

Jacques VILLIERS

**AUTOMATISATION DU CONTRÔLE
DE LA CIRCULATION AÉRIENNE**

"ERASMUS"

*Une voie conviviale pour franchir
le "mur de la capacité"*



103, rue La Boétie – 7008 PARIS (France)
tél. 01 43 59 38 68 – fax. 01 43 59 47 37 – internet : <http://www.ita-paris.com>

Prologue

Je remercie très chaleureusement tous ceux, contrôleurs et pilotes, chercheurs, ingénieurs et ergonomes, avionneurs et producteurs de systèmes, qui ont bien voulu prendre connaissance de ce document au cours de sa maturation et me manifester l'intérêt qu'ils ont porté à sa démarche et à ses propositions.

Je n'en citerai aucun, mais tous se reconnaîtront.

J'ai apprécié leurs précieux conseils et tenu compte de leurs critiques constructives.

Ce texte aura sans doute contribué à une meilleure connaissance par chacun du domaine des autres partenaires, des problèmes posés comme des opportunités offertes.

La discussion qui s'est spontanément instaurée entre ces spécialistes de toutes les disciplines concernées m'a encouragé à publier ce texte en espérant qu'il pourrait inciter à la poursuite, voire à l'institutionnalisation, d'une concertation et d'une coopération actives entre tous ces acteurs.

Il n'est pas possible de rendre compte du fructueux débat largement amorcé, ni des dispositions déjà prises par certains pour commencer à explorer en commun le domaine ainsi ouvert et les applications novatrices proposées.

Toutes les composantes du transport aérien, des constructeurs d'avion aux compagnies aériennes, sont impliquées par le contrôle de la circulation aérienne, même si les retards et les coûts qu'il occasionne leur sont plus familiers que la réalité des problèmes rencontrés, à la solution desquelles elles devront cependant toutes contribuer.

On souhaite que chacun puisse trouver intérêt aux analyses et à la démarche proposée comme aux nouvelles perspectives offertes.

Jacques VILLIERS

TABLE DES MATIÈRES

Résumé	7
Chapitre 1	
LE SYSTÈME ACTUEL	11
1.1. L'ATC aujourd'hui	11
1.2. Un système efficace... mais jusqu'à quand ?	12
1.3. Point de vue critique de maints observateurs	13
1.4. À questions simples, réponses complexes	13
1.5. Un système essentiellement «humain»	14
Chapitre 2	
L'HOMME DANS LE SYSTÈME	15
2.1. Les processus mentaux fondamentaux	15
2.2. Un environnement flou	16
2.3. Des «problèmes» aux «conflits»	16
2.4. «Détection des conflits», «résolution des conflits» : des concepts flous	17
2.5. Un environnement fragile : les ressources cognitives	18
2.6. La «productivité des secteurs»	20
2.7. L'homme dans le système	21
Chapitre 3	
UNE SITUATION BLOQUÉE	23
3.1. D'énormes potentialités inexploitées	23
3.2. Un climat délétère	24
3.3. Vers une automatisation complète ?	25
3.4. Vers un «big bang» de l'automatisation ?	26
3.5. Le «mur de la capacité»	26
3.6. Vers une re-fondation du système ?	27
3.7. Le syndrome de l'automatisation	27
Chapitre 4	
LE MUR DE L'AUTOMATISATION	29
4.1. Une longue transition incontournable	29
4.2. Détection et résolution des conflits	29
4.3. Quelques non-solutions pour assister le contrôleur	30
4.4. La vraie nature du «mur de l'automatisation»	34

Chapitre 5	
VERS UNE ASSISTANCE CONVIVIALE AUX CONTRÔLEURS	35
5.1. Les contraintes	35
5.2. Les «Dix commandements»	36
5.3. Comment progresser et pour quoi faire ?	38
Chapitre 6	
ERATO : UNE PREMIÈRE BRÈCHE DANS LE MUR DE LA CAPACITÉ ?	39
Chapitre 7	
FRANCHIR LE MUR DE LA CAPACITÉ	41
7.1. Des ressources mal utilisées	41
7.2. Faire sauter le verrou : la démarche "ERASMUS"	41
7.2.1. Détection des «faux problèmes»	42
7.2.2. Accroissement de la «fluidité»	42
7.3. Un «auto-pilote ATC»	44
7.4. Les communications ordinateur/contrôleur	45
7.5. La délégation de responsabilité	46
7.6. Faisabilité, efficacité et démonstrations probatoires	47
7.6.1. Faisabilité et efficacité	47
7.6.2. Démonstration probatoire	50
7.7. Sécurité	52
7.8. Pilotage des avions et exercice du contrôle	52
7.9. Un projet intégré et fédérateur	53
7.10. Un projet progressif et évolutif	54
Chapitre 8	
RÉPONDRE AUX «POURQUOI ?»	57
Chapitre 9	
ALLER DE L'AVANT	59
9.1. Vers l'unification des systèmes	59
9.2. Vers une industrie européenne de l'ATM	59
9.3. Vers un ciel unique novateur et efficace	60

RÉSUMÉ

Beaucoup ne comprennent pas pourquoi le système de contrôle de la circulation aérienne (ATC) n'est pas encore entré dans la «modernité» d'une automatisation plus poussée.

Ce ne sont pourtant pas les financements qui ont manqué.

Souvenons nous des milliards de dollars dépensés. Souvenons nous d'AERA 3 (lancé aux États-Unis après la grande grève des contrôleurs de 1981) visant à l'automatisation complète du système, puis des «solutions miracles» successivement proposées : le «tout satellite», le «*free flight*», le «*free route*», une «navigation 4D planifiée». Les matériels qui seraient nécessaires à cet effet (GPS, FMS, *data-link*) sont déjà utilisés à bord de certains avions par les compagnies aériennes... mais pas par l'ATC !

Tous ces travaux n'ont guère réussi à dépasser le stade des études papier ou d'expérimentations décevantes.

La transition brutale vers un système automatisé se heurte en effet à des écueils insurmontables : certification préalable d'un logiciel d'une extrême complexité, équipement de tous les avions, aléas divers en exploitation.

Et pendant ce temps, le contrôle continue à ne reposer que sur le cerveau humain : à l'exception de l'alarme de dernière minute, les ordinateurs ne comparent pas les trajectoires des avions deux à deux.

Les essais de prévision et de résolution automatiques des conflits pour assister les contrôleurs ne sont jamais parvenus à aller au

delà de simulations ou d'une utilisation d'intérêt marginal.

Devant tant de désillusions, certains sont prompts à attribuer l'échec de leurs brillants travaux au «conservatisme» des contrôleurs.

Mais que savent-ils du travail de ces contrôleurs ?

Savent-ils que ce n'est pas l'espace aérien «en route» qui est saturé, mais que ce sont les aptitudes cognitives ultimes du cerveau humain qui imposent de multiplier sans cesse le nombre de secteurs pour faire face à l'augmentation du trafic ?

Savent-ils que les contrôleurs, sous fortes contraintes de sécurité et de stress, travaillent sur la base d'informations floues et incomplètes, du fait de leurs limites perceptives et de calcul mental en temps réel ? Même 10 minutes à l'avance, ils ne peuvent pas toujours affirmer que la séparation de 5n.m. ou 1.000 pieds sera ou ne sera pas assurée. Ils doivent donc détecter tous les «problèmes», les mémoriser et en surveiller l'évolution. Leur priorité est d'élaborer une stratégie et une tactique visant d'abord à optimiser la gestion de leurs propres ressources cognitives et mnémoniques.

Les ordinateurs ne sont pas affectés par les mêmes contraintes, mais au prix d'une barrière d'incommunicabilité entre eux et un cerveau humain qui «voit le monde avec d'autres yeux» : à vision différente, différentes stratégies et différentes décisions. Toutes les expériences l'ont montré.

L'ordinateur ne peut pas non plus agir de sa propre initiative car, dans un espace donné, il ne peut y avoir qu'un seul décideur.

Alors, jeter l'éponge ?

Ce serait sans doute inévitable, si tous ces obstacles ne pouvaient pas être contournés grâce à un moyen judicieux qui n'a pas, jusqu'ici, été mis en évidence.

Puisque la vision du contrôleur est floue, pourquoi ne pas en tirer judicieusement parti?

L'ordinateur peut non seulement détecter à l'avance les «faux problèmes» tels qu'ils sont vus par les contrôleurs, mais il est aussi libre de faire procéder à des ajustements mineurs de la vitesse des avions, tels qu'ils soient indécélables par le contrôleur (quelques nœuds peuvent suffire). Grâce à ce «contrôle subliminal», toute la précision de l'information disponible pourra être mise à profit d'une manière conviviale pour «dissoudre» une fraction très importante des conflits et pré-organiser un trafic «miraculeusement chanceux».

L'ordinateur accomplit ainsi, sans interférer avec le travail du contrôleur, ce que celui-ci ferait lui-même s'il disposait des informations et du temps nécessaire.

Le service en sera amélioré dans l'état actuel de l'équipement des avions et bénéficiera encore plus des nouveaux équipements de bord que les compagnies seront alors encouragées à installer.

La faisabilité et l'efficacité de ces processus novateurs sont en cours de validation.

Il est possible de bâtir sur ces bases un projet réaliste, appelé "ERASMUS"¹, ouvrant la voie et balisant le chemin pour franchir le «mur de la capacité»² en fédérant tous les projets jusqu'alors avortés.

¹ "ERASMUS" a way towards an «En Route Air traffic Soft Management Ultimate System».

² Voir "Le mur de la capacité" J. Villiers, *ITA Magazine*, n° 59 et n° 60 (1990).

Chapitre 1

Le système actuel

1.1. L'ATC aujourd'hui

Le contrôle du trafic aérien, tel qu'il est aujourd'hui effectué, est très différent de ce qu'il était au temps du «contrôle aux procédures» avec ses «*strips*»³ manuscrits ; la seule source de données ne provenait alors que du plan de vol déposé par les pilotes avant le décollage et des communications radiotéléphoniques par lesquelles ils faisaient connaître leurs positions.

Dans une première phase d'automatisation, les ordinateurs ne traitaient que les données de plan de vol, imprimaient les strips et les distribuaient aux contrôleurs au moment opportun.

Quand le radar primaire est devenu disponible, il est apparu que les contrôleurs pouvaient très difficilement assurer la corrélation de cette information brute avec les données de plan de vol.

Une nouvelle ère d'automatisation a été ouverte avec le radar secondaire qui a rendu possible la corrélation automatique et la présentation intégrée de toutes ces données.

Depuis ces phases initiales, les systèmes dits «automatisation du contrôle de la circulation aérienne en route» n'ont pas radicalement bénéficié d'un plus grand degré d'automatisation, sauf la mise en œuvre d'un «filet de sauvegarde» assurant une alerte en cas de danger immédiat de collision, lequel a été complété ensuite par un système air/air d'anticollision (TCAS).

³ Le «strip» est une bandelette de papier sur laquelle sont imprimés les points caractéristiques d'un vol dans un secteur donné ainsi que l'heure et le niveau de leur survol.

Jusqu'à présent, le rôle des ordinateurs reste ainsi limité à acquérir, traiter et afficher, de la manière la plus appropriée et au moment le plus opportun, les données disponibles concernant la position radar et les intentions des pilotes afférentes à chaque vol considéré isolément.

A l'exception de l'alarme de sécurité, les ordinateurs ne participent pas d'une manière significative à la comparaison de la position future des avions pris deux à deux en vue d'évaluer leur probabilité de collision.

Le contrôle proprement dit reste donc essentiellement «humain».

1.2. Un système efficace... mais jusqu'à quand ?

Des améliorations structurelles et opérationnelles n'ont jamais cessé d'être apportées au système, en vue de l'adapter à des contraintes de plus en plus sévères, de sorte que sa saturation pendant les périodes de pointe peut essentiellement être attribuée à une planification ayant pris du retard sur le trafic réel. La quasi-stagnation actuelle du trafic a permis de reprendre son souffle et laissé du temps pour effacer les grands retards, tels qu'ils ont été subis dans un passé récent.

