

- 9 /1-

Rapport des Sages  
Annexe 4



Considérations sur la croissance  
du trafic aérien  
au cours des vingt prochaines années

J. VILLIERS  
Octobre 1984

"L'homme ne peut prédire  
le futur, mais il peut l'inventer"  
Denis Gabor (1)

(1) Cité par Pierre Drouin (Le Monde 1984).

Considérations sur la croissance  
du trafic aérien  
au cours des vingt prochaines années

Les études prospectives à long terme sont bien passées de mode depuis qu'il se révèle que le temps est venu d'en constater les résultats décevants, voire risibles.

Les futurologues sont devenus prudents sur leurs certitudes,  
voire sceptiques sur leur art. Qui s'en plaindra ?

Dans ce domaine, comme dans tant d'autres, la crise du pétrole a servi de révélateur de problèmes beaucoup plus profonds que, précisément, trop de "certitudes" accumulées au cours des "trente glorieuses" avaient contribué à masquer.

Les méthodes et le bon usage des prévisions font manifestement partie de ces domaines qui méritaient de toute façon une sérieuse remise en cause.

Fort heureusement, le groupe n'a pas besoin pour la conduite de ses travaux d'une véritable prévision (au sens strict de ce terme) ; il lui suffit de constater "le trafic futur" à prendre en considération" à ses propres fins, c'est-à-dire pour déterminer la probabilité pour que la croissance du trafic impose dans les vingt ans à venir de profondes modifications du système de contrôle.

Ce n'est déjà plus le même problème.

.../...

On notera bien la différence fondamentale entre la notion de "prise en considération" d'une hypothèse de croissance de trafic jugée raisonnable pour élaborer la "stratégie" de l'action à long terme et la notion de prévision. La prévision reprend ses droits dès lors qu'il s'agit de décisions tactiques concernant une échéance plus rapprochée. Bien entendu stratégie et tactique se recouvrent d'autant plus que les délais d'exécution des décisions tactiques sont plus longs (recrutement et formation des hommes ; recherches, expérimentation et développements complexes...). La bonne stratégie, c'est-à-dire la moins risquée, doit d'abord s'attacher à créer les conditions pour que le choix des tactiques successives à venir subisse le moins de contraintes possibles ; dans la mesure où la mise en oeuvre d'une stratégie optimale (au sens ci-dessus) n'entraîne pas d'investissements trop lourds et trop irréversibles, les hypothèses de trafic sur lesquelles elle doit s'appuyer doivent être celles qui permettent de conserver le maximum de liberté aux planificateurs à venir.

L'expérience du passé a montré (cf. III.2 du rapport) les conséquences néfastes sur le plan social et sur le plan de l'efficacité d'une évolution mal anticipée. Les propositions du rapport visent justement à en éviter le retour.

Compte tenu du temps nécessaire à la conception et à la réalisation d'un système profondément repensé et du temps nécessaire à la formation des hommes pour le concevoir et l'exploiter, on peut prévoir, sans risque, que les échéances sont beaucoup plus proches que la tendance actuelle du trafic pourrait le laisser penser.

Or, tels sont précisément les problèmes que le groupe a pour mission d'éclairer.

L'annexe 5 montre par ailleurs que d'autres facteurs encore plus déterminants que le trafic rendront inéluctable une profonde évolution du système ; son urgence n'en serait qu'accrue si la croissance actuellement modérée du trafic venait à reprendre une accélération comparable à celle connue antérieurement.

## 1. METHODOLOGIE

Afin de mieux éclairer la nature du problème de prévision auquel le g a été confronté, il paraît utile de rappeler certains ordres de grandeur : croissance moyenne de 3, 4 ou 5 % sur vingt ans entraîne une augmentation de fic respectivement de 80, 119 et 165 % (et 34, 48 et 63 % en 10 ans).

Dans tous ces cas, et sous la seule pression du trafic, le système dar conception actuelle ne serait pas à même de faire face aux besoins dans des cc tions satisfaisantes.

Ainsi convaincu que la modernisation du système est inéluctable, il néanmoins nécessaire de tenter d'affiner la vision de l'avenir par une méthod gie appropriée.

A cette fin, il convient d'abord de procéder à une critique de la mét analytique selon ses trois phases classiques :

- recensement des paramètres significatifs,
- élaboration de modèles,
- prévision de l'évolution quantitative des paramètres retenus.

Une telle méthode qui s'est révélée décevante même lorsque tous les pa mètres en cause suivaient des évolutions relativement stables, et supposées "P visibles", perd de sa crédibilité lorsque la plupart de ces paramètres ont subi cours des précédentes années des évolutions instables comme ils continueront vr semblablement à le faire à l'avenir. Le principe même de l'extrapolation du pa perd ainsi sa validité, comme il perd son fondement mathématique dès lors que évolutions comprennent des ruptures. Le risque est grand de se laisser leurrer tel aspect tendanciel qui peut n'être en réalité qu'une instabilité sur une cou de tendance lourde inconnue.

Ces difficultés de principe portant sur chaque paramètre s'amplifient mutuellement dès lors qu'on les combine au sein d'un modèle de prévision. Disposant d'une série statistique sur une longue période passée, il est toujours possible de construire un modèle qui en rende compte : c'est une affaire d'intuition, de moyens et de patience. Il convient cependant de se garder d'en être dupé : la valeur de l'outil ainsi forgé est loin d'être à la hauteur de l'effort qu'il a imposé. Il s'agit essentiellement d'un exercice mathématique qui n'a de chance de représenter l'avenir que moyennant les hypothèses restrictives et hasardeuses sur lesquelles il est fondé.

L'expérience passée a bien montré, même dans les périodes réputées "stables", que la courbe d'évolution réelle au cours d'une longue période ne constitue que l'enveloppe (au sens mathématique) de l'ensemble des prévisions à long terme (successivement effectuées et réajustées au cours de cette période) sans qu'aucune d'entre elles n'ait été en mesure de prévoir le futur.

Dans les périodes manifestement instables - comme le sont les années actuelles -, le système ne peut être appréhendé que dans le cadre de l'étude des "systèmes complexes" au sens moderne donné à ce concept, c'est-à-dire comme un ensemble réagissant à un très grand nombre de paramètres selon des relations qui ne sont ni linéaires, ni réversibles (notamment au-delà d'un certain seuil). La science moderne (1) apporte en ce domaine un éclairage théorique et pratique nouveau. Il apparaît aussi que de tels systèmes portés loin de leur état d'équilibre stable, tendent à évoluer vers un nouvel état d'équilibre plus ou moins stable mais imprévisible et qui obéit donc à un modèle qui peut être fondamentalement différent du modèle explicatif passé.

Tel est, manifestement, le cas de l'environnement politico-économique (à l'échelle de la planète) de l'économie du transport aérien.

Les paramètres internes au transport aérien, plus faciles à appréhender, méritent d'être examinés tout d'abord.

.../...

---

(1) cf. les travaux d'Ilya Prigogine prix Nobel 1977.

## 2. LES PARAMETRES INTERNES AU TRANSPORT AERIEN ET LEUR EVOLUTION.

Au cours des trente dernières années le trafic aérien a été multiplié trente ; sa croissance très supérieure à celle de l'ensemble des autres secteurs économiques peut être expliquée par les "gains de productivité" dont a bénéficié ce secteur.

Ces gains ont résulté d'une conjonction de facteurs dont les effets sont mutuellement amplifiés à savoir :

- la croissance générale de l'économie,
- l'évolution géopolitique,
- la substitution aux autres modes de transport,
- les progrès techniques et technologiques,
- la capacité des avions.

### 2.1. La croissance générale de l'économie

Bien que la croissance générale de l'économie mondiale et locale puisse être considérée comme externe au transport aérien, il convient de la citer par les facteurs internes en raison de l'effet amplificateur qu'elle a revêtu sur l'amplitude et la rapidité de l'évolution de ces derniers.

### 2.2. L'évolution géopolitique

Il est banal de constater qu'en abolissant les obstacles et les distances le transport aérien a puissamment contribué à l'émergence d'une nouvelle donne géopolitique ; l'essor des télécommunications a eu à cet égard un effet de synergie.

Les nouveaux courants d'échange ainsi créés alimentent en retour le trafic aérien selon une première boucle rendant partiellement compte de la croissance exponentielle constatée.

Dans une première phase cette croissance a surtout concerné le transport des personnes et de l'information, tandis que la nouvelle répartition des productions, et notamment des productions les plus modernes en "ique" (électronique, informatique, robotique, bureautique ...) et plus généralement de tous les produits à fort ratio prix/poids, donnait plus récemment le départ d'un essor considérable du transport de fret.



La poursuite et l'orientation de cette évolution géopolitique restera dans l'avenir sous la dépendance de l'évolution de la croissance économique mondiale, et plus particulièrement de la croissance différentielle des ensembles économiques mondiaux. On peut ainsi augurer une croissance contrastée selon les différents faisceaux de transport aérien. Faute d'autres données, on peut estimer que l'effet de nouveauté du transport aérien étant désormais érodé, la croissance moyenne du trafic ne devrait guère s'écarter de ce point de vue de la croissance des échanges mondiaux eux mêmes supérieurs à la croissance moyenne de l'économie (dans la mesure probable où la tendance à la mondialisation de l'économie n viendrait pas à s'inverser).

Hors de cette dernière donnée imprévisible sur l'évolution du monde, il existe cependant deux autres inconnues majeures qui méritent une attention particulière et qui concernent les rapports Est/Ouest et la construction politique européenne. Une évolution profonde qui n'est pas à exclure pourrait revêtir, dans un scénario optimiste, une importance capitale sur la croissance du trafic. Seul le lecteur peut effectuer des estimations en de tels domaines qui soient de nature à le convaincre !

L'ensemble de ces problèmes, et notamment celui de l'influence de l'avenir de l'Europe sur le transport aérien, est particulièrement bien éclairé par l'examen de l'essor d'Air Inter. L'Europe, comme la France, est dotée d'anciennes structures politico-économiques modelées par l'histoire et inscrites dans leur réseau de communication terrestre (les routes et le chemin de fer empruntent des tracés voisins). Inversement la rigidité des communications (notamment des communications à grande distance, ou entre points non directement desservis par le réseau classique) a contribué à amplifier celle des structures politico-économiques ou à les scléroser. Dès lors que, grâce à l'avion et à l'évolution des constructions politiques (décentralisation en France, construction de l'Europe), ces rigidités tendent à disparaître, il se crée (ou se créera) un mouvement lent, mais de longue durée, qui remodèle le paysage (nouvelle répartition du travail, croissance différenciée des structures urbaines notamment au profit des villes précédemment les plus excentrées).

Il y a ainsi tout lieu de penser que la croissance d'Air Inter, supérieure à la croissance moyenne de l'économie, se perpétuera avec une moindre ampleur mais pendant une très longue période. Le trafic intra-européen notamment de ville moyenne à ville moyenne pourrait bien à l'avenir amorcer une évolution de nature et de mêmes effets.

### 2.3. La substitution aux autres modes

Outre le nouveau trafic qu'il a engendré, le transport aérien a réduit le trafic d'autres modes auxquels il s'est plus ou moins substitué. Il en est ainsi pour le transport maritime de passagers et d'une manière générale pour la quasi-totalité des voyages au-delà de quelques centaines de kilomètres (on rappelle qu'en France, pays particulièrement bien doté en moyens de transports terrestres, le transport aérien achemine d'ores et déjà plus de passagers que le rail, toutes classes confondues, dès lors que la distance parcourue dépasse environ 500 km). Ces effets sont désormais accomplis et ne sont donc plus porteurs en eux-mêmes de nouveaux progrès. Au contraire, le retour en force du rail (TGV) amorce un mouvement inverse qui ne s'étendra cependant pas significativement hors des routes très fréquentées et des distances inférieures à 500 km.

Le transport aérien de fret n'est pas susceptible de tels effets de substitution à l'égard des transports maritimes et terrestres, mais plutôt de complémentarité comme on l'a exposé ci-dessus.

L'essor prodigieux des télécommunications (qui englobe désormais l'imagerie) devrait continuer à revêtir à l'égard du transport aérien de personnes plus un effet de synergie de développement qu'un effet de substitution.

La plus grande inconnue résulte de l'estimation de la probabilité de voir émerger l'aviation de voyage qui ne représente en Europe qu'une activité marginale, alors qu'aux Etats-Unis cette aviation augmente de 36 % le nombre de vols IFR qu'auraient les centres de contrôle du seul fait du contrôle des vols commerciaux. L'excellence des moyens de transports terrestres et aériens en Europe fournit qu'une explication partielle à cette différence qui pourrait, pour l'essentiel, provenir de l'exiguïté de chaque territoire national en Europe et du confinement national des entreprises. Une évolution géopolitique de l'Europe pourrait avoir une influence importante sur l'essor de l'aviation de voyage que la prudence dans les prévisions devrait d'autant moins inciter à négliger que son impact sur la charge du contrôle se mesure au nombre de vols et non au nombre de passagers acheminés.

