

L'ATM : 20 ans d'effort et perspectives

Jean-Marc Alliot et Dominique Colin de Verdière (CENA)
Journée d'études : vers l'automatisation du vol et de sa gestion
Toulouse – Onera – 26 novembre 2003

Résumé

Le système de gestion de la circulation aérienne est un système complexe par bien des aspects : il comporte un grand nombre d'agents humains et techniques, il doit pouvoir traiter des aéronefs ayant des performances et des équipements variés; c'est un système ouvert dont l'arrêt rapide dans un état sécuritaire est impossible.

Depuis 40 ans l'informatique a été introduite dans la gestion de la circulation aérienne. L'automatisation a porté sur le traitement plan de vol et radar pour distribuer l'information pertinente aux contrôleurs sur les secteurs et faciliter les transferts des vols entre secteurs. Elle a permis de faire passer le trafic, mais a peu augmenté la productivité des contrôleurs. Dans les 10 prochaines années des outils d'assistance au contrôleur et au pilote permettront d'augmenter la sécurité et la capacité dans une mesure que l'on ne sait pas évaluer.

L'automatisation plus poussée a fait l'objet de nombreux projets de recherche (Aera aux USA, Arc 2000 Eurocontrol, Phare, ...).

L'évolution de l'ATM et de son automatisation sont indissociables. Deux scénarios nous semblent envisageables :

- l'un déterministe centralisé basé sur une gestion des trajectoires 4D destinés à des espaces encombrés et aux compagnies aériennes cherchant l'optimisation des vols et la ponctualité et
- un autre basé sur l'avion autonome pour des espaces peu denses et l'aviation générale.

Cette évolution se fera par petites étapes en prenant en compte les opportunités de développement, La question de la planification de ces évolutions est posée : peut-on définir a priori la voie du changement ?

1. Introduction

La fonction principale du contrôle de la circulation aérienne est d'assurer un écoulement sûr et ordonné des vols, en évitant les abordages entre aéronefs en l'air ou au sol. Sa raison d'être est avant tout la sécurité.

L'automatisation consiste à transférer à un système (totalement ou partiellement) des tâches effectuées jusqu'à présent par un opérateur humain. Tant que l'automatisation n'est pas totale, l'opérateur garde un rôle et on parlera d'assistance automatisée.

La simple apparition du radar peut être déjà considérée, dans ce cadre, comme une forme élémentaire d'automatisation. L'automatisation n'est donc pas une opération « tout ou rien », mais bien un lent processus qui a ses racines aux origines du contrôle aérien et continue depuis sa lente progression. Le questionnement que nous devons avoir n'est donc pas « pour ou contre l'automatisation », mais plutôt : « Pourquoi et comment automatiser ».

2. Près de 40 ans d'assistance automatisée

Depuis le début des années 1960 la navigation aérienne a développé une assistance automatisée aux contrôleurs dans les centres de contrôle En-route de la navigation aérienne dans le cadre du projet Cautra (Coordinateur Automatique du Trafic Aérien) [Poirot95].

Cette assistance automatisée a eu pour but principal de faciliter le travail du contrôleur à l'aide d'un recueil, d'un traitement, d'une distribution et d'une présentation des informations au contrôleur. Dès les années 60, des psychologues-ergonomes ont analysé le travail du contrôleur et ont été associés à la conception des outils qui ont été développés avec la technologie du moment. Le projet Cautra a suivi l'évolution des matériels informatiques : gros calculateurs centralisés pour les 3 premières générations, mini-calculateurs à partir des années 80, stations de travail et serveurs au cours des années 90.

La Figure 1 retrace les évolutions passées du trafic et sa prévision, ainsi que celles du nombre de secteurs de contrôle et du nombre de contrôleurs dans les centres en-route. L'assistance automatisée a peu augmenté la productivité globale annuelle des contrôleurs et ce malgré des investissements de plus en plus importants en matériels informatiques et surtout en développement des logiciels. L'informatique n'aurait-elle contribué qu'à rendre gérable des situations plus complexes avec la densité du trafic ? L'ATM reste un service dans lequel les coûts de personnels représentent près de 65% des coûts pour l'en-Route.

