

# **Interfaces homme-systèmes assistées d'automates et conscience de la situation**

**Henri Marotte**

*Professeur Agrégé du Val de Grâce,  
Membre du Conseil Médical de l'Aéronautique Civile,  
Directeur de la Capacité de Médecine Aérospatiale de Paris*

*Résumé : Le pilotage d'aéronefs à travers une interface homme-systèmes informatisée peut introduire certaines difficultés. Celles-ci impliquent d'abord une exacte définition de ce qu'il est convenu d'appeler le " dialogue homme-systèmes ", puis la définition de l'erreur et du risque admissible, avec la notion de sécurité de la transmission de l'information entre l'homme et la machine. Pour améliorer la qualité de l'interface entre l'homme et la machine, il convient de mieux définir les caractéristiques de l'acquisition sensorielle chez l'homme qui, si elles sont mal comprises et mal exploitées, conduisent à l'illusion sensorielle (comprenant l'absence de perception sensorielle). Pour illustrer le propos, quelques exemples de dysfonctionnement du dialogue homme-systèmes sont présentés et analysés, issus de l'observation d'événements réels, certains d'entre eux étant des accidents meurtriers d'avions gros-porteurs. Ils montrent que certaines informations sensorielles ne peuvent pas être perçues par l'homme en conditions naturelles. Il apparaît donc que le dialogue homme-systèmes est construit à partir d'hypothèses prédéfinies faites sur l'acquisition des signaux et leur traitement par l'opérateur humain.*

*Dans le pilotage de l'avion, l'homme reste investi de la responsabilité de la gestion des tâches complexes et rares, celles qui ne peuvent être confiées à l'automate. Par contre, il est tout à la fois déchargé et dépossédé de la tâche primaire de pilotage par ce même automate. Cette phase de transfert de responsabilité entre l'automate et l'homme doit faire l'objet d'une adaptation précise. L'instrumentation moderne d'un aéronef, construite à partir d'automates, apporte de très grands facteurs de sécurité des vols. Une amélioration supplémentaire de la sécurité sera obtenue au prix d'une connaissance très fine des modes de communication de l'homme avec son partenaire technique.*

L'introduction des automates dans le pilotage des avions a profondément modifié l'interface homme-systèmes, donc le dialogue entre l'homme et la machine : c'était le but

recherché. En fait c'est un bouleversement, plus qu'une simple évolution, qui a été introduit dans ce qu'il est convenu d'appeler le dialogue entre l'homme et la machine. Encore faut-il définir ce qu'est un dialogue. Les dictionnaires consultés nous répondent : « Conversation entre deux ou plusieurs personnes, contenu d'une conversation, discussion visant à trouver un terrain d'entente ». Le dictionnaire Robert ajoute explicitement à cette énumération « Dialogue homme-machine ». À travers l'utilisation du mot « dialogue », l'automate est implicitement défini comme une personne. Est-ce une attitude pertinente ? Oui et non car, jusqu'à preuve du contraire, l'objet qu'est l'automate a bien été conçu par l'homme, avec deux conséquences : la première est que le dialogue homme-systèmes peut être considéré comme un dialogue vrai entre le concepteur et l'utilisateur de la machine, mais un dialogue en temps différé, avec un décalage temporel, probablement aussi culturel, entre les représentations mentales respectives de l'un et de l'autre. La seconde est que le dialogue entre l'homme et la machine passe à travers les canaux de communication que sont les capteurs sensoriels de l'un et l'instrumentation de l'autre, dans une relation en partie interactive. Le milieu aéronautique est rompu à la technique et il semble inutile d'expliquer longuement que l'inadéquation entre systèmes de communications est potentiellement génératrice d'erreurs.

Le concept d'erreur apparaît, dans son acception technique, probabiliste ; erreur n'est pas faute. La communication, considérée comme un processus physique, comporte une mesure, qualitative dans une étape initiale de reconnaissance de la nature du message, puis quantitative. Tout résultat de mesure est inclus dans un intervalle, qui définit la normalité au sens statistique de ce terme, c'est-à-dire pour un risque d'erreur prédéterminé. En ce sens, il est normal – au sens probabiliste de la normalité - d'observer des résultats situés hors de la fourchette attendue. L'erreur fait partie des processus naturels, qu'ils soient physiques ou biologiques ; la prise d'information sensorielle n'échappe pas à cette règle.

La question posée par l'instrumentation de bord réside donc dans l'adaptation entre l'émetteur et le récepteur, à la recherche d'un niveau maximal de sécurité de la communication. Est-il possible de décrire les caractéristiques des canaux de communication de l'homme, émetteur et récepteur, pour que l'information soit échangée entre l'homme et la machine, idéalement sans erreur, en pratique à un risque d'erreur compatible avec la sécurité aérienne. En d'autres termes, les canaux récepteurs de l'homme sont-ils tous exploités, sont-ils exploités à bon escient, sont-ils toujours exploitables ?

Cependant, plutôt que de décrire les caractéristiques sensorielles de l'homme sur un mode purement théorique, ce sujet sera analysé à travers quelques questions naïves, à travers également quelques exemples d'erreurs, parfois meurtrières, dans la communication entre l'homme et la machine. Il s'agira, plus simplement, de répondre à deux questions obsédantes dans l'analyse de nombreux accidents : “ Pourquoi l'équipage n'a-t'il pas perçu les messages qui lui étaient adressés ? ”, “ Les messages étaient-ils suffisamment adaptés à la situation pour qu'ils soient perçus sans délai ni erreur ? ”.

