

# Optimisation des flux de trafic aérien : allocation de niveaux de vols et définition de trajectoires 3D

David Gianazza

► **To cite this version:**

David Gianazza. Optimisation des flux de trafic aérien : allocation de niveaux de vols et définition de trajectoires 3D. EDIT 2003, Colloque des doctorants de l'École Doctorale Informatique et Télécommunications, Apr 2003, Toulouse, France. <hal-00990278>

**HAL Id: hal-00990278**

**<https://hal-enac.archives-ouvertes.fr/hal-00990278>**

Submitted on 13 May 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Optimisation des flux de trafic aérien : allocation de niveaux de vols et définition de trajectoires 3D

David Gianazza

*LOG (Laboratoire d'Optimisation Globale) CENA/ENAC*  
7, avenue Edouard Belin 31055 Toulouse Cedex, FRANCE  
Email : gianazza@recherche.enac.fr

**Résumé :** L'objet du travail présenté est de séparer les flux de trafic aérien, en supposant que les avions volent sur la route la plus directe possible entre origine et destination. La première phase consiste à allouer des niveaux de vol en croisière à chaque flux, par des méthodes de coloration de graphe. Les niveaux alloués sont ensuite utilisés en entrée d'un algorithme  $A^*$  qui calcule une trajectoire 3D pour chaque flux, en séparant celle-ci des trajectoires précédemment calculées. Le but est de séparer non seulement les segments de trajectoire en croisière, mais aussi les segments de montée et de descente. Des simulations avec CATS/OPAS sur des échantillons de trafic réel montrent les améliorations apportées par l'allocation de niveaux, tant sur le nombre de conflits détectés que sur la nature de ceux-ci.

**Mots clés :** Optimisation du trafic aérien, Coloration de Graphe,  $A^*$

## 1 Vocabulaire

**plan de vol :** Avant le décollage, chaque avion doit déposer un plan de vol décrivant notamment les aéroports de départ et de destination, la route aérienne qui sera suivie, et le niveau de vol préférentiel demandé pour la croisière.

**niveau de vol :** C'est l'altitude-pression par rapport à l'isobare 1013 hPa, exprimée en pieds et divisée par 100. Un avion volant au FL 190 est à 19000 pieds au dessus de l'isobare 1013 hPa.

**route :** Dans la pratique actuelle, les avions empruntent un réseau de routes prédéfinies passant par des balises radio-électriques ou des points de report fixés. Dans cet article, on considérera des routes directes entre origine et destination, dans un plan de projection stéréographique centré sur Paris.

**profil vertical :** C'est la courbe représentant les évolutions de l'altitude d'un avion en fonction de la distance parcourue.

**trajectoire :** C'est la succession des positions occupées par un avion durant son vol. Si l'on ne

tient pas compte du facteur temps, la route et le profil vertical suffiront à définir la trajectoire.

**flux :** Dans cet article, un flux représentera un ensemble de vols ayant la même origine et la même destination.

## 2 Introduction

Le problème critique de la congestion de l'espace aérien est géré par l'ATFM (Air Traffic Flow Management) en imposant des délais au décollage des avions. L'augmentation continue du trafic pousse ce système aux limites et le besoin d'alternatives de plus grande capacité se fait chaque jour plus pressant.

Par ailleurs, les opérateurs aériens sont généralement libres de choisir les routes et niveaux de croisière pour chacun de leurs vols. Leurs choix peuvent éventuellement être limités à un sous-ensemble de routes et de niveaux lorsqu'un schéma d'orientation du trafic est défini, mais en dehors de cette limitation, très peu de contraintes liées à la saturation de l'espace aérien pèsent sur les choix des opérateurs. En conséquence, on retrouve un nombre important de vols sur les mêmes trajets et aux mêmes niveaux de croisière.

Le problème de la définition d'un réseau de routes optimisé a été l'objet de nombreux travaux, cités dans [9] et [8], qui abordent en particulier la faisabilité d'un réseau de routes directes entre les points de départ et d'arrivée. Dans [9], le concept est considéré comme impraticable, sans toutefois considérer une éventuelle séparation verticale des flux. Dans [8], la méthode proposée est proche de la première étape décrite dans cet article, mais avec des performances médiocres quant à la technique de coloration de graphe utilisée pour l'allocation de niveaux de vol. Une approche radicalement différente, basée sur les diagrammes de Voronoï et des méthodes d'agrégation, est présentée dans [10]. Cette méthode permet d'une part de proposer de nouveaux indicateurs de complexité du trafic aérien, et d'autre part d'obtenir un réseau de routes 2D en déplaçant et en fusionnant de manière itérative les points de croisement des routes. La séparation verticale des trajectoires n'est cependant pas abordée.

Dans la suite de cet article sont présentés des algorithmes allouant une (ou plusieurs) trajectoire(s) 3D aux flux de trafic, de façon à éviter les interférences entre les principaux flux. On suppose que chaque vol demande la route la plus directe possible, et on ne tient donc pas compte du réseau de routes actuelles. La méthode proposée comprend deux étapes. Dans la première, un niveau de croisière est alloué à chaque flux, de telle sorte que les segments de trajectoire en croisière des différents flux n'interfèrent pas. Dans la deuxième étape, on calcule des trajectoires 3D complètes, avec la phase de montée vers le niveau de croisière alloué dans la première étape, et également la phase de descente. Chaque trajectoire est calculée itérativement de manière à ne pas interférer avec les trajectoires précédemment calculées.

