

Le concept de Free Flight rendrait les avions autonomes

PEUT-ON SUPPRIMER LE CONTROLE AU SOL ?

NICOLAS DURAND ET JEAN-MARC ALLIOT

Pour résoudre le problème de saturation de l'espace aérien, des chercheurs ont proposé des projets de contrôle automatisé, qui à ce jour n'ont pas abouti.

Une technique séduisante, fondée sur le Free Flight, serait pourtant en mesure d'assurer la sécurité d'avions autonomes. Son principe ? Quelques règles et algorithmes simples que nous avons développés et testés.

Le fait semble désormais bien établi, du moins en Europe : la congestion du ciel est en passe de devenir le facteur limitant de la croissance exponentielle du trafic aérien. Pourtant, la densité volumique d'avions reste faible en dehors des zones aéroportuaires...

Comment expliquer ce paradoxe ? Vient-il - comme le pensent aujourd'hui nombre d'experts - des faiblesses du contrôle aérien ? Ainsi, Philippe Jaquard, ancien directeur de la navigation aérienne, écrivait lui-même en 1998⁽¹⁾ : « La véritable saturation observée parfois n'est pas celle du ciel, c'est celle du système de contrôle. » Alors que l'automatisation à bord des avions a progressé à grands pas grâce notamment aux technologies FMS* et Datalink*, force est de constater que les méthodes de travail dans le petit monde de l'ATC (Air Traffic Control) n'ont guère évolué au cours des dernières années, et ce, quels que soient les pays.

Régulation du trafic. Pourquoi ? Rappelons tout d'abord quelques notions élémentaires : le but premier du contrôle du trafic aérien est d'assurer la sécurité des aéronefs, le but second d'assurer le meilleur écoulement possible du trafic. Il existe bien sûr des systèmes de régulation. Ainsi les compagnies doivent déposer à l'avance des plans de vol, qui contiennent certaines informations fondamentales, comme l'heure de départ, l'origine et la destination, le niveau de vol et la route aérienne souhaités. Ces informations sont aujourd'hui prétraitées au niveau européen par le CFMU*. Cet organisme impose des créneaux horaires pour les décollages afin de limiter l'encombrement de certaines zones de l'espace : il s'agit de fait d'une régulation. Celle-ci est fondée sur l'adaptation de la demande (des compagnies) à l'offre, c'est-à-dire à la capacité des différents centres de contrôle. Limitons-nous au contrôle en route.

Les deux contrôleurs qui ont la charge d'un secteur de contrôle doivent garantir qu'à tout instant deux aéronefs quelconques seront séparés. Pour mémoire, la séparation réglementaire est actuellement de 1000 à 2000 pieds (300 à 600 m) dans le plan vertical et de 5 à 8 milles nautiques (9 à 15 km) dans le plan horizontal. Si ces deux conditions sont simultanément violées, les spécialistes parlent de « perte de séparation » ou de « conflit ». Deux avions susceptibles de se retrouver dans une situation de perte de séparation sont dits en conflit potentiel. La charge de travail d'un contrôleur provient donc de trois facteurs : la surveillance du trafic, la détection-résolution de conflits et la coordination avec les secteurs voisins. On observe que la performance des contrôleurs se dégrade brutalement à partir d'une certaine charge de travail : ce phénomène est appelé « mur de la capacité ». L'ouverture de nouveaux secteurs sur une zone donnée permet alors de maintenir le niveau du trafic, voire de l'augmenter. Mais ce processus est limité, car au-delà d'un certain seuil, les secteurs de plus en plus petits ne permettent plus d'effectuer les résolutions de conflit, et rendent prépondérante la charge de coordination.

Dès le début des années 1980, la MITRE corporation*, un organisme notamment financé par l'aviation civile américaine, s'intéresse à la possible automatisation de la gestion du trafic aérien⁽²⁾. L'idée sous-jacente de ses deux projets, AERA II et AERA III*, était d'augmenter la capacité de l'espace en faisant disparaître de la boucle le premier facteur limitant ou en tout cas reconnu comme tel, à savoir l'opérateur humain.

