L'accident du vol AF447 Rio-Paris, un cas d'étude pour la recherche en IHM

Stéphane Conversy **Stéphane Chatty** **Hélène Gaspard-Boulinc** **Jean-Luc Vinot**

Université de Toulouse - ENAC
7 av. Edouard Belin, 31055 Toulouse, France
prenom.nom@enac.fr

RÉSUMÉ
Le 1er Juin 2009, le vol AF447 de Rio à Paris s'abîmait dans l'Océan Atlantique. Les expertises de sécurité et judiciaires ont conclu à un rôle important des facteurs humains dans cet accident. Observant que de nombreux éléments du rapport d'enquête produit par le Bureau d'Enquête et d'Analyse du Ministère des Transports français peuvent être assimilés à des concepts connus de l'IHM, nous proposons d'en faire un cas d'étude pour la recherche en IHM. Après avoir introduit le vocabulaire aéronautique nécessaire à leur compréhension, nous reprenons les éléments du rapport en les assimilant, organisant puis traduisant dans des cadres conceptuels du modèle de l'action et de l'activité scientifique. Nous espérons ainsi favoriser des travaux de recherche visant à une modélisation plus formelle de l'accident, ou encore à l'identification d'améliorations possibles dans les systèmes de bord.

Mots-clés : accident, aéronautique, théories de l'IHM

ACM Classification Keywords : H.5.2 Information Interfaces and presentation : User Interfaces

INTRODUCTION

L'appareil Airbus A330 du vol Air France AF447 du 1er Juin 2009 entre Rio et Paris s'est abîmé dans l'océan Atlantique, entraînant le décès des 228 personnes à son bord. Le Bureau d'Enquêtes et d'Analyses pour la sécurité de l'aviation civile (BEA) appartenant au Ministère des Transports Français a produit un rapport suite à une enquête de sécurité sur les circonstances de l'accident [2]. Comme le BEA le stipule, « ses enquêtes ont pour unique objectif l'amélioration de la sécurité aérienne et ne visent nullement la détermination des fautes ou responsabilités ». Le rapport vise néanmoins à analyser les causes et l'enchaînement des conséquences qui ont conduit à l'accident.

Comme souvent dans de tels cas, les causes peuvent être nombreuses. L'aviation est un système socio-technique complexe composé d'acteurs multiples (agences nationales et internationales, constructeurs, compagnies, organismes de formation, pilotes etc.). Le rapport d'enquête comporte des sections concernant le déroulement du vol, les pilotes et leur comportement, le matériel, les conditions météorologiques. L'enquête s'appuie notamment sur les enregistrements effectués à bord dans ce qu'on appelle communément les « boîtes noires ».

Le rapport semble exclure toute panne des systèmes embarqués, à l'exception des capteurs appelés « sondes Pitot ». La défaillance de ces sondes est un cas prévu : les systèmes de bord sont conçus pour y réagir, et ont eu le fonctionnement attendu par leurs concepteurs. C'est donc une combinaison des comportements de ces systèmes, des conditions de vol et des réactions des pilotes, qui a donné une issue fatale à cette défaillance. Cela fait de cet accident un cas d'étude particulièrement pertinent pour la recherche en interaction homme-machine, d'autant que le rapport fournit des éléments très détaillés.

Le rapport offre des analyses sur les fonctionnements de l'interface homme-machine du cockpit, sur les raisonnements que les pilotes ont pu tenir devant les informations données par le système, et sur les interactions entre sous-système humains et matériels. Cette analyse se base sur les échanges verbaux, l'enregistrement des actions effectuées par les pilotes et des réponses des sous-systèmes, et des simulations effectuées pour vérifier notamment le comportement des différentes sorties visuelles, auditives ou haptiques des sous-systèmes matériels. Pour qui comprend le vocabulaire aéronautique, cet ensemble de données est très riche et rappelle en de nombreux points des questions traitées par la recherche en IHM.

Le présent article vise à rendre accessible ce cas d'étude à la communauté académique de l'IHM. Le but est de servir : à la formation des concepteurs de systèmes, à tester que des modèles théoriques rendent compte fidèlement des phénomènes décrits, ou encore à la recherche sur la formation des pilotes ou sur la conception des systèmes embarqués. Pour cela, nous commençons par introduire le vocabulaire aéronautique nécessaire. Nous reprenons ensuite les extraits de texte du rapport du BEA qui nous semblent les plus pertinents pour l'IHM. Nous reproduisons d'abord les conclusions du rapport liées à l'interaction homme-machine et aux facteurs humains. Puis nous sélectionnons cinq phénomènes mentionnés dans le rapport. Pour chacun d'entre eux, nous montrons comment il peut être relié aux cadres d'analyse de l'IHM et de l'ergonomie, en particulier le modèle de l'action de Norman [15], ou de l'épistémologie, en particulier l'abduction [11].

LE DOMAINE DE VOL D'UN AVION ET SON PILOTAGE

Le rapport du BEA décrit l'accident du vol AF447 comme une sortie de l'avion de son domaine de vol, suite à un mauvais fonctionnement temporaire de capteurs de pression et aux réactions de l'équipage que cela a engendrées. Nous introduisons ci-dessous les éléments nécessaires pour comprendre les extraits du rapport.

Vol et domaine de vol

Pour qu'un avion vole, il faut que l'écoulement aérodynamique produise une force vers le haut suffisante par rapport à son poids. Cette force de « portance » dépend de nombreux paramètres : vitesse par rapport à l'air, angle d'attaque du flux d'air par rapport aux ailes (incidence), configuration des ailes (volets rentrés ou sortis), altitude.

L'avion ne vole en sécurité que s'il reste dans son domaine de vol, défini par une combinaison des domaines de valeur des différents paramètres. Ainsi, à l'instar de la vitesse du son, les vitesses compatibles avec le domaine de vol dépendent de la température de l'air et donc de l'altitude : l'unité de vitesse en nombre de Mach (rapport à la vitesse du son) est donc plus pertinente qu'en noeuds pour raisonner sur le domaine de vol à haute altitude. Si l'incidence est trop grande ou la vitesse est trop faible, la masse d'air ne porte plus l'avion ; on dit qu'il décroche. On sort d'un décrochage en donnant à l'avion une « assiette à piquer », nez vers le bas, réduisant ainsi l'incidence. La valeur maximum d'incidence diminue lorsque le nombre de Mach augmente, ce qui signifie qu'à Mach élevé (généralement à haute altitude), l'avion entre en « décrochage haut » à un angle d'incidence inférieur à celui à vitesse faible. À haute vitesse, des phénomènes aérodynamiques provoquent une perte de portance et des vibrations dangereuses pour l'avion (« survitesse »). Ces phénomènes n'ont cependant pas été rencontrés sur les A330 [2].

La mesure des paramètres est effectuée par des capteurs physiques : les sondes Pitot mesurent la pression d'air totale dont on soustrait la pression statique pour obtenir la pression produite par la vitesse de l'avion et une mesure de cette vitesse ; des gyroscopes mesurent l'assiette et l'inclinaison (à gauche ou à droite) ; des sondes mesurent l'incidence. Les avions modernes comme l'A330 sont pilotés par des sous-systèmes humains et automatiques en interaction [1]. Ce système hybride a notamment pour rôle de faire en sorte que l'avion reste dans son domaine de vol.