*Cet exposé est articulé autour de faits réels. Il ne veut mettre en cause ni personnes physiques ni organismes particuliers. L'auteur a fait le choix de s'appuyer sur les dossiers qu'il connaît le mieux : ce fut son seul critère de sélection. Toutes les données utilisées pour cet exposé ont été publiées dans la littérature ouverte.*

**Première question, naïve : qu'est-ce qu'un instrument de bord moderne, c'est-à-dire plus ou moins informatisé ?**

La commande de vol *tout électrique* casse la chaîne traditionnelle entre la main du pilote et la gouverne de l'avion. En technologie classique, la commande de vol est un peu le prolongement des membres du pilote, de la même façon que le senseur analogique peut être considéré comme l'extension de ses capteurs sensoriels. La commande de vol numérique rompt cette chaîne en y insérant un calculateur, donc un module d'intelligence artificiel, parfois perçu comme une boîte noire (figure n°1). Elle considère l'action sur les commandes comme l'une des entrées d'un système de gestion de la machine, intégrée en fonction de la situation. De façon symétrique, le système retourne une information élaborée à l'équipage, considéré comme un gestionnaire de système. Ce concept est très puissant et il présente d'énormes avantages. Mais, faite pour décharger l'homme de la tâche primaire de pilotage, la commande de vol l'a éloigné de l'avion, à charge pour le concepteur d'élaborer une stratégie de rapprochement des deux partenaires, l'homme et la machine, en remarquant que ce rapprochement se situe à deux niveaux fondamentaux, la conduite opérationnelle de la machine et l'apprentissage, avec ou sans du transfert de connaissances acquises antérieurement.

**Seconde question, tout aussi naïve : de combien de canaux sensoriels l'homme dispose-t-il ? Sont-ils tous exploités ?**

**L'information, traitée par l'automate selon son propre mode de travail (mode numérique), est imposée à l'homme selon le même mode.** Techniquement, c'est le plus facile mais l'interface correspondante privilégie un mode quasi-exclusif de saisie de l'information, la voie visuelle alphanumérique ou graphique. Il s'agit probablement d'un très grave problème. L'organisme humain dispose de multiples informateurs sensoriels. En première approche, le goût et l'odorat peuvent être négligés (encore que l'odorat, en cas de pollution, puisse être un excellent détecteur). Restent les autres fonctions visuelles, la vue, l'audition, l'équilibration, la sensibilité cutanée, ainsi qu'une très importante fonction qui est la somesthésie, définie comme une sensibilité répartie dans l'ensemble du corps et que nous limiterons, pour cet exposé, à la sensibilité propre du système locomoteur. Les capteurs sensibles à la température, à la douleur ou à l'appui sont bien connus : de même il existe aussi d'autres fonctions, qui renseignent le système nerveux sur la position des différents segments squelettiques, sur la tension des tendons, sur l'étirement musculaire, etc. C'est ce qui explique que l'homme sain n'a nul besoin de voir ses segments de membres pour savoir où ils se trouvent, et dans quelle attitude : pour donner un exemple, même dans une cage d'escalier obscure, un homme normal est capable d'atteindre le bouton lumineux de l'ascenseur, c'est-à-dire de diriger ses membres vers une cible, sans le contrôle de la vue.

**Que captent réellement nos canaux sensoriels ?**

**- une information tonique ou une information phasique ?**

Certaines fonctions sensorielles possèdent une particularité importante : elles sont sensibles non seulement à la valeur absolue d'un paramètre (information *tonique*) mais aussi, et souvent préférentiellement, à sa dérivée par rapport au temps (information *phasique*). Certains capteurs ne sont même sensibles qu'à la dérivée. Il existe ainsi des capteurs cutanés qui ne pulsent pas en régime stable mais uniquement lorsque les informations varient. La vie courante en fournit de nombreux exemples.

Information de position, information de dérivée (tendance) : la main étant posée sur une structure rigide, le système nerveux perçoit la position de la main, donc la position de cette structure. Si le cas se présente, il percevra déplacement et nouvelle position. En ce sens,

pourquoi ne pas considérer la commande tenue en main comme un instrument informatif de bord ? Appliquons cette hypothèse à l'instrumentation : pour autant que sa dimension et son déplacement aient été judicieusement choisis, la commande de gaz tenue en main par le pilote peut l'informer de la puissance affichée et de ses variations.

### **- une information linéaire ou une information à effet de seuil ?**

Il existe une autre particularité de certains des capteurs sensoriels de l'homme : un effet de seuil, ce qui signifie que le capteur est insensible à une stimulation *infraliminaire*. L'absence de linéarité de la réponse, au sens algébrique du terme, ainsi que la sensibilité préférentielle ou exclusive à la dérivée, peuvent être à l'origine de troubles perceptifs particulièrement dangereux, connus sous le terme d'*illusions sensorielles*, illusions de tous types, incluant l'absence de perception d'une modification de l'environnement. Pour donner un exemple tiré de l'observation d'accidents, la mise en descente en mode automatique d'un avion de transport de passagers permet d'éviter la sensation de trou d'air par une très grande lenteur d'évolution de la vitesse de descente et de la prise d'assiette, en d'autres termes en utilisant une valeur *infraliminaire* de l'accélération dans le plan vertical. Dans ce cas, l'illusion sensorielle par absence de perception du changement de trajectoire n'est pas un accident, elle est recherchée et ce choix prive l'équipage de la perception de l'attitude réelle de l'avion. Comment l'instrumentation peut-elle très clairement pallier cette absence intentionnelle de perception naturelle de la situation ?

### **- l'art du camouflage**

Considérons la fonction visuelle, qui n'est pas limitée à la seule fonction de lecture, fût-ce en utilisant une symbologie colorée. Parmi les facteurs de la discrimination visuelle, citons le *contraste* et le *mouvement* qui, l'un et l'autre permettent l'extraction d'un signal dans le bruit de fond : tous les militaires le savent et l'exploitent - ou l'évitent. Le mouvement est important : il permet de saisir des informations de tendance (dérivée) par l'observation des déplacements. Il renforce la perception et parfois la rend possible. C'est le mouvement enfin qui est à la base de la perception dans le champ visuel latéral.