Un système automatisé semblait en effet pouvoir effectuer de façon bien plus efficace les tâches de détection de conflits entre avions, puis de résolution, qui paraissent être de nature strictement calculatoires : il s'agissait donc de supprimer purement et simplement l'intervention du contrôleur.

Ces projets ont échoué. Pourquoi ? Pour deux raisons complémentaires : d'une part les moyens technologiques disponibles à l'époque (informatique, Data-Link, etc.) étaient insuffisants. Mais il y eut de plus des erreurs méthodologiques et conceptuelles. La complexité des problèmes fut largement sous-estimée. On pensait par exemple que, pour résoudre un conflit impliquant simultanément quatre avions, on pouvait séparer ce conflit en deux sous-problèmes indépendants.

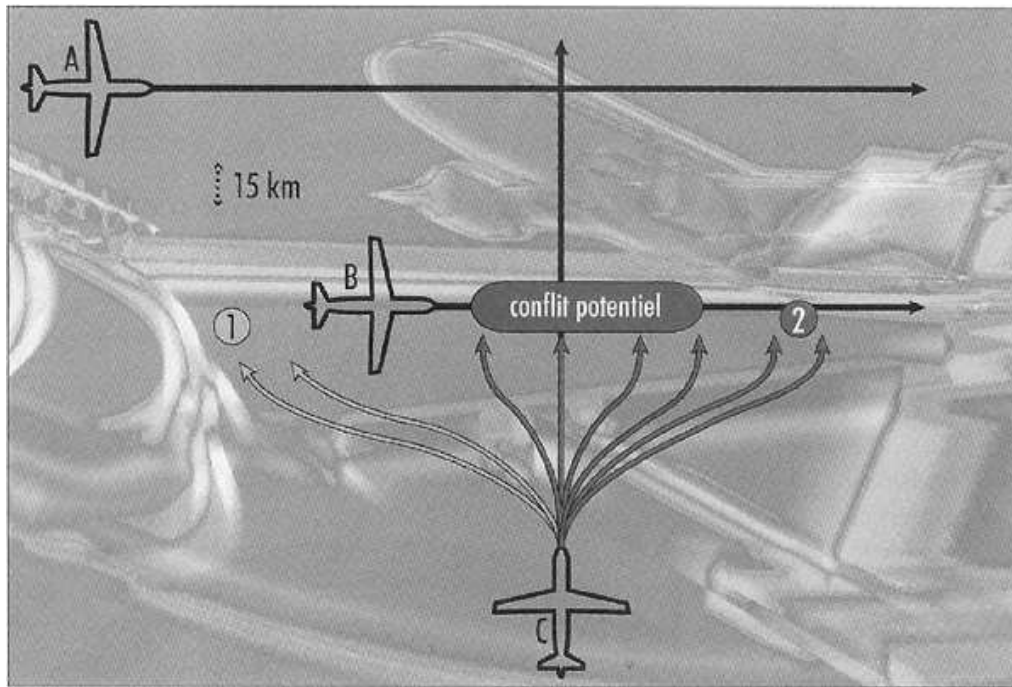


Figure 1. Pour simplifier la résolution de conflits on prend des marges très importantes entre aéronefs dans le plan horizontal.

Ci-dessus, elles ne sont pas suffisantes car une déviation de B pour éviter C peut entraîner un conflit entre A et B : (A,C) et (B, C) ne sont pas des paires indépendantes. La complexité du problème est aussi renforcée par le fait que le mouvement de C devant ou derrière B fait intervenir des solutions mathématiques (1) et (2) disjointes.