La partie 3 de cet article présente succinctement l'algorithme d'allocation de niveaux de croisière, proposé par Nicolas Barnier et Pascal Brisset dans [1], et surtout la validation de cette méthode par des simulations montrant les gains sur le nombre et la nature des conflits détectés. La définition des trajectoires 3D est présentée dans la partie 4. La partie 5 conclut et propose des développements futurs.

### 3 Allocation de niveaux de croisière, par une méthode de Coloration de Graphe

Le problème traité dans cette partie consiste à allouer un niveau de croisière à chaque flux de trafic, de façon à ce que la phase de croisière de chaque vol soit libre de tout conflit avec les vols en croisière des autres flux principaux. Le nombre de niveaux alloués doit être aussi petit que possible, et le niveau de vol alloué doit être aussi proche que possible du niveau le plus demandé sur le flux considéré.

Notons que le but que l'on s'est fixé n'est pas de chercher une trajectoire sans conflit pour chaque vol, mais uniquement pour les vols appartenant aux principaux flux de trafic. Nous ne chercherons pas non plus à éviter les conflits pouvant survenir dans les phases de montée ou de descente (ceci sera abordé dans la partie 4).

Le problème de l'allocation de niveaux est représenté par un graphe dont les noeuds sont les flux, et dont les arêtes représentent les intersections de flux. Une allocation valide assure que deux flux interférant (dans le plan horizontal) auront des niveaux de vol en croisière différents. L'objectif est également de minimiser le nombre de niveaux alloués. Ce problème est équivalent au problème classique de coloration de graphe dont on sait qu'il est NP-difficile, ce qui implique souvent l'utilisation de techniques approchées notamment sur les graphes aléatoires et de grande taille ([7], [11]). Cependant, les algorithmes

énumératifs complets utilisant le Branch & Bound (B&B) peuvent aussi être efficaces (voir [2]) pour des problèmes plus structurés issus d'applications réelles ou de taille moindre.

L'algorithme proposé pour le coloriage exact des noeuds par N. Barnier et P. Brisset dans [1] consiste à associer des techniques de programmation par contraintes avec un algorithme glouton de recherche de *cliques*. Pour notre problème, une *clique* sera un ensemble de routes toutes sécantes deux à deux : autant de niveaux différents seront alloués à chacune de ces routes. L'utilisation d'un B&B pour rechercher la *clique maximum* (cf [3]) permet de plus, lorsque la taille du problème l'autorise, d'obtenir une borne inférieure du problème de coloriage de graphe et éventuellement de prouver l'optimalité lorsque cette borne est atteinte.

L'algorithme de N. Barnier et P. Brisset a été utilisé pour résoudre le problème d'allocation de niveaux pour les flux au dessus d'une certaine taille.

Notons  $r_i$  la route directe dans le plan horizontal (en projection stéréographique) pour le flux  $i$ , et  $tw_i$  la fenêtre de temps pendant laquelle cette route est utilisée. Afin de détecter les intersections de flux, on définit un ruban autour de chaque route  $r_i$ , d'une largeur  $S_h$  (en milles nautiques), où  $S_h$  est la valeur de la norme de séparation. Deux routes  $r_i$  et  $r_j$  sont sécantes lorsque les deux rubans définis autour de ces routes s'intersectent ou sont superposés. Il y a cependant quelques exceptions à cette règle : par exemple deux flux divergents ayant la même origine n'interfèrent pas si cette origine est un aéroport ou le dernier point d'une procédure de départ d'un aéroport. De même pour les flux convergeant sur un même aéroport d'arrivée. Deux flux  $i$  et  $j$  interfèrent si leurs routes horizontales  $r_i$  et  $r_j$  interfèrent et si leurs fenêtres temporelles  $tw_i$  et  $tw_j$  se recoupent.

L'espace aérien supérieur et l'espace aérien inférieur sont considérés séparément. Pour ce qui concerne l'espace inférieur (vols évoluant à des niveaux de croisière entre 6000 et 19500 pieds au dessus de l'isobare 1013 hPa), l'algorithme a alloué 10 niveaux de vols aux flux comprenant plus de 3 avions dans la journée. Dans l'espace supérieur, le problème d'allocation a été résolu pour des flux de plus de 10 avions, avec un nombre minimal de 17 niveaux de vol. Les tailles retenues pour les deux problèmes (3 ou 10 avions minimum par flux) permettent d'obtenir un nombre réaliste de niveaux de vol. Cependant l'algorithme est capable de résoudre des problèmes nettement plus difficiles : par exemple il trouve une solution optimale pour les flux en espace aérien ayant plus de 3 avions dans la journée, avec 22855 intersections de flux, en allouant 34 niveaux. Ce nombre n'est pas compatible avec la réalité de la structure de l'espace aérien : il n'y a pas autant de niveaux de vol exploitables.

Le jour de trafic choisi comprenait 7902 vols répartis sur 1736 flux. 6104 vols (répartis sur 906 flux) demandaient un niveau de vol en espace supérieur, et 1798 vols (941 flux) intéressaient seulement l'espace inférieur. Le problème d'allocation résolu en espace inférieur (flux de plus de 3 avions) concerne 837 vols (171 flux), et celui en espace supérieur 4131 vols (146 flux). L'algorithme utilisé a donc permis d'allouer des segments de trajectoire en croisière n'interférant pas entre eux pour près de 63 % du trafic.