### **De l'action du pilote sur ses instruments. Faut-il corrélérer la gestuelle du pilotage et l'action qui en résulte ?**

*Le développement qui suit prend sa source dans une observation personnelle de l'auteur. Travaillant sur un accident aérien bien connu, il a bloqué mentalement lorsqu'il a voulu comprendre quel était le processus gestuel à l'origine de la mise en descente finale de l'avion. Sa culture de pilote d'avions légers ne lui permettait pas de comprendre comment la descente finale dans des conditions difficiles pouvait être commandée par une gestuelle aussi anodine que celle qui consiste seulement à tirer sur 2 mm environ un simple bouton, de surcroît à fonctions multiples. Essayons d'analyser cette anecdote : ne révélerait-elle pas un mécanisme à portée générale dans le dialogue entre l'homme et la machine ?*

Il convient de rappeler quel est le mode de commande pour la mise en descente en mode automatique. L'équipage sélectionne le mode de descente (mode à vitesse verticale constante ou mode à pente constante) par l'intermédiaire d'un bouton poussoir, qui commute réversiblement de l'un vers l'autre mode. Puis le pilote agit sur un bouton rotatif pour ajuster la valeur choisie qui est, selon le mode de descente sélectionné, l'angle de descente ou la vitesse verticale (dans le cas

présent, affichés respectivement en degrés et dixièmes de degré ou en centaines de ft/min). Au moment choisi pour la mise en descente, c'est ce même bouton qui est tiré sur une faible course pour enclencher la fonction présélectionnée.

Commentaire : lorsqu'une commande est effectuée par l'intermédiaire d'un automate, toute action peut être déclenchée par une séquence de gestes, conceptuellement tous identiques entre eux, quelle que soit l'importance de l'action résultante ; ce concept est différent d'une commande classique où, pour donner un exemple, une action de changement de trajectoire est très différente d'une commande de radio. Peut-être est-il naturel de déclencher un changement de niveau de vol en haute altitude en modifiant les paramètres d'un automatisme. La question est de savoir si cette procédure reste licite en toutes circonstances, en particulier au moment de l'approche finale, lorsque le risque de collision avec le relief est, par définition, maximisé. Faut-il considérer qu'à un acte majeur, tel qu'une mise en descente finale au-dessus du relief en IMC, doit correspondre une gestuelle majeure, à définir, peut-être une action combinée des deux membres d'équipage, au lieu d'une action physiquement anodine de l'un, contrôlée par l'autre.

### **Mélanger des informations sensorielles. Pourquoi l'équipage n'a-t-il pas perçu certains signaux ? Le canal sensoriel était-il perméable ?**

Pourquoi, dans un accident récent, l'équipage n'a-t-il pas vu le *vario* (figure n°2), alors qu'il avait perçu d'autres informations sur le même écran ? Pouvons-nous comprendre pourquoi, dans un ensemble informatif complexe, toutes les informations n'ont pas la même aptitude à traverser les canaux sensoriels de l'homme et, partant, à forcer son attention ? Pourquoi certaines informations ne passent-elles pas ?

L'examen d'un exemple tiré de l'art du prestidigitateur est révélateur : celui-ci exécute un tour simple, l'évasion d'une pièce de monnaie. Il tient une pièce de monnaie dans la main droite, la main gauche étant à proximité ; il jette la pièce en l'air et chaque spectateur voit la pièce de monnaie voler et disparaître. Le prestidigitateur la récupère ensuite dans l'endroit de son choix. Il est évident que la pièce avait préalablement glissé dans la main gauche. Indépendamment de l'illusion qui fait que le spectateur voit la pièce voler et disparaître, illusion sur laquelle le débat ne sera pas ouvert, il existe deux bases théoriques à ce tour. D'une part le tour ne se passe pas exactement lorsque le spectateur l'attend : il y a un décalage temporel entre l'émission du signal et l'ouverture du canal récepteur, ici voulu et réussi par l'artiste, qui ferme le canal récepteur au moment de l'émission - en fait il ouvre un autre canal récepteur et sature l'attention avec une information non signifiante, gestuelle et vocale. D'autre part le tour est réussi lorsqu'une main effectue un mouvement parfaitement naturel et lent, anodin, et l'autre main un mouvement rapide, ample et inusuel.

Cette observation est extrapolée à la présentation de l'information : qu'une (ou plusieurs) informations défilent rapidement sur l'écran, éventuellement avec des enrichissements, et les informations à défilement lent ne pourront pas être vues sans que ne leur soit portée une attention particulière et intentionnelle. Lorsque, dans une scène animée, une information est présentée avec un défilement lent ou nul, cette information ne peut délivrer qu'un message de consultation systématique ; en aucun cas elle ne peut être alertante. L'instrument ou la partie d'écran chargée de délivrer le message d'alerte, s'il est malencontreusement conçu selon le principe du défilement lent dans un ensemble animé, rentre bien dans la catégorie des instruments de bord invisibles.

L'instrument (ou la partie d'instrument) est invisible, non pas parce qu'il n'émet pas dans le rayonnement visible mais parce que la perception physiologique ne dépend pas que de la longueur d'onde du rayonnement électromagnétique. Le problème présent est celui de l'effet de masque physiologique d'une information à défilement lent par une information à défilement rapide. Ceci amène à une interrogation grave : peut-on mélanger sur un même écran ou sur un même tableau de bord des informations dont les conditions dynamiques sont très différentes et, si oui, avec quelles limites et, en tous cas, pour quoi faire ?

### **Faut-il réserver certaines entrées sensorielles à l'alerte ?**

Comment rendre une information alertante sans délai ? Quel est le canal sensoriel utile ? Ce n'est sûrement pas le canal auditif usuel car nous avons trop d'exemples de sa prise en défaut. Le canal tactile ? Pourquoi pas, mais à condition que la main ne quitte pas l'instrument, c'est-à-dire que le capteur physiologique reste branché. Reste la vue, à travers une fonction très particulière.

Traditionnellement, en aéronautique, le chromatisme est porteur d'information, et d'information d'alerte. Or, pour améliorer la lisibilité des écrans, la couleur a été utilisée dans la présentation d'information, tout en réservant les couleurs traditionnelles, vert, ambre et rouge, aux fonctions d'alerte. Parmi les couleurs utilisables de la palette habituelle, la majorité d'entre elles sont utilisées dans un but utile mais qui pourraient être rattaché, avec quelque impertinence et caricature, au confort ou à l'esthétique, tandis que deux d'entre elles sont chargées de coder les dysfonctionnements et, en pratique, la plus ou moins grande imminence d'une catastrophe. Esthétique d'un côté, catastrophe de l'autre : le trait est forcé pour décrire combien est grande la distance entre deux emplois distincts du même canal sensoriel.