Il faut cependant reconnaître que l'augmentation progressive de la capacité a essentiellement résulté de l'augmentation du nombre de «secteurs» dont chacun contrôle un volume d'espace de plus en plus faible (en France le contrôle est partagé entre près de 100 secteurs employant environ 2.000 contrôleurs, sans compter le contrôle d'approche et terminal autour des aéroports).

Il y a tout lieu de penser que la diminution du volume d'espace affecté à chaque secteur de contrôle finira par trouver ses limites lorsque le trafic recommencera à croître dans les années à venir. Sans de sérieuses novations, les compagnies aériennes qui, de leur côté recherchent tous les moyens de réduire leurs propres coûts, se montreront de plus en plus concernées par les charges croissantes (ou au mieux stagnantes) de l'ATM ; elles se montreront de plus en plus pressantes pour que la «productivité» de ce système soit accrue.

1.3. Point de vue critique de maints observateurs

Tout observateur, professionnel de l'ATC ou non, pourrait être fondé à poser les questions suivantes :

1 - POURQUOI l'ATC n'est-il pas encore entré dans l'ère de la «modernité technique» comme tant d'autres systèmes l'ont fait, l'avion en particulier, et pourquoi paraît-il encore si «archaïque" ?

2 - POURQUOI les nouveaux moyens de communication, de navigation et de surveillance (CNS) tels que les transmissions automatiques de données codées, le GPS et les systèmes de management de bord (FMS), sont-ils déjà couramment utilisés par les compagnies aériennes pour leur propre bénéfice... mais très peu pour celui de l'ATC ?

3 - POURQUOI tant de propositions, intellectuellement stimulantes et imaginatives, qui pourraient faire entrer ce système dans la «modernité», se montrent-elles si décevantes lorsqu'elles sont confrontées à la réalité ?

4 - POURQUOI tant de millions de dollars et d'euros ont-ils pu être dépensés pendant tant d'années aux Etats-Unis comme en Europe, et continuent-ils à l'être, sans avoir encore apporté de résultats opérationnels prouvés ?

5 - POURQUOI le système actuel, aussi «archaïque» qu'il soit supposé être, se montre-t-il encore si sûr ? Pourquoi a-t-il pu, jusqu'alors, s'adapter progressivement à un trafic rapidement croissant ? Où sont les limites et pourquoi ?

1.4. À questions simples, réponses complexes

Il n'est guère facile de donner des réponses simples à ces vues pessimistes sur le système actuel et sur son avenir, et au doute exprimé à l'égard de ses managers et des prestataires de service de la circulation aérienne.

C'est la nature même du problème posé qui est extrêmement com-

plexe ; ce n'est pas en le simplifiant artificiellement qu'on peut espérer parvenir à des conclusions réalistes.

Même en se limitant à l'essentiel, il n'est pas possible d'échapper à l'étude du problème sous toutes ses facettes et dans toutes ses implications.

Les analyses qui suivent se fixent pour objectif d'apporter des réponses objectives aux questions ci-dessus, et de repérer la «porte étroite» qui pourrait ouvrir la voie à un système futur plus efficient (en terme de sécurité, de capacité et de coût), mais aussi capable de soulager les contrôleurs de leur stress.

1.5. Un système essentiellement «humain»

La prestation du service de contrôle de la circulation aérienne est effectuée par des êtres humains qui mettent en œuvre des processus cognitifs d'une grande complexité.

En sous-estimant cette complexité, il est facile d'imaginer bien des «solutions» pour sortir le système de son «archaïsme», solutions d'autant plus séduisantes qu'elles se jouent des réalités.

Ces visions futuristes ne pourraient trouver leur place que dans le cadre d'un système entièrement automatisé qui, comme on le montrera ci-dessous, nécessiterait une longue transition qui soulèverait les mêmes problèmes humains – et sans doute des problèmes encore plus difficiles – que ceux qui affectent le système actuel.

Revenons donc en ce bas monde et à la vraie vie.

Chapitre 2

L'homme dans le système

Pour être crédible, tout projet doit être bâti sur la connaissance approfondie de la nature et de la spécificité des tâches qui sont accomplies par les contrôleurs, ou qui le resteront dans le cadre d'un système plus automatisé.

Le lecteur qui souhaite se faire sa propre opinion ne peut pas éviter de pénétrer dans l'univers complexe des processus cognitifs et mnémoniques mis en œuvre par les contrôleurs, ce qui requiert une certaine attention.

Il est bien difficile en effet de décrire en quelques mots la manière dont le cerveau des contrôleurs est capable, sous de sévères contraintes de temps, de sécurité et de stress et à la limite de leur saturation, de dominer simultanément plusieurs problèmes difficiles à la fois évolutifs et réagissant les uns sur les autres. L'analyse approfondie de ce travail est désormais bien décrite grâce à des travaux entrepris depuis de très nombreuses années.

2.1. Les processus mentaux fondamentaux

Imaginons ainsi par la pensée un «secteur de contrôle» dans lequel une quinzaine d'avions évoluent le long de routes et à des altitudes différentes ou selon des trajectoires montantes ou descendantes, entrant et quittant cette portion de l'espace dans laquelle ils ne restent qu'une quinzaine de minutes ou moins.

Eviter toute collision et se coordonner avec les secteurs précédents et suivants serait relativement aisé, hors de toute contrainte temporelle ou sécuritaire, sans le stress associé aux tâches accomplies, et si l'environnement informationnel du contrôleur n'était pas aussi flou et aussi fragile.

2.2. Un environnement flou

Les contrôleurs ont pour mission de s'assurer du respect d'une séparation minimale de sécurité entre les avions d'au moins 5n.m. dans le plan horizontal ou 1.000 pieds dans le plan vertical.

A cette fin, ils doivent extrapoler mentalement les positions de chacun des avions jusqu'au point de croisement de leurs trajectoires et sur la seule base de la connaissance de leurs positions et de leurs vitesses actuelles, telles qu'ils peuvent grossièrement les estimer sur l'écran radar. La précision de ce processus est si faible que les contrôleurs doivent prendre de larges marges avant de décider que deux avions ne posent pas de «problème», c'est-à-dire avant de déclarer, dès maintenant et en toute certitude, que ne sera pas enfreinte la séparation standard de sécurité.

Fort heureusement la précision de la prévision s'améliore au fur et à mesure qu'approche le moment du croisement.

2.3. Des «problèmes» aux «conflits»

Pour chaque «problème» détecté, les contrôleurs sont ainsi amenés à mettre en mémoire un «filtre»⁴ approprié et à suivre avec vigilance dans quelle mesure chacun de ces problèmes évolue soit vers une situation dénuée de risque, soit vers un risque croissant, selon des processus itératifs :

- > risque potentiel
- > risque certain
- > risque alarmant
- > perte de séparation minimale
- > anti-collision

Ces «filtres» sont très sensibles à la précision de la prévision effectuée. Par exemple, 15 minutes à l'avance, une différence de quelque 2% (moins de 10 nœuds) dans l'estimation de la vitesse de chaque avion transforme la prévision d'une collision absolue en celle d'une situation non conflictuelle.

⁴ Voir «La méthode des filtres» J.Villiers, Revue «Navigation» 1968

Une telle précision est tout à fait hors d'atteinte à partir de la perception de l'information sur l'écran radar et du calcul mental pour les extrapoler.

On comprend ainsi que de nombreux «problèmes», identifiés comme tels, ne se transformeraient pas en «conflit» si le contrôleur ne s'en préoccupait pas, mais on se persuade aussi que le contrôleur ne peut pas prendre un tel risque.

Tous ces «problèmes» ne sont donc pas résolus immédiatement, soit parce que le contrôleur est trop occupé par ailleurs, soit parce que cela pourrait se révéler inutile pour beaucoup d'entre eux.

Le contrôleur doit donc mettre en mémoire les «problèmes» jusqu'à ce qu'ils se révèlent injustifiés ou jusqu'au moment où il décide de les résoudre en émettant la «clairance» nécessaire (changement de niveau, route directe, évitement radar...).

2.4. «Détection des conflits» et «résolution des conflits»: des concepts flous

L'analyse qui précède amène à rejeter l'idée simpliste, et cependant commune, même parmi ceux qui se considèrent comme des spécialistes, que la tâche du contrôleur se limite à un simple flux ordonné de détections de conflits immédiatement suivies de leur résolution.

Pour les raisons exposées ci-dessus, ces concepts sont loin d'être aussi évidents qu'on le suppose souvent.

a) détection des conflits

La détection d'un conflit n'est pas une constatation par «tout ou rien». Cette déclaration est :

- contingente (incertaine) car elle repose sur la qualité des informations disponibles et des moyens de calcul mis en œuvre pour les extrapoler,
- remise en cause en permanence : plus le moment du conflit potentiel se rapproche plus l'estimation est précise et sûre, mais

inversement moins sa résolution est confortable pour le contrôleur et pour le pilote.

b) résolution des conflits

Même si cela est moins évident à première vue, toute solution proposée à un moment donné pour résoudre un conflit est également :

- contingente car :
 - . elle dépend de la probabilité de l'occurrence effective du conflit potentiel (et donc de la précision des données utilisées et de leur extrapolation),
 - . elle ne constitue qu'un élément dans une stratégie d'ensemble, c'est-à-dire dans la séquence choisie pour traiter tous les problèmes en suspens,
- remise en cause en permanence : toute disposition prise à un moment donné peut être revue ultérieurement à la lumière de l'évolution de ce problème comme de tous les problèmes en cours.

Il en résulte que ce qu'on nomme pour faciliter les choses «conflits», «détection des conflits» et «résolution des conflits» correspond à des concepts flous qui ne peuvent pas être définis en dehors de chaque contexte.

2.5. Un environnement fragile : la gestion des ressources cognitives

Mais il existe encore d'autres fortes raisons pour lesquelles un «problème» ne peut pas être résolu dès qu'il est détecté.

A l'évidence, les contrôleurs cherchent à faire l'usage le plus efficient possible de l'espace aérien disponible, mais ils doivent, aussi et surtout, gérer au mieux leurs propres ressources cognitives et mnémoniques, par nature limitées, sans parler de leur capacité de résistance au stress.

Ils ne peuvent en aucun cas prendre le risque de se trouver surchargés face à une situation qui serait devenue critique ou dommageable pour la sécurité.

En fait, les contrôleurs traitent le trafic comme un tout.

Toute action doit trouver sa juste place et son juste moment dans le cadre d'une stratégie et d'une tactique élaborées et revues en permanence.

Plus le trafic est intense, plus les contrôleurs augmentent les marges de sécurité, ce qui accroît ainsi le nombre de problèmes retenus et explique bien leur rapide saturation au-delà d'un certain trafic.

Ayant ainsi «filtré» le trafic avec un «filtre à mailles larges», les contrôleurs doivent mémoriser la situation d'ensemble et en assurer la surveillance selon un processus de balayage et de réévaluation (ce qu'on a appelé la «mémoire opérationnelle» des contrôleurs), tout en restant simultanément en alerte et prêt à réagir à tout stimulus provenant d'un contrôleur d'un secteur voisin ou d'un pilote.

Cet environnement est donc fragile, non seulement parce que le contrôleur fonctionne à la limite haute de ses capacités physiologiques, cognitives et mnémoniques, mais aussi parce que tous ces processus reposent sur la mémoire⁵. En effet, les contrôleurs ne disposent d'aucune visualisation des problèmes en cours ni de la stratégie qu'ils ont élaborée (à l'exception de courtes inscriptions manuelles sur les strips et de la manipulation de leur emplacement).

Le contrôleur et son assistant doivent donc coopérer sans disposer de visualisations communes des problèmes et de la stratégie en cours, ce qui suppose une longue période préalable d'entraînement et de travail en commun.

On comprend ainsi que ce n'est pas l'espace qui est saturé mais le cerveau humain, dont on sait qu'il n'est pas capable de traiter et de mémoriser plus d'un certain nombre de problèmes à la fois.