Angle	--	-↑	-↓	↑↑	↓↓	↑↓	Mix	Total
0-9	176	45	56	41	26	1	7	352
10-19	16	3	1	13	3	0	0	36
20-29	34	1	5	4	2	0	0	46
30-39	39	6	1	3	1	0	0	50
40-49	38	0	3	0	0	0	0	41
50-59	35	3	2	0	0	0	0	40
60-69	28	2	2	0	0	0	0	32
70-79	41	1	3	0	0	0	0	45
80-89	24	2	2	0	0	1	0	29
90-99	17	4	2	0	0	0	0	23
100-109	13	2	0	0	0	1	0	16
110-119	16	0	2	0	0	0	0	18
120-129	16	13	0	0	0	0	0	29
130-139	10	7	6	1	0	1	0	25
140-149	25	5	1	0	0	0	0	31
150-159	7	6	4	0	0	3	0	20
160-169	14	12	5	0	0	2	0	33
170-180	60	22	8	0	1	28	0	119
Total	609	134	103	62	33	37	7	985
Percent.	61.8	13.6	10.5	6.3	3.4	3.8	0.7	100

TAB. 1 – Distribution des conflits par angle de convergence et par type (Croisière : -- ; Montée : ↑ ; Descente : ↓), pour des avions volant sur une route directe à leur niveau de vol initialement demandé

Angle	--	-↑	-↓	↑↑	↓↓	↑↓	Mix	Total
0-9	286	40	51	31	28	2	11	449
10-19	5	5	3	13	7	0	0	33
20-29	1	3	6	4	4	0	0	18
30-39	1	2	2	4	1	0	0	10
40-49	1	4	1	1	3	0	0	10
50-59	0	2	3	0	0	0	0	5
60-69	0	3	1	0	0	0	0	4
70-79	0	1	3	0	0	0	0	4
80-89	2	4	3	0	0	1	0	10
90-99	2	5	2	0	0	0	0	9
100-109	4	0	5	0	0	0	0	9
110-119	0	3	3	0	0	0	0	6
120-129	2	9	1	0	0	0	0	12
130-139	8	6	7	0	0	1	0	22
140-149	19	3	3	0	0	0	0	25
150-159	14	7	2	0	0	1	0	24
160-169	6	8	5	0	0	1	0	20
170-180	40	24	8	0	0	22	0	94
Total	391	129	109	53	43	28	11	764
Percent.	51.2	16.9	14.3	6.9	5.6	3.7	1.4	100

TAB. 2 – Distribution des conflits par angle de convergence et par type (Croisière : -- ; Montée : ↑ ; Descente : ↓), pour des avions volant sur une route directe au niveau de croisière alloué par l'algorithme

Les simulations sur cette journée de trafic avec le simulateur en temps accéléré CATS/OPAS montrent les gains apportés par cette allocation de niveaux. Une présentation de CATS/OPAS et de ces différents modules peut être trouvée dans plusieurs articles ([4], [5], [6]). Ces principales fonctions sont la détection des conflits et leur résolution, pour des avions volant soit en route directe ou en route standard, ceci à partir de plans de vols enregistrés.

Pour notre problème, seule la détection de conflit a été exploitée, avec deux jeux de trafic. Le trafic de

référence est celui du 21 mai 1999, chaque avion volant sur une route directe avec une phase en croisière au niveau de vol demandé par l'opérateur aérien. Le deuxième trafic reprend les caractéristiques du trafic de référence, à ceci près que la phase de croisière se fait au niveau de vol alloué par l'algorithme de coloriage de graphe.

Le simulateur a été modifié de façon à calculer pour ces deux jeux de trafic le nombre de conflits et la distribution de ces conflits selon l'angle de convergence et la typologie.

Le tableau 1 montre les résultats pour le trafic de référence, avec un nombre total de 985 conflits détectés. Notons (au bas de la deuxième colonne) que plus de 60 % des conflits se produisent entre avions stables à leur niveau de croisière. Ce chiffre souligne l'intérêt de séparer les flux de trafic pendant leur phase de croisière.

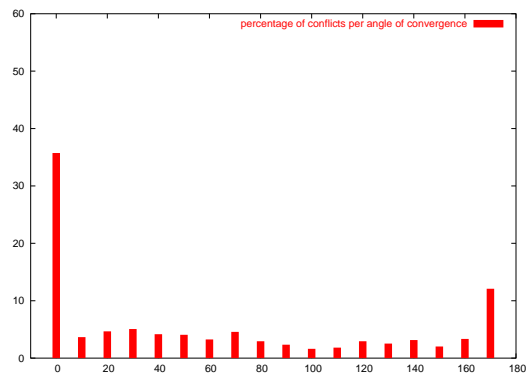


FIG. 1 – Distribution des conflits par angle de convergence, pour des avions volant sur une route directe à leur niveau de vol initialement demandé

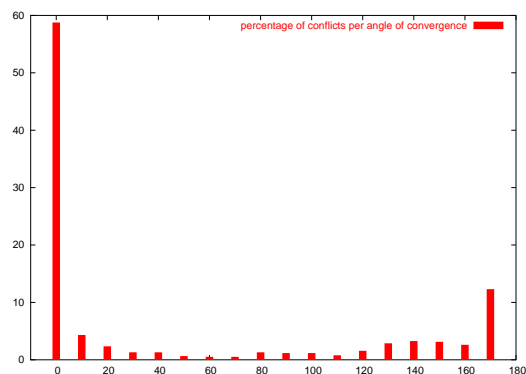


FIG. 2 – Distribution des conflits par angle de convergence, pour des avions volant sur une route directe au niveau de croisière alloué par l'algorithme

Dans le tableau 2, qui montre les résultats en utilisant l'allocation de niveaux, le pourcentage de conflits entre avions en phase de croisière est encore important : plus de 50 %. Toutefois, la plupart de ces conflits

ont un angle de convergence inférieur à 9 degrés. Il s'agit en fait de conflits *en rattrapage*, ayant lieu entre avions suivant une même trajectoire, au même niveau de vol. Ce résultat n'est pas surprenant, étant donné que l'algorithme alloue seulement un ou deux niveaux (un en inférieur et un supérieur le cas échéant) par flux, qui remplacent les niveaux de vol plus disparates demandés par les opérateurs. Ces conflits *en rattrapage* entre avions en croisière représentent 37,4 % des 764 conflits détectés. Faisons l'hypothèse, raisonnable, que ces conflits puissent être résolus par des techniques spécifiques de séquençement (dites *miles-in-trail*). Au final, si l'on compare ces résultats avec ceux du trafic de référence, nous avons un gain de 22,4 % pour le nombre de conflits, sachant que la plupart des conflits restants sont *en rattrapage*.