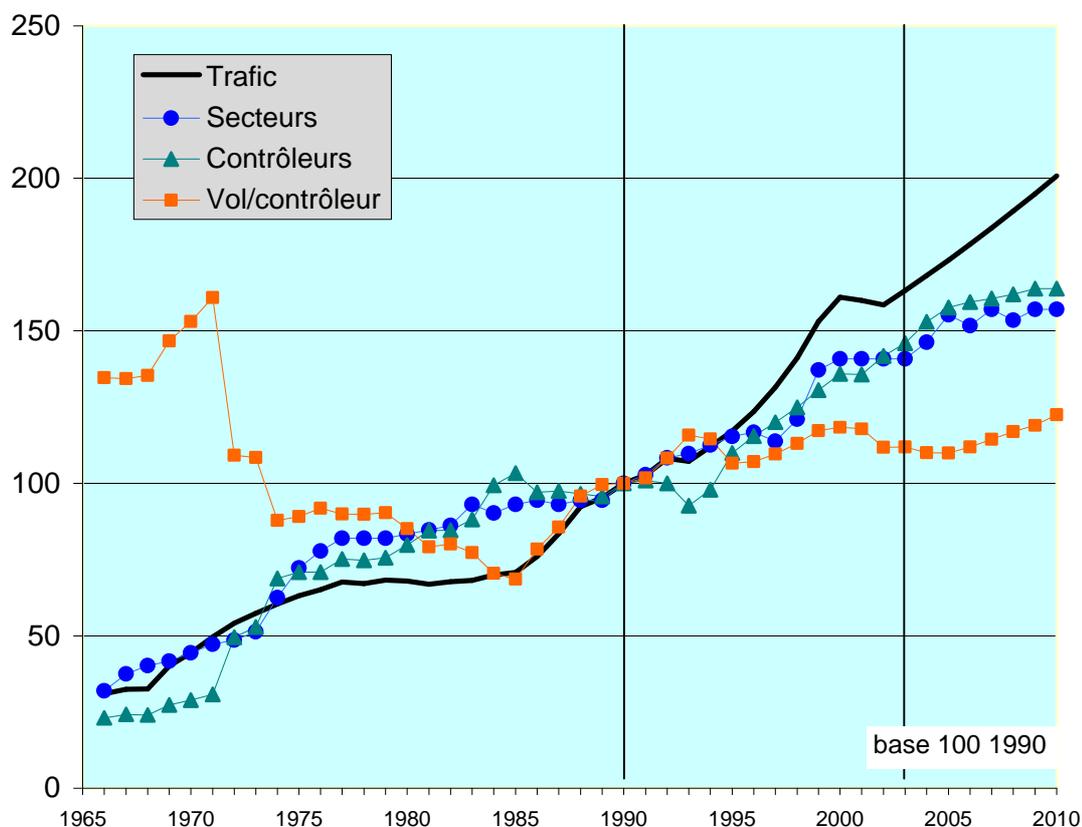


Figure 1 : Trafic, secteurs et contrôleurs

1960	Cautra 1	Traitement plan de vol Impression des strips
1965	Cautra 2	Traitement radar
1970	Cautra 3	Image radar renseignée Digitatron Filet de sauvegarde
1980	Cautra 4	Coordination automatisée Régulation de trafic national
1990	Cautra 4.1	Maestro - Aide au séquençement Régulation européenne du trafic (CFMU)
2000	Cautra 4.2	ODS-nouveau poste de travail

Tableau 1 : Historique Cautra

L'état de l'assistance automatisée aujourd'hui.

Aujourd'hui les principales fonctions du Cautra sont :

- le recueil, le traitement, la distribution et la présentation des informations, position, vitesse et identification des aéronefs, recueillies par les radars;
- le recueil des informations plan de vol, effectué aujourd'hui au plan européen, le traitement de ces informations et la distribution de bandes de papiers, appelées 'strips', comportant les informations nécessaires pour le contrôleur et la coordination lors du transfert d'un avion d'un secteur de contrôle à un autre;
- des filets de sauvegarde permettant d'avertir le contrôleur avant un risque de d'abordage à court terme (30 sec) ou de collision avec le sol en particulier en approche près des aéroports;
- enfin depuis quelques années une première fonction d'aide à la décision par une aide au séquençement à l'arrivée sur les grands aéroports (Maestro).

Les fonctions de régulation sont depuis 1996 traitées de manière centralisée en Europe.

Après 40 ans d'automatisation, on constate que l'assistance automatisée a permis de faire passer le trafic en sécurité, bien que la capacité nécessaire ait été disponible avec quelques années de retard. L'évolution a toujours été lente et progressive. Les transitions douces, par fonctions ou systèmes élémentaires ont été acceptées si elles apportaient quelque chose au contrôleur – confort, diminution de la charge de travail ou sécurité.

L'expérience a montré que l'expression des besoins réels et les spécifications des systèmes sont difficiles. La fiabilité est une exigence très importante à la fois pour la sécurité, mais aussi pour la régularité. La validation des fonctions d'assistance automatisée est une activité très importante, mais l'impact sur les performances est difficile à anticiper et ceci rend leurs sélections difficiles.

3. Le futur de l'ATM

3.1 Les projets de recherche sur l'automatisation avancée

Des projets de recherche ont eu pour objet des systèmes entièrement automatisés. Ceux-ci ont été évalués souvent en simulation arithmétique et parfois en simulation temps-réel avec des hypothèses plus ou moins fortes. Nous en présentons ici quelques uns parmi les principaux.

3.1.1 Des systèmes centralisés au sol

1) Le premier projet d'automatisation « poussée » est le **projet AERA** (Automated En-Route Air Traffic Control), [Niedring83][Niedring89] développé au début des années 80 à la MITRE Corporation, aux Etats-Unis. Ce projet devait se réaliser en trois phases :

La première phase AERA1 consistait à prévoir les trajectoires des avions en fonction des intentions des pilotes et à détecter d'éventuelles violations des minima de séparations ou de restriction de flux pour les vols existants ou désignés par un contrôleur. C'était donc avant tout un **outil d'information** qui ne proposait pas de solution aux opérateurs.