⁵ Voir «La mémoire des opérateurs dans la conduite des systèmes complexes» J.Villiers, *Forum «Homme/machine» Académie Nationale de l'Air et de l'Espace (ANAE) 2000.*

Certaines de ces tâches sont visibles (clairances, évitement radar...), mais l'essentiel de l'effort cognitif et mnémonique ne peut pas apparaître à un observateur extérieur.

2.6. La «productivité» des secteurs

En dépit des progrès et de la sophistication technique croissante du système, la capacité des secteurs en terme du nombre maximum d'avions pris en compte simultanément, est restée quasi-constante depuis les temps anciens du contrôle aux procédures sans radar ni ordinateurs.

Cela n'est pas aussi paradoxal que cela pourrait le sembler ; la raison en est l'accroissement de la vitesse des avions, mais surtout la réduction de la taille des secteurs qui induisent :

- une augmentation du flux de tâches,
- un accroissement de la densité du trafic et, par là même, du nombre d'avions en conflit ainsi que du nombre de conflits intervenant à peu près au même moment (*clusters*),
- une diminution de l'espace et du temps pour intervenir.

De plus, le stress du contrôleur s'accroît lorsque les périodes de pointe de trafic deviennent plus fréquentes et plus longues.

Ce travail de cognition et de mémoire, d'attention soutenue et d'expertise, nécessite un long entraînement préalable et s'effectue sous sévère contrainte de temps et de sécurité ; il finit par trouver ses limites qui s'expriment synthétiquement d'une manière quantifiée par le «maximum d'avions» qu'un secteur peut prendre en charge simultanément.

On comprend ainsi qu'il ait été nécessaire de protéger les secteurs par une régulation en amont des flux de trafic (*flow control*) pour leur éviter toute surcharge, et pourquoi la «capacité des secteurs» est un concept difficile à cerner et sujet à controverses.

Sauf innovation marquante, on est donc en droit de se demander dans quelle mesure le système ne butera pas sur des limites de capacité et de coûts.

Pendant les heures de pointe, le système fonctionne d'ores et déjà aux limites extrêmes des performances du cerveau humain, ce qui n'est pas sain, même si cela reste encore très sûr. On doit d'ailleurs s'interroger sur la légitimité d'un système qui fait peser une telle pression physiologique et psychologique sur les contrôleurs.

2.7. L'homme dans le système : une contrainte lourde et un paradoxe

C'est donc l'homme qui limite la capacité de l'espace aérien... dont l'organisation est elle-même contrainte du fait même que le contrôle est effectué par des cerveaux humains :

a) Secteurs de plus en plus petits au fur et à mesure que le trafic croît, et en conséquence :

- un accroissement du nombre de coordinations entre les secteurs,
- une faible anticipation des conflits (et de leur résolution) qui ne peuvent se révéler et être résolus avant que les avions arrivent dans le secteur où le conflit va avoir lieu : un contrôleur ne peut agir au profit du secteur suivant qu'au moment de la coordination avec celui-ci.

b) Routes prédéterminées qui réduisent les «degrés de liberté» mais facilitent l'analyse et la mémorisation de la situation par des cerveaux humains (ne dit-on pas qu'une roue tourne librement lorsqu'elle n'a plus qu'un seul degré de liberté !).

c) Grandes précautions pour garantir la sécurité du fait que le contrôleur, comme chacun d'entre nous, peut commettre des erreurs d'appréciations et avoir des défaillances d'attention ou de mémoire.

Le paradoxe découle ainsi du fait que la charge repose sur des hommes saturés... dont la présence même empêche d'optimiser l'organisation du système et, comme on le montrera ci-dessous, de profiter pleinement des possibilités qui pourraient être offertes par les ordinateurs modernes !

Chapitre 3

Une situation bloquée

Des améliorations sont en permanence apportées au fonctionnement du système au jour le jour. En particulier, la position de contrôle a été de mieux en mieux aménagée, notamment par la mise en service de grands écrans de visualisation modernes de très haute qualité. On est parvenu dans certains centres à remplacer les strips-papier par des strips-électroniques, mais les «concepts opérationnels» n'ont pas significativement évolué depuis de nombreuses années.

Les analyses qui suivent se placent essentiellement dans le cadre de l'automatisation du contrôle en route, même si elles peuvent s'étendre à d'autres espaces.

Il est évident que le manque de capacité du système dans son ensemble provient aussi de bien d'autres sources (saturation des aéroports, zones militaires, unification trans-nationale des espaces aériens...) qui sortent du cadre de la présente étude.

3.1. D'énormes potentialités inexploitées

Si le contrôleur ne peut tirer qu'un profit limité des informations d'ores et déjà disponibles, que dire *a fortiori* de celles qui pourraient être considérablement enrichies grâce au GPS, aux ordinateurs de bord (FMS) et aux liaisons codées ? Ces potentialités ne sont que marginalement utilisées par l'ATC, en dépit du fait que bien des avions en sont déjà équipés pour leurs propres besoins et que rien n'incite à le faire pour ceux de l'ATC.

Et pire, pour des raisons qui seront analysées en détail ci-dessous,

la puissance des ordinateurs reste encore largement inemployée pour la détection et la résolution des conflits (à l'exception de certains dispositifs d'intérêt limité qui permettent au contrôleur d'interroger l'ordinateur au coup par coup).

Il faut aussi rappeler que, dans un contexte de saturation et de stress, la voix (son contenu sémantique comme son intonation) reste le moyen le plus naturel et le plus efficace pour la communication en temps réel entre les hommes : les liaisons de données ne trouveront leur pleine application qu'entre les ordinateurs ou pour les communications asynchrones.

L'évolution semble donc bien bloquée.

3.2. Un climat délétère

Compte tenu de la saturation du système et du coût des retards, les compagnies aériennes ne manqueraient pas de se montrer prêtes à équiper leurs flottes en matériels nouveaux, si la preuve et l'assurance leur étaient d'abord données qu'il en résulterait des améliorations très significatives de coût et d'efficacité du contrôle.

De leur côté, les avionneurs et les producteurs d'avionique ont accompli des efforts couronnés de succès pour développer de nouveaux systèmes à bord des avions, dans l'espoir qu'ils pourraient aussi entraîner une mutation équivalente du système de contrôle de la circulation aérienne. Impatients et frustrés, ils sont prompts à accuser les prestataires des services de navigation aérienne, l'industrie de l'ATM et les contrôleurs, d'être coupables d'une inertie, voire d'une mauvaise volonté, pour lesquelles ils n'imaginent aucune excuse.

De leur côté, les contrôleurs continuent à craindre de se voir imposer des gadgets plus ou moins utiles et d'être blâmés de ne pas les utiliser, mais ne voient venir aucun espoir de soulagement de leur stress croissant.

On peut comprendre la passion qui entoure ces sujets, mais rien

ne laisse penser qu'elle ait contribué à dégager des solutions réalistes et crédibles.

Et ce ne sont cependant pas les études, les propositions et les budgets qui font défaut !

Il conviendrait de mettre fin à ces accusations mutuelles, de comprendre pourquoi tous ces efforts n'ont pas été couronnés de succès et de s'attacher résolument à relever ensemble le défi.

3.3. Vers une automatisation complète ?

Puisque c'est l'homme qui bloque l'évolution du système, on peut à juste titre se demander pourquoi on l'y maintient. Après tout, l'ATC n'est-il pas tout simplement un système de traitement de l'information qui pourrait donc théoriquement se prêter à sa complète automatisation, si les avions étaient équipés de dispositifs nécessaires d'ores et déjà disponibles ?

Toutes les contraintes qui résultent de la présence de l'homme disparaîtraient : utilisation incomplète des données, piètre précision du calcul mental, inefficacité de l'organisation de l'espace, erreurs humaines...

D'éminents mathématiciens en Europe et aux Etats-Unis ont développé de très sophistiqués algorithmes arithmétiques ou neuro-naux pour résoudre les problèmes afférents à l'anticollision de «n avions» évoluant dans un espace donné.

Un récente thèse⁶ enrichie de plus de 60 références, met en œuvre ces modèles pour effectuer un ensemble de simulations d'un système entièrement automatique. Des conclusions essentielles peuvent en être tirées :

- a) toute déclaration de «conflit» ou de «non conflit» entre deux avions est très sensible à la précision de la connaissance de leurs vitesses horizontales et verticales,
- b) le nombre de conflits à prendre en considération peut devenir rapidement très important de même que le nombre de conflits quasi-simultanés (*clusters*),
- c) des *clusters* de 4 ou 5 avions sont délicats à résoudre.

⁶ «Détection et résolution des conflits aériens : modélisation et analyse» Géraud Granger ENAC 2000.

d) une simulation conduite sur la base d'une journée chargée de trafic en France montre que :

- un système centralisé est plus efficace qu'un système décentralisé dans lequel les avions assurent eux-mêmes leurs séparations (*free flight*),
- un système de routes libres (*free route*) donne naissance à moins de *clusters*, mais ceux-ci sont plus difficiles à résoudre,
- le système requiert la mise en place en amont d'un «filtre de décomplexification» pour éviter l'émergence de trop de *clusters* ou de *clusters* trop complexes.

3.4. Vers un «big bang» de l'automatisation ?

La mise en œuvre d'un système entièrement automatique se heurterait à d'énormes obstacles :

- la production de logiciels fiables de cette taille et de cette complexité reste hors de portée pour la (ou les) décennie(s) à venir,
- l'impossibilité de la certification préalable de tels logiciels aptes à prendre en compte toutes les situations imprévisibles pouvant survenir dans le monde réel,
- l'équipement simultané de toutes les flottes d'avions (y compris des plus anciens) avec les équipements nécessaires (liaisons de données, FMS modernes...).

La FAA aux Etats-Unis a tenté sa chance dans une telle aventure (AERA 3) qui n'a cependant pas dépassé le stade des études papier et de quelques simulations, bien qu'un tel projet ait été «vendu» au Congrès américain après la grande grève des contrôleurs de 1981.

Le D Day étant exclu, il faudrait mettre en œuvre une période de transition et apporter la preuve de sa faisabilité.

3.5. Le «mur de la capacité»

On est ainsi amené à considérer que, entre le système actuel et un système futur supposé être entièrement automatisé, il existe un «mur de l'automatisation»⁷ (et en conséquence un «mur de la capa-

⁷ «Le mur de l'automatisation» J.Villiers, Forum «Homme/machine», Académie Nationale de l'Air et de l'Espace (ANAE) Sept. 1999.

cité⁸) qui doit être franchi comme celui, par le passé, entre les vols sub et supersoniques.

On analysera ci-dessous les problèmes impliqués et on proposera des modalités pour les affronter.

3.6. Vers une re-fondation du système ?

Dans la mesure où l'automatisation complète apparaît comme hors de portée, il vient rapidement à l'esprit de changer de stratégie : si le système ne s'y prête pas, changeons le système ! Il ne manque pas de suggestions en ce sens :

- a) certains proposent d'abandonner le système centralisé pour confier au réseau des ordinateurs de bord en liaisons mutuelles la responsabilité de l'auto-séparation des avions. Cela aussi a été «vendu» aux Etats-Unis dans ce qui a été dénommé le «*free flight*»,
- b) d'autres suggèrent de renoncer aux routes prédéterminées au profit de «routes libres» (*free routes*),
- c) d'autres encore songent à tirer tout le profit de la précision de navigation pour envisager un système déterministe et donc planifiable (souvent appelé "trajectoires 4D") plus ou moins à l'exemple du chemin de fer,
- d) et il y a aussi ceux qui ont prétendu qu'un système entièrement basé sur les satellites pour l'information et pour les communications offrirait la solution providentielle... sans dire pourquoi ni comment !

Si de telles propositions reposent sur une automatisation intégrale, elles se heurtent à un «big bang» irréaliste, sinon elles impliquent une longue transition qui compliquera le travail des contrôleurs et soulèvera des problèmes de relations homme/machine plus complexes que ceux auxquels est déjà confrontée toute automatisation partielle du système actuel.

3.7. Le «syndrome de l'automatisation»

Tous ces projets sont plus ou moins inspirés par ce qu'on pourrait appeler le «syndrome de l'automatisation» qui cache une logique implicite :

⁸ «Le mur de la capacité» J.Villiers, *ITA Magazine* n° 59 et n° 60 (1990).