Les figures 1 et 2 montrent la distribution des conflits par angle de convergence pour les deux jeux de trafic. La distribution est aplatie pour les angles intermédiaires lorsqu'on utilise l'allocation de niveaux (figure 2). Donc, le fait énoncé précédemment pour les conflits entre avions en croisière reste vrai pour l'ensemble des conflits : la plupart d'entre eux sont *en rattrapage*. La proportion des conflits *en face-à-face* reste approximativement constante, aux alentours des 12 %.

#### 4 Définition des trajectoires 3D, avec un algorithme $A^*$

Dans ce qui précède, nous avons vu que l'allocation de niveaux de croisière fournit à elle seule des résultats intéressants. Cependant, seuls les segments en phase de croisière sont séparés de façon à ne pas interférer entre eux. Dans ce qui suit, une nouvelle approche est présentée, avec seulement des résultats préliminaires. Cette approche consiste à définir des trajectoires 3D pour les principaux flux de trafic, qui soient complètement séparées, dans les phases de croisière mais aussi dans celles de montée ou de descente.

Afin de bénéficier des bons résultats de l'algorithme de coloration de graphe, les niveaux de croisière alloués par celui-ci sont utilisés comme niveaux de vol préférentiels pour les trajectoires que nous essayons de construire.

A ce stade, quelques hypothèses simplificatrices ont été adoptées :

- tous les avions sont du même type (A320) ;
- chaque flux est représenté par un seul *avion représentatif*, volant du point d'origine du flux au point de destination, avec comme niveau de croisière préférentiel le niveau alloué par l'algorithme présenté en partie 3 ;
- chaque *avion représentatif* suit par défaut un profil nominal de vol, selon un modèle tabulé de performances avion.

- on considère que tous les aéroports sont à l'altitude 0, relativement à l'isobare 1013 hPa) ;
- les flux débutent et se terminent aux points d'entrée ou de sortie de l'espace aérien, ou aux points d'entrée ou de sortie des zones d'approche terminale. Les segments de trajectoire à l'intérieur des zones d'approche ne sont pas considérés.

La figure 3 illustre le profil vertical idéal d'un avion représentant un flux. Comme indiqué dans les hypothèses, le niveau préférentiel de croisière est produit par l'algorithme d'allocation de niveaux. Seuls les flux demandant des niveaux de vol en espace supérieur sont considérés.

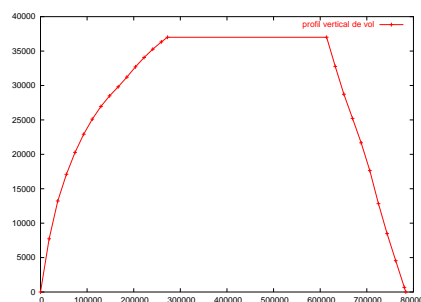


FIG. 3 – Exemple de profil vertical de vol pour une trajectoire nominale (non déviée)

Pour chaque flux, les niveaux de vol en entrée et en sortie de l'espace aérien pour l'avion représentatif sont calculés en considérant l'ensemble des avions appartenant au flux. Prenons l'exemple d'un flux dont l'origine est un point de sortie de la zone d'approche de Paris. Les vols sur ce flux peuvent *a priori* provenir de n'importe lequel des aéroports de la région parisienne (bien que ce ne soit pas toujours le cas, les procédures propres à chaque aéroport se terminant souvent sur des points distincts). Dans un tel cas, nous prendrons comme niveau de vol en entrée le plus petit des niveaux de vols atteints au dessus de ce point par les avions appartenant au flux.

Bien sûr, s'il existe des flux avec des vols entrant dans l'espace français à un niveau de croisière, mais aussi avec des vols en montée provenant d'un aéroport proche, l'*avion représentatif* risque de ne plus être si représentatif que cela du comportement de l'ensemble des avions du flux. Le modèle retenu n'est donc pas, à ce stade de la recherche, d'un réalisme très soutenu. Il peut être facilement amélioré en définissant plusieurs avions représentatifs par flux, avec des hypothèses plus réalistes (altitude des aéroports, incertitudes verticales, etc...). Cependant, il faut se souvenir que notre but n'est pas d'éviter tous les conflits, ce qui est le rôle du contrôle aérien tactique, mais seulement de diminuer de façon significative le nombre de conflits en organisant mieux les flux à un niveau stratégique. Il n'est donc pas utile de compliquer le modèle pour l'instant.