## 2.4. Les progrès technologiques

Enfin, les progrès technologiques apportaient année après année la manne d'une "productivité croissante". Les grandes étapes sont marquées (outre par l'accumulation d'une multitude de progrès sur les structures des avions et sur les rendements aéro et thermo-dynamiques) par la mise en oeuvre du moteur à réaction puis de moteurs à double flux à taux de dilution croissants... La productivité croissante a entraîné une baisse des prix alimentant ainsi une boucle de croissance endogène du trafic qui, à son tour, justifiait les investissements de recherche et de développement de nouveaux appareils et de nouveaux moteurs.

Les efforts de modernisation ont tout d'abord porté sur les avions de plus grande capacité, dont la taille s'est ainsi accrue rapidement, ce qui a permis d'ouvrir le transport aérien à une nouvelle clientèle plus sensible au prix qu'aux conditions de transport (largeur, confort et espacement des sièges ; prestations à bord, conditions de réservation, disponibilité des places...)

L'examen du passé récent montre que les effets amplificateurs de l'évolution technologique sur la croissance n'existent plus désormais qu'à la marge (1) et tout laisse penser (notamment l'état des recherches et des projets) qu'il en sera ainsi au cours des vingt ans à venir.

Bien plus, les gains technologiques majeurs auraient même déjà disparu depuis plusieurs années, si l'accroissement du prix du pétrole n'avait pas contraint de précipiter le progrès, pour en compenser les effets : la plupart des progrès accomplis ces dernières années n'auraient pas revêtu une rentabilité suffisante pour valoir leur propre coût (recherche, développement, renouvellement radical des flottes) si le prix du pétrole n'avait varié que modérément.

Inversement, il y a tout lieu de penser que, si les cours du pétrole devaient connaître dans le futur une nouvelle flambée notable, de nouveaux progrès technologiques seraient accomplis pour en minimiser à nouveau les effets. Sauf à la baisse, (ce qui ne paraît pas forcément improbable si la substitution d'autres

.../...

---

1) Il va de soi que rien ne permet cependant d'exclure formellement une innovation technologique majeure aujourd'hui imprévisible dont les effets pourraient contribuer à relancer d'une manière nouvelle le développement du trafic aérien. Mais cela relève à ce stade de la science-fiction.

énergies se généralise à tous les usages autres que les transports) l'évolution du coût du pétrole ne devrait avoir qu'une influence relativement faible sur l'aérien ; ce paramètre ne constitue donc pas une incertitude majeure contrairement à une idée reçue.

## 2.5. La capacité des avions

Enfin, l'effet favorable de la taille des avions sur le coût du siège offert tend lui-même à s'atténuer considérablement dès lors que les efforts technologiques sont désormais effectués sur les avions court et moyen-courriers de taille modeste (130/150 sièges) avec un acharnement tel qu'ils vont bénéficier de progrès à l'avant-garde de toutes les techniques (A 320) dans tous les domaines concernés (poids des structures, finesse aérodynamique (1), rendement thermodynamique).

L'attrait économique pour les avions de petite taille sera amplifié par leur souplesse d'exploitation et plus particulièrement par l'accroissement concomitant des fréquences très apprécié de la clientèle et qui multiplie par ailleurs les possibilités de vols avec correspondance. Ces effets auront un impact important sur le trafic moyen et court-courrier à contrôler : on devra constater, à trafic égal (en nombre de passagers), un accroissement significatif du nombre de vols conduisant à la fois à un meilleur étalement du trafic au cours de la journée et à une amplification du trafic de pointe (effet de "rendez-vous" sur les aéroports principaux).

Si les aéroports principaux venaient à se saturer, la tendance vers l'usage de liaisons d'appareils de faible capacité pourrait venir à s'inverser, à moins, ce qui est plus probable, que se développent les relations intraeuropéennes directes province/province, l'obstacle de rentabilité qui s'y opposait venant progressivement à se lever grâce aux nouveaux avions de faible capacité et à la croissance du trafic potentiel liée à la régionalisation, à l'europanisation et à la croissance économique.

.../...

---

(1) le rendement aérodynamique va être significativement accru par une avancée technologique dans le domaine du pilotage (CAG) qui permettra ainsi d'exploiter l'avion dans un domaine de vol non naturellement stable mais aérodynamiquement favorable.

## 2.6 Les gains de productivité interne des compagnies

Privées, sauf à la marge, des ressources de productivité généreusement prodiguées par le passé et dont elles s'enorgueillissaient un peu hâtivement, les compagnies aériennes (et leurs personnels) ne trouveront plus guère à l'avenir nouveaux gisements de productivité que dans leurs propres structures et dans leurs propres efforts. Cette nouvelle situation à laquelle elles sont désormais confrontées, ne manquera pas de leur poser de redoutables problèmes face à une clientèle qui, conditionnée par l'expérience du passé, tend à considérer la baisse continue des tarifs comme un dû.

Un fossé sépare le problème de la répartition des gains de productivité (dont les compagnies, les personnels et les consommateurs pouvaient bénéficier) de celui de l'émergence éventuelle d'une nouvelle donne dans la répartition des surpluses (partage, toutes choses égales par ailleurs, entre la masse salariale, les profits et les prix).

Telles sont bien les réalités profondes qui se cachent derrière les débats passionnés sur la réglementation et la déréglementation... mais ceci est une autre affaire !

Quelles que soient les péripéties de ces débats et les expériences tentées, il y a tout lieu de penser que les gains de productivité internes constitueront un enjeu vital de survie pour chaque compagnie aérienne qui sera, ici ou là, soumise à une concurrence accrue (voire sauvage), mais que l'effet final sur les prix des compagnies régulières (et donc sur le trafic) sera tout à fait modeste. On peut le démontrer en constatant que toute déréglementation, en libérant le contrôle des capacités offertes, entraîne inéluctablement un surcroît de capacité totale (1) ; or, tout point de capacité excédentaire (réduisant le coefficient de remplissage en-deçà d'environ 65 % couramment jugé comme optimal pour la clientèle) ne peut être compensé que par un abaissement de 4 % des charges maîtrisables (2) essentiellement constituées par la masse salariale, - ce qui montre bien les limites des gains escomptables.

.../...

---

(1) la théorie peut l'expliquer, et la pratique le démontre.

(2) le mémorandum N° 2 de la commission de Bruxelles estime en effet à 37,5 % les charges maîtrisables d'une compagnie aérienne (y compris la commercialisation).

L'exemple de rupture occasionnée par une déréglementation brutale a montré que, dans une phase de transition, des tarifs très attractifs peuvent être pratiqués par certains ; il ne s'agit cependant que de phénomènes non généralisables qui ont d'ailleurs plus d'incidence sur le trafic exprimé en nombre de passagers que sur le nombre de vols ; en effet, les compagnies qui confondent le marginal avec le prix moyen, ne peuvent le faire plus ou moins impunément (en vendant des sièges volant à vide), qu'à la condition formelle de ne pas accroître la conséquence, et sur ces bases, leurs moyens de production : au-delà des péripéties sur les tarifs, ces pratiques ne sauraient pas avoir d'effet notable à moyen et long terme sur les capacités offertes et donc sur le trafic à contrôler.

Le développement du trafic par vols nolisés (charters) n'entre évidemment pas dans cette dernière catégorie de pratiques marginales : ce marché ne constitue qu'une des modalités possibles de la satisfaction de la clientèle à bas tarifs parmi lesquelles figure par ailleurs le mélange de toutes les clientèles dans les mêmes avions grâce à la mise en oeuvre de techniques commerciales adaptées (tels que "vacances", vols tricolores...). La croissance du nombre de passagers due au "phénomène charter" se concrétise plutôt par un meilleur coefficient de remplissage que par la croissance du nombre total de vols.

On peut donc conclure sans risque d'erreur grave que l'évolution des structures du transport aérien n'aura pas d'incidence majeure sur son développement moyen. On notera d'ailleurs qu'une amélioration interne de la productivité des compagnies aériennes par baisse de leurs coûts ne constitue pas en tout cas, une fois réalisée, une source renouvelable comme l'ont été par le passé les "gisements" externes de productivité.

## 2.7. Quels "gains de productivité" pour l'avenir ?

En conclusion, l'analyse des paramètres internes incite à penser que le transport aérien devrait continuer à croître avec un taux plus élevé que celui de la croissance économique générale mais nettement plus faible que par le passé. Estimer ce taux différentiel futur à 1 ou 2 % constitue sans doute une évaluation raisonnable compte tenu :

- de la mondialisation de l'économie entraînant, toutes choses égales par ailleurs, un accroissement des échanges,
- de la tendance à la croissance qui se porte plus sur les services que sur les produits (ce qui implique un accroissement du déplacement des personnes en synergie avec le développement des télécommunications),
- de l'émergence d'un nouveau trafic de fret actuellement en pleine croissance sans aucun signe de saturation,
- des réserves de gain de productivité faibles mais non négligeables.

En ce qui concerne plus particulièrement l'Europe, il subsiste cependant trois inconnues majeures :

- l'évolution des rapports est/ouest,
- la croissance différentielle de l'Europe par rapport à celle de l'ensemble du monde qui peut, entre autres hypothèses, entraîner soit une croissance du trafic (Europe politique), soit une décroissance due à son déclin économique et politique éventuel,
- l'émergence de l'aviation d'affaires en Europe (partiellement, mais non uniquement, liée à l'évolution économique politique de l'Europe).

.../...

### 3. LA CROISSANCE ECONOMIQUE GENERALE

Qui oserait aujourd'hui jouer les prophètes et engager sa responsabilité en prévoyant la marche de l'économie du monde dans les vingt ans à venir et, ce cadre, la place qui reviendra à l'Europe ? En cas de succès, une telle impudence, voire une telle inconscience, ne risquerait pas d'être payée de retour étant donné le caractère lointain de l'échéance considérée (chaque lecteur d'ailleurs sa propre idée ou sa propre appréciation, à la fois sur le degré de prévisibilité en ce domaine et sur la marche future du monde).

En se tenant aux objectifs poursuivis par la présente note, tels qu'ils sont décrits dans son introduction, ces écueils peuvent être évités en les tournant.

Il est d'abord possible d'éliminer tout scénario de rupture correspondant à des événements violents, à des changements brutaux de structure socio-politique ou même à une décroissance économique qui risquerait d'entraîner les mêmes conséquences. Ces conséquences, d'ailleurs imprévisibles, auraient des effets si importants et si incalculables qu'ils relègueraient à un rang bien modeste toute erreur dans la planification du seul système de contrôle, qu'un refus du "catastrophisme" aurait amené à commettre (1).

Même une croissance nulle pendant toute la période aurait des conséquences sociales dans toute la Nation, qui imposeraient des révisions déchirantes à toutes les professions (y compris dans celle de la navigation aérienne : compagnies aériennes et contrôle du trafic) qu'on se refuse à envisager par manque d'imagination.

.../...

---

(1) On peut aussi constater que la planification des catastrophes, si elle était généralisée, pourrait bien avoir pour effet d'en favoriser l'émergence



A l'inverse une croissance forte et soutenue sur toute la période, peu probable qu'elle soit, ne rendrait que plus indispensables les mesures proposées pour prévenir des goulots d'étranglement dus à la saturation de l'espace aérien et à l'occupation des sols (aéroports et leurs zones de nuisance, bien que ces dernières doivent décroître notablement dans les dix années à venir lorsque le renouvellement complet des flottes sera effectué).

La prise en considération d'une croissance moyenne de l'économie de 1 à 2 % sur les 20 ans considérés constitue sans doute l'hypothèse la plus sage pour le besoins du groupe.

#### 4. CONCLUSION

Au vu des tendances lourdes des facteurs de productivité du transport aérien (cf. 2.6) et des hypothèses faites sur la marche de l'économie mondiale (cf. 3. ci-dessus), il paraît raisonnable de prendre en considération un taux de croissance du trafic de 3 à 5 %, ce dernier n'étant pas à exclure dans le cadre de l'élaboration d'une stratégie au sens où elle a été définie dans l'introduction.