- c'est l'homme qui bloque l'évolution du système,
- des solutions techniquement parfaites peuvent être imaginées,
- les «experts en facteurs humains» parviendront à les adapter aux contrôleurs,
- si elles ne sont pas utilisées face à un trafic réel dense, la faute en sera aux contrôleurs corporatistes et conservateurs ou à tous ceux qui se proclament spécialistes en ATC ou en facteurs humains.

On comprend ainsi pourquoi, depuis de nombreuses années, le débat se cantonne à ses aspects académiques ou polémiques entre les tenants de telle ou telle «solution»... mais ne débouche sur aucun projet pouvant être effectivement réalisé et mis en service.

Chacun de ces projets n'en a pas moins des mérites propres si l'on considère ses potentialités à long terme, même si aucun d'entre eux n'a apporté la preuve de sa faisabilité opérationnelle à court et moyen termes.

De tels projets restent intellectuellement stimulants, mais ne doivent pas décourager tous ceux qui font face aux contraintes de la vie réelle, ni contribuer à ruiner leur crédibilité ou à les priver des rares ressources financières encore disponibles mais en passe de se raréfier.

Plutôt que de partir de solutions "*a priori*", il convient de commencer par reconnaître la véritable nature du problème et des obstacles à surmonter, puis de poursuivre l'analyse, jusqu'à ce que des moyens puissent être trouvés pour ouvrir la voie à des développements réalistes.

Telle est la démarche proposée dans la suite de cette étude.

Toute autre approche, aussi excitante qu'elle puisse être pour les théoriciens et les ingénieurs, et aussi prometteuse qu'elle puisse apparaître pour des applications à long terme, ne constituerait qu'un prétexte à l'immobilisme et une offense faite aux contrôleurs qui restent avides, comme ils l'ont toujours été par le passé, de toute amélioration susceptible de les soulager dans leur travail.

Chapitre 4

Le mur de l'automatisation

4.1. Une longue transition incontournable

Ce serait certainement aller au-devant de graves déceptions que de rêver de franchir aisément le «mur de l'automatisation».

Sans être prophète on peut prédire que, dans le cas de l'ATC, cette entreprise se révélera fort délicate et nécessitera une longue et difficile transition dont «l'entrée des artistes» reste encore à découvrir.

Il ne sera d'ailleurs pas possible de s'aventurer sur un chemin aussi mal pavé sans s'être assuré que toutes les étapes seront viables et capables d'apporter en elles-mêmes des améliorations de sécurité et/ou de capacité.

La transition doit aussi être telle que le contrôleur bénéficiera progressivement de nouveaux outils même avec l'équipement actuel des avions. Ces outils deviendront ensuite de plus en plus efficaces avec la généralisation des nouveaux équipements de bord et l'encouragement des compagnies aériennes à leur installation.

4.2. Détection et résolution des conflits

Comme on l'a déjà dit, il ne manque pas d'études et de modèles mathématiques pour analyser les positions relatives de «n avions» deux à deux et leurs évolutions probables. De tels algorithmes ne sont pas sujets aux contraintes du cerveau humain et peuvent utiliser toute l'information disponible actuellement, ou telle qu'elle pourrait être enrichie dans le futur par celle qui parviendra des équipements de bord.

De tels automates peuvent effectivement détecter et résoudre les conflits... mais on a vu que ce n'est pas là que se situe le vrai problème.

Ce qu'il faut déterminer c'est quel service effectif ils pourraient rendre aux contrôleurs.

4.3. Quelques «non-solutions» pour assister le contrôleur

Espérer qu'un ordinateur puisse assister un contrôleur repose sur l'hypothèse que l'ordinateur peut faire mieux que le contrôleur, puisqu'il a accès à des informations plus riches et plus précises et qu'il peut procéder à des calculs plus sophistiqués et plus rapides.

Mais si l'ordinateur fait mieux

...il fait différemment

...et, faisant différemment

...il parvient à des solutions différentes.

Il en résulte qu'un contrôleur et un ordinateur sont structurellement amenés à diverger tant dans l'évaluation des problèmes que dans leur solution et donc aussi dans la stratégie et la tactique dans lesquelles ces décisions doivent trouver leur place. Ces faits sont incontournables et leurs conséquences doivent être tirées soigneusement.

Il devient ainsi facile de comprendre pourquoi tant de projets, pourtant d'apparence prometteuse pour assister le contrôleur à détecter et résoudre les conflits (concepts flous comme on l'a montré), n'ont pas réussi à être implantés opérationnellement ou n'ont pas réussi à être utilisés pour ce qu'on attendait d'eux.

Et ce n'est pas la «résistance au changement» des contrôleurs qui en est la cause, comme le montrent plusieurs exemples :

a) L'ordinateur comme un contrôleur supplémentaire

La différence de perception et d'interprétation de la situation entre un contrôleur et un ordinateur érige une véritable «barrière d'incommunicabilité» entre eux.

De telles différences supposées exister au sein d'une équipe de contrôleurs rendraient leur travail réellement extravagant. Il est bien connu que de nombreuses conditions doivent être remplies pour former une équipe sûre et efficace, et notamment une longue période de travail en commun. Quand cette adéquation parfaite est réalisée, la coopération au sein d'un secteur ne requiert que peu d'échanges de mots, des signes restant suffisants. Comment étendre une telle intimité au dialogue contrôleur/ordinateur ?

b) L'ordinateur comme un mentor

On pourrait imaginer que l'ordinateur puisse faire de sages suggestions pour résoudre un «problème» donné, d'une certaine manière et à un certain moment, comme un instructeur pourrait le faire au cours d'un exercice d'entraînement. Cela marcherait sans doute pendant une séance de simulation, en cas de faible trafic ou face à une situation dangereuse qui n'aurait pas été détectée par le contrôleur (cf. le "filet de sauvegarde").

Mais, hormis dans ce dernier cas, essayez donc de trouver un contrôleur qui accepterait de faire son travail et assumer ses responsabilités avec un type aussi énervant, aussi futé soit-il, derrière ses épaules !

De plus, et pour les raisons déjà expliquées, il y a fort peu de chance que les propositions de l'ordinateur soient compatibles avec la vision du contrôleur, de sorte qu'elles lui apparaîtraient le plus souvent comme incompréhensibles ou mal venues. En effet, l'ordinateur ignore la stratégie élaborée par le contrôleur ainsi que les processus cognitifs qui se déroulent à chaque moment dans son cerveau ; il se trouve mal placé pour lui apporter assistance. De telles propositions intervenant à un moment donné auraient de surcroît une grande chance de perturber le fil de la pensée et la mémoire du contrôleur, ou les actions qu'il est en train d'exécuter.

De tels dispositifs pourraient au mieux apparaître comme des gadgets propres à étonner un visiteur... sous réserve que le trafic soit suffisamment faible pour permettre au contrôleur de se plier à une telle démonstration!

On n'oubliera pas non plus que cette aptitude à conseiller le contrôleur implique que celui-ci tienne systématiquement l'ordinateur informé de toutes les clairances qu'il délivre aux pilotes.

c) L'ordinateur comme un conseiller

Puisqu'il n'est pas possible que l'ordinateur prenne l'initiative de donner son avis, on pourrait imaginer au contraire que ce soit le contrôleur qui interroge l'ordinateur à sa guise pour obtenir des informations plus précises, pour demander un calcul de prévision plus élaboré ou pour tester une solution.

Observons à nouveau un secteur en trafic chargé : on peut se demander si vraiment un contrôleur interrompra les autres tâches en cours ou prendra le risque de perturber son attention ou ce qu'il a en mémoire, pour un bénéfice si incertain.

Un tel dispositif dit de «détection de conflit à moyen terme» (MTCD) expérimenté par le Centre Expérimental d'Eurocontrol (CEE) semble montrer qu'il ne pouvait vraiment être utile que dans des cas simples ou qu'avec de faibles trafics.

d) L'ordinateur comme «super contrôleur»

Puisqu'on peut difficilement envisager que l'ordinateur offre ses services de détection/résolution d'un problème l'un après l'autre, on pourrait lui demander de se comporter comme un «super contrôleur» qui détecte tous les conflits et visualise l'ensemble selon une liste constamment mise à jour.

En utilisant une telle liste, le contrôleur serait déchargé de l'essentiel de son travail de base. Mais, en conséquence il devrait choisir entre :

- continuer sa propre recherche de conflits selon ses propres critères ; il serait alors confronté à deux listes largement différentes au risque de devenir schizophrène et sans être capable de comprendre les raisons de ces différences,
- ignorer la liste de l'ordinateur.

Poursuivons mentalement la simulation dans le premier cas : on imagine mal pourquoi le contrôleur qui ferait confiance à la liste de

l'ordinateur continuerait à rechercher lui-même les conflits et les solutions, alors qu'il sait que l'ordinateur est mieux armé que lui pour ce faire et pourquoi il prendrait la responsabilité légale de s'opposer à la «sagesse» de l'ordinateur.

On peut d'ailleurs se demander ce que le contrôleur saurait et retiendrait en ce qui concerne les avions non signalés dans cette liste, mais qui pourraient devenir impliqués du fait des clairances qu'il serait amené à élaborer par lui-même.

Franchement, en quoi le contrôleur continuerait-il à servir à quelque chose... sauf à transmettre des clairances à des avions non équipés de liaison automatique... tant qu'ils ne le seront pas.

En tout cas, un tel scénario impliquerait que le système ait été au préalable certifié pour qu'il puisse décharger les contrôleurs de toutes les responsabilités de facto transférées à l'ordinateur.

On pensait donc concevoir un dispositif destiné à assister les contrôleurs. En fait, il s'agirait bel et bien d'un système automatique sans qu'on l'ait voulu au départ. Un tel projet devrait être soumis aux mêmes spécifications de sécurité que tout système entièrement automatique... sachant que, en cas de dysfonction ou de problème imprévu, aucun contrôleur ne pourrait être en mesure de reprendre la situation en main, sans un long préavis.

En pensant contourner en douceur le «mur de l'automatisation», on aurait toutes les chances de s'y casser le nez, comme tant de projets l'ont fait auparavant, et le feront peut-être encore, en dépit des lourdes sommes qui y ont déjà été consacrées.

Caresser de telles illusions n'est pas spécifique au monde de l'ATC. De telles mésaventures ont affecté les rêves d'automatisation de maints systèmes complexes qui exigent un très haut degré de sécurité, comme les centrales nucléaires par exemple (on notera que, de surcroît, ces centrales peuvent être arrêtées en cas d'urgence, pas les flux d'avions !).

e) Le blocage

Tous ces exemples montrent qu'on est confronté à une situation bloquée.

Fort heureusement, les analyses qui précèdent permettent d'en comprendre les raisons et d'être ainsi bien armé pour éviter les écueils.

4.4. La vraie nature du «mur de l'automatisation» de l'ATC

Le passage du «mur de l'automatisation de l'ATC» est ainsi truffé de nombreuses défenses, parmi lesquelles on peut citer :

- l'impossibilité absolue pour deux acteurs différents (l'homme et la machine) d'agir chacun de leur côté dans un même espace aérien,
- l'analyse, la stratégie et la tactique respectivement élaborées par un contrôleur et par un ordinateur sont strictement incompatibles dans la mesure où elles reposent sur des informations et des moyens de calcul différents,
- la difficulté pour ces deux acteurs de se «comprendre» mutuellement et donc de communiquer en temps réel, alors qu'ils disposent de représentations différentes basées sur des données et des moyens de calcul différents,
- l'impossibilité pour un ordinateur de savoir à chaque instant ce qui se passe dans le cerveau des contrôleurs, et notamment leur stratégie et leurs intentions,
- le risque pour tout avis émis par l'ordinateur à un moment mal choisi de constituer pour le contrôleur une source de perturbation (interruption de ses processus cognitifs ou mnémoniques, lecture d'information non indispensables...),
- l'obligation pour le contrôleur d'informer le calculateur de toutes les clairances émises,
- les «horloges» réglant les processus des ordinateurs et des contrôleurs sont soumises à des contraintes différentes et battent à des tempos différents.