La question est donc de savoir si, lorsque la couleur est utilisée à d'autres fins que l'alerte, sa valeur informative ne se dilue pas dans le processus global de présentation de l'information. Ne conviendrait-il pas de réserver le chromatisme exclusivement pour coder les fonctions d'urgence ? Est-il possible de revenir en arrière sur son utilisation ? Faut-il adapter son utilisation, par exemple en n'employant que des couleurs très désaturées pour l'information simple et des couleurs violentes pour l'alerte, éventuellement associées à un graphisme particulier ? Remarquons enfin que, si la couleur est employée pour augmenter la lisibilité des multiples informations présentées sur l'écran de pilotage, revenir sur l'écran couleur actuel imposerait probablement de *faire le ménage* dans l'information présentée au pilote.

### **Pourquoi ne pas utiliser certains modes spécifiques d'entrée sensorielle, habituellement négligés ?**

Autre accident : un avion de transport de passagers s'est écrasé après que l'équipage se fût interrogé sur la signification d'une annonce vocale, délivrée dans une langue étrange bien que réglementaire. L'annonce était simple : le GPWS (Ground Proximity Warning System) venait d'annoncer "Pull-up, pull-up" ("ressource, ressource") et l'équipage n'a pas compris. D'aucuns se sont offusqués qu'un équipage pût à ce point méconnaître l'anglais mais c'est ainsi : une inadéquation dramatique entre l'émetteur et le récepteur. Or le contexte est celui de la mise en action, justifiée, du GPWS. Par définition, cet instrument n'est utile qu'en l'absence du repère primaire, évident, qu'est la vue du sol. Il ne sert que dans ces conditions où le pilote a dû se construire une représentation mentale très forte de la situation et de sa trajectoire. Or chacun sait que plus est forte la représentation mentale, plus est grande la difficulté d'en sortir.

L'objectif n'est plus alors de faire œuvre didactique en forçant le pilote à entendre une langue étrange ou en s'offusquant qu'il ne la comprît point. Quel rêve que d'être le passager d'un avion dans lequel l'instrumentation a été enrichie d'une ligne supplémentaire dans la check-list avant décollage, qui demanderait au pilote le choix de la langue à employer dans l'urgence ! Même de simples logiciels de Bureautique offrent ce prodige qu'est le choix de la langue ! Un simple calcul, accessible à chaque amateur de systèmes informatiques, peut montrer qu'à la fin de ce siècle, les capacités de mémoire permettent ce raffinement à peu de frais.

Reste le cas de l'équipage dont les deux pilotes ne sont pas originaires de la même culture linguistique : plutôt que de sélectionner la langue du plus ancien dans le grade le plus élevé, le choix de l'auteur se porte sur la langue du pilote en fonction.

### **L'information n'est signifiante qu'après un traitement intellectuel complexe de l'information présentée**

Ce débat montre que l'information peut n'être acquise qu'après un traitement intellectuel complexe du message, auditif dans le cas du GPWS, visuel dans bien des cas. Est exemplaire la mise en descente d'un avion en mode automatique, sous la contrainte d'une accélération infraliminaire dans le plan vertical. L'augmentation globale de la portance entraîne initialement la positivité de la vitesse verticale et une légère augmentation de l'altitude, avant la descente, lente et progressive, dont la vitesse programmée ne sera atteinte qu'après 20 à 25 s. Dans ce scénario, le pilote a enclenché la fonction. Le retour d'information dont il dispose est la réaction de l'avion, éloignée de l'action commandée car la pleine efficacité de la commande n'est pas atteinte ; au début il n'observe même qu'un signe abstrait, une légère montée, conforme au schéma mental qu'il s'est construit (figure n°3).

Dans cette démarche, n'est utilisée comme entrée sensorielle qu'une partie de la fonction visuelle, traitée à travers un mode intellectuel pur ; par conséquent un signal ne peut être reconnu comme alertant qu'à travers une analyse complexe de l'information car il n'y a pas contrôle du *changement de la trajectoire* mais contrôle de la *prise en compte de la commande de changement de trajectoire*. L'exécution de l'ordre ne peut être contrôlée qu'à distance de l'acte initial. Dans un contexte de charge de travail élevée, est-ce nécessairement réaliste ?

### **La prise en compte neurophysiologique du facteur temps - Les tâches biphasiques :**

**a) quel est le délai maximal que l'on peut introduire entre deux actes d'une même tâche ?**

**b) l'opérateur humain peut-il conduire une tâche secondaire pendant ce délai ?**

C'est le problème du décalage temporel entre deux éléments d'une même action, en l'occurrence le couple commande-contrôle. Nous ne sommes de nouveau pas très loin du prestidigitateur précédemment évoqué. Des travaux ont récemment été menés sur la prise en compte du facteur temps par le système nerveux central lorsque deux actions combinées doivent être effectuées séquentiellement, avec un délai. Ils amènent à poser deux questions, auxquelles il n'est pas possible de répondre de façon exhaustive à ce jour : a) quel est le délai maximal que l'on peut introduire entre les deux actions d'une même tâche ? et b) l'opérateur humain peut-il conduire une tâche secondaire pendant ce délai ? La réponse à ces questions est évidemment essentielle si l'on veut bâtir une procédure acceptable de contrôle efficace d'une commande à action différée.

## Les processus naturels de l'homme sont des processus analogiques

Cette présentation de l'information amène à discuter la complémentarité de l'homme et du processeur mathématique. L'ordinateur est irremplaçable pour effectuer du travail pas-à-pas (tri de fichier, calcul numérique, gestion d'interruptions, surveillance de processus, etc.). Par contre, il est très difficile de programmer un ordinateur pour qu'il reconnaisse, sur une radiographie pulmonaire, une cavité tuberculeuse derrière la clavicule. Or celle-ci ne peut échapper à l'œil averti du radiologue. L'opérateur humain est peu performant dans le travail pas-à-pas mais il est capable, après apprentissage, de grouper en un ensemble signifiant une série d'informations même si chacune est caractérisée unitairement par un rapport signal-bruit exécutable.

