l'avion par rapport au sol, composition de la vitesse aérodynamique et de la vitesse du vent). Le domaine de vol autorisé est limité, entre autres paramètres, par une valeur maximale (indépendante de l'altitude, fonction de la configuration géométrique, lisse, volets, becs, train) et par une valeur minimale (indépendante de l'altitude, fonction croissante de la masse de l'avion).
- **VFE** : vitesse conventionnelle limite volets sortis.

- **VOR, VOR-DME** : approche sur un axe défini par une balise radio électrique (VOR).
- **Vsol** : vitesse de l'avion par rapport au sol, voir GS.
- **Vz** : vitesse verticale.
- **V1** : vitesse conventionnelle de décollage au-delà de laquelle l'avion ne peut plus s'arrêter sur la piste en cas d'interruption de l'accélération, ce qui nécessite de poursuivre l'accélération avec un envol obligatoire.
- **Z** : altitude.

2 - Partie cognitive/pilote

- **Action consciente** : action cognitive consciente gérée en boucle fermée BF par le processeur opérationnel PO et ses agents.
- **Action automatique (ou inconsciente) autonome**: action cognitive gérée en boucle fermée directement par des modèles fonctions cognitives autonomes en dehors et en parallèle des actions du processeur opérationnel PO, de ses agents AG.
- **Action automatique (ou inconsciente) déléguée**: action cognitive gérée en boucle ouverte BO, sans contrôle de résultat, directement par des fonctions cognitives FC en dehors et en parallèle des actions du processeur opérationnel PO, de ses agents AG. Ces fonctions cognitives FC, déléguées par des agents peuvent être celles de ces agents dont l'action est laissée temporairement ou non en boucle ouverte par le processeur PO ou l'agent primaire AP1.
- **Agent** : entités fictives ou réelles, gérant des tâches complexes en vue d'accomplir une tâche opérationnelle majeure, par exemple le pilotage manuel, ou la navigation. Le PNF (pilote non en fonction) est un agent utilisé par le PF (pilote en fonction). Au plan mental un agent correspond à des réalités apprises de groupement et de gestion de fonctions opérationnelles. En fait un agent est un assemblage de fonctions cognitives
- **AGn** : (Agent opérationnel « n » du Processeur opérationnel PO ou de l'agent primaire AP1), partie opérationnelle agissante du processeur conscient opérationnel ; il y a un agent AGn par fonction opérationnelle majeure.
- **AP1** : (Agent primaire 1 du Processeur opérationnel PO), partie gestionnaire du processeur conscient opérationnel, niveau supérieur conscient.
- **AP2** : (Agent primaire 2 du Processeur opérationnel PO), partie vigilante du processeur conscient opérationnel, détectant les ambiguïtés et anomalies.
- **Balayage visuel** : cheminement visuel de l'observation des instruments et de leurs figurations, des commandes, des éléments du cockpit, de l'environnement extérieur, avec l'objectif de vérifier à la fois la conformité de la situation à ce qu'on en attend, le résultat d'actions menées, et de lancer de nouvelles actions. La vision véhicule simultanément des informations à objectifs divers par un canal unique.
- **BF** : boucle fermée action/contrôle/correction du fonctionnement cognitif conscient ou du fonctionnement mental automatique autonome.
- **BO** : boucle ouverte des actions sans retour de correction, du fonctionnement cognitif automatique délégué.
- **Capacité Cognitive Consciente CCC** : capacité quantitative instantanée de traiter un problème mental de façon consciente.
- **Cinématique** : s'applique à tout système et/ou modèle décrivant des fonctions, leurs liens et leurs interactions sans que le paramètre temps intervienne.
- **Cognitif** : qui relève de la psychologie cognitive, c'est-à-dire étude des activités psychologiques supérieures, perception, attention, mémoire, langage, processus intellectuels.

- **Dynamique** : s'applique à tout système et/ou modèle dont les fonctions et leurs interactions évoluent avec le paramètre temps.
- **Effet tunnel** : blocage ou enfermement de l'attention sur une tâche donnée sans possibilité d'en changer de façon volontaire.
- **Fonction cognitive** : Ce sont les éléments dynamiques. Leur fonctionnement est essentiellement temporel. De façon consciente les transforment les tâches déterminées et assignées, grâce à des objectifs définis par chaque agent AP ou AG ou par le processeur PO, en actions conscientes. Cependant des fonctions cognitives peuvent aussi accomplir directement des tâches de façon mentalement automatique.
- **FCn** : (Fonction cognitive « n »), organe de travail d'un agent cognitif ; leur repérage numéroté n est arbitraire et dépend de chaque cas.
- **IM** : (image mentale) voir MM.
- **Mct** : (Mémoire court terme / cognitif), rémanence entre 10 et 20 sec.
- **Mlt** : (Mémoires long terme), mémoires sémantique et déclarative.
- **modalité** : terme donné aux modes de perception, par exemple la vision et l'audition.
- **MM** : (Modèle mental ou image mentale), cadre et base de travail tirés des mémoires Mlt utilisée par les agents opérationnels AG ou primaires AP, et par les fonctions cognitives FC pour une action ou une série d'actions donnée.
- **MMP** : (Mental model pattern), assemblage de modèles mentaux MM rassemblant ceux utilisables pour une fonction complexe.
- **MT** : mémoire de travail (englobe la Mct avec une rémanence supérieure).
- **NBIA** : niveau basique inférieur des fonctions cognitives automatiques, pouvant être déléguées ou autonomes.
- **NBIC** : niveau basique inférieur des fonctions cognitives conscientes.
- **NDA** : niveau de détection cognitive d'anomalies de l'agent principal AP2.
- **NGO1** : niveau de gestion cognitive opérationnelle des agents AGn.
- **NGO2** : niveau de gestion cognitive opérationnelle de l'agent principal AP1.
- **NSC** : niveau supérieur cognitif conscient du processeur opérationnel PO.
- **Objectif** : but d'action déterminé de façon consciente par le processeur opérationnel PO, ou par l'un de ses agents APn et AGn ; une tâche assignée est un objectif élémentaire.
- **PO** : (Processeur opérationnel), partie consciente agissant en séquences d'actions soutenues par la mémoire court terme Mct ; il utilise pour cela des agents APn et AGn en séquences conscientes successives alternées.