Ce serait une grave erreur de sous-estimer ces problèmes et de rejeter la responsabilité de l'échec, qui en résulterait inmanquablement, sur la mauvaise volonté supposée des contrôleurs suspectés de protéger leur job ou leurs habitudes et d'être «conservateurs» pour le dire plus poliment !

Chapitre 5

Vers une assistance automatisée conviviale

Devant l'irréalisme du "big bang d'automatisation" et devant les résultats décevants des tentatives d'automatisation partielle, il ne sera possible de sortir de ce blocage qu'en imaginant une voie novatrice.

5.1. Les contraintes

Atteindre un tel objectif implique beaucoup plus que les slogans du type «laisser le contrôleur dans la boucle» ou «le rôle du contrôleur évoluera d'un rôle exécutif à court terme vers un rôle de planning à moyen terme» (et pourquoi pas le contraire puisqu'on sait bien que les ordinateurs sont meilleurs que les hommes pour effectuer une planification dans un environnement complexe !).

La plupart (tous même, semble-t-il) des projets ambitieux pour l'avenir, tels qu'ils sont encore couramment proposés, sont essentiellement conçus en prenant les automatismes pour point de départ. Leur conception laisse peu de place à l'étude de leur compatibilité, à tous les stades de leur implantation éventuelle, avec les processus mentaux décrits ci-dessus, c'est-à-dire aux besoins des hommes... quand ils n'ignorent pas tout simplement les problèmes de transition.

Pour être crédible, tout projet doit prendre pour point de départ la spécificité des processus mentaux impliqués dans le travail du contrôleur.

Une telle connaissance a heureusement été déjà acquise grâce à un long et patient travail accompli par des équipes de contrôleurs,

de cognitiens et d'ingénieurs travaillant en étroite collaboration⁹ :

- le contrôleur entraîné sait contrôler mais ne peut ni décrire directement ce qui se passe dans son cerveau, ni définir quels outils pourraient lui faciliter le travail (en revanche, il sera toujours prompt à ignorer ou à rejeter tout outil inefficace ou perturbateur),
- l'ergonome/cogniticien n'est évidemment pas capable de contrôler mais, avec l'aide des contrôleurs, il parvient à avoir accès à leurs processus cognitifs et à leurs représentations mentales,
- l'ingénieur sait concevoir un système et «instruire» un ordinateur.

Il est évident que ce ne devra pas être au contrôleur de s'adapter à de nouveaux outils techniques, fussent-ils magnifiquement conçus, s'ils sont inadaptés au fonctionnement du cerveau humain tel qu'il fonctionne effectivement. Ce n'est pas la prise en compte *a posteriori* des «facteurs humains» qui serait capable de rattraper un projet fondé sur de fausses prémices. Cette remarque n'est pas inspirée par quelque déviance anthropocentrique, mais trouve sa complète justification dans la nature même du travail du contrôleur tel qu'il a été décrit ci-dessus.

L'ATC sera contraint par les performances du cerveau humain, tant que le système ne pourra pas être conçu pour s'y substituer totalement ?

5.2. Les «Dix commandements»

L'analyse conduit ainsi à proposer aux concepteurs les «Dix commandements» suivants :

1. Respecter l'autonomie des contrôleurs dans leur analyse de la situation sur la base des seules données auxquelles ils peuvent directement avoir accès.
2. Respecter leurs choix stratégiques et tactiques.
3. Respecter leur autonomie dans l'organisation et la gestion de leurs ressources cognitives et mnémoniques.

⁹ Voir notamment «Représentation et décision experte : psychologie cognitive de la décision chez les aiguilleurs du ciel» André Bisseret, OCTARES.

4. Respecter leurs processus de décision.
5. Respecter leur responsabilité qui ne peut pas être partagée, mais accepter des délégations de responsabilités de leur part et assumer ensuite la pleine responsabilité de leur exécution.
6. Ne pas leur imposer de «tâches induites» qui ne soient pas à leur propre bénéfice :
 - présentation de toute information qui ne serait pas nécessaire à un moment donné,
 - manipulation non indispensable de moyens d'entrée dans l'ordinateur.
7. Être convivial à leur égard : respecter leurs diversités et leurs réflexes et ne pas déranger le déroulement de leurs processus cognitifs et mnémoniques naturels et acquis.
8. Offrir des services qu'ils peuvent utiliser à leur manière quand et s'ils le veulent.
9. Trouver les moyens pour leur permettre de bénéficier directement ou indirectement de toute l'information et de tous les moyens de calcul disponibles.
10. Tirer le meilleur parti de tous les moyens de communication, de navigation et de surveillance actuellement disponibles, ou qui le deviendront dans le futur, et s'accommoder de toute la diversité des équipements des avions à tous les stades de leur équipement progressif en matériels nouveaux.

En un mot, tout projet doit être tel qu'à tous les stades de son évolution il respecte tous les aspects du travail du contrôleur et établisse avec lui des relations conviviales .

Parodiant le serment d'Hippocrate des médecins, on pourrait dire :
«D'abord ne pas nuire aux processus fragiles qui se déroulent dans la tête des contrôleurs».

Tel est bien aussi l'esprit du document concernant la stratégie proposée par le document du Centre Expérimental Eurocontrol (Document daté du 20 Octobre 2002).

Telles sont les conditions pour pouvoir affronter progressivement et avec succès le «mur de l'automatisation».

5.3. Comment progresser et pour quoi faire ?

Pour résumer, on peut dire que l'efficacité du système à son stade actuel est essentiellement limitée par deux obstacles qui bloquent ses possibilités d'évolution :

- les contrôleurs ne peuvent utiliser que partiellement l'information et les moyens de calcul disponibles et, *a fortiori*, ne pourraient pas bénéficier de toutes les potentialités des nouveaux moyens CNS,
- les contrôleurs doivent compter sur leur mémoire puisqu'ils ne disposent que de moyens très frustrés de présentation des problèmes en cours et de la stratégie qu'ils ont élaborée pour les résoudre.

L'objectif de la suite de cette étude est de rechercher toutes les possibilités pratiques de sortir de cette impasse, tout en respectant les Dix commandements à tous les stades de l'évolution du système.

Chapitre 6

Une première "brèche dans le mur de la capacité" ?

Le projet ERATO¹⁰ a été développé et expérimenté sous la brillante conduite de Marcel Leroux du CENA (Centre d'Etude de la Navigation Aérienne) et de son équipe composée de contrôleurs, de cogniticens et de programmeurs.

ERATO est un complément des systèmes tels qu'on les trouve dans tous les centres «en route» modernes et n'impose aucun nouvel équipement de bord tel que la liaison de données, le FMS ou une navigation plus précise.

Sa spécificité résulte de la programmation de l'ordinateur de telle sorte qu'il puisse assister le contrôleur dans l'élaboration et l'affichage de ce qui a été appelé l'«agenda du contrôleur», c'est-à-dire la liste des «problèmes» en cours, tels que les contrôleurs peuvent les recenser sur la base des seules informations floues et incomplètes dont ils disposent.

Cet «agenda du contrôleur» matérialise la «mémoire opérationnelle» du contrôleur qui en est d'autant soulagée et sert aussi de base efficace pour faciliter et renforcer la cohésion et la coordination au sein de l'équipe de contrôleurs de chaque secteur.

ERATO respecte toutes les conditions énoncées ci-dessus.

Beaucoup de contrôleurs venant de différents centres de contrôle français et étrangers ont participé pendant plusieurs années à son expérimentation avec du trafic simulé. Ils se sont montrés capables de l'utiliser après une courte période d'initiation de quelques

¹⁰ «ERATO, une aide au contrôleur aérien» Marcel Leroux, *Revue CONTROL* n°85, 1997 et "Mode d'emploi ERATO" Sonia Abdesslem et Corinne Capsie (Centre d'Études de Navigation Aérienne).

jours. Ils se sont déclarés avides de pouvoir le tester en environnement réel. La préparation de ce stade de validation opérationnelle est en cours en France.

ERATO a bien des chances d’ouvrir une première brèche dans le mur de l’automatisation.

En tant que tel, ERATO n’offre cependant pas de solution pour tirer tout le parti de toute l’information disponible, ou susceptible de le devenir, ni de toute la puissance des ordinateurs au sol et à bord.

Chapitre 7

Franchir le mur de la capacité

7.1. Des ressources mal utilisées

Le complexe de communication, navigation surveillance (CNS) actuel, et *a fortiori* celui qui est étudié par l'OACI pour le futur, peut être considéré comme une «boîte noire» capable de recourir à toutes les sources d'information et à tous les moyens de calcul et de commande au sol et à bord.

On a montré pourquoi il n'existe malheureusement aucune possibilité de permettre l'accès direct du contrôleur à ce «paradis de l'information et de la communication». Un écran du type radar ne peut fournir des informations que sur les positions et vitesses actuelles et avec une précision limitée par les capacités perceptives d'un œil humain ; il laisse de surcroît au contrôleur la charge mentale de procéder à leur extrapolation.

Comment permettre aux contrôleurs de bénéficier de toute la précision de ces informations ? Comment contourner les obstacles qui s'y sont jusqu'alors opposés ? Tel est l'objectif de la suite de l'étude.

7.2. Faire sauter le verrou : la démarche "ERASMUS"

Supposons que l'ordinateur établisse sa propre liste de conflits, qu'on appellera «agenda de l'ordinateur», sur la base de toutes les données et moyens de calcul dont il dispose, cette liste incluant tous les conflits, quel que soit le secteur dans lequel ils vont se produire.

Plusieurs applications novatrices peuvent alors être proposées.

7.2.1. Détection des «faux problèmes»

La liste de l'agenda ordinateur est évidemment différente de celle de l'agenda du contrôleur ; cette dernière comprend en particulier de nombreux «faux problèmes» dont l'existence ne découle que du flou et de l'incomplétude des informations sur lesquelles leur estimation est basée.

La seule comparaison des deux listes permet à l'ordinateur de détecter ces «faux problèmes» et de le faire savoir aux contrôleurs. Une telle information est pérenne et indépendante du déroulement du travail des contrôleurs qui peuvent donc en prendre connaissance et en tenir compte à tout moment de leur choix.

Le nombre de ces faux problèmes devrait être important et croître encore quand les liaisons de données permettront l'accès direct de l'ordinateur aux informations disponibles à bord des avions (meilleure connaissance des intentions du pilote, position et vitesse/air précises, vitesse/sol).

7.2.2. Accroissement de la «fluidité» du trafic

L'ordinateur peut aussi rechercher des solutions aux problèmes restants, mais on a vu les raisons pour lesquelles il est quasi-impossible d'en faire directement bénéficier les contrôleurs. Il est aussi hors de question que l'ordinateur puisse mettre à exécution une de ces solutions de son propre chef, puisque serait ainsi enfreinte la règle de l'unicité du contrôle dans un espace donné. L'exemple de la collision de Uberlingen (près du Lac de Constance) a illustré dramatiquement ce qui pourrait arriver si, même pendant une période très courte, deux instructions incompatibles étaient émises.

Un examen plus approfondi montre toutefois que ces difficultés peuvent être contournées grâce à un moyen judicieux qui semble jusqu'alors être passé inaperçu.

a) *Le contrôle «subliminal»*

Puisque la vision du contrôleur est floue, pourquoi ne pas en tirer judicieusement parti ?

Grâce à ce flou, l'ordinateur est libre de faire procéder à des ajustements mineurs de la vitesse horizontale ou verticale des avions d'une amplitude telle qu'elle soit indécélable par les contrôleurs.

Dite autrement, l'idée est de transformer automatiquement un «problème» en un «faux problème», en ouvrant une «aire d'indépendance» pour l'ordinateur, sans enfreindre la règle de l'unicité du contrôle de l'espace : une sorte de «zone franche» d'initiative à la frontière de la «zone privée» de responsabilité du contrôleur.

La règle impérative «un espace/un décideur» peut ainsi être impunément contournée.