Pilotage

Deux pilotes sont aux commandes (fig. 1[1]), le pilote en fonction (PF, à droite dans le cockpit lors de l'accident) et le pilote non en fonction (PNF, à gauche dans le cockpit). Chacun dispose de dispositifs d'entrée, notamment d'un sidestick (joystick isométrique latéral) revenant à sa position initiale quand il est relâché. Les mouvements longitudinaux sur le sidestick ont une influence sur l'assiette de l'avion, par des actions à « cabrer » (tirer pour faire monter le nez de l'avion) et à « piquer ». Les mouvements latéraux ont une influence sur l'inclinaison.

Le dispositif de sortie consiste en un ensemble d'écrans, de voyants et de haut-parleurs et ceux qui concernent l'accident sont :

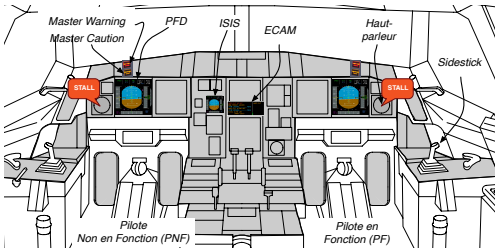

Figure 1. Le cockpit et ses éléments [1]

- l'écran de vol primaire (PFD), sur lequel sont affichées les informations considérées comme primordiales : vitesse, horizon artificiel, altitude, cap (fig. 2) ; et l'ISIS, un système de secours reprenant ces informations ;
- l'écran de supervision des systèmes (ECAM), sur lequel sont affichées des notifications produites par les sous-systèmes de mesure (fig. 3) et les voyants Master Warning (rouge) et Master Caution (orange) qui signalent des notifications de l'ECAM de niveau respectif ;
- l'alarme de décrochage, qui prévient de façon visuelle (Master Warning qui clignote) et sonore (séquence en boucle de quatre « buzz » de quelques dixièmes de seconde (« cricket »), et message vocal « STALL » (« décrochage »)) que l'avion est hors du domaine de vol.

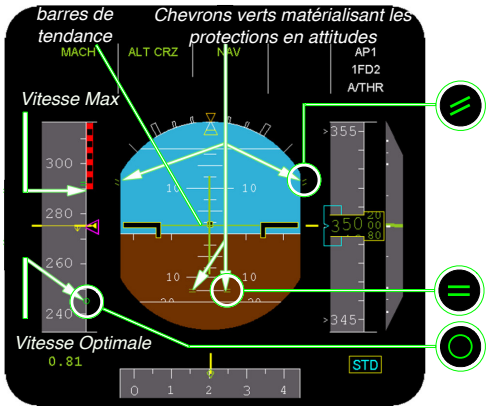

Figure 2. PFD en loi Normale (d.)

Figure 3. Master Warning & Caution (g.) et ECAM (d.)

Les instruments et appareil de navigation permettent aux pilotes de « voler aux instruments » dans les espaces aériens où cela est obligatoire, c'est-à-dire de voler sans condition de visibilité. Cependant, les pilotes peuvent aussi utiliser des informations de contexte : signaux visuels par le vitrage (p. ex. feux de saint elme), ressenti des vibrations de l'appareil (*buffet*, notamment en approche de décrochage), sons extérieurs (bruit aérodynamique, cristaux de glace), voire odeur d'ozone en cas d'orage. En revanche, la sensibilité des êtres humains aux accélérations lors d'évolutions (montée/descente, virage) n'est pas fiable, ce qui peut engendrer des problèmes d'orientation spatiale.

Systèmes d'aide au pilotage

Les aides au pilotage concernant l'accident sont :

- les calculateurs de commande de vol, qui interprète les ordres du pilote au sidestick pour orienter les gouvernes. L'objectif du système est de rendre le vol sûr, économique et confortable pour les passagers [1] ;
- le pilote et la poussée automatiques (resp. PA et A/THR), qui ont entre autres pour rôle de décharger les pilotes humains de la tâche d'atteindre et maintenir les consignes renseignées par les pilotes (consignes simples comme le cap ou plus élaborées comme une trajectoire d'approche)
- le directeur de vol (FD), qui donne des indications aux pilotes sur les actions à effectuer sur le PFD (cabrer, piquer, à g., à d.) avec les barres de tendance pour suivre les consignes de trajectoire retenues.

Les systèmes d'aide au pilotage ont plusieurs modes de fonctionnement. Ceux du calculateur de commande de vol sont appelés lois de pilotage. Ces lois définissent la présence ou non d'asservissements automatiques, la fonction de transfert entre les périphériques d'entrée et les systèmes physiques de l'avion, ainsi que l'existence ou non de protections contre des commandes qui feraient sortir l'avion du domaine de vol. Les changements d'une loi à l'autre se font à l'initiative des pilotes mais peuvent aussi être déclenchés automatiquement par des événements extérieurs (par ex. des pertes de mesure de vitesse). Dans le cas du vol AF447, les lois qui nous intéressent sont les lois « normale », « alternate » et « alternate 2 ».

Par exemple, en loi « normale », les traductions des demandes en inclinaison par le sidestick se font en fonction d'objectifs de sécurité mais aussi de confort. En loi « alternate 2 », l'angle latéral du sidestick contrôle directement les ailerons. Les inclinaisons du sidestick n'ont donc pas les mêmes effets sur le comportement de l'avion. Les automatismes offrent aussi des protections : il est difficile pour les pilotes de faire sortir l'avion du domaine de vol. Ainsi, en loi normale il faut insister sur le sidestick pour dépasser 33°d'inclinaison, alors que ces protections sont levées en loi alternate 2. Les protections sont d'autant plus utiles qu'en haute altitude le domaine de vol est réduit : la vitesse de croisière est relativement proche tant du décrochage bas que du décrochage haut. les marges entre l'incidence de décrochage d'un côté et de la survitesse de l'autre côté sont limitées. Lorsque les protections sont désactivées, il appartient alors aux pilotes seuls de respecter le domaine de vol. Ils disposent pour cela d'instruments de bord qui affichent les grandeurs pertinentes (vitesse, attitude de l'avion, etc), d'alarmes sonores et visuelles, d'une documentation fournissant des tableaux de valeurs pré-calculées, et de valeurs à connaître de mémoire (memory items) dans le cadre de procédures d'urgence, comme par exemple la procédure « IAS (Indicated Aircraft Speed) » douteuse qui aurait due être appliquée dans le cas présent.

LE RAPPORT DU BEA ET L'IHM

Dans cet article, nous sélectionnons uniquement les faits et analyses du BEA qui nous semblent accessibles à la modélisation en utilisant le corpus théorique de l'interaction homme-machine. Ce choix impose des précautions de lecture. Tout d'abord, malgré nos efforts notre sélection peut présenter des erreurs ou mauvaises interprétations. Le lecteur est invité à se référer au rapport du BEA en cas de doute. Ensuite, notre sélection peut induire le lecteur en erreur sur les causes de l'accident. Le lecteur est invité à garder en tête qu'il existe d'autres faits importants, absents seulement parce qu'ils ne nous semblent pas accessibles aux modèles de l'IHM.