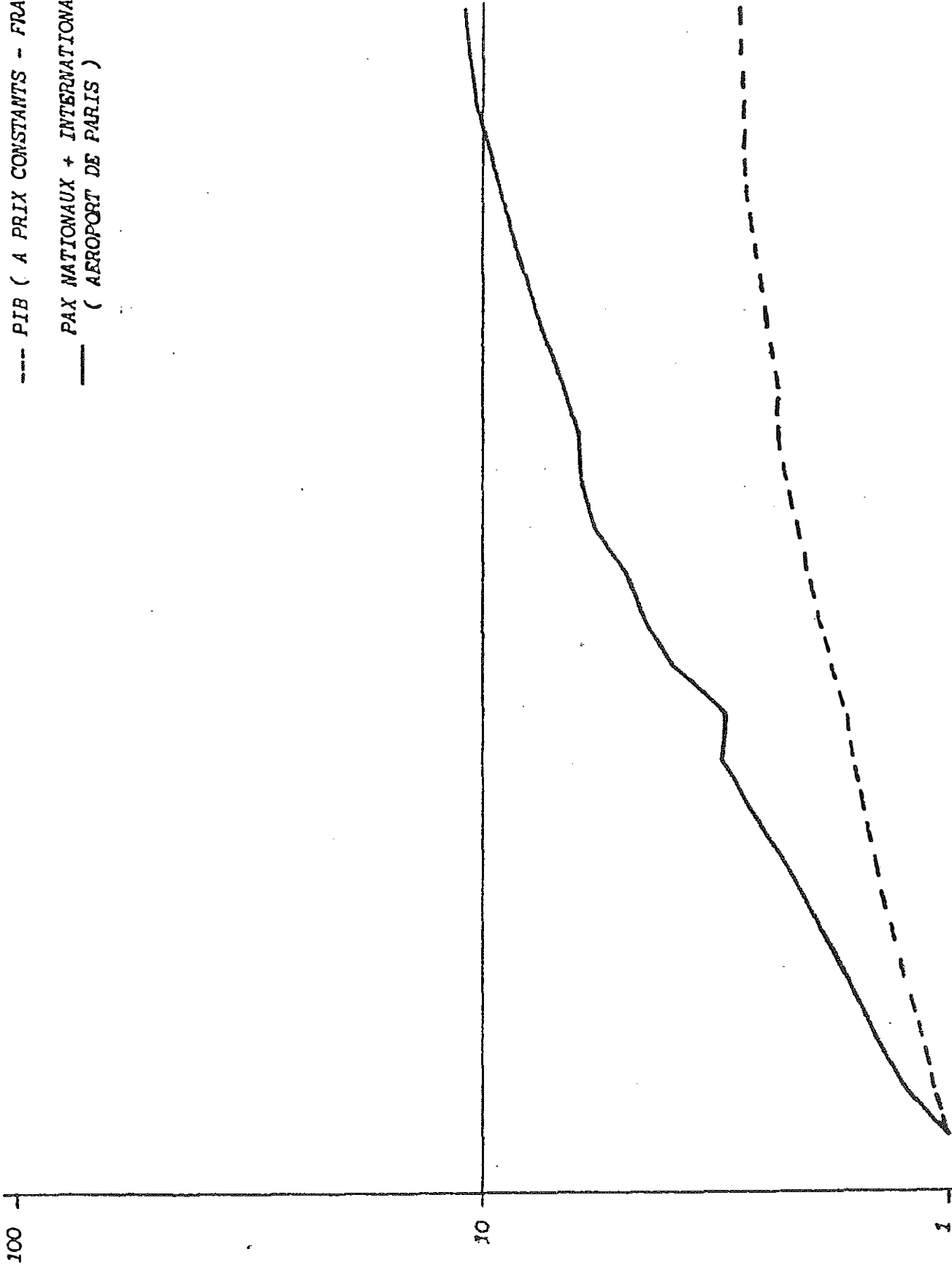
C'est d'ailleurs un taux de 5 % qui est retenu dans le plan à long terme de la FAA aux Etats-Unis.

Par ailleurs les études de Boeing, de Douglas, de la SNIAS, et de Rolls Royce prévoient des taux de croissance s'approchant plutôt de 5 que de 2 %. D'une manière générale ces industriels estiment que les ventes d'avions concerneront pour parties plus ou moins égales, des avions gros porteurs et des avions de moyenne et faible capacité, de sorte que la croissance du trafic, notamment court et moyen-courrier, se répercutera pour une bonne part en une croissance du nombre de vols à contrôler.

EVOLUTION COMPAREE DU PIB ET DU TRAFIC

Annexe 4 a

---- PIB ( A PRIX CONSTANTS - FRANCE )  
—— PAX NATIONAUX + INTERNATIONAUX  
( AEROPORT DE PARIS )



E C H E L L E S E M I L O G A R I T H M I Q U E

- 9/2 -

**Rapport des sages : Annexe 5**



L'AVENIR DU SYSTEME EN ROUTE  
LA PRESSION D'EVOLUTION

(J. VILLIERS)

Août 1984

Une fois doté de calculateurs modernes susceptibles d'apporter la fiabilité et une large capacité d'adaptation progressive, le système CAUTRA sera de nouveau susceptible d'évolutions. Cette évolution résultera de l'action conjuguée du "besoin" et des "moyens disponibles".

1 - La pression d'évolution du "besoin opérationnel"

La pression d'évolution du besoin résultera de trois types de facteurs : le trafic, l'espace aérien, les contraintes croissantes sur les compagnies aériennes et sur les personnels.

a) Le trafic

L'annexe 4 montre qu'il est prudent de considérer que, au cours des vingt années à venir le trafic est susceptible de croître à un rythme de 3 à 5 % par an, soit une progression comprise en plus 80 % et 165 %.

On ne peut donc cependant pas exclure l'éventualité d'une reprise forte de l'ensemble du trafic aérien qui, si elle venait à se produire, pourrait ne pas laisser le temps de réagir au Système : cinq à dix ans sont en effet nécessaires entre la conception et la mise en service de modifications substantielles tant du système de contrôle au sol que de l'équipement des avions en matériels nouveaux.

.../...

La prudence oblige donc à pousser très avant les investigations sur toutes les améliorations possibles du système afin d'être prêts à mettre en oeuvre en temps opportun le moment venu. Par ailleurs, l'évolution du trafic n'est pas le seul facteur à prendre en compte pour l'avenir du système.

Le trafic aérien militaire devrait rester stable. Il est vraisemblable, toutefois, que ce trafic aura de plus en plus tendance à se déplacer à très basse altitude. Les problèmes de compatibilité avec ce qui a été convenu d'appeler l'aviation légère risquent donc de devenir plus importants à l'avenir.

#### b) l'espace aérien

Tout particulièrement pour un pays de dimension exigüe, sur lequel se trouvent par ailleurs un des trafics les plus denses du monde, la capacité intrinsèque de l'espace aérien joue un rôle d'autant plus fondamental que cet espace doit être utilisé à la fois par l'aviation civile et par une aviation militaire qui a pour contrainte de maintenir ses bases opérationnelles et ses possibilités de manoeuvre et d'entraînement sur ce même territoire.

.../...

Or, la capacité effective de l'espace (c'est-à-dire l'ampleur des contraintes que son encombrement apporte à l'écoulement efficace des vols) est autant fonction de l'espace disponible que des modalités de son utilisation.

En ce qui concerne l'utilisation conjointe par les deux partenaires civil et militaire, de grands progrès au cours des années écoulées ont permis un desserrement certain du dispositif civil. Des réserves existent sans doute encore sur le plan de l'organisation de l'espace mais elles sont loin d'être illimitées.

Quatre voies d'amélioration sont possibles :

- une planification de l'utilisation de l'espace par les militaires comparable à celle mise en oeuvre par les civils et une confrontation à l'échéance du mois, de la journée (voire de l'heure) des possibilités d'optimisation pour chacun des partenaires en vue de l'élaboration conjointe à ces échéances de compromis optimaux.

- une meilleure information en temps réel des contrôleurs militaires sur les vols civils et leurs évolutions. Le contrôle militaire est en effet de nature essentiellement tactique et l'espace stérilisé par un avion civil dans une zone d'intérêt militaire est d'autant plus grand qu'il existe plus d'incertitude sur ses évolutions non planifiées. En ce sens, l'introduction systématique dans les calculateurs des autorisations délivrées (clearances) aux avions civils recèlerait sans doute de notables potentialités de progrès (1).

- une plus grande flexibilité du réseau d'itinéraires civils. Il s'agit de rechercher la meilleure utilisation possible de libération d'espaces et des facilités accordées par les autorités militaires. Le but à atteindre est de parvenir à mettre à profit sans retard toute possibilité

.../...

---

(1) L'annexe 7 montre que ce problème se résoudra de lui-même dans les phases plus avancées d'automatisation.

d'utiliser des itinéraires directs à partir du moment où une zone devie bre. L'amélioration de la coordination intersecteurs, notamment grâce à tomatisation, devrait permettre de tirer progressivement un meilleur des possibilités ainsi offertes.

- Un progrès plus lointain et plus incertain qui pourrait résulter de l'accroissement de la capacité de l'espace par réduction des séparations verticales de 2000 à 1000 pieds.

### c) Contraintes sur les compagnies aériennes

Au fur et à mesure de la croissance de leurs coûts variable (au premier chef du coût du carburant) les compagnies aériennes ont été contraintes à porter de plus en plus leur attention sur tous les paramètres de déroulement des vols (horaires, longueur des routes, vitesses et taux de circulation des avions...).

On doit considérer, en conséquence, que les plans de vol déterminés ainsi que les consignes données aux pilotes constituent des optima économiques pour les compagnies aériennes que le contrôle doit s'efforcer de ne pas altérer.

Par ailleurs, les retards du fait du contrôle portent préjudice aux compagnies ; il en est de même de l'éventualité de retards qui leur imposent des contraintes dans la planification des vols et plus particulièrement des vols avec correspondance. On sait toute l'importance qu'Air France et Air Inter attachent à une bonne organisation des correspondances à leurs bases parisiennes (à l'instar de LUFTHANSA à Francfort) ainsi qu'aux "rendez-vous" essentiels au succès des lignes de rabattement (Lyon, Limoges, etc..) ; il est inutile de rappeler, tant l'évidence est patente, que la régularité constitue pour Air Inter la qualité primordiale de son produit et de son image de marque (on peut d'ailleurs se référer aux sommes considérables qui sont dépensées à cet effet, tant au sol qu'à bord, pour assurer la régularité des atterrissages quelle que soit la visibilité). On sait aussi que les retards introduisent des effets en chaîne qui détériorent rapidement la qualité de service générale.



En outre, du fait de la cohabitation civile-militaire, les routes civiles ne peuvent pas être aussi directes qu'on pourrait le souhaiter. L'organisation de l'espace et son utilisation optimale en temps réel recèlent encore de larges possibilités de progrès.

Il n'est pas toujours facile de mesurer le coût précis des contraintes apportées au libre écoulement du trafic. Quelques chiffres permettent cependant de se faire une idée des ordres de grandeur ; on citera à cet effet le coût (francs 1984) d'une heure de vol d'un B 747 (116.500 F) d'un Airbus 300 (84.200 F)

Il convient d'ajouter à ces contraintes résultant du caractère imparfait du contrôle, le coût du contrôle en route lui-même qui est intégralement supporté par les compagnies aériennes et qui est loin d'être négligeable.

Le coût actuel du contrôle en France (dont on rappelle qu'il est l'un des moins onéreux d'Europe) se chiffre pour une heure de vol, et pour les avions considérés ci-dessus, à : B 747 (6 800 F), A 300 (4 500 F).

Les compagnies accueilleraient avec grande satisfaction une baisse de ces coûts, cette baisse en elle-même peut devenir un des objectifs à fixer à l'évolution du système.

Il est particulièrement intéressant de noter que les projets d'avenir aux Etats-Unis (qui sont analysés par ailleurs) donnent une importance prioritaire à l'objectif de diminution du coût du contrôle.

.../...

Il n'en reste pas moins que les compagnies aériennes seront toujours prêtes à envisager, et donc à payer, des charges supplémentaires pour atteindre un objectif de réduction des contraintes qu'elles subissent du fait du contrôle, notamment si elles ont l'assurance que toutes les dispositions sont prises pour diminuer les coûts à service égal.

Toute pression importante du trafic qui engendrerait à la fois une augmentation des coûts de l'ATC et des contraintes pour les compagnies aériennes rendrait souhaitable la poursuite simultanée de l'accroissement de la capacité du système et de la réduction de ses coûts.

Il faut toutefois, garder en mémoire que certains allègements de contraintes qui pèsent sur l'emploi des appareils des compagnies aériennes peuvent avoir pour conséquence une pénalisation accrue du trafic militaire qui se traduit par des allongements de trajet, des pertes de temps, des consommations supplémentaires de pétrole. Le trafic militaire subit déjà des propres contraintes dues :

- à l'éloignement des zones d'entraînement car la densité du réseau d'itinéraires prédéterminés ne permet pas toujours de dégager à proximité des bases les espaces nécessaires aux missions d'instruction,
- aux évitements en route que les contrôleurs militaires sont contraints d'ordonner puisqu'ils ont la responsabilité d'assurer l'anticollision avec le trafic civil.

La répartition optimale des contraintes affectant chacune des missions civiles et militaires constitue un problème permanent qui impose, pour lui seul, une évolution globale du système, pour permettre le développement économique du transport aérien civil et le plein accomplissement des missions de toute nature de la défense nationale.

.../...

d) Contraintes sur les personnels

On a montré les effets néfastes d'ordre technique et social qui ont été constatés pendant la période où la capacité du système s'est révélée trop inférieure à la demande. Dans des circonstances similaires, les contrôleurs seraient désormais mieux protégés contre les surcharges et les conséquences malheureuses sur leur vie professionnelle grâce au contrôle des flux mais au prix de contraintes reportées sur les compagnies aériennes.