De telles actions peuvent être qualifiées de «subliminales» du fait qu'elles ne sont pas directement perceptibles par les contrôleurs et n'interfèrent en aucune mesure avec leurs propres activités, leurs propres décisions et leur propre responsabilité. Il s'agit d'un partage de tâches sans recouvrement ni interaction.

Ce contrôle subliminal peut être initié très en avance, alors qu'aucun des deux avions concernés ne vole encore dans le secteur où la perte de séparation pourrait se produire.

On peut s'attendre à ce qu'un très grand nombre de conflits puissent ainsi être éradiqués puisque, comme on l'a montré ci-dessus, une très faible modification des paramètres de vol (vitesse, de taux de montée ou de descente, début de descente, écarts latéraux...) peut suffire à cet effet.

Les contrôleurs constateront un «trafic chanceux» qui aurait providentiellement échappé aux lois de l'aléatoire pour être échelonné d'une manière particulièrement gratifiante leur égard.

Compte tenu du rapport entre le volume d'espace disponible et la somme des volumes de protection des avions, on peut raisonnablement escompter que le nombre de conflits résiduels puisse ainsi être considérablement diminué.

Il est intéressant de constater que le contrôle subliminal ne vise pas à demander à l'ordinateur de faire ce que le contrôleur peut faire, mais ce qu'il ferait certainement lui-même s'il disposait des informations, des moyens de calcul et de communication nécessaires... et s'il en avait le temps.

Un physicien considèrerait le contrôle subliminal comme résultant de l'action d'un «démon de Maxwell» bien intentionné capable de réduire l'entropie du flux de trafic !

Telle est aussi une magnifique opportunité offerte pour utiliser les liaisons de données air/sol en vue de transformer l'ATC en «boucle ouverte» en ATC en «boucle fermée», c'est-à-dire le filtrage passif en filtrage actif.

b) Prévention des accumulations de tâches

On a déjà dit que les contrôleurs craignent par-dessus tout de se trouver surchargés à un moment donné et d'avoir à affronter dans un temps trop court une accumulation de problèmes, par exemple plusieurs conflits intervenant à des moments trop rapprochés.

Il se peut que le contrôle subliminal ne soit pas toujours suffisant pour éviter de telles situations, mais l'ordinateur peut les détecter à l'avance et proposer à l'assistant contrôleur d'un secteur amont des modifications plus substantielles qui soient de nature à y parvenir et de rendre ainsi service, s'il le souhaite, à un contrôleur aval... à charge de revanche. De telles actions ne seront proposées par l'ordinateur que si leur bilan, en termes de charge de travail des contrôleurs concernés, en vaut la peine.

7.3. Un «auto-pilote ATC»

Afin de conférer le maximum d'efficacité au contrôle subliminal, il sera souhaitable d'établir, pour chaque vol, les marges dans lesquelles leur vitesse/air pourra être modulée par l'ATC en toute sécurité, les pilotes restant libres de choisir leur vitesse en fonction d'impératifs commerciaux ou économiques.

Dans ces limites, l'ordinateur ATC pourra librement tirer avantage de cette flexibilité pour «dissoudre» les conflits, le contrôleur en étant simplement informé, notamment dans les cas où la variation est la plus notable.

Ces changements de vitesse horizontale, de changement de niveau ou de moment souhaité de début de descente, peuvent être transmis automatiquement par liaison de données aux ordinateurs des avions. Ces instructions peuvent aussi prendre la forme d'un rendez-vous à un certain point et/ou à un certain niveau à un certain moment (le problème de l'accord préalable des pilotes avant leur exécution reste à débattre avec eux). L'action est prise en charge par le pilote automatique (la première couche du FMS) de la même manière que celui-ci réagit aux variations de vent ou aux turbulences en vue d'assurer un vol confortable pour le pilote... et pour ses passagers.

Pour fermer cette «boucle ATC», l'ordinateur au sol surveillera en permanence la bonne exécution des instructions et interviendra à nouveau si nécessaire.

La boucle subliminale se comportera comme un «pilote automatique ATC» intégrant à la fois le segment sol et le segment air.

Ni la liberté du contrôleur ni celle du pilote ne sera pour autant diminuée, le contrôleur pour émettre toute clairance, le pilote pour modifier son plan de vol après accord du contrôleur.

On touche du doigt que l'entrée de l'ATC dans la terra incognita de l'automatisation exigera dès la conception un étroit travail en commun des spécialistes de toutes les disciplines air et sol concernées.

7.4. Les communications ordinateur/contrôleur

Pour tirer le meilleur parti de ces fonctions innovantes, il va sans dire que la plus grande attention devra être portée aux visualisations comme aux communications et aux procédures entre l'ordinateur et les contrôleurs, notamment pour informer ces derniers des problèmes qui n'ont plus raison d'être.

Il n'entre pas dans le cadre de la présente étude de préciser toutes les possibilités conviviales de communication ordinateur/contrôleur rendues possibles par la spécificité du projet. On pourra tirer tout le parti de l'expérience déjà acquise dans le cadre de certaines expérimentations et surtout escompter que les contrôleurs trouveront par eux-mêmes les meilleurs moyens pour s'approprier les outils qui leur seront proposés, dès lors qu'ils seront convaincus de l'aide qu'ils sont susceptibles de leur apporter.

Une référence complémentaire doit être faite à ERATO ou à tout autre moyen d'établir une liste des conflits en cours. Un «agenda des contrôleurs» ne se limitera pas à être un outil efficace pour les contrôleurs eux-mêmes, mais constituera pour l'ordinateur une source «providentielle» pour savoir comment les contrôleurs, dans leur environnement flou et avec leurs propres contraintes, «voient» et interprètent la situation.

La comparaison des agendas du contrôleur et de l'ordinateur permettra à ce dernier d'anticiper les désirs des contrôleurs et de choisir le moment le plus approprié pour leur communiquer certaines informations, pour lui faire des propositions ou pour les assister dans l'entrée des clairances.

7.5. Les délégations de responsabilité

A l'exception du «filet de sauvegarde», la responsabilité des ordinateurs (en fait la responsabilité des concepteurs et des producteurs du système !) n'est actuellement engagée que dans la garantie de l'intégrité des informations qu'ils délivrent.

Les responsabilités de nature nouvelle envisagées ci-dessus pour l'ordinateur ne pourront résulter que de délégations explicites consenties par les contrôleurs et confirmées, au cas par cas, par l'ordinateur. Par exemple, lorsque l'ordinateur détectera et affichera un «faux problème» (naturel ou résultant d'une action subliminale), la responsabilité du contrôleur sera totalement dérogée en ce qui concerne ce conflit potentiel.

L'agenda du contrôleur servira ainsi de «tableau de bord» des rela-

tions de responsabilité entre le contrôleur et l'ordinateur et notamment des actions déléguées.

Au fur et à mesure que les liaisons de données et les logiciels de bord appropriés se généraliseront, l'ordinateur pourra sub-déléguer aux avions la responsabilité d'assurer par eux-mêmes leur séparation, et en fixera les conditions. C'est ainsi que sera amorcée une évolution conduisant à une décentralisation progressive du système sol, ce qui apportera l'avantage d'une sécurité accrue en cas d'incidents affectant ce dernier.

En plus de ces responsabilités directes croissantes, l'ordinateur pourra assurer une surveillance complète de tout ce qui se passe et actionner une alarme ou proposer certaines actions en cas d'urgence à la manière du "filet de sauvegarde" dont le temps d'anticipation serait largement accru.

7.6. Faisabilité, efficacité et démonstrations probatoires

7.6.1. Faisabilité et efficacité

Sachant que la détection et la résolution des conflits est extrêmement sensible à la précision des données utilisées, certains en concluent quelque peu hâtivement que l'utilisation du GPS/GALILÉO pourrait apporter la solution quasi-absolue à tous les problèmes.

La démarche proposée dans la présente étude se garde bien d'un tel optimisme, car ce serait supposer que la connaissance précise des positions et vitesses passées et actuelles suffissent pour prévoir avec cette même précision les positions futures. On se souviendra de ce que :

- les avions volent selon une certaine vitesse/air et les moyens de navigation ont un référentiel terrestre,
- une collision est évidemment relative à des positions en référentiel terrestre dans le plan horizontal et en référentiel barométrique dans le plan vertical,

- la comparaison entre les vitesses/air et les vitesses/sol passées permettent de calculer la vitesse du vent pour servir au calcul des positions futures.

Que peut-on dire du vent que va rencontrer un avion dans les minutes à venir ? Sans doute bien des choses dans la mesure où, par comparaison des vitesses/air et vitesses/sol, on connaît le vent qu'il a rencontré jusqu'alors, ainsi que le vent rencontré par des avions qui l'ont devancé sur la même trajectoire. Mais il n'est pas possible de négliger cette incertitude, en raison de l'extrême sensibilité de l'évaluation de la perte de séparation.

Tout projet impliquant des délégations de responsabilité à un ordinateur doit tenir le plus grand compte de ce problème. Il faut s'assurer que l'ordinateur sera capable, avec ses propres moyens, de garantir, avant de les proposer, la sécurité des actions qui lui seront déléguées, quelle que soit la situation météorologique que les avions pourraient rencontrer.

Il semble très probable que le contrôle subliminal pourra très souvent remplir ces conditions préalables.

Mais le projet ne pourra pas être entièrement validé tant qu'on n'en saura pas plus sur la répartition statistique de la précision d'extrapolation pour les minutes à venir. Cette connaissance sera nécessaire pour estimer l'efficacité en termes de pourcentage de conflits évitables par le jeu du contrôle subliminal.

Il paraît surprenant que tant de projets futuristes aient pu être proposés alors que ces données ne sont pas encore disponibles.

La meilleure référence trouvée concerne la précision de prévision basée sur le radar et les plans de vol. Les résultats en boucle ouverte sont très décevants en raison de l'imprécision de la vitesse mesurée par le radar et de l'estimation du vent. D'autres mesures incluant l'accès à la vitesse/air des avions par liaison de données ACARS (couramment utilisées par les compagnies aériennes pour leurs propres besoins), restent aussi peu encourageantes. Il est vrai que ces liaisons ont un débit et un renouvellement de l'information limités. Il faut aussi noter que les résultats disponibles

intègrent en un seul ensemble des mesures effectuées dans des conditions météorologiques différentes les unes des autres.

Ces résultats sont loin d'être suffisants pour prévoir la précision d'extrapolation qui pourrait être obtenue en mettant en œuvre tous les moyens modernes : boucle fermée avec réajustement continu en fonction des positions et vitesses constatées grâce à la retransmission à haut débit des données GPS, carte du vent et de sa stabilité acquise auprès des services météorologiques et affinée grâce aux passages successifs des avions...

On constatera avec étonnement que les simulations ATC, telles qu'elles sont couramment pratiquées pour évaluer un nouveau «concept opérationnel» ou un nouvel outil de travail, pêchent par la méconnaissance de cette précision d'extrapolation, ce qui entache gravement la validité de leurs résultats : cette circularité ne fait que reproduire en sortie les hypothèses retenues à l'entrée.

L'action la plus urgente nécessaire pour valider la conception de tout système futur serait de connaître la répartition statistique des erreurs d'extrapolation de trajectoire en boucle ouverte et en boucle fermée. De telles campagnes de mesure ont toujours été entreprises par le passé avant tout progrès majeur mettant en cause la précision de navigation : réduction des séparations au-dessus de l'Atlantique Nord ou séparation verticale en espace supérieur.

Dans le cas présent, les expérimentations en vol pourront être effectuées directement à bord des avions puisque l'utilisation du GPS permettra à la fois de connaître à bord les positions actuelles, de les extrapoler à différents horizons temporels et de vérifier le moment venu les écarts constatés par rapport à ces prévisions. Ces essais devront concerner la conduite du vol en boucle ouverte et en boucle fermée.

Une telle campagne fournira les données réelles permettant d'estimer la proportion des conflits qui pourront à coup sûr être résolus d'une manière subliminale.