En particulier, nous nous limitons à une phase précise du vol, celle qui débute à 2 h 10 min 05 par le givrage des sondes Pitot et le débrayage du sous-système de Pilote Automatique. Certaines causes de l'accident trouvent leurs racines bien avant cet instant, et sont liées au fonctionnement du système homme-machine, qu'il s'agisse de l'entraînement des pilotes ou des choix d'organisation de l'équipage pour ce vol. Mais les dernières minutes sont celles qui relèvent le plus clairement de l'interaction homme-machine et de ses modèles.

Nous reproduisons ci-dessous le synopsis de l'accident et la synthèse des faits et de l'analyse des causes par le BEA. Puis, dans les sections suivantes, nous nous focaliserons sur une série de phénomènes mis en évidence dans l'analyse et nous les relierons à des théories de l'IHM.

Synopsis de l'accident

Vers 2 h 08, l'équipage effectue une déviation de 12 degrés vers la gauche, probablement pour éviter des échos détectés par le radar météo. A 2 h 10 min 05, vraisemblablement à la suite de l'obstruction des sondes Pitot par des cristaux de glace, les indications de vitesse deviennent erronées et des automatismes se désengagent. La trajectoire de l'avion n'est pas maîtrisée par les deux copilotes. Ils sont rejoints 1 minute 30 plus tard par le commandant de bord, alors que l'avion est dans une situation de décrochage qui se prolonge jusqu'à la collision avec la mer, à 2 h 14 min 28. (p19)

Analyse par le BEA

L'objectif des travaux sur les facteurs humains a été d'examiner le sous-ensemble de ces dispositions qui concernent les comportements et compétences attendus des équipages pour la situation rencontrée. [...] Au-delà de la simple découverte d'une explication psychologiquement probable, vraisemblable ou plausible aux comportements constatés, il s'agissait aussi d'évaluer le degré de spécificité ou de généricité des réponses comportementales constatées : sont-elles spécifiques à cet équipage particulier, partagées par tous les équipages de la compagnie ou encore généralisables à tous les équipages ? (p107)

Faits établis par l'enquête :

- Les systèmes de l'avion ont détecté une incohérence des vitesses mesurées. La loi de commande de vol s'est reconfigurée en loi alternate 2B.
- Aucun message de panne n'indique clairement à l'ECAM la détection par les systèmes d'une incohérence des vitesses mesurées.

- Les pilotes ont détecté une anomalie par l'alarme de déconnexion du pilote automatique qui les a surpris.
- Bien qu'ayant identifié et annoncé la perte des indications de vitesse, aucun des deux copilotes n'a appelé la procédure « IAS douteuse ».
- Les directeurs de vol n'ont pas été désengagés. La vitesse affichée sur le PFD gauche a été erronée pendant 29 secondes, la vitesse de l'ISIS pendant 54 secondes, et la vitesse affichée sur le PFD droit pendant au maximum 61 secondes. En moins d'une minute après le désengagement du pilote automatique, l'avion est sorti de son domaine de vol à la suite d'actions de pilotage inadaptées.
- Les barres de tendance ont disparu puis réapparu à plusieurs reprises en changeant plusieurs fois de mode.
- L'approche du décrochage a été caractérisée par l'activation de l'alarme puis l'apparition de buffet.
- En l'absence de la présentation des vitesses limites sur le bandeau de vitesse du PFD, l'alarme de décrochage sonore n'est confirmée par aucune indication visuelle spécifique.
- L'alarme de décrochage a retenti de façon continue pendant 54 secondes.
- Aucun des pilotes n'a fait référence à l'alarme de décrochage ni au buffet.
- L'incidence est le paramètre qui permet d'activer l'alarme de décrochage ; si les valeurs d'incidences deviennent invalides, l'alarme s'arrête.
- Par conception, lorsque les valeurs de vitesse sont mesurées inférieures à 60 kt, les valeurs d'incidence mesurées sont invalidées.
- L'incidence de l'avion n'est pas directement présentée aux pilotes. (p203)

Causes de l'accident (extraits) :

- L'équipage, progressivement déstructuré, n'a vraisemblablement jamais compris qu'il était confronté à une « simple » perte des trois sources anémométriques.
- Dans son état actuel, la reconnaissance de l'alarme de décrochage, même associée au buffet, suppose que l'équipage attribue à l'alarme une « légitimité » minimum. [...] Lorsqu'une action de l'équipage est attendue, il est toujours supposé qu'il aura une capacité de maîtrise initiale de la trajectoire et de diagnostic rapide permettant d'identifier la bonne entrée dans le dictionnaire de procédures. Un équipage peut être confronté à une situation imprévue entraînant une perte momentanée mais profonde de compréhension. [...] Lors de cet événement, l'incapacité à maîtriser initialement la trajectoire a aussi rendu impossible la compréhension de la situation et l'accès à la solution prévue. (p205)

L'accident résulte de la succession des événements suivants :

- l'incohérence temporaire entre les vitesses mesurées, vraisemblablement à la suite de l'obstruction des sondes Pitot par des cristaux de glace ayant entraîné notamment la déconnexion du pilote automatique et le passage en loi alternate ;
- les actions inappropriées sur les commandes déstabilisant la trajectoire ;
- l'absence de lien, de la part de l'équipage, entre la perte des vitesses annoncée et la procédure adaptée ;
- l'identification tardive par le pilote non-volant (PNF) de l'écart de trajectoire et la correction insuffisante par le pilote volant (PF) ;
- la non identification par l'équipage de l'approche du décrochage, l'absence de réaction immédiate et la sortie du domaine de vol ;
- l'absence de diagnostic de la part de l'équipage de la situation de décrochage et en conséquence l'absence d'actions permettant de la récupérer. (p205)

Ces événements peuvent trouver leurs explications dans la combinaison des facteurs suivants :

- les mécanismes de retour d'expérience de l'ensemble des acteurs qui n'ont pas permis [...] de détecter la non-application récurrente de la procédure relative aux pertes d'informations de vitesses et d'y remédier,
- un travail en équipage affaibli par :
  - l'incompréhension de la situation à la déconnexion du PA,
  - l'absence d'indication claire dans le poste de pilotage de l'incohérence des vitesses identifiée par les calculateurs ; (p207)

De cette analyse faite par le BEA nous avons sélectionné cinq phénomènes (noté de P1 à P5) qui nous semblent à la fois jouer un rôle significatif dans l'analyse et constituer des exemples d'application de modèles disponibles.

P1 : NON DÉTECTION DES CHANGEMENTS DE MODE

En cas d'incident, il est attendu du PF et du PNF de reprendre en main la stabilité de l'avion, puis d'analyser l'événement. Ici, il existe un doute sur l'identification du changement de loi.