La seconde phase AERA2 proposait de nouvelles aides comme une liste de « résolutions recommandées ». Néanmoins, la responsabilité de séparer les avions relevait en dernier ressort du contrôleur, AERA2 était un **outil d'aide à la résolution**.

AERA3 devait implanter un système de résolution automatique. La structure d'AERA 3 était hiérarchique. On comptait trois composants : l'ASF (Automated Separation Function) séparait les paires d'avions, le MOM (Maneuver Option Manager) assurait le respect du contexte global pour l'ASF (qui ne savait gérer que des paires d'avions séparées du reste du trafic) et l'AMPF (Airspace Manager Planning Functions) s'assurait que MOM pouvait opérer avec succès en prévenant les trop fortes densités de trafic. AERA3 ne résolvait les conflits que dans le plan horizontal. Les algorithmes envisagés pour le MOM n'ont jamais été évoqués dans les rapports disponibles. AERA3 n'a pas abouti et n'a apporté aucune réponse viable aux problèmes techniques de l'automatisation.

2) Le **projet ARC2000** [Arc2000-89] [Arc2000-93] a été développé au Centre Expérimental d'Eurocontrol de Brétigny à la fin des années 80. Il s'agit du premier concept qui soit allé, avec un certain succès, jusqu'au stade de l'expérimentation en simulation arithmétique. Le principe d'ARC2000 était d'affecter à chaque avion un tube en 4 dimensions (x,y,z,t) respectant son plan de vol. Dès qu'un nouvel avion se présentait, son tube optimal était calculé en considérant les tubes précédemment affectés comme des contraintes fixes. Autrement dit, un tube déjà affecté n'était pas remis en cause. Le principal défaut d'ARC2000 était son manque de robustesse et l'irréalisme de certaines de ses hypothèses (capacité à prévoir parfaitement une trajectoire 4D sur des durées d'au moins une heure). ARC2000 a été arrêté au début des années 90.

3) Le **projet CATS** [Granger2002] a été développé au CENA dans les années 90 sur l'idée d'une résolution globale centralisée. Ce projet a défini la notion de cluster, ou ensemble d'avions interférant dont les trajectoires doivent être calculées simultanément. Les manœuvres mises en œuvre pour résoudre les conflits restent simples, et les algorithmes prennent en compte les incertitudes sur les vitesses horizontales et verticales des avions. Ces algorithmes tentent de trouver des

manœuvres optimales à l'aide d'algorithmes d'optimisation globale. CATS a été testé sur du trafic réel en simulation arithmétique. Le système est capable de résoudre l'ensemble des conflits au dessus du niveau 60 pour une journée de trafic complète.

3.1.2 Des systèmes distribués : avions autonomes et séparations embarquées

Les méthodes de résolution décrites dans ce paragraphe sont radicalement différentes de celles évoquées précédemment. Nous n'avons vu jusqu'ici que des projets basés sur des systèmes au sol. Le projet ATLAS (Air Traffic Land and Airborne Systems), étude de la Commission Européenne/DGXIII, est parmi les premiers projets à avoir envisagé l'hypothèse d'avions autonomes ou hybrides en 1993. Plusieurs méthodes se sont appuyées sur cette hypothèse :

1) La plus ancienne est celle étudiée par Karim Zeghal à l'Onera [Zeghal94]. Il introduisit la notion de coordination d'actions grâce à différentes forces qui s'exercent sur les agents, dans notre cas, les avions. Dans la mesure où le processus individuel ne nécessite que des informations locales à l'appareil, il peut fonctionner de façon autonome à partir d'une perception de son environnement. Il reste néanmoins de nombreux problèmes à résoudre : il faut maintenir une densité suffisamment faible d'avions (ces méthodes échouent relativement souvent lorsque le nombre d'avions est trop important), ou encore savoir donner des manœuvres simples au pilote.

2) **Le projet FREER** (Free-Route Experimental Encounter Resolution) est né en 1995 au Centre Expérimental d'Eurocontrol. L'idée est de généraliser les règles de résolution du vol à vue par des EFR (Extended Flying Rules). Les concepteurs de FREER ont complété les règles de l'air de façon à pouvoir d'une part prendre en compte toutes les configurations de conflit à deux avions, et d'autre part définir un ordre total sur l'ensemble des avions dès lors qu'on s'intéresse à trois avions ou plus. Par exemple, si trois avions arrivent simultanément sur le même point en suivant des routes Nord, 120 degrés et 240 degrés, la règle de priorité à droite ne permet pas de définir l'ordre de priorité pour ces trois avions. Le fonctionnement de FREER dans ce contexte n'a jamais été précisément décrit.

3) **Le projet FACES**, développé au CENA, résout le problème de la coordination des avions par un mécanisme de distribution de jetons. Cet algorithme permet de construire un ordre total pour l'ensemble des avions, même si ceux-ci ne sont pas en visibilité directe les uns des autres. Une fois cet ordre défini, on utilise un algorithme classique en robotique (A*) pour résoudre les conflits. FACES a été testé en simulation arithmétique sur du trafic réel. Il permet de résoudre l'ensemble des conflits sur la France au dessus du niveau 300.