Dans le but de séparer les trajectoires des flux principaux, une grille 3D est définie. Cette grille permet de mémoriser l'occupation de l'espace par les trajectoires déjà définies. Lorsqu'on cherche à définir une nouvelle trajectoire, il suffit de regarder si le segment que l'on est en train de construire traverse des zones d'espace déjà occupées pour savoir s'il faut retenir ce segment ou non. La figure 4 montre un exemple de trajectoire d'avion à travers une telle grille. Les cubes en rouge (ou gris foncé) sont ceux traversés par la trajectoire, et ceux en bleu (gris clair) sont les voisins de ces cubes. La figure 5 est une vue 3D des trajectoires nominales pour les flux de plus de 20 avions. Elle montre également les cubes d'espace pour lesquels les contraintes de séparation entre trajectoires sont violées.

Un algorithme  $A^*$  est utilisé pour trouver une trajectoire pour chaque flux, à travers l'espace non occupé par les trajectoires précédemment calculées pour les autres flux. Les flux sont considérés par ordre décroissant de taille (nombre d'avions par flux). De cette manière, les flux les plus importants ont les trajectoires les plus directes. Chaque trajectoire est calculée pas à pas, et peut éventuellement être déviée soit verticalement ou horizontalement afin d'éviter des cubes d'espace occupés.

Le principe de l' $A^*$  (cf [12]) consiste à rechercher le meilleur parcours dans un arbre de possibilités, en repartant à chaque étape du meilleur noeud possible. Pour cela il faut définir d'une part une fonction de coût pour la transition entre états, et d'autre part une fonction heuristique. Cette heuristique doit estimer au mieux, tout en le minorant, le coût total des étapes restantes entre l'état courant et la solution optimale.

Dans notre problème :

- les noeuds de l'arbre sont des états. Un état est un couple (*position, niveau*) regroupant la position de l'avion dans l'espace et le niveau de vol vers lequel il évolue.
- la racine de l'arbre (l'état initial) sera alors le couple comprenant la position de départ de l'*avion représentatif* du flux considéré, et le niveau vol en croisière alloué à ce flux.
- les feuilles (noeuds terminaux) sont des états solutions, pour lesquels la position de l'avion est celle du point d'arrivée.
- chaque noeud a zéro, un, ou plusieurs fils. Pour calculer un noeud fils, on choisit un point parmi les points admissibles. La partie gauche de la figure 7 montre pour la trajectoire 2 les rangées successives de points admissibles définis perpendiculairement à la trajectoire directe. Lorsque le point courant est sur l'une de ces lignes, on choisit donc un point sur la ligne suivante, dans le sens de progression de l'avion. Il faut également choisir un niveau de vol en croisière si l'avion n'est pas déjà en descente finale. Ce n'est pas forcément le même que

celui du noeud père. La position suivante (en 3D) est alors calculée en faisant évoluer l'avion vers ce niveau, sur le nouveau segment de route. On détermine alors les cubes de la grille 3D traversés par le nouveau segment de trajectoire. Si l'un des cubes traversés (rouge/gris foncé), ou si un cube au voisinage de ceux-ci (bleu/gris clair) est déjà occupé par une trajectoire précédemment calculée, le noeud fils potentiel est rejeté, et sinon il est retenu.

- l'arbre est parcouru en partant à chaque étape du meilleur noeud calculé précédemment. Pour ceci, l' $A^*$  gère une *priority queue* qui mémorise tous les noeuds calculés. Le processus consiste à considérer le meilleur noeud (en tête de la *priority queue*), à calculer les noeuds fils et à les insérer dans la *priority queue*. L'insertion se fait avec une priorité dépendant du coût et de l'heuristique. Le processus est répété jusqu'à tomber sur une feuille (la solution trouvée est alors optimale) où jusqu'à démontrer qu'aucune feuille ne peut être atteinte (il n'y a pas de solution).

Pour instancier les fonctions de coût et d'heuristique, il faut pouvoir associer un coût aux déviations par rapport à la trajectoire idéale (route directe, profil vertical nominal). Un exemple de profil nominal peut être : montée vers le niveau de vol préférentiel, puis phase de croisière, puis descente vers l'aéroport de destination. Considérons la surface entre ce profil nominal et le profil réellement suivi par l'avion. Pour une déviation verticale, avec par exemple une stabilisation pendant un certain temps à un niveau en dessous du niveau préférentiel, on voit immédiatement que plus la déviation sera importante et longue, plus la surface sera importante. C'est également valable pour les déviations horizontales, du moins lorsqu'il y a une phase de descente : le rallongement de la trajectoire déviée décale le profil de descente par rapport au profil nominal, générant ainsi une surface représentative du rallongement de trajectoire. Toutefois ce n'est pas vrai pour les vols stables en croisière pendant toute la traversée de l'espace aérien. Pour ceux-ci, toutes les déviations horizontales auraient un coût nul. Pour pallier à ces cas particuliers, il suffit de tenir compte également de la distance parcourue.

Le coût d'une transition entre un état et le suivant sera donc une pondération de la distance horizontale entre les deux points successifs, et de la surface entre les portions des deux profils, nominal et réel, comprises entre les abscisses curvilignes (distances depuis le point de départ) correspondant aux deux états.

L'heuristique sera également une pondération, avec les mêmes coefficients, de la distance horizontale du point considéré jusqu'à l'arrivée, et de la surface entre le profil nominal (la portion après le point) et un nouveau profil calculé *en supposant que l'avion cherchera à rejoindre le profil nominal à partir du point considéré*.