La saillance de l'anomalie de vitesse étant très faible devant celle de la déconnexion du pilote automatique, l'équipage détecte un problème par cette déconnexion et non par la perte des indications de vitesse. Pour les mêmes raisons de saillance, il est probable que l'équipage n'a pas encore perçu le passage en loi alternate et la déconnexion de l'A/THR. (p180)

L'équipage va néanmoins se construire un début de représentation mentale de la situation une dizaine de secondes

après la déconnexion du PA par l'identification d'une anomalie des informations de vitesse. Toutefois il ne précise pas le nombre de sources de vitesses perdues. L'annonce de la perte des vitesses est quasi simultanée par les deux pilotes. (p181)

Lorsque l'une des trois vitesses s'écarte trop des deux autres, elle est automatiquement rejetée par les PRIM et la valeur votée devient alors la moyenne des deux valeurs restantes. Mais si l'écart entre ces deux valeurs restantes devient trop grand, les PRIM les rejettent et la loi de pilotage devient alternate 2. (p40)

Il n'existe cependant aucune indication explicite, en dehors du drapeau SPD LIM rouge à côté du bandeau de vitesse, du niveau de loi alternate dans laquelle se trouve l'avion. Le message ECAM associé au passage en loi alternate, quelle qu'elle soit, porte la mention « PROT LOST » ; cependant toutes les protections ne sont pas perdues, puisque la protection en facteur de charge reste disponible, et que des protections réduites peuvent également exister. L'identification précise des conséquences d'une reconfiguration en loi alternate est donc compliquée. (p193)

Ces problèmes réfèrent à la gestion des modes d'une interface. Un mode est un état de l'interface dans lequel les mêmes actions des utilisateurs sont interprétées différemment des autres modes. Les modes posent deux problèmes aux utilisateurs : celui de leur perception, et celui de la mémorisation des actions possibles et de leurs effets. La perception du mode courant est d'autant plus problématique si l'initiative du changement de mode est celle de l'appareil et non des opérateurs humains, et que ce changement n'est pas perçu. Pour l'AF447, les pilotes n'ont pas perçu immédiatement le passage en loi (ou mode) alternate 2. Ils n'ont pas non plus inféré un tel déclenchement, qui dépend notamment du nombre de sources de vitesse perdues : 1 vitesse perdue → alternate, 2 vitesses perdues → alternate 2.

Les concepteurs d'IHM préconisent d'éviter les modes [16, 19] dans la mesure du possible car ils sont source de nombreuses erreurs. Pourtant, le vol d'un avion présente une telle combinatoire qu'il est difficile d'éviter l'utilisation de modes. Il serait donc utile d'approfondir le rôle des modes pour les systèmes complexes : est-il possible de les éliminer, et dans la négative comment rendre leur perception plus immédiate ?

P2 : ADAPTATION AU CHANGEMENT DE LOI

Dès les premières secondes après le désengagement du pilote automatique, le PF a dû reprendre le pilotage de l'attitude de l'avion et s'adapter au changement de loi de pilotage, sans avoir pris conscience de ce changement.

Le PF est immédiatement absorbé par le pilotage en roulis dont les oscillations peuvent s'expliquer par : une action initiale sur le mini-manche, de forte amplitude sous l'effet de la surprise ; l'entretien des oscillations, le temps d'adapter son pilotage à haute altitude, qui plus est dans une loi de pilotage inhabituelle en roulis (loi directe).

Le caractère excessif des actions du PF peut s'expliquer par la surprise et la charge émotionnelle à la déconnexion du PA, amplifiées par l'absence de formation pratique des équipages au vol à haute altitude, de surcroît avec des lois de commande de vol inhabituelles. (p179)

Dans le cas de l'accident, le PF a cherché à contrôler le roulis, même si l'amplitude de ses actions a finalement entretenu ces mouvements ; l'action à cabrer relativement forte qu'il applique dans le même temps a pu, entre autres hypothèses, trouver son origine dans une certaine difficulté à intégrer la différence de type de loi de commande et donc la différence de type de pilotage à adopter entre les deux axes. (p194)

Les changement de lois de pilotage correspondent à des changements de fonctions de transfert. Les fonctions de transfert réfèrent aux relations entre les mouvements dans l'espace de contrôle (ici le sidestick) et l'espace de résultat (ici l'attitude de l'avion)[3]. Nous n'avons pas connaissance de travaux sur les performances de l'adaptation « dynamique » des utilisateurs à un changement de fonction de transfert, qu'ils en soient conscients ou pas. Mieux comprendre ces performances et les coûts cognitifs induits pourrait aider à préparer les pilotes à ces changements, ou à revoir des choix de conception si nécessaire.

P3 : DIFFICULTÉS DE PERCEPTION

Le BEA émet l'hypothèse que durant les premières secondes après la perte des informations de vitesse, les pilotes ont pu éprouver des difficultés à percevoir et organiser les informations émises en leur direction.

Saturation audio et tentative pour y remédier

Il est à noter que, pendant cette période de 46 secondes entre la déconnexion du pilote automatique et l'activation de l'alarme STALL 2 [2 pour deuxième activation], l'alarme C-chord [qui indique une différence d'altitude mesurée et prévue] a sonné sur une durée cumulée de trente-quatre secondes, dont trente-et-une de manière continue, et l'alarme STALL 1 pendant deux secondes. L'alarme C-chord a donc saturé l'environnement sonore du poste de pilotage. Elle n'a pas été annulée par l'équipage. Cette ambiance sonore a certainement contribué à altérer la réponse de l'équipage à la situation. A 2 h 10 min 47, l'un des membres d'équipage a annulé l'alarme Master Caution qui était active depuis 2 h 10 min 05. Il a pour cela appuyé sur le bouton poussoir au FCU, qui était alors allumé en ambre. [L']alarme [C-Chord] est annulable par appui sur le bouton poussoir Master Warning, qui n'est pas allumé, situé juste à côté du bouton poussoir Master Caution. Il est possible que cette action d'appui sur le bouton Master Caution ait été une action réflexe à la constatation visuelle que le bouton était allumé. Il est cependant aussi envisageable qu'elle ait été faite dans l'intention d'annuler l'alarme C-Chord afin de désaturer l'ambiance sonore dans le poste de pilotage. (p194)

Signifiant

Le problème de l'appui potentiellement erroné réfère au concept de « signifiant » [15]. Les signifiants (*signifiers*) réfèrent à tout indicateur perceptible (marque visuelle,

son, toucher, goût, force) qui communique un comportement adéquat à une personne. Les signifiants peuvent être des signes, des labels, et des dessins placés à des endroits appropriés comme des textes « pousser », « tirer » ou « sortie » sur les portes, ou des flèches et des diagrammes qui indiquent ce qui peut être manipulés et la direction de manipulation, ou d'autres instructions. Un bon signifiant communique aux gens qui utilisent un appareil son objectif, sa structure et son mode opératoire.

Ici, l'alarme C-Chord est une alarme de niveau « Warning », mais le bouton « Master Warning » qui permet de les couper n'est pas allumé. Le bouton « Master Caution » est lui allumé, et a pu signifier à l'utilisateur qu'il permettait d'éteindre l'alarme. De plus, le résultat infructueux de son action, contraire au fonctionnement attendu, a peut-être perturbé l'utilisateur.

Notification

Les alarmes sonores sont quant à elles des « notifications ». Une notification est un signifiant temporaire (passant d'un état non-perceptible à perceptible) déclenché par un sous-système (généralement automatique) à destination d'un autre sous-système (généralement humain). Les notifications sont nécessaires dans le cas où les actions déclenchées par l'utilisateur ont des effets dans un futur au-delà de leur mémoire immédiate, ou dans les interfaces de type supervision, pour lesquelles le monde physique évolue de façon indépendante des actions de l'utilisateur. Sans les notifications, l'utilisateur est engagé dans un processus de surveillance, potentiellement coûteux en ressources.