La séparation des avions par paires indépendantes est une contrainte du contrôle automatisé. Un problème difficile à résoudre

Il s'agit là d'une technique employée par les contrôleurs pour résoudre des conflits trop complexes, surtout quand leur charge de travail est importante, mais c'est aussi une des causes essentielles de la faible capacité de l'espace. Car séparer les avions par paires est un problème au moins aussi compliqué que la résolution de conflits! Qui plus est, les avions se déplaçant à des vitesses élevées, il est indispensable d'utiliser différents niveaux de vol pour garantir la séparation (ce qui est coûteux pour les avions) ou de prendre des marges très importantes dans le plan horizontal. En effet, si les marges prises ne sont pas suffisantes, on se retrouve dans des situations telles que celle représentée sur la figure 1. Les avions A et B sur des routes parallèles, séparés dans le plan horizontal par une distance supérieure à 15 km, ne sont pas en conflit. En revanche, les avions A et C forment une paire d'avions en conflit potentiel (ils vont se croiser), ainsi que les avions B et C. Une déviation de C pour éviter B peut lui permettre d'éviter A, mais une déviation de B pour éviter C peut entraîner un conflit entre A et B. Les paires (A,C) et (B,C) ne sont donc pas indépendantes et on parle alors de cluster à trois avions.

Trajectoires et conflits. Si séparer les avions par paires indépendantes est relativement difficile et diminue à terme la capacité du secteur, mettre au point un algorithme qui prendrait en compte simultanément les n avions présents et résoudrait globalement le problème n'est pas plus aisé. Prenons le cas simple où $n = 2$ (par exemple la paire d'avions C de la figure 1) : on peut montrer mathématiquement que l'espace des trajectoires admissibles se compose de deux parties indépendantes (1) et (2) suivant que l'avion C passe devant ou derrière l'avion B. On ne peut pas passer continûment de la zone (1) à la zone (2) ; il faut utiliser deux fois un algorithme de résolution pour trouver la trajectoire optimale : une fois dans la zone (1) et une fois dans la zone (2). Si le conflit implique simultanément n avions, l'espace des solutions admissibles comprend $2[n(n-1)/2]$ parties indépendantes, ce qui rend impossible l'application exhaustive d'un algorithme classique dès que n devient grand. Il faut alors explorer d'autres voies.

Le projet ARC2000 du centre expérimental d'Eurocontrol, aujourd'hui abandonné, a montré que l'on peut réaliser du contrôle automatique dans un cadre restrictif : les avions doivent pour cela être équipés de FMS-4D⁽³⁾. Le FMS-4D est un système de nouvelle génération qui devrait permettre un suivi de trajectoire précis suivant les 3 dimensions spatiales x,y,z et le temps t . Les techniques utilisées dans ARC2000 dérivait de méthodes géométriques classiques. Les algorithmes d'ARC2000 s'attachaient avant tout à construire des trajectoires qui supprimeraient les conflits potentiels, mais ils ne trouvaient en général pas la trajectoire la « meilleure », c'est-à-dire la plus courte possible. Si ce projet a été abandonné après cinq années d'étude, c'est essentiellement parce qu'il nécessitait des systèmes pas encore disponibles, comme les FMS-4D, et avait un taux d'échecs trop élevé. D'autres

techniques d'optimisation (notamment l'optimisation stochastique) ont été testées et ont permis de résoudre de façon complètement automatisée des situations de conflits sur une journée complète de trafic en France, hors des zones d'approche⁽⁴⁾.

Mais le problème majeur reste entier: comment assurer la transition du système actuel vers un système complètement automatisé (hors atterrissage et décollage) ? Il semble inévitable de maintenir l'opérateur humain dans le système de contrôle pendant un temps qui peut encore être long : en effet, tous les avions ne seront pas équipés en même temps de systèmes permettant l'automatisation et certaines zones de l'espace seront plus difficiles à automatiser que d'autres. Or pour des conflits faisant intervenir plus de deux avions, les algorithmes mis en œuvre, dans les systèmes automatiques, du fait même de leur efficacité, bâtissent des solutions impossibles à imaginer ou même à valider par les opérateurs humains. L'inévitable mélange des deux techniques de contrôle apparaît donc plutôt utopique.