Les conditions de travail n'ayant pas encore atteint un stade que chacun puisse considérer comme optimal, il convient par ailleurs de continuer à assigner au système l'objectif de leur amélioration, toutes choses égales par ailleurs, et, notamment, l'élimination de toute forme de stress qui risquerait d'être pathogène.

Pour éviter tout malentendu il importe de noter cependant que le stress ne constitue pas une contrainte à éliminer obligatoirement mais plutôt une contrainte à maîtriser : bien dosé et bien surmonté, un certain stress constitue au-delà de la simple situation d'éveil, une condition nécessaire à toute action créative et à la satisfaction d'un besoin naturel d'action valorisante et de réussite.

Le seuil à ne pas dépasser ne peut être mesuré que par l'examen expérimental du comportement et de la santé physique et psychique des intéressés. Les études effectuées à cette fin par une équipe de médecins de l'aviation civile travaillant sous la direction du docteur NOLLAND, n'ont pas été en mesure de détecter des distorsions spécifiques et caractéristiques de la santé des contrôleurs (bien qu'aucune autre population n'ait été prise comme population témoin). On rappellera que cette étude a été menée pendant la période évoquée ci-dessus pendant laquelle les contrôleurs ont été soumis pendant plusieurs années consécutives à la plus grande charge moyenne et à une moindre protection contre les surcharges de trafic.

On notera enfin que la diminution des heures de travail ne saurait en soi constituer une antidote valable à un stress dégradateur ; par contre un bon rythme des alternances de travail et de repos est de nature à apporter de la manière la plus naturelle les meilleures conditions de réparation et de reconstitution permanente de l'équilibre physique et psychique.

e) En conclusion, il apparaît que, du fait du trafic, de contraintes pour les compagnies et pour la circulation aérienne militaire, le coût du système et des contraintes sur les conditions de travail, il pèse sur le système une pression d'évolution importante. L'examen trop axé sur le court terme au jour le jour pourrait masquer cette pression tant qu'elle n'atteint pas le seuil qui impose de réagir. Or, de longs délais sont nécessaires pour une évolution significative.

L'examen et le suivi du système avec la tête trop proche de la réalité pourraient aussi amener à négliger les profondes transformations qui résulteront de la disponibilité prochaine de moyens nouveaux susceptibles de fournir des informations et des moyens d'action plus riches et plus sûrs.

## 2 - Evolution des moyens d'information et de communication

### 2.1. L'évolution aux Etats-Unis

Le présent rapport concerne essentiellement le système français et, plus généralement le système européen. Cet ensemble soumis à des contraintes comparables est profondément solidaire.

L'analyse ne peut pas pour autant négliger le système américain aux Etats-Unis et son évolution.

L'importance de la croissance du trafic aux Etats-Unis implique une profonde évolution du système. Dans cette perspective les responsables ont engagé depuis une dizaine d'années une réflexion en profondeur ; ils ont procédé à des études fondamentales et à des expérimentations pratiques et cherchent à atteindre trois objectifs essentiels :

- faire reculer les limites de saturation du système et réduire en conséquence les contraintes d'exploitation des compagnies aériennes

- améliorer la compatibilité et la sécurité des vols contrôlés et non contrôlés

- réduire le coût du système (tout en accroissant son efficacité).

Dans l'état actuel de leurs projets, les américains s'orientent d'une manière délibérée vers la mise en oeuvre de plus en plus systématique de processus automatisés et plus particulièrement de l'anticollision automatique, pour deux raisons essentielles qui s'ajoutent à celles qu'on vient d'analyser :

- existence d'un trafic intense et croissant de vols non contrôlés (aviation d'affaires et de loisir) qui fait peser une menace de plus en plus sérieuse sur le trafic contrôlé (et, bien entendu, vice-versa) ;

- pression politique du Congrès en vue de rendre obligatoire, à une date la plus rapprochée possible, un système de protection automatique contre les collisions.

La doctrine américaine sur la méthode de prévention automatique des collisions a fluctué à plusieurs reprises au cours des dernières années et a notamment hésité entre les choix offerts par une double alternative :

- anticollision automatique effectuée par le système au sol ou anticollision automatique air/air indépendante du système au sol par échange direct de signaux entre les avions deux à deux

.../...

- anticollision automatique incluant les ordres d'évitement simple alarme automatique des pilotes concernés.

La compatibilité du système de contrôle au sol, destiné à co-ter avec les dispositifs d'anticollision, fait encore l'objet d'études et de controverses.

Le Système ne pourra progresser rapidement dans ces voies nouvelles au-delà du stade atteint actuellement par le "filet de sauvegarde" s'il dispose d'informations plus nombreuses, plus précises et plus fiables.

Le choix fondamental effectué par les américains consiste à porter à cet effet sur une exploitation plus systématique et plus complète des potentialités recélées par le radar secondaire (SSR).

a) Un premier stade d'amélioration du SSR peut être franchi par une technique d'interrogation (dite par mono-impulsion) qui ne nécessite aucune modification des répondeurs d'avions et peut donc être mis en oeuvre à tout moment par les organismes responsables du contrôle (1) unilatéralement et indépendamment les uns des autres. Il en résulte :

- une précision accrue de la mesure de la position des avions

.../...

---

(1) Une telle décision a déjà été prise en France et un programme est en cours de mise en oeuvre.

- une très grande protection contre les chevauchements des réponses avions et donc une meilleure continuité de l'information (position et niveau) et de l'identification (ou donc de la mesure des vitesses et des taux d'évolution).

Les coûts d'un SSR classique et d'un nouveau SSR (dit "à mono-impulsion") sont très voisins de sorte que l'on peut dès maintenant considérer pour acquis que le renouvellement des stations en service s'effectuera toujours avec des matériels de la nouvelle technique.

b) Dans un deuxième stade le SSR peut être enrichi d'un mode de fonctionnement plus complexe (mode S) nécessitant une modification des matériels au sol et à bord en vue de permettre des échanges d'informations codées entre le sol et les avions et vice-versa (1). Le mode S permet notamment d'effectuer les calculs d'anticollision au sol et de transmettre automatiquement les alarmes et/ou les instructions aux pilotes et/ou aux pilotes automatiques des avions.

c) Concurrément à ce deuxième stade (ou préalablement ?) la FAA s'apprête à rendre obligatoire à très court terme l'équipement des avions (notamment des avions de ligne) avec un système d'anticollision air/air dit TCAS faisant partie intégrante des futurs répondeurs de bord SSR.

d) Indépendamment de l'évolution des moyens directement liés au contrôle, on constate une évolution très rapide des moyens de bord en vue d'accroître l'efficacité économique (et ergonomique) de la conduite de vol (trajectoires et vitesses optimales, économie de carburant et de temps de vol...). Souvent déjà équipés des moyens de "navigation de surface" (RNAV)

.../...

---

(1) Il permettra notamment de transmettre automatiquement les vitesses et taux d'évolution des avions connus à bord avec une grande précision ainsi que, dans le sens sol/air, des instructions de contrôle complexes portant notamment sur ces vitesses et taux d'évolution.

permettant un libre choix des trajectoires sans contrainte due à la location des moyens de navigation au sol, les avions modernes seront systématiquement équipés de calculateurs (flight monitoring system FMS), capables d'intégrer toutes les données pertinentes pour l'optimisation et la commande automatique du vol. L'existence future de moyens de liaison codée automatique avec les calculateurs ATC au sol (SSR mode S) ouvre en conséquence des perspectives nouvelles quasi-illimitées (échange d'informations et d'instructions, conduite de processus coordonnés...) pouvant aller jusqu'à l'asservissement des trajectoires, des vitesses et des taux d'évolution verticals des avions selon des instructions émises en temps réel par le contrôle de la circulation aérienne.

Il est intéressant de noter que les compagnies aériennes toujours réticentes à s'équiper en vue d'assister l'ATC (tant qu'elles n'ont pas la preuve certaine du bénéfice qu'elles en tireront) sont toujours prêtes à aller au devant du progrès dès lors que celui-ci n'exige pas une action corrective toujours lente à être décidée et mise en service effectif.

L'équipement des compagnies en FMS et RNAV en est la preuve. Cela constitue un pas en avant dont l'exploitation de toutes les potentialités attend encore que le système ATC au sol soit en mesure d'en tirer tout profit. On peut aussi penser que les compagnies ne seront sans doute pas réticentes, pour les mêmes raisons, à s'équiper de TCAS.

La modernisation radicale qui résultera de la mise en œuvre de tous ces nouveaux moyens de communication, d'acquisition et de traitement d'information, conjuguée avec la mise en œuvre de calculateurs au sol extrêmement fiables permet à la FAA de s'engager dans la voie d'une mutation fondamentale. Le système actuellement planifié est basé :

- sur une automatisation très poussée et très "fiabilisée" des processus de contrôle au sol (système dit AREA)



- sur l'anticollision (ou plus vraisemblablement l'alarme automatique) air/air TCAS (ce choix remplace le projet ACARS qui conférerait au calculateur au sol la fonction correspondante).

Ce projet, s'il venait à prendre réalité sous cette forme, constituerait une véritable mutation dont nos collègues escomptent simultanément :

- un abaissement spectaculaire des coûts
- une augmentation déterminante de la sécurité (notamment de la protection contre les vols non contrôlés),
- une amélioration des conditions de travail,
- une diminution des contraintes et des coûts d'exploitation des compagnies aériennes.

## 2.2. L'évolution en Europe

Le lecteur aura réalisé que les problèmes américains ne coïncident pas complètement avec les problèmes européens actuels ou dans un futur proche. Ils s'en différencient essentiellement par le trafic d'aviation générale dont l'intensité et le taux de croissance n'ont pour l'instant rien de comparables.

Il n'en reste pas moins qu'il serait déraisonnable d'oublier que l'évolution du système ATC aux Etats-Unis doit désormais être considérée comme inéluçtable.

Il convient aussi de rappeler que :

- la densité du trafic contrôlé en Europe (et plus particulièrement au-dessus de la France) est comparable à celle des zones américaines les plus encombrées,

.../...

- l'espace aérien disponible est beaucoup plus restreint en Europe qu'aux Etats-Unis notamment en raison des besoins militaires,

- le coût du système ATC européen est beaucoup plus élevé qu'en Europe ; les compagnies aériennes ne pourront que se montrer réticentes à coopérer à toute action permettant l'abaissement des charges correspondantes, surtout si elle améliore par ailleurs la sécurité et l'efficacité du système.

On imagine facilement, en conséquence, que l'équipement des avions en moyens nouveaux rendus obligatoires aux Etats-Unis pourrait bien donner le signal de leur rapide généralisation par delà l'Atlantique. Ce serait-ce d'abord que par le truchement initial des avions long courrier survolant les deux continents.

Parallèlement les compagnies se familiariseront avec des nouveaux équipements, les pilotes et l'opinion publique feront peser leur poids sur leur généralisation tandis que leurs coûts tendront à baisser spectaculairement avec l'accroissement de la demande et le lancement de grandes séries de fabrication.

Afin de fixer les idées il est intéressant de donner des ordres de grandeur. C'est ainsi qu'un matériel coûtant (installation comprise) 200.000 F participe d'une manière négligeable à l'accroissement du coût de l'heure de contrôle d'un avion supposé effectuer 2 000 heures par an (soit 20 F par heure ou 15 à 20 F environ pour tenir compte du prix de la maintenance et du surcroît de consommation de carburant découlant de son poids additionnel, soit 10 % du coût de l'heure de contrôle).

Il sera sans doute aisé de prouver que des économies largement supérieures pourront être effectuées corrélativement sur le coût du système et sur les pénalisations économiques qu'il impose à l'écoulement efficace du trafic.

Encore faudrait-il que les Européens soient préparés à en tirer un bénéfice réel dont ils auraient défini la teneur et préparé la mise à profit efficace dans leurs systèmes selon leurs propres besoins. La France qui doit faire face au trafic le plus dense d'Europe se trouve ainsi placée en position privilégiée qui lui donne des devoirs mais pourrait bien, par la suite, lui conférer des avantages si les dispositions sont prises pour qu'elle reconquière l'avance et la place d'avant garde qu'elle avait acquise dans la mise en oeuvre de l'automatisation aux stades qui se sont par la suite généralisés dans tous les pays à fort trafic.

La conception du système ATC va ainsi disposer de nouvelles possibilités qui n'ont pas encore été clairement prévues et encore moins intégrées dans les schémas de pensée de la profession.

Il n'est donc plus possible d'aborder l'analyse prospective avec des vues et des réflexes trop étroitement liés à des habitudes de pensées dont le passé pouvait se contenter, en raison des faibles degrés de liberté dont il disposait.

Il convient donc de procéder à l'élaboration d'une théorie plus générale du système de contrôle, dès lors que de nouveaux espaces de liberté s'ouvriront à l'avenir pour la conception du système (voir annexe 7).