Une notification doit capter l'attention de l'utilisateur [20]. Elles doivent donc utiliser un signifiant compatible avec les capacités de perception, notamment en contexte dégradé : ajout d'une marque visuelle vibrante en périphérie d'une taille optique élevée, son couvrant les sons d'environnement (moteur, vent) et vibrant en hauteur, vibration d'un manche de sidestick, etc [5]. Une fois l'attention détectée, la notification ne doit pas gêner l'activité de l'utilisateur. Si plusieurs notifications se déroulent simultanément, elles doivent être hiérarchisées par l'appareil. Dans le cas du cockpit de l'A330, cette fonction est assurée par le choix de l'alarme sonore à diffuser (alternance entre C-Chord et STALL), et par l'affichage de messages dans l'ECAM avec des codes couleur correspondant au niveau d'alarme. Enfin, une notification se doit d'être informative et doit convoyer un message détaillé à l'utilisateur.

Signifiants, Rétroaction et Transaction

> les conditions de vol de nuit en IMC rendent plus difficile la surveillance des attitudes (assiette en particulier). (p180)

Les signifiants peuvent être délibérés et intentionnels (un message « pousser » sur une porte) ou accidentel et non intentionnel. Dans le cas des cockpits, les pilotes utilisent l'horizon artificiel pour percevoir l'attitude de l'avion mais peuvent s'aider de la vue extérieure. Pour l'AF447, la nuit et l'absence de lumières au-dessus de l'océan ne permettent pas de profiter de ce signifiant.

> l'approche d'un décrochage sur un avion classique est toujours associée à un effort à cabrer de plus en plus prononcé. Ce n'est pas le cas sur l'A330 en loi alternate. Il en résulte notamment que dans cette loi de pilotage l'avion, mis dans une configuration où la poussée n'est pas suffisante pour maintenir la vitesse sur la trajectoire, finirait par décrocher sans action sur le manche. Il apparaît que cette absence de stabilité statique positive a pu contribuer à l'absence d'identification par le PF de l'approche du décrochage. (p194)

> le PNF dit « commandes à gauche », prend la priorité et donne une action brève en butée à gauche ; le PF reprend presque immédiatement la priorité sans aucune annonce et continue à piloter. (p25)

> Il est à noter que les actions appliquées par un pilote sur un mini-manche ne sont pas facilement observables par l'autre. (p180)

La rétroaction (*feedback*) est le signifiant qui communique le résultat d'une action : allumage d'un voyant, émission d'un « clic » etc.[1] Les commandes électriques de l'A330 évitent aux pilotes des efforts physiques pour piloter l'appareil. Il n'y a donc pas de retroaction haptique sur le sidestick liée aux phénomènes physiques (« stabilité statique positive »), à moins que la retroaction soit reproduite par des systèmes à retour d'efforts. Ce n'est pas le cas des A330, et ceci a pu constituer une des raisons identifiées par le BEA à la non-identification de l'approche du décrochage. Par ailleurs, il n'y a pas de rétroaction dans le sidestick du PNF des actions du PF sur son sidestick [15]. Ceci réfère à la notion de collecticiels, ces systèmes dont les interactions sont conçues pour favoriser la conscience des activités des co-équipiers, et en particulier la transaction/*feedthrough* [7] (dont la terminologie est construite sur le modèle du terme rétroaction/*feedback* : « renseigner à travers l'interface » envers un équipier plutôt que « renseigner en retour » envers soi-même).

Evolutions de l'ECAM

> De la déconnexion du pilote automatique à l'activation de l'alarme STALL 2, de nombreux messages se sont affichés à l'ECAM. Aucun de ces messages n'a aidé l'équipage à identifier le problème lié à l'anomalie de vitesse. Par ailleurs, la gestion des priorités des différents messages a provoqué des changements d'affichage rapides et ainsi rendu encore plus compliquée l'analyse et la compréhension de la situation. (p194)

L'ECAM est l'appareil qui affiche les notifications en cours. L'arrivée de nouvelles notifications modifie l'affichage, et notamment l'ordre des messages selon la dimension Y de l'écran. Les changements d'affichage se font immédiatement, ce qui rend difficile la perception de l'occurrence d'un changement si celui-ci a lieu alors que les pilotes ne regardent pas l'ECAM (vision périphérique) [17], et ce qui rend difficile la compréhension du réordonnancement des messages même si les utilisateurs sont en train de le regarder [14, 17].

[1] Norman semble assimiler les notifications et les rétroactions [15]. Nous divergeons sur ce point et les distinguons : la rétroaction doit être immédiate pour être comprise comme telle.

P4 : PILOTAGE DE L'AVION

Au-delà de la reprise en main des premières secondes, le PF doit reprendre à sa charge le pilotage de l'avion dans le but de retrouver une situation stable et une trajectoire sûre, laissant le temps de choisir une procédure d'urgence ou d'explorer le problème. Ici, le PF n'est pas parvenu à atteindre une situation stable.

En premier lieu, on attend de l'équipage qu'il assure le contrôle de l'avion et le suivi de la trajectoire. (p108)

Les premières perturbations des vitesses 1 et 2 interviennent vers 2 h 10 min 04, engendrant la déconnexion du pilote automatique, marquée par une alarme visuelle et sonore (charge de cavalerie). L'équipage ne perçoit pas forcément ces pertes furtives des informations de vitesses et les baisses d'altitudes associées. La première diminution prolongée (au moins 5 secondes) de la vitesse sur le PFD droit débute au plus tard à 2 h 10 min 07. Elle entraîne une baisse de l'altitude affichée sur ce PFD d'environ 330 ft. A partir de 2 h 10 min 08, la vitesse devient aberrante à gauche. La saillance de l'anomalie de vitesse étant très faible devant celle de la déconnexion du pilote automatique, l'équipage détecte un problème par cette déconnexion et non par la perte des indications de vitesse. Par une action réflexe, il réagit comme il l'a appris en reprenant en pilotage manuel (annonce « j'ai les commandes » par le PF, accusé réception par le PNF).

(p180)

Si la première réaction excessive à cabrer du PF peut donc être comprise, il n'en va pas de même de la persistance de cette action qui va provoquer un important écart de trajectoire verticale. [...] Il reste un certain nombre d'éléments d'explication possible : une focalisation de l'attention sur le roulis, la vitesse, ou encore sur l'ECAM, au détriment de la surveillance de l'assiette ; un déclenchement plus ou moins conscient, sous l'effet de la surprise et du stress, du plan d'action (monter) souhaité par le PF avant la déconnexion du pilote automatique ; [...] (p179)

Les oscillations d'assiette dans les secondes qui suivent l'activation de l'alarme de décrochage montrent que le pilotage de l'avion était manifestement délicat et a probablement monopolisé l'attention du PF. Dans cette phase, la maquette avion [représentation de référence de l'avion sur l'horizon artificiel] sur le PFD était proche de la barre horizontale du directeur de vol [FD], en moyenne légèrement supérieure. Le PF a probablement cherché à suivre l'évolution de cette barre, sans avoir intégré le changement du mode longitudinal engagé. (p187)

Note : la procédure « vol avec IAS douteuse » prévoit de désactiver les FD, pour éviter la présentation d'ordres potentiellement non pertinents. (p188)

Afin de reprendre le contrôle de l'appareil, le pilote exécute des actions et évalue le résultat de ces actions en percevant le monde qui l'entoure. Ces processus peuvent être modélisés avec le « cycle de l'action » [15] (fig. 4). Quand des personnes utilisent un appareil, elles doivent faire face à deux « gouffres » (*gulfs*) : le Gouffre de l'Exécution, où elles essaient de comprendre comment opérer, et le gouffre de l'Evaluation, où elles essaient de comprendre ce qui est arrivé après avoir opéré.