En d'autres termes, un bon système de présentation et de traitement de l'information requiert deux outils : un processeur mathématique puissant, chargé d'effectuer les règles de trois, et le système psychosensoriel de l'homme, irremplaçable dans l'analyse d'une tâche complexe car capable d'extraire la bonne information globale. Peu importe que le contour de l'information reconnue par l'opérateur humain soit flou. Il reconnaît la valeur informative d'un ensemble d'éléments, à charge pour l'ordinateur d'effectuer les calculs ou actions précis. Soit un exemple où l'homme reconnaîtrait l'anormalité de l'évolution de l'avion et donnerait à l'automate l'ordre de remettre les gaz, ce que ce dernier exécuterait dans les conditions optimales d'efficacité.

L'enclenchement de la fonction de mise en descente finale provoque la construction d'un figuratif analogique sur l'écran de pilotage (figures n°4). Cette hypothèse dérive du postulat qu'à cette phase du vol, l'équipage et l'automate connaissent de façon redondante la position relative de l'avion et de la piste. Dans un avion *tout électrique*, ce postulat semble réaliste. La représentation analogique de la figure 4a est celle de la trajectoire nominale dans le plan vertical, sur laquelle s'inscrira en temps réel la trajectoire de l'avion (figure n°4b). L'erreur de commande serait signalée par l'intersection de la courbe de descente avec le sol en dehors du seuil de piste (figure n°4c) et une erreur d'exécution de l'ordre par une divergence entre la trajectoire nominale et la trajectoire réelle (figure n°4d), erreurs signalées avec tous les enrichissements graphiques nécessaires.

### Quelle est la nature exacte de l'information acquise sur l'instrument de bord ?

Adapter un dialogue, c'est aussi reconnaître l'exacte nature de l'information échangée. N'existe-t-il pas parfois une assimilation hâtive entre la *dénomination* d'une information et son contenu réel ? Cette question sera présentée à partir de l'exemple suivant : quelqu'un a regardé sa montre et la question lui est immédiatement posée " quelle heure est-il ? ". En général, il regardera une deuxième fois sa montre. Ce n'est pas parce qu'il a oublié l'information, c'est parce que ce n'est pas cela qu'il cherchait. En fait, regarder sa montre ne veut que rarement dire observer la valeur absolue du temps mais veut en général dire évaluer le temps par rapport à une référence, en général postérieure, parfois antérieure. En clair, regarder sa montre correspond à répondre à l'une des questions suivantes : " combien de temps me reste-t-il avant l'événement x. ? (par exemple avant le rendez-vous suivant) " ou bien " combien de temps ai-je déjà passé sur la tâche que je suis en train de faire ? ".

Pour généraliser le problème, la prise d'information recherche rarement une valeur absolue mais un écart par rapport à une consigne, ainsi que son évolution. La lecture du badin ou de l'altimètre est caractéristique. Il existe ainsi plusieurs niveaux dans la prise d'information sensorielle :



a) **un niveau d'alerte**, presque binaire, avec une lecture très grossière de l'information, en général par référence à une consigne primaire, souvent en relation avec un souci de sécurité immédiate ;

b) **un niveau d'évaluation** de l'information : c'est l'ordre de grandeur qui est intéressant, pas la valeur précise ;

c) **l'évaluation de la tendance** ;

d) enfin **la lecture précise de l'information**, pour aboutir à une gestion fine de la machine. A la limite, il s'agit du mode de prise d'information le moins utile car la gestion numérique fine de la machine est parfaitement maîtrisée par l'automate.

### **L'instrument de bord fascine le pilote, au détriment du pilotage pur : le détournement d'objectif**

L'homme doit piloter un avion à travers une instrumentation automatisée puissante donc complexe. La puissance des automatismes s'exprime par des fonctions multiples, parfois accessibles chacune de plusieurs façons, avec variantes et sous-variantes.

Le pilote doit donc tout à la fois piloter l'avion et conduire un processus. Il s'agit bien de piloter l'avion, au sens global de ce terme. Maître à bord, le pilote reste responsable et n'est *qu'assisté* par l'automate. Or dans une conduite de processus, il peut y avoir conflit entre deux tâches : la tâche de responsabilité de la machine et la tâche de conduite performante d'un système, l'une étant prioritaire par rapport à l'autre. **La fascination d'objectif** est une inversion objective des priorités par l'opérateur humain. De multiples causes peuvent déclencher la fascination d'objectif. L'usage de l'ordinateur semble être un moyen redoutable pour y parvenir... Il semble exister des cas où le pilote **ne peut pas** perdre la face vis-à-vis de l'ordinateur, cherche l'erreur qui empêche la machine de prendre son ordre en compte, et subit une érosion de sa vigilance vis-à-vis de la sécurité immédiate.

### **L'équation de l'équipage multiple : que vaut la somme 1+1 ?**

(à rédiger)

### **L'équation de l'équipage multiple : la nature de l'information présentée peut prédéterminer la nature de la tâche effectuée**

En conséquence, ne serait ce pas le type d'instrument qui détermine la nature du travail du pilote ? Cette question amène à évoquer l'instrumentation de l'équipage multiple. Dans un équipage multiple, et pour de multiples raisons, les deux pilotes disposent des mêmes indications ou, du moins, d'indications comparables. Le postulat de la sécurité voudrait qu'ils effectuent des tâches différentes. En général, c'est vrai mais l'erreur (toujours dans la même acception de ce mot) du travail en équipage survient lorsque cette condition n'est plus remplie. Le travail en équipage construit une arithmétique bien particulière où 1+1 est bien rarement égal à 2 (idéalement le résultat devrait être supérieur à 2).

Question d'instrumentation : faut-il présenter la même information aux deux pilotes ? La présence de deux pilotes est-elle simplement une redondance dans un but de sécurité ou s'agit-il d'assurer deux fonctions franchement distinctes ? La réponse est connue : un mélange des deux, et les solutions ne sont pas simples !

En effet, dans sa fonction de redondance, le second pilote doit disposer de la même instrumentation que le pilote en fonction tandis que, dans sa fonction de contrôle, il devrait surtout ne pas disposer de la même instrumentation : il devrait voir autre chose, à définir, par exemple des présentations analogiques telles que celle qui est présentée sur la figure 4. Est-il réaliste de postuler que la puissance des systèmes informatiques actuels permet de manipuler aisément la présentation de l'information sur les écrans de pilotage, avec réversibilité des fonctionnalités ? Les deux fonctions pourraient-elles être ainsi assumées, contrôle avec présentation de l'information totalement différente d'un poste de pilotage à l'autre, et redondance avec identité des deux présentations, dans les conditions exceptionnelles de la défaillance physique du pilote en fonction ?