3.1.3 Que nous ont appris ces projets ?

Au cours des dernières années, de nombreuses tentatives ont donc été faites pour définir des concepts menant à une automatisation totale. Force est de constater que l'on ne peut, avec le recul, que les classer dans deux catégories.

D'une part, certains de ces projets, et ils furent hélas trop nombreux, se sont contentés de définir ce qu'il faudrait faire, sans jamais dire comment le faire. Cette approche, fort peu scientifique, n'aura pas apporté grand chose à l'ATM. D'autre part, les projets qui ont tenté l'évaluation de nouveaux algorithmes, ils ont surtout permis de mesurer, et c'est là leur principal bénéfice, les nombreuses difficultés qu'il resterait à surmonter si l'on souhaitait jamais aller vers une automatisation totale.

Ils ont en particulier bien montré les biais introduits par les simulations arithmétiques, et même les simulations temps réel. Trop de projets utilisent comment système de prévision de trajectoire les mêmes modèles que ceux employés pour faire se déplacer les avions pendant les simulations. Ce biais, qui ne se rencontre d'ailleurs pas seulement dans les projets d'évolution futuriste, rend la prévision de trajectoire « parfaite » par définition, puisque la prévision ne peut que coïncider avec la réalité. Enfin, même dans les projets qui ont tenté de prendre ce facteur en compte, un examen approfondi des hypothèses montre à quel point elles sont encore peu réalistes : pilotes ayant un comportement parfait, automatismes sol-bord totalement compatibles et couplés, etc.

Mais ils n'auront pas été inutiles. En effet, on a pu tirer un certain nombre d'enseignements de ces études, enseignements qu'il faut savoir ne pas négliger. Elles ont aidé, par exemple, à mieux évaluer de façon précise les bénéfices que l'on peut attendre, en terme de capacité et d'efficacité, d'une évolution conséquente des méthodes de contrôle ; elles ont permis de valider (et aussi d'invalidier) certains algorithmes élémentaires de détection / résolution ou synchronisation d'avions ; elles ont également montré que les systèmes centralisés sont plus capacitifs que les systèmes autonomes, etc... Mais surtout, ces projets ont permis de dégager plus nettement les deux directions possibles d'évolution de l'ATM : la navigation 4D et les systèmes autonomes.

3.2 Scénarios pour le futur

Deux grandes voies semblent ainsi devoir s'imposer : l'une vers des avions plus autonomes assurant eux-mêmes leur séparation, l'autre vers des avions gérés de porte à porte le long d'une trajectoire 4D.

Un scénario possible est une spécialisation des espaces, des aéroports et des aéronefs en fonction de ce mode d'opération [UCT2003] [Graham2003] :

- l'un pour un avion autonome comparable au VFR d'aujourd'hui demandant des équipements peu coûteux et laissant beaucoup de liberté et de responsabilité au pilote (projet SATS (Small Aircraft Transport System) de la NASA par exemple),
- l'autre pour des avions de ligne très bien équipés privilégiant l'optimisation de la route et la ponctualité (Projet Phare tube 4D et Boeing ATM).

Ces transitions se feront progressivement depuis le système actuel pour certains espaces, liaisons ou aéroports désignés, en fonction de l'équipement des aéronefs et des systèmes au sol.

Ces deux voies exigent une assistance automatisée importante. Dans le scénario 4D, il s'agit pour le sol d'organiser le trafic en prenant en compte les besoins des usagers (trajectoire, horaire) et pour les avions de pouvoir respecter le contrat avec le sol. Pour les avions autonomes, il s'agit au minimum d'acquiescer les informations à présenter au pilote pour maintenir les séparations et si possible d'assister le pilote dans les manœuvres pour maintenir les séparations, voire de les assurer automatiquement.

La feuille de route pour les 15 ou 20 prochaines années est décrite dans de nombreux documents. (Eurocontrol Stratégie ATM 2000+ [Eurocontrol2002], Operational Evolution Plan de la FAA [FAA2002], plan IATA [IATA2003]) et des concepts opérationnels [Eurocontrol2003] [ICAO2002] ont été élaborés. Dans tous ces concepts

les deux voies précédentes sont envisagées, mais les opérateurs restent au cœur du système (Human-centered system).

L'assistance automatisée constitue une partie importante de ces plans, mais on sait qu'elle a ses limites ; le **système d'information global** et le partage des informations entre les acteurs (ATM, compagnies aériennes, aéroports) constituent la base de cette automatisation. Ces informations plus complètes et plus précises sont fournies aux opérateurs et permettent en diminuant l'incertitude de rendre le système plus efficace. Cette évolution est liée aux nouveaux systèmes de surveillance (radar mode S, ADS-B) et au développement de liaisons de données numériques entre systèmes bord et systèmes au sol.

Le **coût des systèmes** est réparti entre le sol et le bord. Aujourd'hui l'ATM impose des systèmes embarqués relativement simples (transpondeur, radio) et les coûts des systèmes sol sont répartis en fonction de la capacité contributive – la masse des aéronefs ou le nombre de passagers. Le prix des équipements embarqués nécessaires pour assurer les nouvelles fonctions (FMS-4D, Data-Link, ADS-B, ASAS...) sera déterminant pour l'évolution.