La figure 4 montre deux instanciations de ce modèle pour le PF. Le premier cycle concerne la déconnexion du pilote automatique : le PF la perçoit avec l'alarme sonore C-Chord, mais il ne perçoit pas la perte des vitesses. Le deuxième cycle montre l'activité du pilote pour maîtriser la trajectoire. L'alarme STALL 1 retentie tronquée puis s'arrête, pendant que le PF suit les indications du directeur de vol affichées sur le PFD : tout en contrant les inclinaisons, il met à cabrer l'appareil.

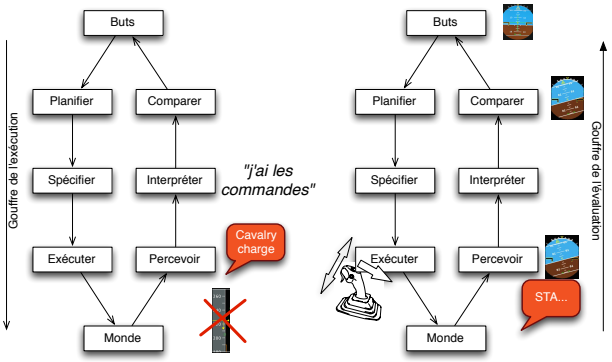

Figure 4. Cycles de l'action du PF

P5 : RECHERCHE DU PROBLÈME (OU ABDUCTION)

Le cycle de l'action est une simplification de la réalité mais constitue cependant un cadre utile pour comprendre les actions humaines. En particulier, en cas de fonctionnement inattendu, les utilisateurs remettent en cause les éléments afférents aux concepts cités par Norman : signifiants, rétroactions, notifications. C'est notamment durant ces situations qu'ils cherchent à comprendre les causes des notifications présentes. Ainsi, il est attendu des pilotes qu'ils explorent la nature du problème pour identifier les actions permettant d'y remédier, voire d'éventuelles procédures d'urgences à appliquer.

Il est alors prévu que l'équipage détectera l'anomalie, qu'il « fera sens » éventuellement de cette détection [...] A partir des informations disponibles à l'ECAM, l'équipage doit analyser et confirmer la nature de la défaillance avant d'entreprendre toute action de traitement de la panne [...] L'application de règles suppose non seulement leur connaissance, mais aussi la reconnaissance de leurs conditions d'applicabilité, et donc une bonne identification plus une certaine interprétation de l'anomalie. La construction d'une réponse par appel aux connaissances suppose une incorporation de l'anomalie dans la représentation mentale de la situation, qui peut passer par une destruction/reconstruction de celle-ci, très coûteuse en ressources et chronophage. [...] Ainsi, la perception correcte de la situation par un équipage, qui permet d'améliorer la fiabilité et la rapidité de diagnostic et de décision, est liée non seulement à la manière dont la situation est présentée à cet équipage (interfaces, paramètres) mais aussi à sa formation et à son expérience. (p108)

Un processus d'abduction

L'activité que doit conduire le PNF est un processus d'abduction : « le processus permettant d'expliquer un phénomène ou une observation à partir de certains faits, événements ou lois. [...] Dans le domaine médical par exemple, le diagnostic final explique les signes et les symptômes d'un patient en supposant un dysfonctionnement tel qu'une maladie ou une fracture » [11]. Le BEA exprime les éléments nécessaires à l'aboutissement d'un tel processus :

> [il faut] que [l]es signes [du problème] soient crédibles et pertinents ;
> [...] que les indications disponibles relatives à l'anomalie soient très rapidement identifiables afin que les éventuelles actions immédiates de mémoire visant à stabiliser la situation soient déclenchées, ou que l'identification de la procédure applicable soit faite correctement. En particulier, il est important que les interfaces habituellement porteuses des informations d'anomalie affichent ou du moins permettent ce diagnostic initial, compte tenu des compétences minimales attendues d'un équipage.
> [...] qu'il n'y ait pas de signaux ou d'informations disponibles suggérant des actions différentes ou incitant l'équipage à une reconstruction préalable de la compréhension de la situation. (p198)

Les pilotes cherchent donc à éliminer des signifiants douteux, ou à chercher des cohérences entre les signifiants, à comprendre les conséquences de leurs actions, voire à agir pour tester des hypothèses.

Crédibilité des signifiants

L'alarme STALL se déclenche une première fois (STALL 1) dès le débrayage du PA pendant 2 secondes.

> De telles activations [de l'alarme de décrochage STALL 1] sont la conséquence de l'augmentation locale de l'incidence ; elles sont donc transitoires et se manifestent généralement par une alarme tronquée (seule la voix synthétique « STALL, STALL » résonne, parfois incomplète). Les événements antérieurs étudiés (alarme de décrochage dans le cadre d'une anomalie de vitesse en croisière) montrent cependant que d'autres équipages n'ont pas réagi comme attendu à la proximité du décrochage et ont eu tendance à considérer l'alarme comme non pertinente. De ce fait, il faut considérer que le comportement de l'équipage AF 447 est probablement reproductible en ce qui concerne la non-réaction à l'alarme STALL 1. De telles activations furtives peuvent paraître inappropriées et nuire à la crédibilité globale d'une alarme qui n'est quasiment jamais rencontrée par les équipages en qualification de type, en vol ou en entraînement. (p195)

> Les activations furtives de l'alarme après la déconnexion du pilote automatique ont pu amener l'équipage à douter de sa crédibilité. De plus, la présence du directeur de vol conduisant à afficher une assiette à cabrer a pu conforter le PF dans l'idée que l'alarme de décrochage n'était pas pertinente. Lors des événements antérieurs étudiés, les équipages ont fréquemment fait part de leurs doutes sur la pertinence de l'alarme. (p187)

Invisibilité des signifiants

> L'équipage est uniquement informé des conséquences du déclenchement de ces surveillances : déconnexion du PA et de l'A/THR, passage en loi alternate, etc. Aucun message de panne ne conduit à identifier l'origine de ces autres pannes, le rejet des ADR et des mesures de vitesse en particulier. (p194)

Incompréhension des conséquences

> Cependant, le PF a pu assimiler l'activation de l'alarme [STALL] à une conséquence de la réduction de poussée qu'il avait appliquée quatre secondes plus tôt ; il aurait alors appliqué la pleine poussée pour revenir à la situation antérieure. Quelques secondes plus tard, le PF a verbalisé « je suis en TOGA, hein ? ». Soit il a douté d'avoir placé les commandes de poussée dans le cran TOGA [poussée assurant une montée sûre à basse altitude] comme il en avait l'intention, soit il n'a pas compris pourquoi cette action était inefficace pour arrêter l'alarme de décrochage. Ce second cas indiquerait alors que le PF a eu une représentation erronée du modèle de vol de l'avion, espérant une efficacité de la poussée TOGA à haute altitude et une assiette de douze degrés, similaire à celle délivrée dans les basses couches. Le résultat infructueux de ses actions a peut-être renforcé sa méfiance vis-à-vis de l'alarme. (p187)

Actions pour tester des hypothèses

Les deux pilotes exécutent des actions afin de confirmer ou d'infirmer des hypothèses.