### **La représentation mentale du travail et de l'action de l'équipage par le concepteur et la représentation mentale que se construit le pilote de l'état de ses systèmes à un instant donné, en fonction des indications disponibles**

Plusieurs accidents mettent en cause la logique des automatismes et la présentation de leur état. L'automate détecte une anomalie et réagit. L'équipage possède sa propre représentation mentale de la situation et surpasse l'automatisme ou une partie de l'automatisme. Plusieurs scénarios peuvent conduire à la catastrophe. L'un d'eux correspond à une bouillie (je n'ai pas d'autres termes) entre l'automate et l'équipage, l'un et l'autre faisant n'importe quoi pour contrer l'autre. Cette situation a provoqué des voltiges célèbres et des accidents meurtriers - sauf lorsque le pilote, français, a eu l'ultime sagesse de se rappeler son statut fondamental de pilote, a débrayé la **totalité** des automatismes et posé son avion à *la main*, sans que l'affaire n'apparaisse autrement que dans le compte-rendu que ce pilote a eu l'élégance de rédiger pour l'édification de ses contemporains.

Dans cette situation, le concepteur de l'instrument de bord n'a pas anticipé les modes d'erreur du pilote, erreur de perception de la situation, erreur procédurale et/ou erreur de gestion de l'automate. Nous connaissons d'autres exemples proches lorsque, en finale, l'équipage d'un B747-400 ne débraye pas l'automatisme. L'avion remet les gaz en mode automatique. Le CdB ordonne l'atterrissage (erreur procédurale). Le touché des roues n'inhibe pas l'ordre de remise des gaz (erreur conceptuelle), y compris lorsque l'une des réverses échappe au pilote (erreur gestuelle) et que l'avion, au cours de cet atterrissage long et rapide sur une piste de surcroît mouillée, se trouve avec trois moteurs en réverse et la poussée maximale sur le quatrième. Ces erreurs existent : parler de faute et rejeter la responsabilité sur un individu isolé, serait totalement contraire à la sécurité des vols.

### **Incompréhension entre groupes différents**

Ces dysfonctionnements nous instruisent-ils sur l'existence **d'une incompréhension fondamentale entre groupes différents** ? Il est probable que certains avions ont été construits (rêvés ?) autour d'une population idéale, qui n'est pas nécessairement la population *existante*, décrite par sa moyenne et surtout par sa limite basse. L'hypothèse dimensionnante est celle du pire pilote, de la pire compagnie, dans les pires conditions de vol et d'exploitation. Ne le nions pas, cet individu existe, et même sans faire appel à la célèbre loi de Murphy, nous savons que les pires ont une fâcheuse tendance à se regrouper.

### **La robustesse nécessaire des systèmes**

Il nous apparaît donc que l'interface homme-systèmes doit présenter de grandes qualités de **robustesse** en cas d'écart par rapport aux hypothèses. L'interface homme-systèmes

automatisée se révèle très sensible à l'erreur. Pour citer un rapport récent de l'équipe de l'IMASSA (Amalberti *et al.*) : " L'automatisation des machines avait au départ pour but de diminuer la charge de travail du pilote et de le soustraire aux travaux les plus fastidieux. En retirant des tâches aux opérateurs, les ingénieurs pensaient surtout les confier à des automates, réputés plus fiables que l'homme. ... Des effets pervers sont rapidement apparus. La charge de travail a effectivement baissé, mais de façon paradoxale ; les tâches considérées par le pilote comme les plus critiques et donc les plus lourdes au niveau charge de travail ne sont pas moins difficiles à gérer qu'auparavant. En effet les ingénieurs n'ont pu automatiser que les tâches les plus simples. Celles requérant des habiletés intellectuelles complexes, dont seul l'homme dispose, sont toujours sous la responsabilité exclusive de l'équipage. Ensuite la prise en charge partielle des tâches par les automatismes a eu pour résultat d'opacifier l'évolution du contrôle de processus complexe qu'est le vol. Les opérateurs perçoivent moins bien les règles de pilotage appliquées par les automates : le déroulement du vol n'est plus assez transparent à leurs yeux. Les reprises en mode manuel sont difficiles à anticiper et induisent des hausses brutales de la charge de travail. ". Le mode manuel est repris parce que le pilotage est devenu tellement complexe et rare qu'il n'est plus accessible à l'automate et c'est précisément à ce moment qu'il est brutalement confié à un homme jusque là dépossédé de la conduite immédiate de la machine.

D'acteur principal, sinon unique, du pilotage traditionnel, l'équipage ne devient plus, en conditions normales de vol, qu'un partenaire, presque un comparse. Par contre, si un équipage humain est maintenu dans l'avion, c'est précisément pour qu'il redevienne l'acteur principal dans l'inattendu, en remarquant que l'inattendu est souvent associé à l'urgence. C'est donc dans ces conditions que l'homme redevient acteur principal, avec le système comme partenaire. Mais ce partenaire est compliqué, au sens quasi psychiatrique que le médecin peut donner à cet adjectif.

En conclusions, l'introduction d'une interface automatisée dans la conduite des aéronefs a apporté de très grands facteurs de sécurité dans leur pilotage. Cependant, l'échange d'information entre le pilote et la machine fait appel à des mécanismes d'acquisition sensorielle et de traitement de l'information dont certaines modalités restent encore à préciser. Ce complément de travail se fera à travers une connaissance culturelle large de l'homme : c'est ainsi qu'a été observé l'art du camouflage, ou encore celui du prestidigitateur, de l'illusionniste. Connaissance culturelle large de l'homme : est-il possible de conclure en utilisant un mot qui apparaît comme désuet mais qui possède ses lettres de noblesse. Ces magnifiques machines recèlent une énorme quantité d'intelligence, de foi, de technicité, peut-être même d'amour ; qu'elles y incorporent aussi, d'abord, une solide dose d'humanisme.