Pour les systèmes sols leur complexité et leur coût devraient conduire à la réduction du nombre de produits. La question est de savoir quel sera l'équilibre entre les exigences d'interopérabilité et les coûts d'une part, le poids de la transition et les exigences des opérateurs d'autre part.

4. Automatisation

Même si nous avons maintenant une meilleure idée de ce que pourrait être l'avenir de l'ATM, il nous faut encore poser ce qui est finalement la véritable question : faut-il vraiment automatiser de façon radicale ? Il semble difficile de faire l'économie d'un examen critique de ce que peut apporter l'automatisation et coûter en termes de moyens humains et financiers, mais aussi de risques inévitablement liés aux évolutions d'un système aussi complexe que le système ATM.[Wickens97][Wickens98][Meyer2003]

4.1 Choix des fonctions à automatiser

La disponibilité de technologies a toujours été une motivation pour pousser l'automatisation, mais elle ne suffit pas en soi. On ne doit pas automatiser parce qu'on sait ou croit savoir le faire ; la connaissance des caractéristiques de l'opérateur humain doit permettre de choisir les fonctions les plus aptes à améliorer les performances du système Hommes-Machines.

L'homme et la machine sont fondamentalement différents : le simple fait de savoir identifier les fonctions « automatisables » ne permet pourtant pas de déterminer quelles sont celles qui devront être automatisées. En dehors même des choix stratégiques concernant les concepts du futur système ATM, il ne faudra jamais oublier deux principes fondamentaux pour toute automatisation : on a souvent écrit, et à juste titre, que la transition devait passer par une bonne compréhension des tâches du contrôleur afin de concevoir des algorithmes acceptables. Mais il ne faudra pas non plus oublier dans ce processus qu'un ordinateur n'est qu'une machine qui ne saurait reproduire un comportement humain. L'homme et la machine sont fondamentalement différents. Il faudra donc exploiter cette complémentarité et non tenter de la faire disparaître.

La machine saura mieux utiliser les informations disponibles, pour diminuer l'incertitude. Le fonctionnement de l'ATM repose essentiellement sur la gestion de cette incertitude – la trajectoire future d'un aéronef est mal connue par les systèmes ATM. Le système ne s'améliorera que par une meilleure connaissance des trajectoires au travers de la connaissance de la position, des intentions de vol et de la trajectoire prédite ou contractée. De plus en plus d'informations sont et seront disponibles sous forme numériques et les procédures actuelles ne permettent pas d'utiliser la qualité de celle-ci. On ne pourra les introduire dans le processus qu'au travers de l'automatisation. La machine est aussi supérieure à l'Homme dans des tâches de surveillance de paramètres en continu.

4.2 Impact sur les performances

L'automatisation de l'ATM peut améliorer les performances dans 3 domaines :

- **la sécurité** en éliminant les erreurs humaines ou en diminuant leur impact, par une meilleure information, des filets de sauvegarde et une certaine supervision de l'homme par la machine ;
- **la capacité**, en utilisant la machine comme « suppléant » ou « collaborateur » de l'homme ;
- **l'efficacité** de la gestion du trafic, en réduisant les pénalités imposées aux avions (routes directes, niveaux optimaux, flexibilité es horaires et ponctualité). On sait par exemple qu'un système totalement « Free Route » permettrait d'économiser 10% sur le coût du carburant.

Notons cependant qu'il faudra savoir quel critère apparaît comme plus important que les autres au moment du choix. Pour donner un exemple caricatural, le concept « Supersector/SectorLess » du Centre Expérimental Eurocontrol s'attache avant tout à améliorer la capacité de l'espace au détriment de l'efficacité des trajectoires, au contraire d'un concept basé exclusivement sur les avions autonomes qui privilégie lui l'efficacité au détriment de la capacité.

4.3 Domaines d'application

L'automatisation concerne les tours de contrôle sur les aéroports, les approches ou l'En-route qui sont les 3 types d'organisme de contrôle du trafic aérien , mais aussi la gestion de l'espace aérien, la gestion des flux de trafic et de la capacité, l'information aéronautique ou l'information de vol. Enfin les systèmes embarqués contribuent eux-mêmes à l'automatisation du système. Tous ces domaines sont liés au travers du système d'information et des liaisons de données.

4.4 L'objet ou le niveau de l'automatisation

Le niveau d'automatisation correspond au degré de délégation de l'homme vers la machine dans le processus. Il va du fonctionnement entièrement manuel au fonctionnement entièrement automatique. Les premiers niveaux consistent à déléguer à la machine des tâches annexes essentiellement le recueil et la distribution d'informations (plan de vol, radar), puis d'assistance aux coordinations, la supervision des Hommes et des systèmes (filets de sauvegarde, alarme). Les niveaux ultérieurs sont les aides à la décision (détection et proposition de résolution de problèmes) et à planification (gestion des arrivées et des départs, gestion des flux) ; un pas est

clairement franchi à partir de la proposition de résolution, même si l'opérateur doit approuver la solution, et au-delà le système impose sa solution et la transmet automatiquement. La possibilité de ne pas utiliser les fonctions automatisées et de se placer dans un mode moins automatisé, est un aspect important dans l'acceptabilité du système. Le Tableau 2 présente cette progression et les fonctions associés. et le Tableau 3, en annexe, présente l'historique et le futur envisagé classé par domaine et par impact sur les performances.