Il est fort probable que ces expérimentations montreront que les répartitions statistiques des résultats présentent des «queues de

distribution» ; pour être rendu rigoureusement sûr, le contrôle subliminal devra être protégé, comme le contrôle humain classique, par son propre filet de sauvegarde : en cas de détection d'un risque, la très grande précision du GPS pourra servir de base à des manœuvres d'évitement aisées et peu pénalisantes (évitement latéral de part et d'autre de l'axe de la route nominale par exemple).

Il est clair que cette campagne fournira aussi les éléments nécessaires pour déterminer avec soin les spécifications souhaitables des liaisons de données et des logiciels de FMS permettant de maximiser l'efficacité du contrôle subliminal, de la séparation automatique air/air comme, plus tard peut-être, des vols planifiés 4D.

Pour l'heure, il existe déjà une intense activité européenne et internationale :

- de spécifications techniques des moyens CNS futurs (11ème Conférence de Navigation Aérienne de l'OACI, Montréal Automne 2003),
 - de développement technologique (Programme DEPLOY en Europe, récemment rebaptisé «*European Master Plan*» puis SESAME),
- ... mais le volet opérationnel fait toujours défaut.

S'il est évident que de telles spécifications ne peuvent pas être établies sans une idée claire de ce à quoi ces outils vont servir, il va de soi aussi que, sans projet pour leur utilisation, il y a peu de chance qu'elles débouchent sur des réalisations industrielles effectives et, *a fortiori*, sur l'équipement des avions !

Des appareillages en quête d'auteurs !

7.6.2. Démonstrations probatoires

La démarche pour s'assurer de la faisabilité et de l'efficacité du contrôle subliminal implique les étapes successives suivantes :

7.6.2.1. Etapes mathématiques :

- a) recours à des modèles mathématiques de recherche des conflits dont il existe de nombreux logiciels disponibles,

- b) analyse, avec différentes hypothèses plausibles, de la faisabilité et de l'efficacité du contrôle subliminal,
- c) modélisation de la tenue des prévisions par les avions à différentes échéances temporelles,
- d) campagne d'essais en vol pour déterminer la répartition statistique des erreurs de prévision,
- e) introduction de ces dernières données expérimentales dans les modèles de simulation de trafic.

7.6.2.2. Etapes opérationnelles simulées

- a) expérimentation opérationnelle des procédures et de différents moyens de communication contrôleur/ordinateur adaptés au projet; ces expérimentations peuvent être menées en parallèles avec les étapes mathématiques et alimentées avec des hypothèses de précision de tenues de trajectoires de plus en plus réalistes au fur et à mesure qu'elles seront disponibles.
- b) expérimentation en trafic réel

7.6.2.3. Conduite du projet

La mise en œuvre d'un tel programme inspire les remarques suivantes :

- plusieurs équipes sont capables de parcourir les étapes mathématiques, dont celle de J.M. Alliot (CENA/ENAC) qui s'y montre très disposée et pourrait sans doute les mener à bien en quelques mois,
 - les étapes de conception impliquent des équipes communes ATM et avions, qui jusqu'alors travaillaient isolément sans bien se comprendre et avec une connaissance trop approximative du domaine de leurs partenaires,
 - à ces équipes devraient s'adjoindre, dès le début, des contrôleurs et des pilotes ainsi que des cognitivistes afin de s'assurer en permanence que le programme ne dérive pas vers une appréciation erronée des problèmes humains qu'impliquera sa mise en œuvre,
 - c'est au cours de l'expérimentation opérationnelle que se révélera la manière dont les contrôleurs et les pilotes s'approprient effectivement (ou modifieront) les procédures et les nouveaux moyens qui leur seront proposés,
- ... c'est alors que sonnera l'heure de vérité !

7.7. Sécurité

Aucun transfert de responsabilité du contrôleur vers l'ordinateur ne pourra être envisagé avant qu'il ait été démontré que l'ordinateur peut effectivement assumer en toute sécurité les responsabilités impliquées.

Tout transfert doit en effet pouvoir s'effectuer sans retour, car il ne serait pas possible aux contrôleurs de reprendre la situation en main en cas de défaillance et sans un préavis suffisant. Pour s'en convaincre, il suffit d'observer le temps de recouvrement entre une équipe et une équipe de relève ou les problèmes délicats posés au moment des dégroupements de secteurs.

La sub-délégation aux avions eux-mêmes sera donc amenée à jouer un rôle complémentaire important pour renforcer la sécurité. Le débat n'a vraiment plus de raison d'être entre ceux qui ne croient qu'au contrôle centralisé et ceux qui ne misent que sur le contrôle décentralisé, puisque les uns et les autres se trouveront à terme réconciliés dans une commune confirmation de leur intuition.

7.8. Pilotage des avions et exercice du contrôle ATC

Il y a évidemment peu de comparaison possible entre l'exercice du contrôle de la circulation aérienne et celui du pilotage d'un avion. Les actions à décider et à exécuter sont de nature essentiellement différentes et n'ont pratiquement de commun que le fait qu'elles s'effectuent en temps réel et que la responsabilité ultime repose sur des acteurs humains.

Les mécanismes cognitifs et mnémoniques impliqués ne peuvent pas non plus être comparés, sauf en ce qu'ils sont également contraints par les performances ultimes du cerveau humain et par le degré de sécurité exigé.

Ce fut une surprise pour beaucoup de spécialistes ATC d'apprendre qu'AIRBUS avait aussi développé en coordination étroite avec les pilotes leur propres "Dix commandements", très similaires dans leur esprit avec ceux qui ont présidé à l'automatisation de l'ATC depuis ses débuts.

Si l'on regarde en arrière, il est intéressant de constater que l'évolution de l'information délivrée respectivement aux pilotes et aux contrôleurs ATC a suivi des voies progressives tout à fait parallèles:

- accroissement du nombre de sources délivrant des informations de plus en plus précises,
- intégration de la présentation de ces informations,
- filtrage de l'ensemble des informations pour ne présenter, à chaque instant, que celles qui sont utiles.

On constate que pilotes et contrôleurs disposent désormais de «*glass displays*», dont l'agenda contrôleur constituera, pour ces derniers, la forme la plus avancée.

Toutefois, le pilote peut déléguer à l'ordinateur plusieurs fonctions exécutives, dont la tenue de la trajectoire et des niveaux (première couche des FMS), alors qu'il n'existe encore rien de tel pour le contrôleur. Les concepts proposés ci-dessus sont de nature à fournir au contrôleur le même confort de délégation de tâches à l'ordinateur que celui dont dispose déjà le pilote.

Cette évolution parallèle convergera ainsi vers un «auto-pilote ATC» c'est-à-dire une boucle impliquant à la fois le système au sol et l'avion.

7.9. Un projet intégré fédérateur

Les concepts qui ont été décrits ci-dessus constituent l'aboutissement naturel des études intensives sur la cognition appliquées spécifiquement au cas des contrôleurs. Ces études ont été effectuées par le Centre d'Études de la Navigation Aérienne français (CENA), directement ou sous son égide, depuis les années 70 ; elles ont servi d'épine dorsale à tous les programmes français d'automatisation de l'ATM depuis ses débuts ainsi qu'aux recherches en cours¹¹. Elles se sont révélées essentielles, non seule-

¹¹ D. Colin de Verdière et J.M Alliot, Conférence «ATM : 20 ans d'efforts et perspectives» prononcée à Toulouse dans le cadre de la journée d'étude «Vers l'automatisation des vols et de leur management» ONERA 26 novembre 2003.

ment pour servir de guide pour conduire l'évolution de l'ATM... mais aussi pour fermer la porte à des projets irréalistes.

L'expérience a systématiquement montré, dès le stade de la simulation, l'échec de la démarche inverse consistant à imaginer des possibilités techniquement avancées et intellectuellement attractives et à rechercher ensuite leur adaptation à l'homme.

Cela ne signifie pas, bien au contraire, que toute la connaissance accumulée dans le cadre de tels projets aura été vaine tant sur le plan expérimental que sur la production de logiciels directement utilisables dans un autre cadre et avec d'autres objectifs ; on citera ainsi parmi d'autres :

- la MTCD (*Mid Term Conflict Detection*) et le "*Conflict Risk Computation*",
- les expérimentations d'utilisation des données de vol acquises par liaisons de données,
- le projet "Cospace" d'Eurocontrol (Brétigny),
- le MSP (*Multi Sector Planning*),
- les projets dits de trajectoires 4D,
- les projets de «*free flight*» et de «*free route*», de contrôle décentralisé, voire d'automatisation intégrale.

Le projet ERASMUS bénéficiera de toutes ces avancées qui se sont jusqu'alors révélées infructueuses en trafic réel, et pourra ainsi jouer un rôle fédérateur de tous ces projets en les plaçant dans un cadre d'ensemble intégré au sein duquel chacun pourra trouver sa place au fur et à mesure de l'évolution du système.

7.10. Un projet progressif et évolutif

Par sa nature même, le projet ERASMUS est évolutif et progressif. Il ne doit pas être considéré comme une «solution unique et fermée» à tous les problèmes, mais comme un ensemble de dispositions cohérentes et réalistes permettant d'améliorer dès maintenant le système et d'ouvrir la voie à une automatisation de plus en plus poussée.

Les contrôleurs disposeront dès le début d'une aide notable qui deviendra de plus en plus efficace au fur et à mesure que les

avions seront équipés de matériels nouveaux (FMS, GPS, liaisons de données, logiciels d'auto-séparation entre eux).

Aucun de ces équipements n'est nécessaire au départ, mais chaque nouvel avion équipé contribuera à faciliter le travail du contrôleur et donc à accroître l'efficacité du système dans son ensemble. Ce «cercle vertueux» sera bien compris des compagnies aériennes qui seront ainsi de plus en plus encouragées à équiper leurs flottes, comme ce fut le cas par le passé pour le radar secondaire par exemple.

La spécificité du projet réside dans son aptitude à ouvrir la porte à une transition jusqu'alors introuvable.

La démarche proposée est de nature à préparer l'évolution du système actuel vers un système de plus en plus efficace pouvant progressivement être adapté à chaque zone et à chaque circonstance. Elle trouvera aussi des prolongements dans les autres espaces que celui du contrôle en route.

Chapitre 8

Répondre aux "pourquoi ?"

Arrivé à ce point, il semble possible de donner la réponse aux «POURQUOI ?» énoncés au début de cette étude et qui laissent encore tant d'observateurs perplexes devant l'archaïsme supposé du système actuel.

La réponse unique suivante peut ainsi être suggérée :
«Ce ne sont pas les «solutions» qui manquent au problème tel qu'il est posé, mais c'est le problème qui est mal posé».

L'objectif de la plupart des projets proposés jusqu'alors était d'aider le contrôleur à prendre ses décisions. Ils se sont heurtés à la contradiction suivante :

- si l'ordinateur travaille sur les mêmes données que celles dont dispose le contrôleur et n'effectue pas de calculs plus précis, il n'est guère de secours pour le contrôleur,
- dans le cas contraire, il existe une barrière d'incommunicabilité entre le contrôleur et l'ordinateur qui baignent dans deux univers informationnels et cognitifs différents.

Tous ces projets achoppent de surcroît sur deux écueils majeurs :

- la crédibilité de la précision supposée des anticipations de positions futures des avions n'est pas encore démontrée,
- leur transition avec le système actuel n'est pas prise en compte d'une manière réaliste.

La perspective est différente si le «problème» à résoudre est posé en termes radicalement différents, à savoir :

«Comment faire bénéficier le système dans son ensemble, et à tous les stades de son évolution, de toute l'information et de tous les moyens de communication disponibles ?»

Comme il n'est pas possible de libérer le contrôleur du flou affectant son univers perceptif, on comprend que le contrôle subliminal constitue une approche résolument nouvelle en tirant justement profit de ce flou irréductible et offrant ainsi des champs d'action indépendants à l'ordinateur et aux contrôleurs, sans enfreindre pour autant la règle de l'unicité du contrôle dans un espace donné.

Cette porte étant ouverte, on a vu comment le chemin d'un progrès vers de plus en plus d'automatisation devient accessible et bien balisé.