Pour éviter l'écueil de la transition, une solution séduisante a vu le jour dans les années 1980, à l'époque de la grande mode de l'intelligence artificielle : construire un modèle, dit « cognitif », du contrôleur dans ses modes d'appréhension des paramètres du conflit puis utiliser ce modèle dans un ordinateur pour mettre en place des outils de filtrage de l'information et d'assistance électronique. Cette méthode a l'immense avantage dans son principe, d'être facilement intégrable au système de contrôle actuel, car elle s'emploie à changer le moins possible les modes opératoires existants.

Le Free Flight est dans une certaine mesure moins touché que les autres systèmes par le problème de la transition

Elle est cependant sous les feux de deux critiques. D'une part, les limitations maintenant bien connues propres aux approches dites « expertes » ou « cognitives » : problème de généralisation des maquettes (on sait résoudre 80 % des problèmes, les plus faciles, et l'on ne parvient jamais à résoudre les 20 % restants), faillibilité du système expert, différence radicale des modes de raisonnement et de calcul de l'être humain et de l'ordinateur; tout cela rend l'implantation de tels modèles coûteuse et souvent inefficace^(5,6).

D'autre part, ces techniques laissant l'homme totalement en charge de toutes les décisions, elles se contenteront de repousser le « mur de la capacité » dont nous parlions plus haut, sans faire disparaître les causes fondamentales de son existence. Il s'agit donc d'une approche essentiellement à court ou moyen terme; elle aura certainement des applications dans le cadre de la conception des nouveaux outils de contrôle et permettra ainsi d'améliorer le confort des opérateurs, mais les gains en termes de capacité resteront très probablement limités.

Mise en place progressive. Il existe pourtant une autre voie : le Free Flight ou vol sans contrainte. En opposition radicale avec les projets classiques tendant à maintenir le contrôle au sol, le concept de Free Flight est soutenu par deux arguments que nous allons rapidement détailler.

1) Il permettrait de simplifier la transition : on passerait du système actuel à un système de type Free Flight par la mise en place progressive de zones Free Flight encerclant les zones contrôlées. De fait, il existe déjà des zones Free Flight, comme l'espace saharien, où la densité est suffisamment faible pour que tout contrôle soit inutile. On pourrait alors progressivement les étendre à des zones plus denses en améliorant les techniques de résolution embarquées.

2) Ce serait une extension d'un système mis en place dans les années 1980, 1990 : le concept ACAS (Airborne Collision Avoidance System), et de son implantation dans les aéronefs avec le TCAS (Traffic Alert and Collision Avoidance System, prononcez TiCas). Le TCAS est un système d'anti-abordage embarqué : chaque avion détecte les avions qui l'entourent ; le TCAS fournit au pilote une information de trafic, et, en fonction de règles extrêmement simples, donne des avis de résolution en cas de risque d'abordage imminent. Même si l'on a toujours souligné que le TCAS n'était en aucun cas un système de contrôle, mais bien exclusivement un système d'anti-abordage, sa bonne acceptation et ses résultats ont certainement fait beaucoup, consciemment ou inconsciemment, pour promouvoir la possibilité d'un système de contrôle embarqué autonome.

Horizons de visibilité. En fait, les problèmes à résoudre sont beaucoup plus complexes qu'on ne le pense. En effet, on se retrouve à nouveau confronté à la séparation des conflits en paires indépendantes. Or le TCAS utilise une technique extrêmement simple : il cherche indépendamment une solution pour chaque avion et regarde ensuite s'il existe un dénominateur commun. Cette logique peut aisément être mise en défaut dans le cas où plusieurs avions seraient à séparer. Mais l'horizon de détection du TCAS est suffisamment faible (moins d'une minute) pour que cela ne se produise presque jamais. Dans le cadre d'un système qui n'est plus un système d'anti-abordage mais un système de contrôle, il devient indispensable d'avoir un horizon de visibilité et de détection plus important: les valeurs envisagées dans l'état actuel de la technologie sont de l'ordre de 90 Nm (170 km).