- 9/3 -

Rapport des Sages  
Annexe 6



**CONCEPTION ET REALISATION DU SYSTEME**

J. VILLIERS

Août 1984

1. Informatique et systèmes

Il est banal de constater que l'informatique pénètre rapidement dans tous les domaines. Il est tout aussi banal de rappeler que l'introduction puis le développement de l'informatique apportent dans les secteurs qu'elle touche de profondes modifications dans les méthodes de pensée, dans les moyens d'analyse, dans la conception et la réalisation des produits ou des prestations des services.

L'impact de l'informatique sur les services de la Direction de la Navigation Aérienne est d'autant plus profond et plus général que la mission même de la D.N.A. concerne quasi exclusivement la création, la transmission et le traitement d'informations.

Dans le cas des services de la navigation aérienne le besoin exprimé en terme d'objectif est stable et bien défini a priori (écoulement du trafic d'une manière efficace, sûre et au moindre "coût généralisé")(1).

Par contre les besoins pratiques à satisfaire, c'est-à-dire les moyens optimaux pour fournir le service sont directement dépendants du stade d'évolution des techniques.

.../...

---

(1) coût généralisé = coût du service et coût des contraintes induites sur le trafic.

Pour tenter des prévisions à cet égard, on a jeté un regard anticipateur sur les tendances de l'évolution des informations et moyens de communication qui seront disponibles (voir annexe 5)

Il convient d'analyser tout le parti qu'on pourra en tirer en fonction de l'évolution des moyens informatiques eux-mêmes.

## 2. Les tendances de l'informatique

### a) Le matériel

Tous les facteurs caractérisant les calculateurs ont subi au cours des dernières années une évolution exponentielle ; tout laisse penser qu'ils continueront encore à évoluer longtemps selon une telle loi.

Il en est ainsi du coût qui, à performances égales, baisse de 20 % par an (soit de moitié tous les 5 ans et des 3/4 tous les 10 ans). Inversement à coût égal, les performances croissent de 25 % par an.

Le taux d'intégration des circuits, et notamment des mémoires, doublant tous les 18 mois est donc multiplié par 100 tous les 10 ans, ce qui à ce rythme conduirait à une multiplication par 10.000 en 20 ans ! Il existe déjà des puces de 1 million de bits, celles de 16 M bits arriveront bientôt sur le marché.

La frontière entre calculateurs, minicalculateurs et micro-calculateurs va tendre à s'atténuer - des microcalculateurs à mots de 32 bits (1) qui deviendront courants sous peu, intégreront progressivement les fonctionnalités des grands ordinateurs.

La fiabilité des calculateurs augmente rapidement et tendra à s'approcher de celle de la durée de vie du produit lui-même. La fiabilité des calculateurs comprenant des millions de circuits dépasse d'ores et déjà celle des matériels analogiques classiques (radar, émetteurs, récepteurs...). La fiabilité globale des matériels sera par ailleurs améliorée par des redondances généreuses et des possibilités multiples de reconfiguration automatique.

.../...

---

(1) Le calculateur du CAUTRA III a des mots de 32 bits, le "minicalculateur" du CAUTRA IV a des mots de 16 bits.



Les coûts de maintenance des matériels qui généraient des charges comparables ou même supérieures à celles de l'amortissement des matériels, vont tendre à diminuer très rapidement grâce aux possibilités d'auto-analyse et d'autodiagnostic (seules les parties mécaniques qui ne verront pas une évolution aussi spectaculaire auront en conséquence tendance à être progressivement éliminées chaque fois que cela deviendra possible).

b) Le logiciel

Le logiciel, par contre, n'est pas encore entré dans un cycle d'évolution comparable à celui du matériel et rien ne permet d'augurer à coup sûr quand (et si) une boucle d'amélioration cumulative d'efficacité commencera à s'amorcer.

Jusqu'alors, les progrès des outils de programmation n'ont pas été suffisants pour contrebalancer les facteurs d'augmentation intrinsèque des coûts de rédaction des programmes (notamment dans le domaine du "temps réel" et, plus particulièrement, dès lors que les applications tendant à s'accroître en taille et en complexité nécessitent des organisations lourdes, onéreuses et donc peu "productives") ; et rien ne permet de penser qu'il en sera ainsi dans un avenir prévisible.

Il s'ensuit que, dans la plupart des applications tant soit peu sophistiquées, le coût du logiciel a désormais largement dépassé celui du matériel et que l'écart tend à se creuser rapidement sous l'effet de la diminution de ce dernier. Le poids de cette constatation est encore renforcé par le fait que, aux coûts de rédaction initiale des programmes, s'ajoutent par la suite ceux de leur entretien et de leur évolution..... si ce ne sont ceux de leur refonte complète éventuelle en cas de changement de calculateur lorsque les précautions nécessaires n'ont pas été prises dans le choix des calculateurs et dans la rédaction des programmes.

.../...

Dans les conditions actuelles de grandes différences apparais dans le coût des logiciels en fonction de la capacité du calculateur, de la stratégie de programmation et des objectifs visés.

C'est ainsi que pour un programme donné le coût du logiciel varie dans un rapport de 1 à 3 selon que la puissance du calculateur utilisée à 50 % de sa capacité maximale ou dans des conditions qui s'approchent de sa saturation. Cet effet se manifeste aussi bien si c'est le temps de calcul ou la taille des mémoires qui est en sous-capacité.

Lorsque le développement progressif d'une application (ou les efforts de prévision initiale sur la puissance nécessaire) tendent à saturer le calculateur, des économies de ressources du calculateur peuvent être recherchées au prix d'une plus grande sophistication de la programmation (donc une augmentation de son coût) notamment en renonçant plus ou moins complètement, selon l'économie à réaliser, à l'utilisation de langages évolués. Le meilleur parti ainsi tiré des caractéristiques spécifiques du calculateur utilisé se paie en contrepartie par une moins grande reproductibilité des programmes en cas de changement ultérieur de machine (et donc de nouveaux coûts de programmation).

La stratégie de programmation offre une grande gamme de choix depuis la réalisation par une très petite équipe à très haut niveau dominant l'ensemble de l'application jusqu'à, au contraire, la répartition du travail - parfaitement analysé et spécifié au préalable - entre des équipes nombreuses et coordonnées dont chacune produit les modules rendus indépendants qui lui sont assignés.

Du seul fait du choix de la stratégie le coût d'un programme donné peut varier de 1 (petite équipe unique) à 3 (équipes aux tâches parallélisées).

Ce dernier cas exige une plus grande rigueur dans la préparation du travail dont bénéficient ensuite les programmes produits et leur documentation : il s'impose pour des applications très lourdes, bien définies à l'avance et plus particulièrement lorsque les programmes sont destinés à une grande diffusion vers des utilisateurs variés n'ayant pas de relations directes et suivies avec le producteur initial du programme (un facteur 3 est encore cité pour l'augmentation des coûts des programmes à haute diffusion par rapport à des programmes à usage interne à l'entité qui les a développés). En conséquence, la stratégie peut faire varier les coûts de production du logiciel dans un rapport pouvant aller de 1 à 9 selon les choix effectués ce qui, combiné avec les variations sur l'adaptation du calculateur choisi à l'application visée, peut faire théoriquement varier les coûts de logiciel de 1 à 27 !

On ne peut guère non plus s'attendre à des progrès spectaculaires sur la fiabilité des logiciels. Seuls le soin dans l'écriture, l'acharnement dans la recherche des déficiences possibles et l'expérimentation longue et approfondie restent le gisement inépuisable des progrès d'une fiabilité dont le coût croît très rapidement en fonction de la qualité recherchée et des délais impartis pour l'atteindre.

### 3 - Le CAUTRA

#### a) Les phases initiales jusqu'au CAUTRA III

Les premières phases du CAUTRA ont été développées alors que les calculateurs n'offraient que des puissances de calcul et des capacités de mémoire qui apparaissent aujourd'hui comme dérisoires. Elles ont permis cependant l'expérimentation et la mise en service opérationnelle des premières fonctions au prix d'une programmation dont l'économie et la subtilité ont été poussées à l'extrême par une équipe très soudée formée d'ingénieurs à très haut niveau ayant le génie du logiciel (1).

.../...

---

(1) Cette équipe comprenait aussi quelques contrôleurs.

C'est encore à ces conditions que le CAUTRA III a pu être développé sur un ordinateur dont la puissance de calcul et la capacité de mémoire ont été limitées au minimum nécessaire en raison des matériels français disponibles et de la rigueur budgétaire nécessitant de limiter les coûts (très sensible à cette époque à la puissance et à la capacité de mémoire). Les méthodes de programmation choisies s'imposaient d'autant plus en conséquence, que l'équipe responsable avait déjà acquis, dans les phases initiales, une grande maîtrise de l'application et de l'architecture des programmes et de ses méthodes pour en optimiser l'économie. Le choix du langage ASTRE (développé spécialement à cet effet) constituait un compromis spécialement adapté à cette application spécifique entre la facilité de programmation et l'économie de la capacité du ordinateur ; ce choix permettait aussi de limiter la documentation des programmes en raison de la très bonne lisibilité directe par des personnes averties.

Au cours de 15 ans de vie du CAUTRA III les programmes ont pratiquement triplé d'importance et ont dû être remaniés d'une manière parfois très profonde en fonction de l'évolution du système au cours de cette période. Une équipe de 7 personnes a assuré l'entretien et l'enrichissement de ces programmes au cours des dix dernières années : on peut estimer qu'elle a produit en quelques années au moins l'équivalent de la moitié du programme total actuel.

#### b) Du CAUTRA III au CAUTRA IV

En raison de la vétusté des ordinateurs (1) et notamment de la très faible durée moyenne entre pannes (de l'ordre de 200 heures), il était indispensable de procéder à une modernisation du système.

.../...

---

(1) la DNA est demeurée le dernier et seul utilisateur des CII 10070 (des IRIS 80).

Plusieurs solutions s'offraient alors (vers 1975) :

- la ré-écriture complète des programmes sur de nouveaux calculateurs,
- la ré-écriture partielle et successive d'éléments du programme existant sur des calculateurs plus modernes en vue d'assurer une transition progressive,
- l'utilisation des programmes existants tels quels sur des nouveaux calculateurs (dits calculateurs hôtes) dotés d'un programme dit "émulateur" leur permettant de simuler le fonctionnement des anciens calculateurs.

La DNA a choisi la première solution, c'est-à-dire la plus radicale, et a réorganisé ses services en vue de se doter de moyens de programmation importants au sein d'une entité organisée susceptible d'entreprendre et de mener à bien un travail systématique et planifié. Ces équipes comprennent aujourd'hui 50 agents de l'administration (de niveau ingénieur) avec un apport de 20 agents fournis sous contrat par l'industrie.

Elles ont mené à bien leur travail dans des conditions rendues très difficiles par les choix initiaux, notamment par une sous-estimation des besoins et des difficultés ainsi que par le choix d'un ordinateur aux caractéristiques trop limitées (puissance effective de calcul, mots de 16 bits...) associé au choix d'un langage évolué qui ne tend pas à l'économie des possibilités du ordinateur.

La programmation a été ainsi rendue très complexe et a nécessité de multiples reprises de programmes en cours de développement, notamment en raison des reconfigurations rendues nécessaires des ordinateurs et de l'architecture des programmes.

Ces efforts cependant couronnés de succès ont permis :

- d'accomplir un saut spectaculaire dans la fiabilité du matériel,
- de réaliser des programmes bien documentés établis sur une systématique,
- de disposer d'une équipe de "production de logiciel" bien organisée.

Placée aujourd'hui dans des circonstances identiques à celles ont nécessité le changement des calculateurs du CAUTRA III, la FAA s'oriente dans une voie différente associant,

- d'une part la reprise des programmes actuels sur des calculateurs hôtes

- par ailleurs, et simultanément, le lancement d'un système entièrement nouveau et entièrement repensé dans l'optique d'une automatization quasi totale allant délibérément très au-delà (en supposant tous problèmes résolus) de la voie beaucoup plus prudente que le groupe a pu tracer pour l'avenir à moyen terme.

### c) Le CAUTRA IV et au-delà

Pour sa part, la DNA reste aujourd'hui confrontée à nouveaux des choix qui vont s'imposer à court terme pour un ensemble de raisons :

- le passage du CAUTRA III au CAUTRA IV s'est fait au prix d'un freinage quasi radical de l'innovation pour éviter que l'évolution du CAUTRA III ne rende impossible son rattrapage par le CAUTRA IV,

- le calculateur choisi pour le CAUTRA IV (Mitra 425 puis 500) est promis à une vie limitée dès lors que de nouvelles fonctions devront être introduites pour faire reprendre la marche en avant du système. En effet on a déjà vu que ces calculateurs ont des performances d'ores et déjà trop restreintes et, qui plus est, que l'espoir antérieurement formulé de développement de cette gamme de calculateurs vers les puissances

supérieures est désormais réduit à néant en raison de l'abandon de cette filière par l'industriel. Bien entendu certains développements de programmes supplémentaires resteront possibles, mais au prix d'une sophistication croissante (et d'un coût croissant) de leur production et de difficultés croissantes de reproduction ultérieure sur un calculateur plus puissant doté de langages plus évolués et plus durables.