> La désactivation de la fonction THRUST LOCK par le PF est le signe d'une recherche d'information. Le PF a donc pu être saturé par son investissement immédiat et naturel dans la tentative de comprendre la situation, venu s'ajouter à sa charge déjà élevée de pilotage. (p182)

> Le PNF a quant à lui actionné le système d'antigivrage de la voilure après avoir lu l'ECAM, ce qui laisse penser qu'il a alors perçu une problématique de givrage fort. Le bruit des cristaux de glace sur le pare-brise, assimilé à de la pluie par d'autres équipages, a pu le conforter dans la perception d'un risque associé. Les symptômes perçus ont pu apparaître à l'équipage comme des anomalies complémentaires à celle des indications de vitesse et sembler composer un syndrome global beaucoup plus complexe que la seule perte des indications anémométriques. (p183)

> Il a également agi sur le rotacteur ATT/HDG et verbalisé cette action (« je te mets en ATT... »). Ce changement de source inertielle, qui a posteriori n'était pas nécessaire, peut indiquer que son diagnostic sur la panne n'était pas complètement délimité. Pour lui, les informations de vitesse étaient incohérentes mais il n'excluait peut-être pas que les informations inertielles le soient aussi. Après avoir modifié la source ADR, le « qu'est-ce que c'est que ça » du PNF semble marquer son incompréhension totale face au résultat de cette action car la vitesse affichée côté droit était toujours erronée. Il semble alors dépassé. (p184)

Ce processus d'abduction peut être modélisé par le cycle de l'action. Les pilotes ont effectué plusieurs cycles, durant lesquels ils ont agi et évalué les conséquences de leurs actions. Durant ces cycles, en émettant et testant des hypothèses de fonctionnement, ils reconstruisent ce qu'on appelle un modèle conceptuel.

Modèle conceptuel

Un modèle conceptuel est une explication, généralement très simplifiée, du fonctionnement d'un appareil [15]. Par exemple, les interfaces informatiques reposent sur un modèle conceptuel basé sur des fichiers et des répertoires. Les modèles conceptuels fournissent une compréhension de l'appareil, des prédictions sur comment l'appareil va se comporter, et des solutions quand ce qui se passe ne concorde pas avec ce qui a été planifié. Ils sont considérés comme l'élément le plus déterminant de l'utilisabilité des systèmes interactifs [12, 9]. Sans utiliser cette dénomination, le BEA évoque les modèles conceptuels :

> En l'absence d'indication de vitesse fiable, la compréhension de la physique globale du vol à haute altitude par une approche synthétique des bilans énergétiques, équilibres de forces, plafonds de sustentation et propulsion, aurait pu considérablement aider les pilotes à anticiper la dégradation rapide de la situation et à prendre à temps la mesure corrective adéquate : la mise en descente. [...]
> Le Manuel Aéronautique Complémentaire d'Air France expose d'une façon très détaillée, sur 38 pages, la physique du vol Haute Altitude avec des exemples de cas réels. Ces connaissances font également partie de l'enseignement théorique censé être dispensé à un stade avancé de la formation d'un futur pilote de ligne (ATPL théorique, performances en QT, etc.). La trajectoire en montée, initialement plus ou moins volontaire de l'équipage mais maintenue trop longtemps, est probablement un indice d'une assimilation insuffisante de ces notions théoriques. (p190)

Les modèles conceptuels décrits dans les manuels techniques peuvent être complexes. Ils doivent cependant être compatibles avec les capacités cognitives des utilisateurs à qui ils sont destinés ainsi qu'avec les tâches qui leur incombent dans un contexte donné.

Modèle conceptuel de l'alarme de décrochage

La surdité inattentionnelle [6] a été évoquée à propos de l'alarme de décrochage, mais le BEA n'a pas retenu cette explication. Plusieurs passages du rapport suggèrent plutôt qu'un des modèles conceptuels utilisés par les pilotes n'était pas suffisant pour comprendre la situation.

> Jusqu'à la fin du vol, les valeurs d'incidence sont redevenues successivement valides et invalides. A chaque fois qu'au moins une valeur redevenait valide, l'alarme de décrochage se réactivait, et à chaque fois que les incidences étaient invalides, l'alarme s'arrêtait. [...]
> Plusieurs actions à piquer ont provoqué une diminution de l'assiette et de l'incidence dont les valeurs sont redevenues valides, de telle sorte qu'une action franche à piquer s'est traduite par la réactivation de l'alarme de décrochage. Il semble que le PF ait, au moins à deux reprises, réagi par une action à cabrer dont les conséquences ont été une augmentation de l'incidence, une diminution des vitesses mesurées et, par conséquent, l'arrêt de l'alarme de décrochage. Jusqu'à la fin du vol, aucune valeur d'incidence valide n'a été inférieure à 35°. (p196)

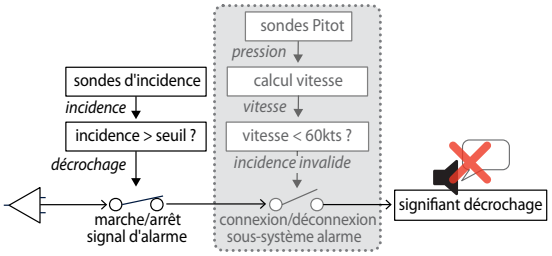

Figure 5. Modèles conceptuels du fonctionnement de l'alarme de décrochage (non-grisé : modèle du PF, grisé : modèle plus réel)

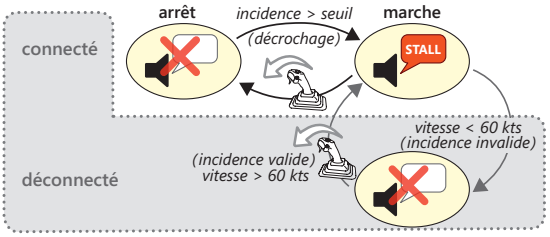

Figure 6. Modèles conceptuels des états et transitions du signifiant de décrochage (non-grisé : modèle du PF, grisé : modèle plus réel)

La fig. 5 représente deux modèles conceptuels du fonctionnement de l'alarme de décrochage : le modèle supposé du PF, et un modèle plus réaliste qui illustre l'absence de signifiant en cas de vitesse faible. La fig. 6 montre les modèles conceptuels des états et transitions du signifiant de décrochage. Le PF a peut-être pensé que l'alarme passe de l'état « arrêt » à « marche » quand elle retentit, alors qu'elle est passée de l'état « marche-déconnecté » à « marche-connecté ». Les deux états « arrêt-connecté » et « marche-déconnecté » ont des signifiants similaires (silence), ce qui les rend indiscernables. Le PF a peut-être constaté que les conséquences de ses actions sont inverses de ce que prévoit son modèle conceptuel : en général, les actions à piquer sont censées faire sortir du décrochage, alors qu'elles ont signalé ici une entrée de décrochage. Inférant peut-être que son action à piquer déclenche un décrochage, le PF stoppe son action en cabrant, ce qui coupe l'alarme en la faisant passer à l'état « marche-déconnecté » (et non à « arrêt »).