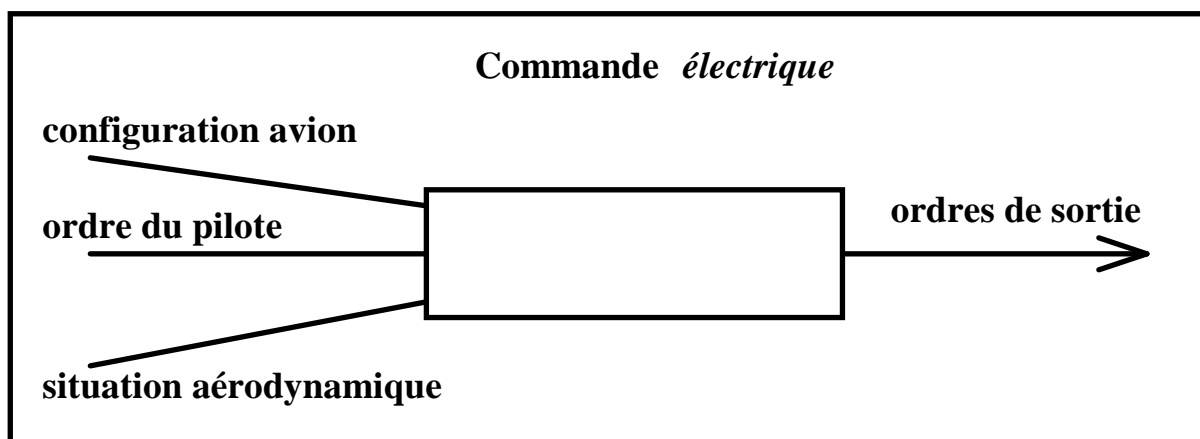
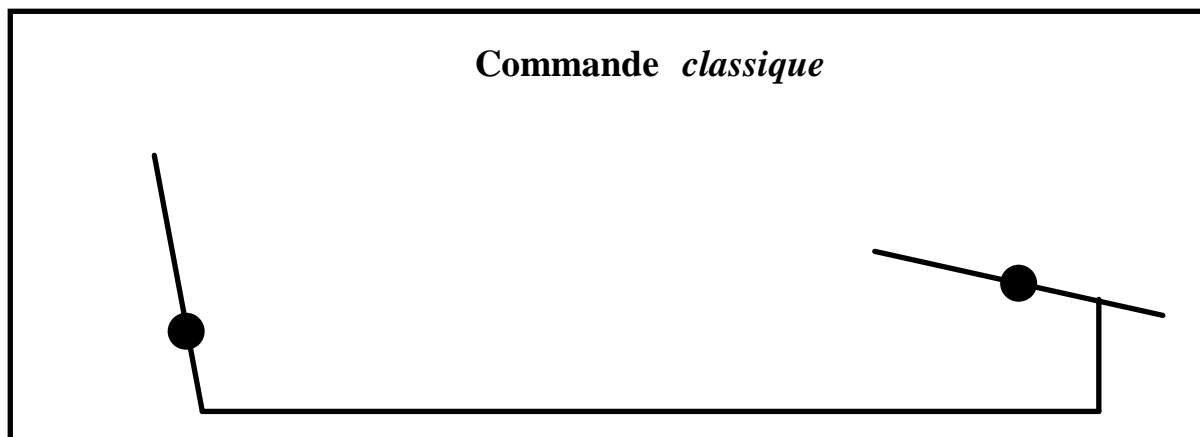


Figure n°1 : La commande de vol *classique* réalise une liaison directe, assistée ou non, entre l'ordre du pilote (ses membres) et la gouverne. La commande de vol électrique insère un processeur entre le pilote et la machine : l'action du pilote sur ses commandes n'est plus que *l'une* des entrées de l'ordre délivré à la commande de vol.