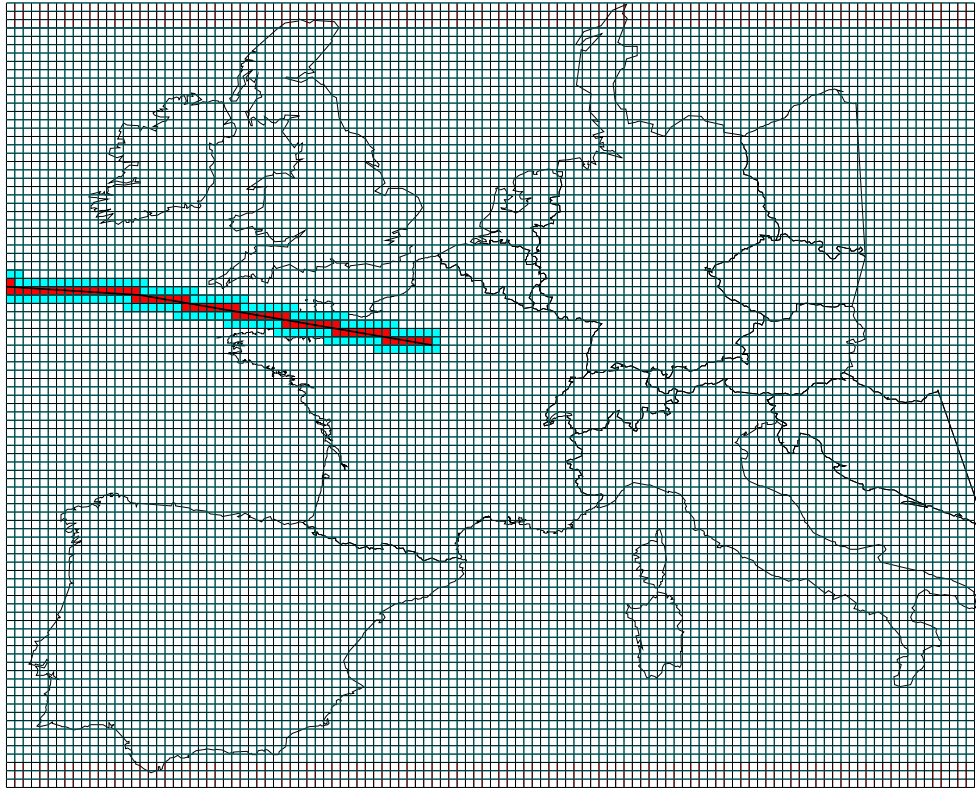


FIG. 4 – Exemple de trajectoire (vue en 2D) à travers la grille 3D

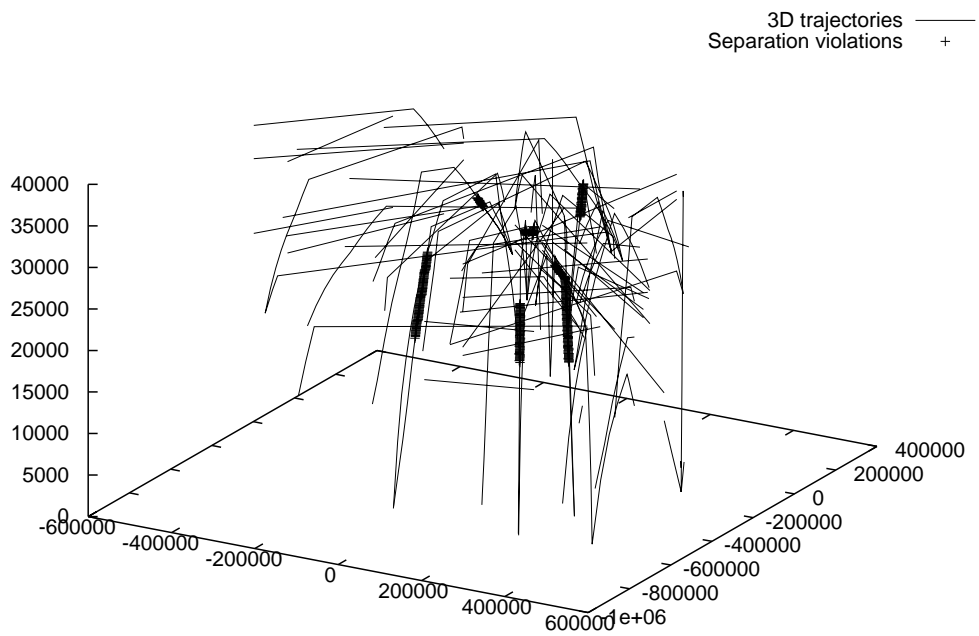


FIG. 5 – Trajectoires 3D directes, et violations de séparation, pour les flux de plus de 20 avions (21 mai 1999)