> Mais au-delà de l'ergonomie de l'alarme, il est probable que la présentation d'une information synthétique sur la physique globale du vol (incidence, bilan énergétique, domaine de vol) pourrait aider les pilotes à « faire sens » de l'alarme et à prendre à temps les mesures correctives adéquates. [...]
> En résumé les facteurs suivants sont de nature à diminuer la performance attendue d'un équipage : l'absence de description du fonctionnement de l'alarme de décrochage (schéma de principe ou ordre de grandeur des seuils, par exemple) dans la documentation ; (p196)

> En conséquence, le BEA recommande que : l'AESA impose de revoir les conditions de fonctionnement de l'alarme de décrochage en vol lorsque les mesures de vitesse sont très faibles. (p218)

Ces constats suggèrent que le métier de pilote nécessite, pour les situations dégradées, des compétences semblables à celles des médecins, des chercheurs et des ingénieurs : la capacité à sélectionner des faits, remettre en cause leur modèle mental, construire un nouveau modèle plausible, et en déduire un plan d'action et de validation. Ceci est à rapprocher du programme de formation des pilotes, qui comprend des notions relativement avancées de physique du vol et de fonctionnement des systèmes : à quoi bon posséder ces notions si ce n'est pour les utiliser dans l'analyse de problèmes sortant du cadre habituel ? Mais alors, comment peut-on s'assurer au mieux que les signifiants disponibles en conditions dégradées permettent aux pilotes de mener un raisonnement correct dans un temps contraint ? Faut-il en déduire des critères de sélection supplémentaires, ou un entraînement spécifique ? Faut-il mener des recherches pour leur fournir des représentations de systèmes permettant de mieux gérer la complexité, comme cela est fait par ailleurs pour les ingénieurs [8] et les chercheurs [10] ?

CONCLUSION

Dans cet article, nous avons sélectionné des éléments d'analyse liés à l'IHM dans le rapport du BEA sur l'accident du vol AF447, nous avons assimilé et organisé ces éléments en axes connus de l'IHM, puis traduits dans des cadres conceptuels de l'IHM et de l'activité scientifique.

L'adéquation entre les données et ces cadres conceptuels fait du rapport du BEA un support intéressant pour l'enseignement de l'IHM. Il peut en particulier illustrer pour de futurs concepteurs l'importance d'éliminer dans la conception d'un système homme-machine tous les facteurs d'interprétation erronée de la situation par les opérateurs humains.

Notre travail peut aussi ouvrir de nouvelles opportunités de recherche. Malgré les efforts en cours [4, 13], les connaissances en IHM sont encore insuffisantes pour isoler de manière formelle l'ensemble des défaillances d'un système homme-machine, notamment celles évoquées ici. A plus forte raison, il reste difficile pour un ingénieur d'identifier toutes les configurations défavorables. En revanche, les connaissances nous semblent ici suffisantes pour organiser utilement une partie des données disponibles, voire pour permettre de formuler des hypothèses ou des théories complémentaires. C'est donc un outil possible pour progresser vers un objectif important pour l'IHM en aéronautique : des cadres théoriques qui permettent aux ingénieurs de mieux anticiper, dans un environnement non maîtrisé, le comportement des systèmes homme-machine qu'ils conçoivent [18].

Les phénomènes que nous avons reformulés dans cet article correspondent à une large gamme de thèmes de recherche, depuis les fonctions de transfert dans la boucle perception-action jusqu'au support à l'analyse de systèmes complexes. L'analyse de l'accident de l'AF447 peut donc participer à l'évaluation des futurs modèles théoriques qui seront proposés sur chacun de ces sujets : permettent-il de décrire plus complètement les phénomènes à l'œuvre dans l'accident ?

Réciproquement, la recherche en IHM peut contribuer à renforcer la sécurité, en utilisant le rapport comme source d'inspiration. L'accident du vol AF447 nous rappelle en particulier l'importance d'éliminer les facteurs d'interprétation erronée de la situation. Raisonner sur la tâche d'abduction à laquelle ont été confrontés les pilotes peut fournir un nouvel angle pour les assister dans leur rôle de dernier recours : comment une IHM peut-elle assister un pilote - comme on assiste un ingénieur ou un scientifique, la contrainte temporelle en plus - dans la construction d'un raisonnement ?

BIBLIOGRAPHIE

1. Airbus. *A330 Flight deck and systems briefing for pilots*, 1999.
2. Bureau d'Enquêtes et d'Analyse. Rapport final - Accident survenu le 1er juin 2009 à l'Airbus A330-203 immatriculé F-GZCP exploité par Air France vol AF 447 Rio de Janeiro - Paris. Tech. rep., République Française, Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Énergie, 2012.
3. Casiez G. & Roussel N. No more bricolage!: Methods and tools to characterize, replicate and compare pointing transfer functions. In Proc. *UIST '11*, ACM (2011), 603–614.
4. Chandler F., Chang Y., Mosleh A., Marble J., Boring R. & Gertman D. Human reliability analysis methods: selection guidance for nasa. Tech. rep., NASA Office of Safety and Mission Assurance, Washington, DC, 2006.
5. Chatty S., Athènes S. & Bustico A. Votre attention s'il vous plait ! Éléments d'un espace de conception de signaux visuels. In *Actes de IHM*, Cépaduès Editions (1999).
6. Dehais F., Causse M., Vachon F., Régis N., Menant E. & Tremblay S. Inattentional deafness to auditory alarms in aviation: A safety issue. *Human Factors and Ergonomics Society*, in press.
7. Dix A. J. *CSCW - a framework*. 1994, 23–37.
8. Gaspard-Boulinc H. & Conversy S. Exigences d'utilisabilité pour les outils d'ingénierie des exigences. In *Proc. IHM*, ACM (2014).
9. Henderson A. & Johnson J. *Conceptual Models: Core to Good Design*, 1st ed. Morgan & Claypool Publishers, 2011.
10. Keim D., Andrienko G., Fekete J.-D., Görg C., Kohlhammer J. & Melançon G. Visual analytics: Definition, process, and challenges. In *Information visualization*. Springer, 2008, 154–175.
11. Lecourt D., Ed. *Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences*. PUF, 1999.
12. Liddle D. Bringing design to software. ACM, New York, NY, USA, 1996, ch. Design of the Conceptual Model, 17–36.
13. Martinie C., Navarre D. & Palanque P. A multi-formalism approach for model-based dynamic distribution of UI of critical interactive systems. *Inter. J. of Hum.-Comp. Studies* 72, 1 (2014), 77 – 99.
14. Mertz C., Chatty S. & Vinot J.-L. The influence of design techniques on user interfaces: the digistrips experiment for air traffic control. In *Proceedings of HCI Aero* (2000).
15. Norman D. A. *The Design of Everyday Things*, revised and expanded edition ed. Basic Books, USA, 2013.
16. Raskin J. *The Humane Interface: New Directions for Designing Interactive Systems*. ACM Press/Addison-Wesley, 2000.
17. Schlienger C., Conversy S., Chatty S., Anquetil M. & Mertz C. Improving users comprehension of changes with animation and sound: an empirical assessment. In *Proc. of Interact 2007, LNCS*, vol. 4662, IFIP, Springer Verlag (2007), 207–220.
18. Speyer J.-J. Les facteurs humains contribueront-ils à l'aéronautique ? *La Jaune et la Rouge*, 535 (1998), 59–69.
19. Tesler L. A personal history of modeless text editing and cut/copy-paste. *interactions 19*, 4 (2012), 70–75.
20. Wickens C., Hollands J., Parasuraman R. & Banbury S. *Engineering Psychology & Human Performance*. Pearson Education, 2012.