Il convient de rappeler aussi que les dispositions prises pour la conception et la production des programmes devront être repensées à l'avenir, dans la mesure où il ne s'agira plus seulement de réécrire des programmes correspondant à des fonctions bien définies ayant au préalable fait l'objet d'une mise au point opérationnelle (prouvée par le CAUTRA III) La marche progressive vers le futur (dans le cadre d'un projet d'ensemble ayant fixé les objectifs généraux) exigera l'introduction pas à pas de nouvelles fonctions dont les modalités pratiques et les compromis nécessaires ne peuvent pas être définis a priori et qui imposeront en conséquence de longues et minutieuses études et mises au point expérimentales.

La tentation sera cependant croissante de procéder à un changement de calculateur dans un avenir proche, ne serait-ce qu'à partir du moment, sans doute peu éloigné, où il apparaîtra à l'évidence que les surcoûts de programmation dus à la saturation et à la nature des calculateurs du CAUTRA IV dépassent le coût du remplacement de ces calculateurs par des calculateurs plus modernes, plus puissants et permettant d'utiliser des modalités de programmation plus aisées et plus performantes.

Le souci de disposer de matériels et de logiciels exportables à l'étranger ne sera pas non plus absent de ces préoccupations.

.../...

A titre indicatif de la tendance, on rappellera que le coût de programmation du CAUTRA III a été faible par rapport au coût de ses calculateurs (cf la stratégie de programmation choisie et le coût des calculateurs de l'époque), alors que les rapports se sont très largement inversés pour le CAUTRA IV pour lequel on peut citer les chiffres suivants (l'ensemble des 5 CCR) :

coût des calculateurs	70 MF
coût des périphériques (consoles des contrôleurs)	60 MF
coût du logiciel :	
. contrats à l'industrie	100 MF
. équipe de programmation de l'administration :	
50 personnes	p.m.

La proximité de ces échéances imposerait à elle seule la nécessité de définir les grands axes d'un projet d'avenir afin de concevoir maintenant et pour une durée suffisamment longue un dispositif adapté.



- 9/4 -

**Rapport des Sages  
( Annexe 7 )**



CONTRIBUTION A UNE THEORIE  
DU SYSTEME DE CONTROLE EN ROUTE ET  
DE SES PERSPECTIVES D'EVOLUTION

J. VILLIERS

Août 1984

1. Besoins et moyens
2. Pour une approche systématique des fonctions de contrôle
  - 2.1. Capacité et saturation
  - 2.2. Les actions de contrôle
3. Partage futur des tâches entre les hommes et le calculateur
  - 3.1. Les problèmes de la sécurité
  - 3.2. L'homme et la machine
    - 3.2.1. Tâches de contrôle et information
    - 3.2.2. Aptitudes respectives de l'homme et de la machine
4. Evolution des fonctions
  - 4.1. Le filtrage quantitatif
  - 4.2. Le filtrage qualitatif du trafic
  - 4.3. Le filtrage qualitatif de secours
  - 4.4. Le filtrage Radar
  - 4.5. Le filtrage de surveillance Radar automatique
  - 4.6. Le filtrage d'anticollision Radar automatique
  - 4.7. Le filtrage d'anticollision air/air

CONTRIBUTION A UNE THEORIE DU SYSTEME  
DE CONTROLE EN ROUTE ET DE  
SES PERSPECTIVES D'EVOLUTION

J. VILLIERS

Août 1984

1 - Les "besoins" et les moyens

L'analyse qui va suivre prendra en considération dans leur ensemble les moyens nouveaux susceptibles d'être progressivement mis en oeuvre (voir annexe 5), étant entendu que leur faisabilité est d'ores et déjà démontrée et que les progrès porteront d'une manière de plus en plus spectaculaire sur les coûts (voir annexe 6).

Traumatisée par le passé par des propositions de nouveaux "moyens" en quête d'utilisateurs, la communauté aéronautique préfère partir de ses "besoins supposés" et en déduire les "moyens" dont elle estime devoir disposer. Dans le contexte peu évolutif qui a prévalu au cours des dernières années les possibilités d'amélioration de détail pouvaient ainsi se révéler de proche en proche et être décrites d'une manière d'autant plus détaillée qu'elles ne changeaient pas sensiblement les habitudes d'exploitation du système.

Une telle approche pragmatique au fil de l'eau ne pouvait se justifier que lorsque les moyens disponibles étaient relativement figés.

.../...

## 2 - Pour une approche systématique des fonctions de contrôle

Il devient indispensable de repenser le système dans son ensemble et de bâtir une théorie susceptible d'embrasser l'avenir d'une manière aussi large et générale que possible.

A cette fin, il convient d'analyser d'abord les causes de la saturation du système, puis la nature des diverses actions de contrôle et enfin les tâches de contrôle.

### 2.1 Capacité et saturation du contrôle en route

L'organisation de l'aviation civile internationale (OACI) a défini l'A T C comme le moyen d'assurer "l'écoulement sûr et efficace du trafic". Cette définition parfaite sans sa généralité et sa simplicité couvre bien les deux objectifs assignés au système : la sécurité et l'efficacité.

L'efficacité optimale de l'A T C est obtenue chaque fois qu'il est possible de laisser écouler le trafic naturellement, tel qu'il se présente.

On peut dire en ce sens que le "contrôle" de la circulation aérienne est d'autant plus efficace qu'il est en mesure de s'abstenir de procéder à des actions effectives de "contrôle" (le mot "contrôle" étant pris dans son sens anglais impliquant une action de "commande").

Les actions contraignantes sur le trafic prises par le contrôle résultent de la "saturation" de l'espace aérien. Or la capacité de cet espace dépend moins des normes de séparation imposées aux avions (dès lors que, grâce au radar celles-ci ont été considérablement réduites) que de l'accumulation des tâches de traitement de l'information qui, à certains moments, dépassent les moyens disponibles.

Dans le contrôle manuel actuel c'est bien la surcharge (ou plutôt le risque de surcharge) des contrôleurs qui est la cause majeure de saturation.

## 2.2. Les actions de contrôle

Les actions de contrôle relèvent de deux catégories :

- les actions de nature tactique visent à procéder au radar à l'évitement entre deux avions : cette action à court terme n'est effectuée que pour assurer la sécurité des vols,
- les actions de nature stratégique peuvent être prises en amont de ces dernières pour assurer un meilleur écoulement du trafic et notamment pour éviter toute surcharge future éventuelle du contrôleur radar (1).

Il est souvent difficile dans un système donné de déterminer lequel des deux types d'actions (contrôle tactique radar, contrôle stratégique amont à moyen terme) constitue le goulot d'étranglement du système et détermine donc la "capacité" de celui-ci : l'un et l'autre sont liés.

Il est attristant de constater que beaucoup d'énergie est encre perdue actuellement pour confronter les opinions des tenants de la primauté du contrôle stratégique sur le contrôle tactique (ou vice versa) alors que, dans la réalité, le juste équilibre ne peut résulter que de la recherche de l'optimum économique (à sécurité égale).

En fait, plus l'échéance d'une action de contrôle est lointaine, plus est floue la connaissance des flux de trafic à venir et moins précise celle des positions actuelles et futures des avions.

.../...

---

(1) Le contrôleur radar ne peut pas conduire simultanément un grand nombre d'"évitements radar".

Le juste équilibre pour toute action stratégique ou tactique se déplacera donc avec l'évolution des informations et des moyens de traitement de l'information disponibles.

Cet équilibre pourra aussi être influencé par de nouveaux moyens d'action disponibles : fixation aux pilotes de rendez-vous précis en temps ou en niveau, voire même, action en temps réel sur leurs trajectoires par dialogue direct entre les calculateurs du contrôle et les calculateurs de bord.

En fait, le contrôle résulte d'une série de filtres successifs qui s'emboîtent comme des poupées gigognes dont la taille serait représentée par l'échéance de ses effets.

On peut ainsi trouver les actions successives suivantes classées dans l'ordre inverse des échéances auxquelles elles s'appliquent : (1)

- la planification (à échéance de 5 à 10 ans) portant sur la conception, l'organisation et la mise en oeuvre des moyens et des personnels,

- le filtrage quantitatif des flux (à échéance de l'heure environ) consistant à prendre les dispositions limitatives en nombre d'avions pour n'admettre dans chaque maillon du système qu'un flux de trafic inférieur à celui de sa capacité effective,

- le filtrage qualitatif des flux (à échéance de la quinzaine de minutes environ) consistant à organiser les flux en délivrant des autorisations de contrôle visant à organiser le trafic suffisamment à temps pour que le nombre des paires d'avions qui, par la suite, ne seront pas séparés selon les normes radar ne dépasse pas les possibilités d'action en temps réel du contrôleur radar,

.../...

---

(1) Voir aussi "La théorie des filtres" J. VILLIERS - Revue de navigation 1968.

- le filtrage radar (à échéance de 5 à 10 minutes) consistant à suivre en temps réel l'évolution des paires d'avions - et plus particulièrement celles qui n'ont pas fait l'objet d'une séparation radar certaine par le filtre précédent - pour détecter celles qui vont devoir faire l'objet d'un évitement radar.

Le nombre et la "taille" de ces poupées gigognes peuvent être profondément influencés par l'évolution des moyens disponibles.

De même chacune des fonctions élémentaires successives du contrôle ne peut être effectivement définie que si tous les éléments suivants sont soigneusement explicités :

- a) - la finalité de la fonction
- b) - les informations disponibles : en quantité, qualité, précision et fiabilité..
- c) - l'échéance de l'effet escompté des actions auxquelles elle donne lieu,
- d) - les processus de traitement de l'information impliqués, et notamment les critères d'optimisation fixés comme objectif,
- e) - la dépendance avec les tâches en amont et en aval ; cette dépendance commande la stabilité de l'ensemble.

La conception du système de demain ne pourra plus se contenter de définitions vagues et statiques, notamment pour son automatisation plus poussée.

#### Fonctions manuelles ou automatisées

Chacune de ces fonctions successives qui se commandent mutuellement peut être accomplie par l'homme ou par le calculateur.



Il existe par ailleurs une fonction, la coordination, qui résulte uniquement de la présence de l'homme dans le système.

La capacité limitée de traitement d'acquisition et/ou de traitement de l'information des maillons humains (et notamment les comparaisons de positions futures respectives des avions deux à deux) impose en effet le découpage de l'espace en cellules (dites "secteurs de contrôle") telles que le nombre d'avions qui s'y trouvent soit limité. Les actions décidées dans un secteur peuvent concerner un avenir tel que l'avion concerné évoluera alors dans un secteur suivant : le contrôleur responsable est ainsi amené à contacter au coup par coup son homologue de ce secteur.

Ces tâches de coordination introduisent un effet perturbateur (et donc une réduction de la capacité d'effectuer les "tâches de contrôle" proprement dites) d'autant plus important que, initiées à un moment donné par un contrôleur donné, elles perturbent à tout moment l'attention et l'activité intellectuelle d'un autre contrôleur.

Cette coordination au coup par coup ne saurait avoir la même efficacité que celle qui découlerait de la prise en considération permanente et en temps réel de l'ensemble de toutes les informations disponibles dans le Système, sans barrière artificielle entre les secteurs (cette dernière remarque s'applique tout particulièrement au contrôle stratégique en amont du contrôle radar). Dans la pratique, les contrôleurs disposent sur leurs positions non seulement des strips (1) (dits actifs) correspondant aux avions évoluant dans le volume qui leur est assigné, mais aussi des strips des avions qui vont entrer dans leur secteur : la "capacité" du secteur en est limitée d'autant puisqu'elle dépend de la quantité totale d'informations que le contrôleur est amené à prendre en compte.

.../...

---

(1) Bandes de papier placées sur des réglettes alignées par colonnes, sur lesquelles sont consignées les caractéristiques d'un vol contrôlé (identification, route, niveau, heures, etc...).

D'une manière générale on peut affirmer que la nécessité de coordination constitue une "pollution" qui a pour effet de réduire à la fois la capacité du système (saturation des contrôleurs) et son efficacité (par prise en compte par chaque contrôleur de sous-ensembles d'informations incomplètes ne permettant pas l'optimisation maximale des décisions).

Les tâches de coordination inhérentes à la présence de l'homme dans le système disparaîtraient bien entendu dès lors que les processus seraient automatisés.

### 3 - Partage futur des tâches entre les hommes et le calculateur

L'accroissement prévisible du rôle des calculateurs en fonction des nouveaux moyens disponibles dépendra de deux ordres de problèmes généraux liés respectivement :

- à la sécurité globale du système
- aux aptitudes respectives de l'homme et de la machine.

#### 3.1. Les problèmes de la sécurité

Le système actuel est d'ores et déjà un système hybride de traitement de l'information dans lequel l'homme et le calculateur constituent un ensemble indissociable. Il n'y a plus une information (sauf celles qui circulent par radio entre le contrôleur et les pilotes et vice versa) qui ne soit pas sous le contrôle du calculateur (acquisition, transmission, corrélation, mémorisation ainsi que choix du moment, de la forme et du lieu de visualisation...).

.../...