Figure n°2 : Informations présentées sur l'écran de pilotage

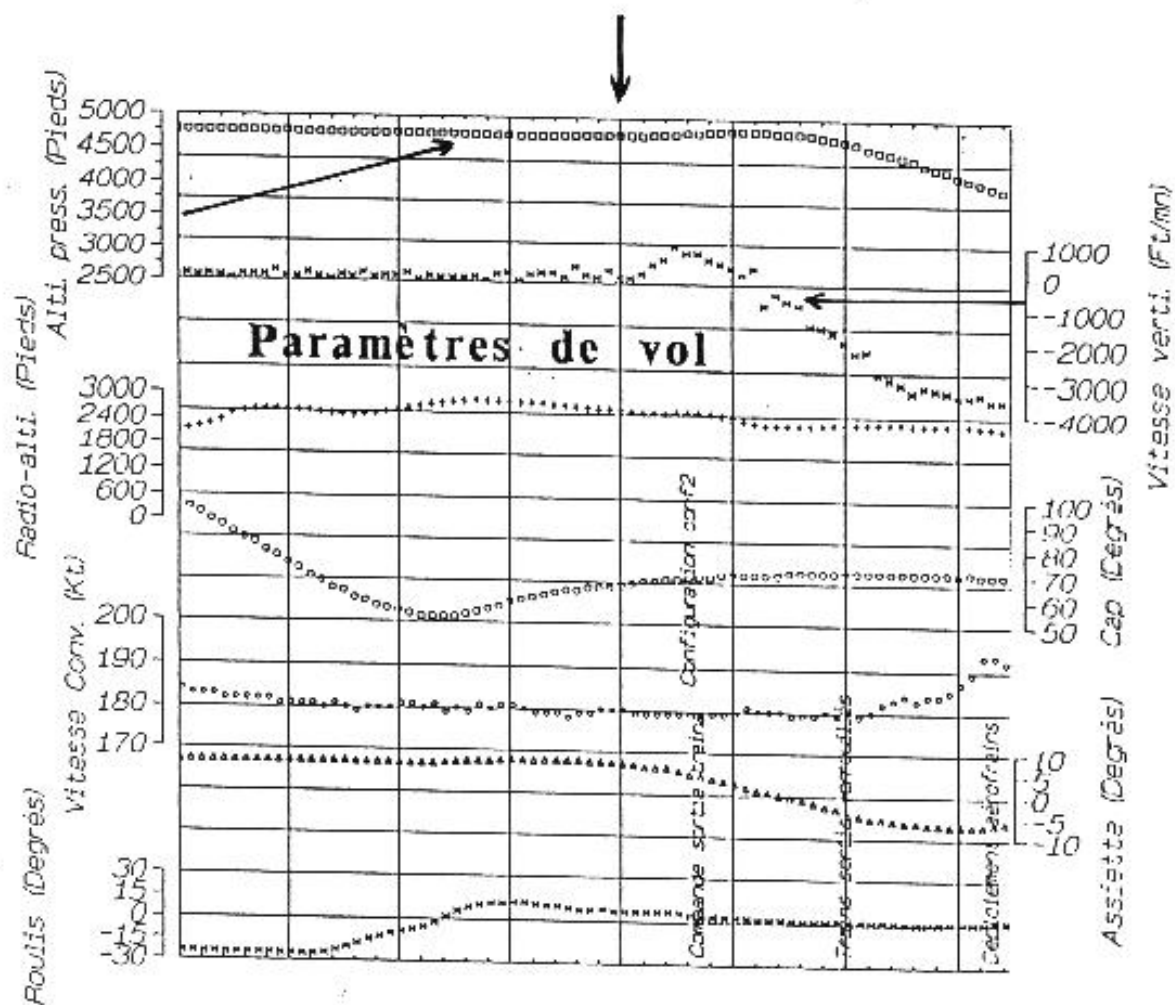


Figure n°3 : Evolution des paramètres de l'avion avant et au début de la mise en descente. Ces courbes montrent bien le passage du vario en valeur positive et une légère augmentation de l'altitude, témoins de la commande de mise en descente de l'avion. Par la suite, vario et altitude décroissent. La flèche verticale indique l'instant de la commande de mise en descente.

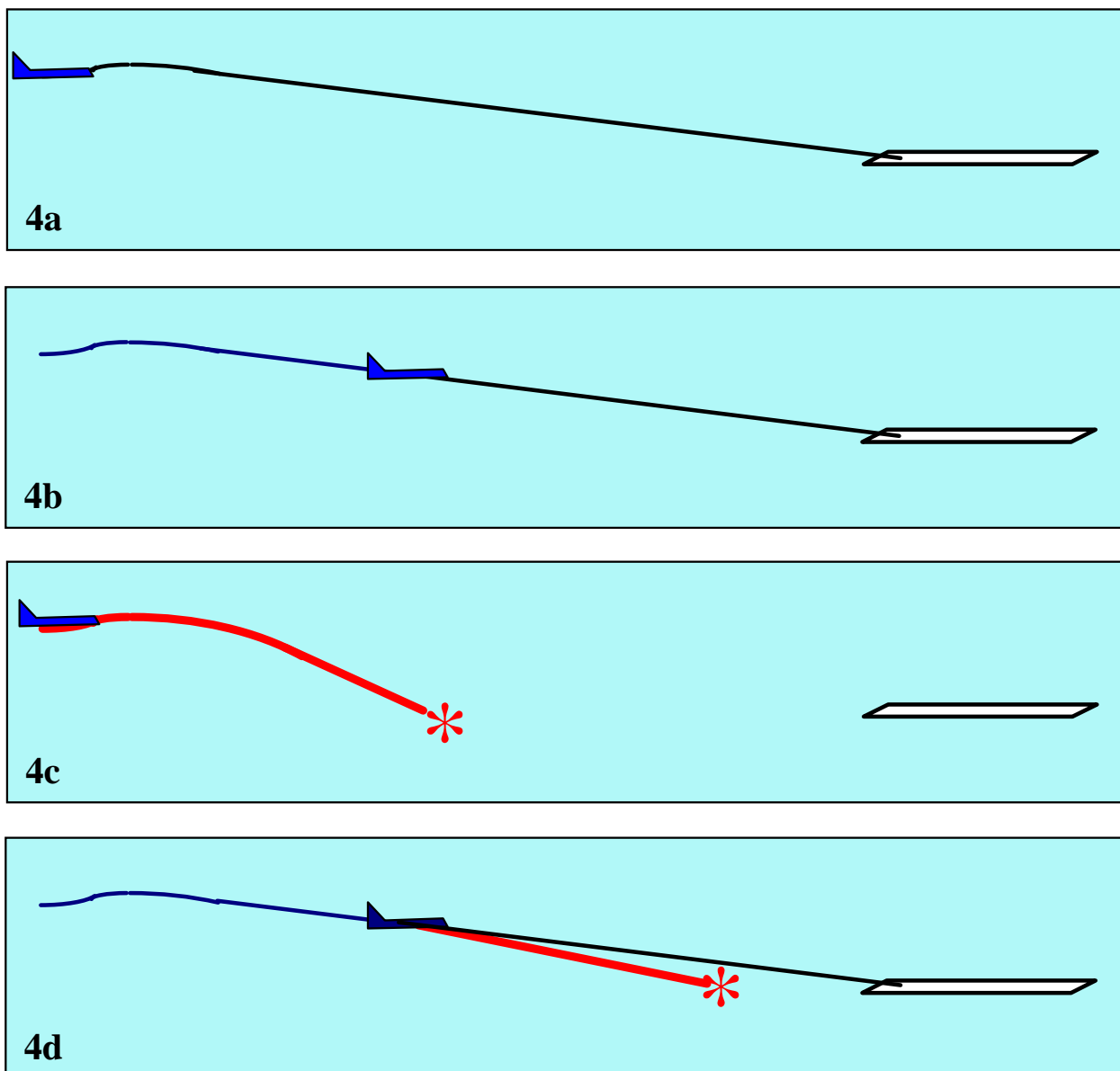


Figure n°4 : ce que pourrait dessiner l'automate sur l'écran de pilotage au moment de la mise en descente : de haut en bas : construction de la trajectoire prévue dans le plan vertical, position de l'avion sur cette trajectoire (utilisation de la couleur : le trait change de couleur, en restant dans une tonalité non alertante (vert foncé → bleu foncé par exemple), position de l'avion qui s'écarte de la trajectoire prévue : dessin de la trajectoire en couleur rouge et addition d'un signal d'alarme clignotant.