Dans le Free-Flight, le pilote n'exécute pas l'ordre défini par le contrôle au sol mais par un ordinateur embarqué

Dans ce cadre, les conflits potentiels à n avions deviennent fréquents (ce n'est pas parce qu'on se « voit » qu'il est facile de s'éviter ...) et les techniques élémentaires du TCAS ne pourront s'appliquer. En outre, les avions n'ont, dans un système décentralisé, qu'une vision locale de leur environnement, limité au rayon de 90 Nm qui les entoure. A peut être en conflit avec B, lui-même en conflit avec C, sans que A puisse avoir même conscience de l'existence de C et des contraintes qu'il engendre.

Parmi les projets de Free Flight européen, les travaux de recherche de Karim Zeghal menés à l'ONERA modélisent les avions par des particules élémentaires soumises à différentes pseudo-forces⁽⁷⁾. Des forces attractives attirent les particules vers leur destination, et les particules exercent les unes sur les autres des forces de glissement permettant de maintenir les séparations. Le système ne garantit malheureusement pas de façon certaine les séparations sur un horizon temporel fixé, résiste assez mal aux fortes densités d'avions et impose des modifications permanentes de trajectoire que le pilote ne peut maîtriser. Il implique donc que l'algorithme d'évitement et le FMS soient couplés, sans possibilité d'intervention du pilote.

Un autre projet développé par le centre expérimental d'Eurocontrol, le projet FreeR (pour Free Route Experimental Encounter Resolution) tente par contre de maintenir le pilote dans le processus de décision en lui permettant, grâce à un outil de visualisation des conflits potentiels, de modifier sa trajectoire lorsqu'un conflit est détecté⁽⁸⁾. La coordination entre les avions est définie par des règles de l'air censées déterminer quel avion est prioritaire et quel avion doit modifier sa trajectoire. Malheureusement, il semble que les algorithmes FreeR ne soient pas capables pour l'instant de prendre en compte des situations impliquant plus de trois ou de quatre avions, ce qui limite largement leur intérêt,

Pourtant, certains mécanismes de synchronisation et de priorité entre les avions permettent de lever les hypothèques précédentes. Pour le pilote, il s'agit alors non plus d'exécuter un ordre défini par le contrôle aérien au sol, mais par un calculateur embarqué, les manœuvres à exécuter restant du même type (changement de cap, de niveau). Les moyens de navigation, de communication et de calcul actuels permettent de proposer des solutions complètes et consistantes, et c'est cette approche que nous avons choisie.

Le principe d'un tel système est illustré dans l'encadré « jetons et priorité ». Toutes les minutes, et de façon synchrone, les avions effectuent une diffusion de leur position précise, de leur trajectoire prévue sur cinq minutes et de leur niveau de priorité. Le niveau de priorité d'un avion se compose de deux éléments : d'une part, un avion qui est déjà engagé dans une manœuvre est toujours plus prioritaire qu'un avion qui n'est engagé dans aucune manœuvre; d'autre part, pour départager deux avions engagés dans une manœuvre ou deux avions libres, chaque avion possède un numéro de priorité qui lui est attribué de façon arbitraire au début du vol.

Chaque avion dispose alors de tous les éléments pour connaître les avions qui sont à l'intérieur de sa zone de sécurité (90 Nm ou 170 km), par la suite appelés avions voisins, et particulièrement ceux qui sont susceptibles de connaître un conflit dans les cinq minutes à venir. Chaque avion reçoit de ses voisins impliqués dans un conflit potentiel et plus prioritaires que lui un jeton: en pratique, lorsqu'un avion reçoit un jeton d'un autre avion, cela signifie que ce dernier le met en position d'attente (l'avion continue sa route sans modifier sa trajectoire). Si un avion a plusieurs voisins en conflit potentiel et plus prioritaires que lui, il reçoit plusieurs jetons.