On peut dire, en ce sens, que le calculateur est déjà au coeur même de la "boucle de contrôle", même s'il n'élabore encore automatiquement ni des instructions de contrôle, ni même des suggestions de solution à l'intention du contrôleur.

Du point de vue de la sécurité le calculateur est aussi entièrement dans la "boucle de contrôle", dans la mesure où une panne de calculateur peut détruire pendant un certain temps l'outil de travail du contrôleur d'une manière plus ou moins totale selon l'architecture et les possibilités de reconfiguration du système en cas de panne partielle. Seul le strip en papier assure une pérennité indépendante du calculateur et présente de ce point de vue une valeur inestimable tant qu'il ne peut être remplacé par un dispositif électronique ayant une fiabilité suffisante (une telle fiabilité n'est cependant pas plus cruciale que celle de la chaîne radar et le problème pourrait être résolu par des dispositions comparables).

La participation plus active du calculateur aux processus de décision ne changerait pas la situation d'une manière déterminante du point de vue de la sécurité. Encore faut-il cependant prendre dûment en considération le "principe de non retour" qui mérite d'être évoqué : un contrôleur ne peut pas reprendre sans délais une situation qu'il n'a pas suivie auparavant d'une manière continue. Il s'ensuit que toute valeur ajoutée par le calculateur qui empiète sur la fonction de contrôle proprement dit doit avoir une fiabilité identique à celle de l'information elle-même.

Contrairement à une idée reçue, la fiabilité de la partie "temps réel" de système (y compris donc de l'aide à la décision) est plus aisée à réaliser que celle de la partie concernant les plans de vol puisque cette dernière a nécessairement besoin de l'historique pour fonctionner, c'est-à-dire d'informations mémorisées non renouvelables après une panne qui les détruirait ou interdirait l'accès aux avions.

Deux cas de nature fondamentalement différente doivent être analysés selon que la fonction considérée a un impact direct sur l'efficacité ou sur la sécurité :

a) la reprise manuelle éventuelle d'une fonction exercée par le calculateur est facilitée, et ne pose pas de problème de principe, s'il s'agit d'une fonction d'optimisation (qui porte sur l'efficacité du contrôle et non directement sur la sécurité). Pour ces dernières fonctions (et c'est d'autant plus le cas que la fonction porte sur des échéances plus lointaines) on peut, bien entendu, accepter une certaine détérioration provisoire de l'efficacité ; ces fonctions peuvent d'ailleurs être doublées en permanence dans le calculateur par une fonction de même nature mais dont les critères d'optimisation économique seraient assouplis au profit d'une plus grande stabilité des solutions. En cas de panne de la fonction de base normalement utilisée, les solutions dégradées peuvent faire l'objet d'un affichage par un circuit sûr et indépendant : leur mise en oeuvre par le contrôleur garantirait la continuité et la sécurité pendant le temps nécessaire pour que les mesures de protection assurées par ailleurs aient pris leur effet (détournement ou réduction du trafic devant entrer dans la zone touchée) en attendant que le système soit remis en état de marche normale.

La continuité ainsi obtenue par stockage et pérennité de l'affichage d'autorisations (clearances) stables, valables pour un temps suffisant, constitue une condition encore plus strictement nécessaire dans le cas où l'automatisation d'une fonction aurait permis une réduction corrélative des effectifs.

b) lorsqu'il s'agit de fonctions à effet à court ou très court terme, de telles solutions ne peuvent pas être envisagées : s'agissant alors de fonctions qui engagent directement la sécurité on est réduit aux seules mesures d'accroissement intrinsèque de la fiabilité du calculateur assurant la fonction correspondante.

Tel est le cas des fonctions d'évitement radar à court terme qui imposent, même si elles sont entièrement effectuées par l'homme, une fiabilité aussi absolue que possible de l'affichage radar (or toute la boucle, depuis les radars eux-mêmes, souvent éloignés du centre, jusqu'à l'affichage, est sous contrôle du calculateur).

On conçoit les précautions qui sont d'ores et déjà prises pour préserver de telles fonctions par mise en oeuvre de redondances de sous ensembles aussi indépendants que possible les uns des autres (ce qui devrait, et pourrait aussi être le cas de la fonction de mémorisation et d'affichage de clearances stables décrites ci-dessus). Cependant toute mesure et tout ensemble de mesures pour tenter de garantir une continuité et une fiabilité de service aussi absolue que possible rencontrent toujours des limites.

Quels que soient la sophistication du système, les précautions prises et le coût accepté, la fiabilité absolue ne peut pas être garantie ; il existera toujours de courtes périodes pendant lesquelles la sécurité dépendra de la protection par les lois du hasard qui font que, même non séparés selon les normes, les avions n'entrent pas pour autant en collision. Le calcul et l'expérience montrent que, dans l'état actuel des choses, la sécurité globale obtenue est largement compatible avec les objectifs de sécurité du transport aérien. Les moyens futurs doivent permettre encore d'améliorer les choses.

.../...

La mise en oeuvre éventuelle des systèmes d'anticollision automatique air/air (TCAS) est de nature à changer radicalement la nature du problème. Le système de contrôle au sol serait alors doublé par un système d'anticollision à la fois indépendant du contrôle au sol et de nature décentralisée (et donc à l'abri de pannes générales intempestives). Dans de telles conditions, l'anticollision air/air prenant automatiquement le relais en cas de dysfonctionnement au sol quelle qu'en soit la nature (y compris des erreurs ou omissions du contrôle) est susceptible de permettre de reculer les limites de sécurité bien au-delà du nécessaire.

Pendant un certain temps, avait bien eu lieu un débat qui avait pour objet de déterminer si, dans l'avenir, le contrôle au sol ne pourrait pas éventuellement disparaître au profit exclusif de l'anticollision air/air. Mais nul ne soutient encore une telle thèse. De même, les études ont montré l'extrême difficulté de cohabitation simultanée d'un système de contrôle au sol et de l'anticollision automatique air/air, en raison de leurs interactions mutuelles non maîtrisables pouvant donner lieu à déstabilisation ou "pompage". En cas de panne ou défaillance du contrôle au sol, un tel problème ne se pose plus : l'anticollision air/air assure le relais de sécurité souhaitable ; telle sera sa fonction essentielle qui permettra d'avancer dans le domaine d'une automatisation croissante, sans se heurter à d'insolubles problèmes de sécurité.

.../...

### 3.2. L'homme et la machine

#### 3.2.1. Tâches de contrôle et information

Le système de contrôle est un système de traitement de l'information et n'est que cela.

L'automatisation à son stade actuel ne porte que sur l'acquisition et la mise en forme, la corrélation, l'acheminement et la visualisation au profit des contrôleurs (en ce sens on a dit qu'elle ne concerne que les "tâches annexes"), mais ne porte pas encore sur l'élaboration des décisions.

La saturation du système résulte de la quantité maximale d'informations qu'un homme peut prendre en considération en temps réel.

Au fur et à mesure que seront disponibles une information plus complète et plus fine et des moyens d'actions ouvrant plus de degré de liberté, le système manuel, tel qu'il existe actuellement sera pris entre deux pièges consistant respectivement soit à ne pas tirer profit de toute l'information disponible, soit à utiliser toute cette information, mais en contribuant aussi à saturer les contrôleurs...et donc à diminuer la capacité effective du Système !

Ces deux perspectives étant également inacceptables, il convient pour trouver une issue de bien analyser les limitations qui proviennent de l'homme et de s'interroger sur le futur partage optimal des fonctions et des tâches entre les hommes et le calculateur.

### 3.2.2. Aptitudes respectives de l'homme et de la machine

Pour étonnantes et efficaces qu'elles soient, les aptitudes spécifiques du cerveau humain (et de ses prolongements sensoriels) ne sont pas pour autant universelles et présentent de graves lacunes. Sans entrer dans les détails, il est nécessaire d'analyser ce problème plus en profondeur.

L'homme excelle dans l'accomplissement de traitement de l'information de nature heuristique : l'homme est en effet capable, d'une manière rapide et efficace, de trouver, par induction quasi intuitive et immédiate, des solutions approximatives aux problèmes posés, puis de les affiner progressivement par répétition cyclique de l'analyse au fur et à mesure que les événements significatifs futurs qu'il a repérés se rapprochent dans le temps. Il est aidé dans l'accomplissement de ces processus par une mémoire sélective qui lui permet de ne retenir que ce qui est important à un moment donné et de rechercher l'information complémentaire le moment venu, à l'endroit qu'il d'ailleurs conservé aussi en mémoire. L'analyse d'un écran radar entre particulièrement bien dans cette catégorie de tâches (poursuites des échos et recherche des conflits).

Au prix d'une plus grande tension instantanée, l'homme est aussi capable de s'adapter aux circonstances les plus imprévisibles, de même qu'il peut faire face à des surcroûts plus ou moins passagers de tâches.

.../...



Enfin, sa fiabilité est exceptionnelle, en ce sens que ses défaillances (fatigue, "coup de pompe", etc...) préviennent par des signes précurseurs qui laissent le temps d'assurer une relève.

Par contre, l'homme peut être sujet à des fautes d'inattention ou d'appréciation, en conséquence même des processus heuristiques mis en oeuvre. Inversement, et fort opportunément, le calculateur, exempt de telles défaillances peut être utilisé à titre complémentaire pour la supervision de tâches de l'homme, en vue notamment de déclencher l'alarme avant que de telles situations ne deviennent irréversiblement dangereuses.

Si les aptitudes de l'homme sont tout à fait exceptionnelles pour interpréter des présentations analogiques (dont le radar est un exemple remarquable), elles sont, au contraire, bien modestes dès lors qu'il s'agit de manipuler en temps réel une grande quantité d'informations numériques et plus particulièrement s'il est nécessaire de procéder à des calculs ; pour s'en convaincre, il suffit de constater à quel point il est difficile d'effectuer de tête, et rapidement, une simple multiplication de nombres même à deux chiffres. Il est bien évident que l'homme est rapidement dépassé dès lors qu'il convient de traiter des matrices complexes portant sur des données nombreuses, nécessitant des calculs intermédiaires (par exemple les extrapolations de la position future des avions en fonction de leur position actuelle et de leurs vitesses dans les trois dimensions) et incluant des appréciations de probabilité (pour tenir compte de l'imprécision des données et de leur répartition statistique). Dans de tels cas l'homme reste capable d'exercer son jugement et de trouver une ou plusieurs "solutions" acceptables du point de vue de la sécurité et de la stabilité : il est relativement désarmé pour calculer des solutions optimales du point de vue de l'efficacité et de la capacité du système. Son approche heuristique des problèmes lui impose de négliger des informations dans la mesure même des limites de son aptitude à en prendre connaissance et à les traiter ; au-delà d'une certaine quantité d'informations, l'information supplémentaire devient, pour l'homme, de la pollution. Le phénomène n'apparaît pas encore d'une manière évidente

et déterminante dans le système ATC en raison du caractère sommaire des informations dont il dispose, et dont on se contente, et des contraintes encore limitées qui lui sont imposées en matière de trafic mais aussi d'efficacité et de coût. Tel ne sera plus le cas dans l'avenir, en particulier dès que le contrôle au sol pourra avoir accès à l'information disponible dans les cockpit des avions (vitesses précises, taux de montée et de descente, accélérations, vent, etc...) et sera en mesure de délivrer des autorisations complexes portant sur ces mêmes paramètres et modifiables en temps réel (avec accès direct ou indirect aux pilotes automatiques). On rappellera aussi que ce sont bien les limitations de l'homme en quantité d'information qu'il peut appréhender, qui conduisent à "sectoriser" l'espace et au prix d'une dégradation des possibilités d'optimisation des décisions, de tâches artificielles et contraignantes de "coordination", et d'un surcroît d'informations à analyser (aux "strips actifs" sur un secteur de contrôle s'ajoutent les strips inactifs ne correspondant pas à des avions effectivement en compte à un moment donné).

A la lumière de ces considérations générales, et compte tenu des perspectives d'évolution technique (évoquées en annexe 5) il devient possible d'entrevoir clairement les grandes tendances de l'évolution du système ATC.

#### 4 - Evolution des fonctions

Chacune des fonctions successives de contrôle qui se commandent mutuellement peut être accomplie par l'homme ou par le calculateur ou par une judicieuse combinaison des deux : les tâches des contrôleurs seront donc évolutives.

.../...

Dans l'avenir, le calculateur sera amené à participer réellement aux processus de contrôle.

La définition des tâches exigera donc une rigueur inconnue aujourd'hui dans la mesure où, face à ses problèmes et riche de son expérience, le contrôleur entraîné fait face à son trafic d'une manière empirique.

On ne peut que se réjouir de ce que les contrôleurs n'aient pas attendu les études théoriques pour s'adapter à l'évolution.

Il n'en reste pas moins que rien ne prouve :

- a) que les résultats de leurs pratiques soient optimaux,
- b) que les contrôleurs disposent des moyens les mieux adaptés aux informations actuellement disponibles et a fortiori à ceux qui le seront dans le futur
- c) enfin et surtout, que la formation des contrôleurs (quasi exclusivement axée sur le radar) soit bien conforme aux besoins actuels et futurs.