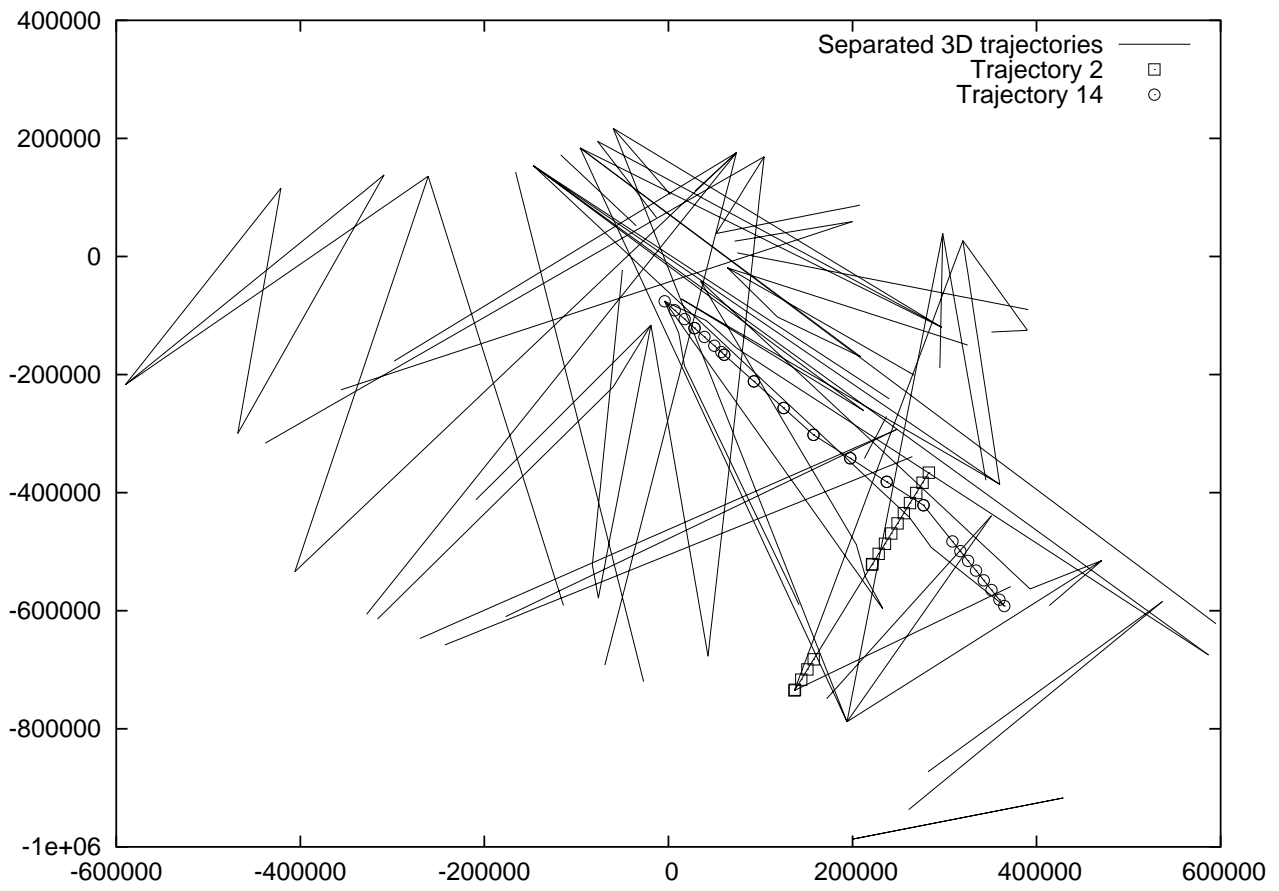


FIG. 6 – Vue en plan des trajectoires 3D séparées, pour les flux de plus de 20 avions au dessus de la France (21 mai 1999)

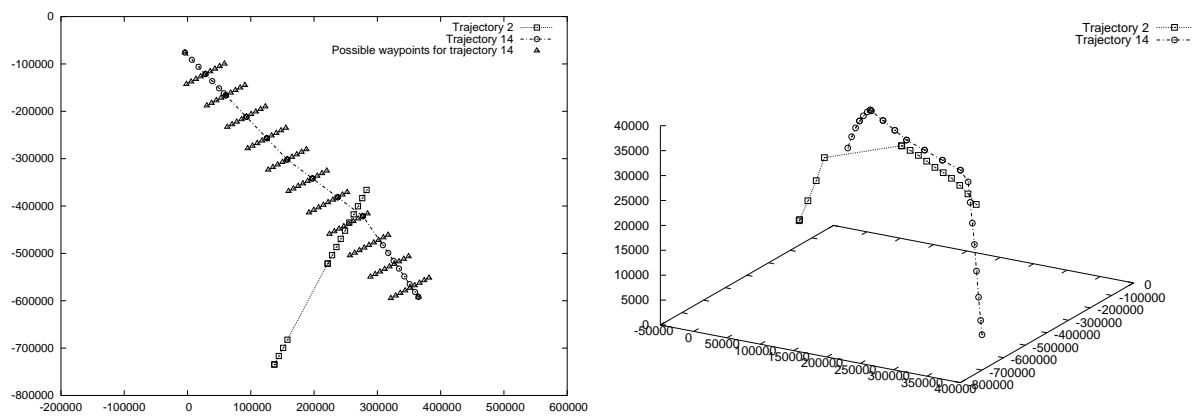


FIG. 7 – Exemple de deux trajectoires séparées (vues 2D et 3D)



Une fois que la trajectoire complète a été calculée, le chemin complet à travers la grille 3D (les cubes en rouge/gris foncé traversés par la trajectoire) est stocké dans une structure de données spécifique contenant les contraintes d'espace (c'est-à-dire les cubes traversés par les trajectoires précédemment calculées).

L'utilisation de la grille 3D et de la structure de données stockant les contraintes accroît l'efficacité de l'algorithme : il n'est pas besoin, à chaque pas de calcul, de tester la séparation entre le nouveau segment de trajectoire et chacune des trajectoires déjà calculées. Il n'y a qu'à tester si le nouveau segment traverse ou est à proximité d'un cube déjà occupé.

Une définition adéquate de la grille et de la notion de proximité permet d'assurer que les flux sont complètement séparés. Par exemple en choisissant une grille d'un pas horizontal de 1 mille nautique, et en définissant la proximité par "tous les cubes dans un ruban de 10 milles nautiques de large autour de la trajectoire directe", nous pouvons dire que si les cubes à proximité d'un segment de trajectoire ne sont pas contraints, alors ce segment sera toujours éloigné d'au moins 5 milles nautiques (la valeur de la séparation devant être assurée) de n'importe quelle autre trajectoire existante.