Lorsque deux avions sont susceptibles de rentrer en conflit, celui qui est le plus prioritaire donne à l'autre un jeton

A la fin de l'étape de détection-distribution de jetons, tous les avions qui ont 0 jeton doivent choisir leur trajectoire (ils n'ont pas été mis en attente par d'autres avions). Pour ce faire, ils « effacent » de l'espace tous les avions ayant au moins un jeton, mais considèrent les trajectoires de tous les autres comme des contraintes intangibles. Une fois leur trajectoire choisie, les avions à 0 jeton informent leurs voisins de leur nouvelle trajectoire. Les avions voisins prennent ces trajectoires comme de nouvelles contraintes, puis se libèrent du ou des jetons que ces voisins leur avaient donnés.

Contraintes et résolution. Ce processus de distribution de jetons permet donc aux avions de se coordonner tout en n'ayant qu'une vue partielle de la situation. De plus, il ne peut pas entraîner de blocage du processus de résolution : on ne peut jamais se trouver dans une situation où tous les avions auraient au moins un jeton et devraient donc tous attendre, ni dans une situation où deux avions en conflit potentiel sans jeton devraient modifier leur trajectoire simultanément.

Pour être opérationnel, le système que nous venons de décrire doit respecter un certain nombre de contraintes :

- garantir pour chaque avion cinq minutes de trajectoire sans violation des limites de séparation et minimiser le retard induit par la manœuvre donnée ;
- ne proposer que des manœuvres simples, comme des manœuvres de changement de cap de 10, 20 ou 30 degrés. Les manœuvres dans le plan vertical, plus contraignantes à mettre en œuvre, sont uniquement employées lorsqu'une manœuvre dans le plan horizontal ne permet pas de trouver de solution ;
- garantir à l'avion un délai suffisant (une minute) pour qu'une modification de trajectoire puisse être diffusée aux autres avions et mise en œuvre ;
- ne jamais donner plus d'une manœuvre à la fois, par souci de simplicité et de confort.

Chaque avion dispose pour ce faire des trajectoires de tous les avions qu'il doit éviter. On se retrouve alors face à un problème classique de la robotique : l'optimisation d'une trajectoire dans un espace de trajectoires contraintes 4D fixées (x, y, z, t). L'algorithme dit A* est classiquement utilisé depuis des années pour résoudre ce type de problème. Cet algorithme construit en un temps très court une trajectoire optimale pour un mobile dans un environnement rempli d'obstacles⁽⁹⁾. Le temps de calcul de cet algorithme est proportionnel à kT^2 où T est la taille de la fenêtre temporelle (cinq minutes dans notre cas), et k le nombre de types de manœuvres autorisées (6 ici, correspondant aux déviations de 10, 20 ou 30 degrés à droite ou à gauche). On peut donc enrichir le nombre de manœuvres et/ou augmenter la taille de la fenêtre temporelle sans incidence trop notable sur ce temps de calcul.

Simulation. Ce concept de Free Flight est-il technologiquement envisageable ? Pour le savoir, examinons les problèmes. Premier point : chaque avion doit être capable de fournir pour les cinq minutes à venir sa trajectoire. Les FMS modernes, couplés au GPS (Global Positioning System), sont actuellement en mesure d'effectuer ce genre d'opérations. Les avions doivent également être équipés d'horloges synchrones, afin de pouvoir repérer leur position au même moment. La précision de l'horloge GPS est là aussi largement suffisante. Enfin, la capacité du canal de communication doit être assez importante pour diffuser les informations de priorité et de trajectoire. Les calculs que nous avons effectués montrent que les deux systèmes de diffusion actuellement en service et en concurrence ont une capacité assez grande pour permettre plusieurs émissions de message par avion même pour des clusters faisant intervenir jusqu'à une cinquantaine d'avions. Le solveur présenté ci-dessus a été testé sur une journée de trafic réel grâce à un simulateur de trafic⁽¹⁰⁾. Les données utilisées sont les plans de vols déposés et non régulés du vendredi 21 juin 1996 dans l'espace aérien français. La zone Free Flight a été définie au-dessus de 10 000 m. Les résultats de la simulation montrent que sur 641 paires d'avions en conflits, le solveur résout 638 conflits en n'utilisant que des manœuvres horizontales. Les trois

conflits restant sont résolus grâce à des manœuvres verticales. Le retard de l'avion par rapport à la trajectoire directe est en moyenne de quatre secondes et ne dépasse jamais quarante secondes.