On se souvient à quel point la conception et la mise en oeuvre du stade d'automatisation atteint actuellement (ayant bénéficié d'améliorations, mais n'ayant guère subi d'évolution notable depuis plus de dix ans) ont été redevables aux études et expérimentations aujourd'hui interrompues sur les processus d'exécution effective des tâches par les contrôleurs.

Ce retard déjà préjudiciable et regrettable fera obstacle, s'il n'est pas rattrapé, à l'évolution qui pourra découler des nouveaux moyens disponibles.

.../...

Il est donc indispensable de sortir des chemins battus et des anciens cadres de pensée pour s'appuyer sur une théorie plus générale du contrôle étayée par des modélisations et des expérimentations dans le contexte du futur ; ces expérimentations nécessitent la participation active des contrôleurs.

Compte tenu des capacités respectives de l'homme et des calculateurs et de l'information et des moyens qui seront disponibles dans le futur (voir annexe 5) on peut prévoir l'évolution suivante des différents filtres

#### 4.1. Le filtrage quantitatif

Le filtrage quantitatif des flux de trafic est d'ores et déjà en cours d'automatisation et son efficacité croîtra en fonction du raffinement des prévisions (affinement de l'analyse statistique des situations antérieures à l'échelle de l'année, du jour, du mois ou de l'heure, resserrement des relations avec les compagnies et les aéroports à ces mêmes échelles temporelles). Son efficacité s'améliorera aussi d'une manière déterminante lorsque la "capacité" réelle de chacun des maillons du système sera mieux connue et pourra, par des dispositions appropriées, être plus finement adaptée dans le temps à la demande prévue.

La sortie de ce premier niveau de filtrage (c'est-à-dire les dispositions contraignantes sur le trafic qu'il conduit à mettre en oeuvre) mesure le degré d'adaptation de la capacité du système au besoin. Par ailleurs en cas de déficience soudaine du système, son action en temps réel, sans souci dominant de l'efficacité de l'écoulement du trafic devient essentiel pour la protection rapide de tout maillon défaillant du contrôle en temps réel.

#### 4.2. Le filtrage qualitatif du trafic

Le filtrage qualitatif du trafic en amont du contrôle radar présente du point de vue du traitement de l'information l'ensemble des caractéristiques suivantes :

- il porte sur une très vaste quantité d'informations qui vont tendre à s'accroître dans le futur ;

- il nécessite la prise en considération d'informations concernant des avions qui évoluent à un moment donné dans des secteurs de contrôle différents ;

- il impose des calculs difficiles (extrapolations) et des opérations portant sur des matrices complexes mettant en oeuvre des probabilités (en vue notamment de bâtir et de tenir à jour une table prévoyant l'heure et la probabilité des conflits radars à venir et donc de prévoir et de réguler la charge de travail effective d'évitement radar à exécuter) ;

- il met essentiellement en cause l'efficacité plutôt que la sécurité.

On rappelle que ce niveau de filtrage a pour objet d'intervenir sur les trajectoires des avions chaque fois que cela se révèle nécessaire pour :

- éviter avec la probabilité souhaitable toute surcharge de la fonction de contrôle radar (nombre d'évitements simultanés ou quasi simultanés),

- limiter au maximum les contraintes économiques imposées au déroulement le plus efficace des vols,

- adapter les flux aux contraintes du système (par exemple en cas de rupture entre une zone à contrôle radar et une zone à contrôle aux procédures ou en cas de limitations de trafic imposées par un centre voisin, etc...).

Une telle fonction de filtrage effectuée aujourd'hui par le contrôleur qui, dans le passé, était chargé du contrôle aux procédures (désormais sans objet en France métropolitaine) n'a guère donné lieu jusqu'à ce jour, notamment en Europe, à des analyses en profondeur sur la nature réelle de la tâche, sur les algorithmes en cause, ni sur les critères d'optimisation, etc...

Fort heureusement, les contrôleurs se sont spontanément adaptés à l'évolution et se sont révélés capables de pratiquer cette fonction sans qu'aient été préalablement explicités ses objectifs et ses modalités d'exécution (et sans que leur ait été prodiguée une formation spécifique (1)).

On notera que l'expérience a montré la complexité et l'importance de ces fonctions qui, contrairement à l'ancien "contrôle aux procédures" confié aux débutants, ne peuvent être bien exercées que par des contrôleurs confirmés et fort expérimentés, ayant notamment une grande expérience du contrôle "radar", ce qui n'est guère étonnant puisque leur rôle est notamment de réguler l'exercice.

La situation actuelle est très comparable à celle qui a été rencontrée dans le passé lorsqu'on a été confronté au problème de l'introduction des calculateurs au profit des fonctions de l'époque (radars et "procédures" lors de la conception initiale du CAUTRA.

A l'époque, comme aujourd'hui, les contrôleurs exerçaient leurs fonctions avec une grande maîtrise mais, s'ils "savaient faire", ils n'étaient pas capables par eux-mêmes de "faire savoir" les modalités de leur pratique.

On se souvient que l'analyse scientifique et expérimentale du travail de ces contrôleurs, selon la méthodologie développée spécifiquement à cet effet et avec la participation passionnée des contrôleurs intéressés, a permis non seulement de déterminer le partage optimum des tâches entre contrôleurs et calculateurs dans le CAUTRA actuel, mais a débouché aussi sur des améliorations de méthodes de travail et de procédure ainsi que sur l'élaboration d'une méthode d'enseignement programmée (la MICUP) servant de base à la formation à l'ENAC.

.../...

---

(1) La mise en oeuvre d'une telle formation présuppose d'ailleurs que la fonction ait fait au préalable l'objet d'une analyse en profondeur.

Tel est manifestement le cas aujourd'hui du contrôle qualitatif de flux pour lequel une action de recherche et d'expérimentation (avec les méthodes qui ont largement fait leurs preuves par le passé) devient urgente et indispensable.

Une telle opération, menée avec les contrôleurs eux-mêmes, permettra de révéler les processus en cause, leurs déficiences et les voies de progrès, les méthodes de formation et le rôle optimal susceptible d'être joué par le calculateur selon les informations disponibles aujourd'hui puis demain.

Parallèlement, il est indispensable de préciser par une approche et une démarche scientifiques et mathématiques les objectifs de cette fonction, d'étudier ses conditions de stabilité et de mesurer ses conséquences sur l'efficacité du contrôle en fonction des informations et de la qualité des informations disponibles.

L'ensemble des analyses effectuées ci-dessus aura sans doute convaincu du fait que le calculateur est, a priori, mieux adapté que l'homme à l'exercice de telles fonctions.

Il a dans ses mémoires toute l'information présentée aux contrôleurs puisque cette présentation est entièrement sous sa dépendance. Mais de surcroît, et contrairement au contrôleur, il a accès à tout instant à la totalité de ces informations quelle que soit leur source et quel que soit le secteur dans lequel évoluent les avions ; ces informations sont constamment à jour dans ses mémoires.

Par contre, dans les conditions actuelles, il est privé de la connaissance des autorisations ("clearances") délivrées par les contrôleurs, au moins dans le système français dans lequel il n'est pas demandé au contrôleur d'entrer (par clavier) de telles informations dans le calculateur.

De nouvelles perspectives techniques sont ouvertes pour l'avenir (et font l'objet d'études par le CENA) par la reconnaissance automatique de la voix humaine qui permettrait au calculateur d'acquérir l'information qui lui manque par analyse des messages échangés entre contrôleurs et pilotes (et vice versa).

Cependant, sans même le recours à une telle innovation, qui ne serait cependant nullement à négliger au moins dans les phases de transition, il est intéressant de noter que l'automatisation de la fonction de contrôle qualitatif des flux, dès lors qu'elle est supposée en service, fait disparaître l'écueil puisque, dans ces nouvelles conditions, c'est le calculateur qui deviendra maître des autorisations ("clearances") et qu'il se trouvera ainsi auto-informé.

Dans les phases intermédiaires dans lesquelles le calculateur se bornerait à proposer une (ou des) solution(s) au contrôleur (en laissant à ce dernier des possibilités de choix) il est évident que le choix du contrôleur peut facilement faire l'objet de l'information du calculateur grâce à la facilité de manipulation des présentations cathodiques à désignation tactile (type "digitatron" d'ores et déjà utilisé aujourd'hui (1)).

Le problème va donc disparaître de lui-même. La voie est d'ores et déjà ouverte à des applications pratiques en ce domaine qui deviendra vitale dans les années à venir.

.../...

---

(1) On notera que le digitatron développé pour le CAUTRA semble avoir constitué à l'époque la première application de ce procédé de dialogue interactif en cours de vulgarisation.



On notera enfin qu'entre le filtrage quantitatif et le filtrage qualitatif qui le suit, il n'existe pas de barrière normative. Au fur et à mesure que la quantité et la qualité de l'information croîtront et qu'il sera par ailleurs possible d'agir d'une manière plus fine en temps réel sur le déroulement des vols (clearances complexes, accès plus ou moins direct au pilote automatique, fixation de rendez-vous en plan et en niveau) le filtrage quantitatif sera amené à agir d'une manière croissante sur les plans de vol, tandis que le filtrage qualitatif tendra à appréhender l'avenir avec un préavis de plus en plus important.

#### 4.3 Le filtrage qualitatif de secours

On a déjà exposé qu'en cas de panne affectant la fonction de filtrage qualitatif du trafic, il est nécessaire que puisse être affiché le résultat d'un filtrage du trafic de même nature, mais effectué selon des critères qui privilègient la sécurité et la stabilité au détriment éventuel de l'efficacité des vols. La "sortie" de ce filtre est tenue à jour en temps réel par le calculateur, mais n'est visualisée qu'en cas de besoin.

#### 4.4 Le filtrage Radar

Le filtrage Radar, effectué en aval de la fonction décrite ci-dessus, est communément dénommé "surveillance Radar". Il consiste en l'analyse cycliquement renouvelée des pistes Radar pour détecter les conflits ultérieurs éventuels entre les avions.

Bien préparée et protégée par les fonctions amont, cette fonction est parfaitement bien définie dans ses objectifs.

.../...

Elle présente de plus les caractéristiques suivantes :

- elle porte sur une quantité limitée d'informations qui peuvent être affichées sur un support unique (écran Radar) où elles sont constamment et automatiquement tenues à jour (1),
- elle porte sur des informations concernant des avions évoluant dans le secteur considéré ou à sa frontière immédiate,
- elle n'impose pas de calculs complexes et se prête bien à l'approche heuristique,
- elle met directement en cause la sécurité plutôt que l'efficacité

Cette fonction entre particulièrement bien dans la catégorie de celles dans lesquelles l'homme excelle.

#### 4.5 Le filtrage de surveillance Radar automatique

La fonction de surveillance Radar est sans aucun doute la fonction qui sera maintenue manuelle le plus longtemps. Il s'agit de fait de la seule fonction mettant directement en cause la sécurité. Le principe de non retour impose que cette fonction soit ou manuelle ou automatique, mais dans ce dernier cas sans retour manuel possible.

Il n'en reste pas moins que la fonction manuelle peut être assistée par un filtre automatique qui révèle les avions en conflit Radar potentiel. Surveiller plus particulièrement (l'utilisation de couleurs sur l'écran Radar pourrait permettre de préciser l'urgence et le degré d'attention que le contrôleur a intérêt à apporter au suivi de certaines paires d'avions).

.../...

---

(1) l'entrée automatique des clearances permettra l'information des pistes et clearances à jour (notamment en niveau).

La connaissance des "clearances" par le calculateur est évidemment nécessaire pour la mise en oeuvre d'un tel filtre avec un taux de fausse alarme raisonnable.

#### 4.6. Le filtrage d'anticollision Radar automatique

Compte tenu des déficiences potentielles de l'homme (erreurs, inattentions...) on a déjà mis en service un filtre automatique qui, en aval de la fonction de surveillance Radar, constitue un "filet de sauvegarde" efficace.

Ce filtre agit avec une anticipation aussi faible que possible (au moins égal cependant au temps de réaction du contrôleur à l'alarme et au temps de développement effectif de l'action d'évitement).

Dans l'état actuel ce filtre est conçu en faisant des compromis entre le nombre d'alarmes intempestives et le nombre d'alarmes non signalées.

Au fur et à mesure que les informations s'amélioreront (et notamment que le calculateur connaîtra les clearances) le fonctionnement de ce filtre sera de plus en plus satisfaisant.

#### 4.7. Le filtrage d'anticollision air/air

Dernier des filtrages, et dernier recours, essentiellement en cas de panne ou d'erreurs d'appréciation du système au sol, le filtrage d'anticollision air/air (TCAS) apportera à l'édifice une contribution qui, pour n'agir qu'exceptionnellement, n'en présentera pas moins des conséquences déterminantes sur la conception, l'architecture et le coût du système ATC, ainsi que sur son degré possible d'automatisation compte tenu des problèmes de sécurité.