Acquisition, transmission, lissage, intégration et filtrage, présentation de l'information	Plan de vol Prévision de trajectoire Filtrage d'information Position des avions (radar, ADS-B) Paramètres avions descendants Intention de vols
Échanges d'information entre acteurs	Coordination automatique > transfert de fréquence Transmission des instructions
Supervision des systèmes et des Hommes	Filets de sauvegarde Cohérence plan de vol sol-bord Monitoring de trajectoire
Aide à la décision et planification	Planification multisecteurs Détection de conflit Agenda du contrôleur Prévision de charge de travail Formulation de la résolution Négociation de trajectoire
Prise de décision	Résolution de conflit

Tableau 2 : Outils d'assistance automatisée dans l'ATM

4.5 Les difficultés

Les difficultés de l'automatisation de l'ATM viennent à la fois de caractéristiques inhérentes au système mais aussi de la nécessité qu'il y a à concevoir l'évolution en terme de transition continue.

Des caractéristiques spécifiques

Le système ATM implique de nombreux agents, à bord et au sol, hommes et machines, parfois de pays différents. Cela en fait un système à la fois complexe et ouvert, qui n'a rien à voir avec, par exemple, un avion, système fermé par excellence.

À l'intérieur de ce système, la gestion des incertitudes occupe une place toute particulière ; celles-ci ont deux origines. La première est liée au comportement de l'opérateur (pilote et contrôleur), à son temps de réaction et surtout à la non connaissance de son intentionnalité, et ne pourra disparaître qu'en supprimant totalement cet opérateur de la boucle. La seconde est liée à l'environnement (vent, orages..) ou aux machines elles-mêmes (défaillances techniques, mais aussi connaissance imparfaite des systèmes équipant spécifiquement chaque avion).

Enfin, le système ATM ayant pour but de produire de la sécurité, les problèmes juridiques de responsabilité sont centraux dans son fonctionnement. Il ne faut pas s'étonner que, pendant de nombreuses années, certains constructeurs de matériel informatique aient refusé de fournir du matériel pour les systèmes ATM au même titre que pour les systèmes de contrôle des centrales nucléaires. Le rôle et les

responsabilités des différents acteurs devront donc être clairement affichés et les problèmes juridiques liés à la délégation de responsabilité résolus. Quel degré d'automatisation la société est-elle prête à accepter sur des systèmes de cette complexité ? Sommes-nous prêts à accepter non plus de simples erreurs humaines d'exécution de l'opérateur de première ligne mais les erreurs des concepteurs eux-mêmes ?

Une transition continue

La transition doit être prise en compte dès le début de la conception de nouvelles fonctions. On ne peut pas aujourd'hui concevoir un système ATM à partir de zéro ; les avions, comme les centres au sol, ne peuvent pas tous être équipés et disposer des fonctions nouvelles le même jour. Cette nécessaire évolution continue a des conséquences qu'il faut bien comprendre si l'on souhaite comprendre les problèmes d'évolution du système ATM.

Il est tout d'abord difficile d'évaluer l'intérêt d'une amélioration élémentaire, le non-synchronisme de l'équipement des avions peut « gommer » l'intérêt immédiat d'une évolution. Mais surtout, cette évolution peut entraîner une modification des méthodes de travail des opérateurs, et donc une déqualification (temporaire) qui rendra très difficile l'évaluation en simulation et peut même avoir, pendant une certaine période en tous cas, des conséquences négatives sur la capacité lors d'une mise en service opérationnel (on peut penser par exemple au passage de la Corta à la CFMU pour la gestion des flux). Plus grave, il peut même être difficile d'évaluer, pour les mêmes raisons, l'impact d'une telle évolution sur la sécurité du système. Or, dans le transport aérien, en cas de défaillance, un état sécuritaire peut être long à atteindre, car contrairement à d'autres modes de transport, l'arrêt immédiat d'un avion en vol est impossible. On ne peut donc se permettre d'introduire dans le système des perturbations susceptibles de modifier de façon conséquente son niveau de sécurité.

N'oublions pas en particulier que toute évolution du système entraîne une évolution des métiers des opérateurs humains. L'automatisation doit ainsi se préserver d'un certain nombre de risques associés à de nouvelles formes d'erreur, à la défiance et à l'excès de confiance des opérateurs, à leur perte de compétence et de savoir-faire, à la modification de leur conscience de la situation. Plus grave, la reprise par l'homme en cas de défaillance des automatismes peut être impossible car trop complexe. Saurons-nous former un opérateur, maintenir sa compétence, le motiver, dans le cadre de ce nouveau métier que serait un « contrôle par exception », où l'homme ne serait plus là que pour pallier à la défaillance des automatismes ?

Un autre des problèmes est le maintien permanent de l'interopérabilité et de la compatibilité ascendante de l'ensemble des systèmes ATM. Il s'agit là d'une des raisons majeures de la lenteur de l'évolution de l'ATM. Mais il faut aussi se poser une question plus cruciale : le développement de normes suffira-t-il à garantir cette interopérabilité qui, aujourd'hui, dans bien des cas, est assurée par les hommes ?