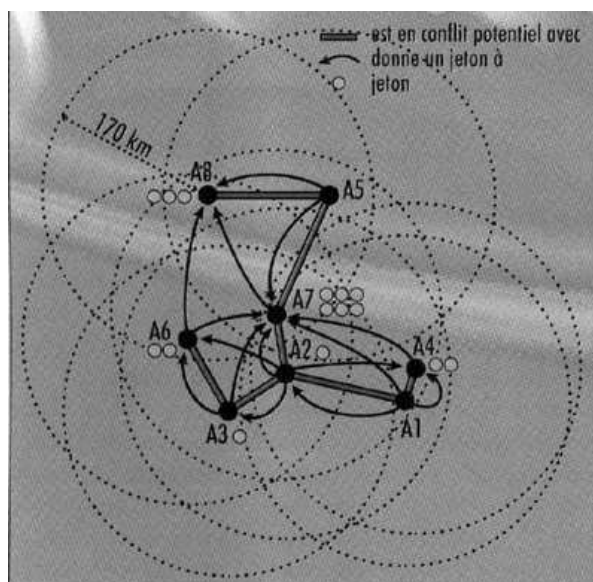
Si nous avons particulièrement développé dans cet article les espérances, les problèmes et les solutions liés au Free Flight, nous sommes loin de penser qu'il s'agit là d'une panacée. Il faut reconnaître que les recherches décrites ici sont encore très fondamentales. Une mise en application n'est envisageable qu'à long terme (d'ici quinze ou vingt-cinq ans).

Le contrôle du futur se situera peut-être dans un moyen terme entre les différentes solutions possibles : entre un système complètement automatisé, un système figé dans les modes actuels de travail et un système non contrôlé au sol, on pourrait imaginer un espace aérien où cohabiteraient des zones Free Flight peu denses avec des zones plus denses contrôlées. Dans tous les cas, il faut être conscient que les facteurs techniques ne seront pas déterminants. L'acceptabilité, la facilité de transition et le poids de tel ou tel groupe de pression, auront probablement plus d'influence sur l'évolution du système de contrôle que l'efficacité technique d'une méthode ou de l'autre.