La réponse à la dernière question amène à exprimer son admiration pour l'aptitude du cerveau humain, capable de traiter en temps réel des problèmes que des ordinateurs puissants auraient bien des difficultés à surmonter s'ils ne disposaient que d'une information aussi fruste que celle des contrôleurs.

Il n'est pas pour autant raisonnable, ni du point de vue humain ni pour la sécurité, de requérir de telles performances de la part des contrôleurs.

De toute façon, le système actuel finira inexorablement par trouver, tôt ou tard, ses limites en terme de sécurité, d'efficacité et de coût.

Chapitre 9

Aller de l'avant

9.1. Vers l'unification du système

Dans la plupart des grands pays européens, l'automatisation du contrôle en route a plus ou moins été développée localement d'une manière pragmatique et progressive. Tous ces systèmes effectuent des fonctions comparables et sont inter-opérables. Cette diversité ne fait donc pas obstacle à la réalisation du «ciel unique» décidée par l'Union Européenne.

Il serait illusoire de tenter de remplacer chacun de ces systèmes, tels qu'ils sont, par un hypothétique nouveau système développé en commun et qui ne rendrait que les mêmes services.

Les logiciels des systèmes en service occasionnent cependant de lourds coûts annuels de développement et de maintenance. Un effort est engagé pour réaliser des sous-ensembles communs (traitement des plans de vol et du radar, visualisations...) qui leur permettront de converger progressivement.

9.2. Vers une industrie européenne de l'ATM

Les entreprises sont de plus en plus impliquées dans ces développements, mais on reste encore loin du cas de la construction aéronautique, dans laquelle les industriels européens ont réussi, après consultation de leurs clients potentiels, à concevoir et construire des avions en grande série. Le cas d'Airbus montre qu'il s'est révélé possible de fédérer une industrie encore éparse ; ce succès doit beaucoup au fait que ses promoteurs ont été animés par une vision à long terme et ne se sont pas contentés de commencer par concevoir une copie plus ou moins améliorée du B737.

De même, pour prendre un réel essor et conquérir son autonomie, une industrie du contrôle de la circulation aérienne devrait résolument se tourner vers l'avenir. On a malheureusement constaté qu'il n'existe pas encore en Europe de vision claire pour la conception d'un futur système. En dépit de l'unicité de leur système, les Etats-Unis n'échappent pas à ce manque de perspective ; leur industrie n'est pas mieux préparée que celle de l'Europe pour imaginer, concevoir et produire par ses propres moyens un système novateur.

L'entrée en scène de «Boeing ATM» aux USA et de «*Air Traffic Alliance*» (Thalès ATM, Thalès Avionique, EADS, AIRBUS) en U.E. est cependant encourageante et montre un commun désir de tenter de combler cette lacune. Il convient cependant de constater que, jusqu'alors, ils n'ont pas encore fait connaître de projet à long terme, ni de stratégie pour assurer une transition réaliste.

9.3. Vers un "ciel unique" novateur et efficace

L'opportunité pour l'Union Européenne et pour son industrie n'a jamais été aussi ouverte avec la préparation du «ciel unique» du futur pour conquérir une position indépendante, voire dominante, dans ce domaine hautement spécifique et stratégique.

Sur la base de la démarche exposée ci-dessus, on a montré qu'il est possible de construire un projet fédérateur et évolutif que l'on propose de désigner par l'acronyme ERASMUS (*towards an «En Route Air traffic Soft Management for an Ultimate System»*).

On espère que la présente étude contribuera à l'élaboration d'une analyse commune de la situation actuelle et à la mise en œuvre des moyens conviviaux pour assurer une transition réaliste pour «franchir le mur de la capacité».

C'est au lecteur d'en juger.

**déjà publié dans la collection
Études & Documents**

- **Vol. 57** La desserte aérienne des départements et territoires d'Outre-Mer –
Évolution historique et perspectives [publié uniquement en français]
par Jean PHILIPPOT
- **Vol. 56** Tableau de bord du transport aérien dans le monde (données 2001)
World Air Transport Data Guide (2001 data)
- **Vol. 55** Air Cargo 2000 – Les enjeux actuels du fret aérien
Air Cargo 2000 – Trends and new challenges
par/by Camille ALLAZ
- **Vol. 54** Tableau de bord du transport aérien dans le monde (données 2000)
World Air Transport Data Guide (2000 data)
- **Vol. 53** Les derniers développements des alliances aériennes
The latest developments in airline alliances
par/by Jacques NAVEAU
- **Vol. 52** Tableau de bord du transport aérien dans le monde (données 1999)
World Air Transport Data Guide (1999 data)
- **Vol. 51** Tableau de bord du transport aérien dans le monde (données 1998)
World Air Transport Data Guide (1998 data)
- **Vol. 50** Modes de gestion aéroportuaire. Quelle stratégie pour une meilleure
efficacité ?
Airport Management. Which strategies to improve efficiency?
(Actes du symposium/*Symposium proceedings* – Sénégal)
- **Vol. 49** Les alliances entre compagnies aériennes
Airline alliances
par/by Jacques NAVEAU
- **Vol. 48** Relations bilatérales France/États-Unis
Bilateral relations between France and the United States
par/by Robert ESPÉROU
- **Vol. 47** Tableau de bord du transport aérien dans le monde (données 1997)
World Air Transport Data Guide (1997 data)
- **Vol. 46** L'utilisation des avions de transport en 1995 et 1996
Transport aircraft utilization in 1995 and 1996
- **Vol. 45** Tableau de bord du transport aérien dans le monde (données 1996)
World Air Transport Data Guide (1996 data)
- **Vol. 44** Les redevances aéroportuaires en Europe
Airport charges in Europe
par/by André WROBEL

- **Vol. 43** Pétrole et transport aérien
Oil and air transport
par/by Jacques RAYNAUD
- **Vol. 42** Tableau de bord du transport aérien dans le monde (données 1995)
World Air Transport Data Guide (1995 data)
- **Vol. 41** Le transport aérien au Brésil
Air transport in Brazil
par/by Olivier de MAROLLES
- **Vol. 40** L'utilisation des avions de transport en 1994
Transport aircraft utilization in 1994
- **Vol. 39** Tableau de bord du transport aérien dans le monde (données 1994)
World Air Transport Data Guide (1994 data)
- **Vol. 38** Tourisme et libéralisation du transport aérien
Tourism and air transport liberalisation
par/by François VELLAS
- **Vol. 37** L'utilisation des avions de transport en 1993
Transport aircraft utilization in 1993
- **Vol. 36** Les nouveaux gros-porteurs pour les routes à moyenne densité
New widebody airliners for medium density routes
par/by Alain BUTTAUD, Pierre LABARRE, Bertrand THÉBAULT
- **Vol. 35** Tableau de bord du transport aérien dans le monde (données 1993)
World Air Transport Data Guide (1993 data)
- **Vol. 34** Regard sur le transport aérien européen
An overview of air transport in Europe
par/by Jacques VILLIERS
- **Vol. 33** L'utilisation des avions de transport en 1992
Transport aircraft utilization in 1992
- **Vol. 32** Les nouveaux développements des SIR
The new developments of CRSs
par/by Barry HUMPHREYS
- **Vol. 31** Tableau de bord du transport aérien dans le monde (données 1992)
World Air Transport Data Guide (1992 data)
- **Vol. 30** La déréglementation du transport aérien en Australie
The deregulation of air transport in Australia
par/by Olivier de MAROLLES & Alexis LENOIR
- **Vol. 29** Utilisation annuelle moyenne des avions de transport en 1990 et 1991
Transport aircraft average annual utilization in 1990 and 1991
- **Vol. 28** La privatisation des compagnies aériennes en Europe (2e édition)
Airline privatisation in Europe
par/by Lucien RAPP & François VELLAS
- **Vol. 27** Tableau de bord du transport aérien dans le monde (données 1991)
World Air Transport Data Guide (1991 data)

- **Vol. 26** Dossier Environnement
Environmental Issues
- **Vol. 25** Tableau de bord du transport aérien dans le monde (données 1990)
World Air Transport Data Guide (1990 data)
- **Vol. 24** L'interconnexion des réseaux de transport en Europe
Interconnection of Transport Networks in Europe
par/by JeanVARLET
- **Vol. 23** Concurrence et efficacité. Quelle politique européenne de transport aérien ? Pour quels objectifs et quelle efficacité ?
Competition and efficiency. Which Policy for which Objectives for European Air Transport?
par/by Jacques VILLIERS
- **Vol. 22** Les compagnies charter européennes : Stratégies pour les années 90
European Charter Airlines : Strategies for the 1990s
par/by Daniel BELET & Laurence COLOMB de DAUNANT
- **Vol. 21** Tableau de bord du transport aérien dans le monde (données 89)
[épuisé]
World Air Transport Data Guide (1989 data) [out of print]
- **Vol. 20** L'Afrique face à la libéralisation réglementaire du transport aérien
Africa and the Liberalization of the Air Transport Regulatory System
par/by Bernard NSANG
- **Vol. 19** *Euroderegulation as seen by Asia*
(ITA/PIA Conference - Pakistan) [published only in English]
- **Vol. 18** Les SIR (Systèmes informatisés de réservation) [épuisé]
The CRSs (Computer Reservation Systems) [out of print]
par/by Barry HUMPHREYS
- **Vol. 17** Transport aérien : 1 000 jours pour faire l'europe ?
Air transport: 1,000 Days to Get Europe Off the Ground?
(Actes du colloque / *Symposium proceedings* - Dubrovnik)
- **Vol. 16** Utilisation annuelle moyenne des avions de transport en 1987
Transport aircraft average annual utilization in 1987
- **Vol. 15** Le transport aérien en Chine [épuisé]
Air Transport in China [out of print]
par/by Florence INZERILLI
- **Vol. 14** Les redevances aéroportuaires en Europe (2e édition, 1989)
Airport Charges in Europe (2nd edition, 1989)
par/by Christian ASSAILLY, Didier LAUNEZ
- **Vol. 13** Productivité des aéroports: les facteurs explicatifs [épuisé]
Airport Productivity: an Analytical Study [out of print]
par/by Christian ASSAILLY
- **Vol. 12** Tableau de bord 1988 [épuisé]
World Air Transport Data Guide 1988 [out of print]

- **Vol. 11** La libéralisation du transport aérien dans la CEE: Le point de vue des pays voisins
Air Transport Liberalization in the EEC: The viewpoint of neighbouring countries
(Actes du colloque / *Symposium proceedings* - Marrakech)
- **Vol. 10** La privatisation des compagnies nationales européennes [épuisé]
Privatization of European National Airlines [out of print]
par/by Lucien RAPP & François VELLAS
- **Vol. 9** Les installations fixes dans le traitement de l'avion au sol (2e partie)
Fixed Aircraft Ground Servicing Facilities (Part II)
par/by Nathalie GAYET
- **Vol. 8** Les installations fixes dans le traitement de l'avion au sol (1ère partie)
Fixed Aircraft Ground Servicing Facilities (Part I)
par/by Nathalie GAYET
- **Vol. 7** Tableau de bord 1987
World Air Transport Data Guide 1987
- **Vol. 6** Tourisme international en Europe: le Portugal
International Tourism in Europe: Portugal
par/by François VELLAS
- **Vol. 5** Les liaisons long et moyen-courriers au départ des métropoles régionales européennes [publié uniquement en français]
(Actes de la journée d'étude organisée le 24 novembre 1987 par l'ITA)
- **Vol. 4** Les redevances aéroportuaires en Europe (1987)
Airport Charges in Europe (1987)
par/by Christian ASSAILLY
- **Vol. 3** La cinquième liberté: droit, stratégies et pratiques (1944-1986)
The Fifth Freedom: Legal Aspects, Strategies and Practices
par/by Patrick LEFEBVRE
- **Vol. 2** Bi/quadriréacteurs, étude comparative [épuisé]
Twin/Four-Engined Jets, a Comparative Study [out of print]
par/by Louis DRESSE
- **Vol. 1** Les pays de l'ASEAN dans le transport aérien international
The Place of ASEAN in International Air Transport
par/by Jacques GUERIN