Enfin, l'ensemble des éléments que nous venons de citer explique ce qui constitue à son tour une difficulté en soi : le coût de développement des systèmes ATM. Les exigences de sécurité (qui demandent une fiabilité sans faille), les problèmes d'acceptabilité et d'utilisabilité par les opérateurs, la nécessaire interopérabilité et la compatibilité ascendante ont fini par entraîner une croissance exponentielle des budgets de développement. Cette croissance pourra-t-elle se poursuivre, ou faudra-t-il ralentir un rythme qui semble déjà trop lent à certains ?

4.6 Le processus de développement

Dans le processus de la définition à la mise en œuvre, en passant par le développement et la validation, la participation des futurs opérateurs est indispensable car ce sont eux qui s'approprient ou non le système et décideront finalement du changement. Au cours de ce processus on constatera que les fonctions développées ne sont pas utilisées, ou utilisées d'une manière non prévue. D'où l'importance d'une validation par étape pour éviter de se trouver dans une impasse après des investissements importants.

Ce processus devrait aboutir à la définition des fonctions, des procédures, du mode d'emploi et des méthodes de travail, des algorithmes, de l'interface homme-machine et sol-bord et de la formation associés.

5. Conclusion

Le futur du système ATM est celui de son automatisation, car l'ATM n'est que traitement de l'information. La seule voie possible est celle de l'évolution ; il n'y a pas eu et il n'y aura pas de révolution dans le transport aérien pour des raisons de sécurité et d'économie. Toute solution doit, dès le départ, intégrer la transition. Sa construction s'est faite et se fera par petites étapes successives (« *Do a little, Test a little, Implement a little* »). On ne peut pas changer tout du jour en lendemain ; à chaque étape il faut s'assurer que le changement est sûr. Les coûts très élevés des développements et de mise en œuvre (logiciels, procédures, validation, formation) poussent également à ce mode d'évolution.

Cette évolution doit-elle être orientée par une vision à long terme (concept opérationnel), ou bien se déploie-t-elle en fonction des circonstances de manière opportuniste et alors doit-on garder une direction d'évolution ? Un plan semble nécessaire pour

- assurer un minimum de synchronisation entre les évolutions des différents systèmes sol et les systèmes bord et
- préparer les étapes suivantes en assurant une compatibilité ascendante nécessaire pour les opérateurs et les systèmes sol et bord en minimisant les efforts de formation et d'adaptation

La question est de savoir comment mener cette évolution et cette automatisation de manière sûre et efficace dans un système complexe comportant une multitude d'agents machines et humains évoluant à des rythmes différents.

Cette évolution se fera avec les opérateurs, les contrôleurs et les pilotes. Elle sera basée sur les caractéristiques propres de l'Homme et de la machine, dans le cadre d'une automatisation centrée sur l'Homme (« *human-centered* »). La réduction de l'incertitude permise par les nouvelles technologies sera la base de l'évolution du système en permettant un mode de fonctionnement de la gestion des séparations de plus en plus stratégique pour le transport commercial. Gestion de trajectoires 4D et avions autonomes, voire l'hybridation des deux, sont le futur de l'ATM. L'évolution vers les avions autonomes dans les espaces à forte densité est peu probable à cause de la complexité des algorithmes distribués à mettre en œuvre. On assistera probablement à une ségrégation des trafics en fonction de leurs équipements et du service attendu. Les coûts des systèmes embarqués seront déterminants dans l'évolution.

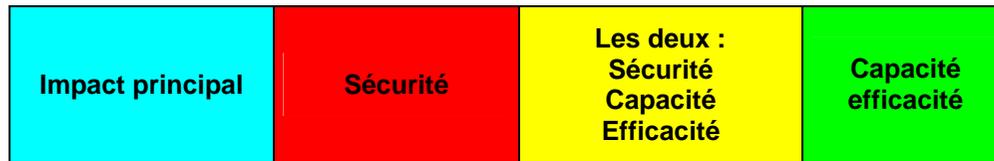
Pour terminer quelques aphorismes de sources incertaines :
« *L'incertitude est la raison d'être du contrôleur* » et est très mal gérée par les automatismes.
« *Dans les systèmes automatisés l'Homme est là pour corriger les erreurs humaines* ».
« *L'Homme est l'avenir de l'automatisation* »
« *Que le monde serait beau, si l'Homme n'existait pas* »

Liste des abréviations

ACAS	Airborne Collision Avoidance System
ADS-B	Automatic Dependent Surveillance – Broadcast
AMAN	Arrival Manager
APW	Area Proximity Warning
AREA	Automated En-Route Air traffic control
ASAS	Airborne Separation Assistance System
ASM	Air Space Management
ATFM	Air Traffic Flow Management
ATM	Air Traffic Management
Cautra	Coordinateur Automatique du trafic aérien
CDM	Collaborative Decision Making
CFMU	Central Flow Management Unit
CORTA	Cellule d'Organisation et Régulation du Trafic Aérien
DMAN	Departure Manager
EFDP	European Flight Data Processing
ERATO	En-Route Air Traffic Organizer
FMS	Flight Management System
FUA	Flexible Use of Airspace
(E)GPWS	(Enhanced)-Ground Proximity Warning System
MONA	Monitoring Aid
MSAW	Minimum Safe Altitude Warning
MSP	Multisector Planning
MTCD	Medium Term Conflict Detection
MTCR	Medium term Conflict Resolution
ODS	Operational Display System
SATS	Small Aircraft transport System
SMGCS	Surface Monitoring, Guidance and Control System
STCA	Short Term Conflict Alert
STPV	Système Traitement Plan de Vol,
STR	Système de Traitement Radar
SWIM	System Wide Information Management
TCAS	Traffic alert and Collision Avoidance System