JETONS ET PRIORITES

Dans le système de Free Flight proposé, les avions bougent en fonction de leurs priorités. Considérons huit avions appartenant au même cluster. L'avion A7 voit dans sa zone de sécurité (170km) tous les autres avions. L'avion A8 a pour voisins les avions A5, A6 et A7. L'avion A4 a pour voisins A1, A2 et A7. L'avion A6 a pour voisins les avions A2, A3, A7 et A8. L'avion A2 a pour voisins les avions A1, A3, A4, A6 et A7. L'avion A3 a pour voisins les avions A2, A6 et A7. L'avion A1 a pour voisins les avions A2, A4 et A7. L'avion A5 a pour voisins les avions A7 et A8. Les avions en conflits potentiels sont les paires A1 – A2, A1 – A4, A2 – A3, A2- A7, A3 – A6, A5 – A7 et A5 – A8. L'avion le plus prioritaire est l'avion A1, le moins prioritaire est l'avion A8 (A1>A2>A3>A4>A5>A6>A7>A8) . Les flèches noires montrent quel avion a donné un jeton (donc mis en attente) quel autre avion. Dans l'exemple présenté, le tableau donne la répartition des jetons au cours des six étapes successives que requiert la résolution. A l'étape 1, les avions A1 et A5 n'ayant pas de jeton n'ont donc pas été mis en attente par d'autres avions ; ils optimisent leur trajectoire en ne tenant compte d'aucun autre avion (en effet tous les avions de leur zone de détection ont déjà des jetons). A1 ayant optimisé sa trajectoire, il récupère les jetons qu'il avait donnés à A2, A4 et A7 pour les mettre en attente (voir tableau). A5 fait de même avec A7 et A8. A l'étape 2, l'avion A2 n'a plus de jeton (il n'est donc plus mis en attente) et optimise sa trajectoire en ne tenant pas compte de ses voisins en attente, mais en tenant compte de l'avion A1, qui a 0 jeton et qu'il doit éviter. A2 récupère ensuite les jetons donnés à ses voisins A3, A4, A6 et A7. A l'étape 3, l'avion A3 modifie sa trajectoire pour éliminer le conflit potentiel avec A2 (0 jeton), l'avion A4 modifie sa trajectoire pour éliminer le conflit potentiel avec A1 (0 jeton) en évitant l'avion A2 (0 jeton). A6 perd alors un jeton que lui avait donné A3. A7 perd 2 jetons que lui avaient donnés A3 et A4. A l'étape 4, l'avion A6 (0 jeton) modifie sa trajectoire pour éliminer le conflit potentiel avec A3 en évitant A2. A7 et A8 perdent 1 jeton que A6 leur avait donné. A l'étape 5, A7 modifie sa trajectoire pour éliminer les conflits potentiels avec A2 et A5 en évitant A1, A3, A4 et A6. A8 perd un jeton, donné par A7. Enfin, à l'étape 6, A8 modifie sa trajectoire pour éliminer le conflit potentiel avec A5, en évitant A6 et A7.

	Etape 1	2	3	4	5	6
A7	6	4	3	1	0	
A8	4	3	3	2	1	0
A4	2	1	0			
A6	2	2	1	0		
A2	1	0				
A3	1	1	0			
A1	0					
A5	0					



*LE FMS

est un calculateur assurant la conduite du vol des avions. Il s'agit de la version moderne de ce que l'on appelle le pilote automatique.

*LE DATA-LINK est une liaison de données numériques entre l'avion et le sol ou entre les avions permettant le transfert de paramètres complexes (altitude, position, vitesse).

***CFMU**

Le Central Flow Management Unit (cellule de gestion centralisée des flux) basé à Bruxelles dépend de l'agence Eurocontrol.

***MITRE** n'est pas un acronyme. Le nom a été choisi probablement en référence au MIT (D'où venait une large part du personnel original de la mitre) et au mot mitre qui veut dire « assembler ».

***AERA II ET III**

Automated En Route Air Traffic Control.

- (1) P. Jaquard, Nouvelle revue d'Aéronautique et d'astronautique, n° 5, 1998.
- (2) Joseph C. Celio, « Controller perspective of AERA2 », technical report, MITRE, PM-88W00015, 1990.
- (3) G. Dean, X. Fron, W. Miller et J.P. Nicolaon, « Arc2000 : An investigation into the faisability of automatic conflict », technical report, Centre Expérimental Eurocontrol, 1995.
- (4) N. Durand et J.M. Alliot, « Optimal resolution of en route conflict », proceedings of the 1st Air Traffic Management R&D Seminar, Saclay, 1997.
- (5) H. Dreyfus, « What computers can't do. The limits of artificial intelligence », Harper and Row, ISBN : 0-06-090624-3, 1979.
- (6) M. Fox, « AI and expert systems : myths, legends and facts », IEEE Expert, 1990.
- (7) K. Zeghal, « Vers une théorie de la coordination d'actions. Application à la navigation aérienne », thèse de l'université Paris-VI, 1994.
- (8) V.N Duong, E. Hoffman et J.P. Nicolaon, « Autonomous Aircraft », 1st USA/Europe R&D ATM Seminar, Saclay, 1997.
- (9) J. Pearl, « Heuristics », Addison Wesley, 1985.
- (10) G. Granger, N. Durand et J.M. Alliot, « FACES: a Free flight Autonomous Coordinated and Embarked Solver », 2nd USA/Europe R&D ATM Seminar, Orlando, 1998.