Tableau 3 : Les fonctions d'assistance automatisée dans l'ATM

	1960	1970	1980	1990	2000	2005	2010	20xx
En Route	STPV Traitement Plan de vol Radar	Corrélation Identification STR Traitement radar	Coordination automatique STCA filet anti-collision		ODS Poste de travail du contrôleur APW- Alerte pénétration de zone		EFDP Nouveau traitement plan de vol ERATO Outils coopératifs MTCD Détection de conflit à moyen terme MONA - surveillance de trajectoire MTCR- résolution de conflit	
Approche			Gestion des vols SIGMA	MSAW Alerte terrain AMAN Gestion des arrivées Maestro	STCA Filet de sauvegarde approche	DMAN Gestion des départs		
Tour			Radar sol		SMGCS Surveillance sol		A-SMGCS Surveillance, guidage	
Bord			GPWS	FMS	TCAS -Système anticollision embarqué	E-GPWS	4D FMS ADS-B- ASAS p1	ASAS Full-self separation
ATFM			Previ -Gestion nationale		Gestion des flux européens - CFMU		ATFM Gestion tactique des flux MSP Multisecteur planning tactique ?	
ASM						FUA Gestion flexible de l'espace		
Information					Sysco Messages de coordination	CDM -Prise de décision collaborative	Info Aéronautique intégrée	SWIM Gestion globale de l'information



Bibliographie

- [Arc2000-89] Fred Krella and others, Arc 2000 scenario (version 4.3), Eurocontrol, April 1989,
- [Arc2000-93] Xavier Fron, Bernard Maudry, Jean-Claude Tumelin,, Arc 2000 : Automatic Radar Control, Eurocontrol April 1993,
- [Eurocontrol2002] ATM strategy 2000+ Eurocontrol 2002
- [Eurocontrol2003] Operational Concept Document V2. Eurocontrol,,August 2003
- [FAA2002] NAS Operational Evolution Plan, V5.0, FAA, decembre 2003
- [Graham2003] Robert Graham, Eric Hoffman, Christian Pusch, Karim Zeghal, Absolute versus Relative Navigation: _ Theoretical Considerations from an ATM Perspective, ATM seminar Budapest, June 2003
- [Granger2002] Géraud Granger, Détection et résolution des conflits aériens: modélisation et analyse}, CENA-LOG/INPT, 2002
- [IATA2003] IATA position on the global air traffic management (ATM) operational concept and the need for an ATM global implementation roadmap, ANC11/WP49 , Montréal, September 2003
- [ICAO2002] ICAO ATMCP, Global Operational Concept Document, 2003
- [Meyer2003] Edmund Meyer, Controller Acceptance of New Air Traffic Control (ATC) Automation, June 2003 -
<http://ffp1.faa.gov/approach/media/controller/controller.htm>
- [Niedring83] W.P. Niedringhaus, I. Frolow, J.C. Corbin, H. Gisch and N.J. Taber and F.H. Leiber,Automated En Route Air Traffic Control Algorithmic pecifications, FAA,1983,DOT/FAA/ES-83/6
- [Niedring89] W.P. Niedringhaus, Mathematical formulation for planning automated aircraft separation for AERA3,FAA, 1989, DOT/FAA/DS-89/20
- [Poirot95] Sophie Poirot Delpech, Biographie du Cautra – naissance et développement d'un système d'informations pour la circulation aérienne, these de doctorat de sociologie – Paris I, 1995
- [Post2003] Joseph Post, David Knorr, Free Flight Program Update - The CNA Corp., Alexandria, VA, Federal Aviation Administration, Washington, DC ATM seminar Budapest June 2003
http://ffp1.faa.gov/approach/media/pdfs/ATM2003_RandD.pdf
- [UCT2003] A. Zellweger et al.,Airspace and Airport concepts – report of the University Concept Team, NASA, Volpe NTSC, February 2003,
- [Wickens97] Christopher D. Wickens, Anne S. Mavor, James P. McGee, Editors; Flight to the Future: Human Factors in Air Traffic Control - Panel on Human Factors in Air Traffic Control Automation, National Research Council National Academies Press 384 pages, 6 x 9, 1997
<http://www.nap.edu/catalog/5493.html>
- [Wickens98] Christopher D. Wickens et al., The Future of Air Traffic Control: Human Operators and Automation : National Academies Press, 1998
<http://www.nap.edu/catalog/6018.html>
- [Zeghal94] Karim Zeghal, Vers une théorie de la coordination d'actions. Application à la navigation aérienne.,Université Paris VI, Décembre 1994.