L'algorithme a été testé avec en entrée les plans de vol enregistrés par les centres de contrôle aérien français. La figure 6 montre les trajectoires résultantes pour les flux de plus de 20 avions dans l'espace supérieur. La figure 7 détaille les trajectoires pour les flux 2 et 14, et montre comment la trajectoire 14 évite d'interférer avec le segment en montée de la trajectoire 2 en étant légèrement déviée horizontalement. La route dans le plan est choisie parmi les points calculés que l'on voit sur la vue 2D (figure 7).

Les résultats préliminaires sont bons : à la fin du processus, on ne détecte aucune violation des contraintes d'occupation de l'espace pour les trajectoires associées à chacun des avions représentatifs. Rappelons cependant que ces trajectoires sont calculées sur la base d'un modèle simplifié des flux de trafic (un seul type d'avions, profil nominal, etc...), et seulement pour les flux dans l'espace aérien supérieur. La validation de l'organisation de l'espace aérien obtenue en résultat, via des simulations en temps accéléré prenant en compte l'ensemble du trafic et la variabilité des performances des avions, est actuellement en cours de développement.

## 5 Conclusion et perspectives

Nous avons démontré, dans la partie 3, une amélioration significative du nombre et de la nature des conflits détectés lorsque l'on utilise l'allocation de niveaux de croisière. L'algorithme fournit des niveaux de croisière séparés, mais ne tient pas compte des phases de montée ou de descente. Cette méthode

à elle seule réduit de 22,4 % le nombre de conflits détectés par le simulateur CATS/OPAS. Quant à la nature des conflits restants : plus de 37 % d'entre eux sont des conflits *en rattrapage* entre avions appartenant au même flux et suivant donc la même trajectoire. La méthode proposée cherche seulement à éviter les conflits entre avions appartenant à des flux différents. On peut toutefois imaginer que ce type de conflits soient résolus dans la phase tactique du contrôle aérien par des techniques de séquençement, dites *miles-in-trail*, assurant une séparation longitudinale des avions sur la même trajectoire.

Dans la partie 4, les niveaux de croisière alloués sont utilisés dans le modèle de l'*avion représentatif*, où chaque flux est représenté par un seul avion. La séparation des flux de trafic, dans les trois dimensions, en utilisant un algorithme  $A^*$  semble correcte pour les flux en espace aérien supérieur. Les flux en espace inférieur n'ont toutefois pas été pris en compte. Ceci pourrait se faire en utilisant le même algorithme avec les *avions représentatifs* associés à ces flux. Le cas de deux flux ayant la même origine et la même destination, l'un en espace supérieur et l'autre en espace inférieur, devrait alors être examiné avec attention : ils devraient alors soit suivre la même route et n'être séparés que dans la phase de croisière, soit suivre des routes différentes et avoir alors des trajectoires complètement séparées.

Quoi qu'il en soit, les résultats préliminaires sur la séparation complète des trajectoires 3D pour les flux en espace aérien supérieur sont bons. Il reste à réaliser les simulations CATS/OPAS permettant de quantifier les bénéfices apportés par cette méthode. Un développement supplémentaire pourrait être d'utiliser le simulateur pour comparer la complexité de l'organisation actuelle du trafic avec le nouvel environnement, où les flux principaux sont séparés. Ceci pourrait être testé sur des échantillons de trafic européen. Les travaux présentés ici peuvent également être utilisés pour définir et valider un nouveau concept d'organisation du contrôle aérien, appelé *sector-less*, sur lequel réfléchissent certains services d'Eurocontrol. Dans ce concept, le rôle d'un contrôleur aérien est radicalement différent de ce qui se fait actuellement : plutôt que de contrôler les avions à l'intérieur d'un volume d'espace sous sa responsabilité, le contrôleur aurait à guider un ou plusieurs avions sur la totalité du vol (ou une grande partie), tout en évitant le reste du trafic. La tâche d'un contrôleur dans un environnement *sector-less* serait probablement plus facile si l'on prend soin d'organiser le trafic de façon à éliminer les interférences entre les flux principaux. Les algorithmes présentés dans ce papier pourraient être utilisés au niveau stratégique, pré-tactique, ou même tactique pour la gestion du trafic dans un tel environnement.

L'évaluation du concept requiert par ailleurs des

éléments de quantification. Le nombre de manoeuvres (horizontales, verticales, ou restrictions de vitesses) données par le solveur de conflits du simulateur CATS/OPAS pourrait être un bon indicateur. En l'état actuel, le solveur de conflits n'utilise que des déviations horizontales ou verticales. Il pourrait être amélioré de façon à résoudre les conflits *en rattrapage* en jouant sur la vitesse des avions.

Dans une perspective différente, l'algorithme permettant de définir des trajectoires 3D séparées a d'ores et déjà été modifié de façon à travailler sur routes passant par des points pré-définis, et pas seulement sur des routes directes. Un développement futur de ce travail consisterait à tenter de séparer les principaux flux de trafic sur le réseau de routes actuel.

## Références

- [1] Nicolas Barnier and Pascal Brisset. Graph coloring for air traffic flow management. In *CPAIOR'02 : Fourth International Workshop on Integration of AI and OR Techniques in Constraint Programming for Combinatorial Optimisation Problems*, pages 133–147, Le Croisic, France, March 2002.
- [2] Daniel Brélaz. New methods to color the vertices of a graph. *Communications of the ACM*, 22 :251–256, 1979.
- [3] Olivier Coudert. Exact coloring of real-life graphs is easy. In *Design Automation Conference DAC97*, Anaheim, California, June 1997.
- [4] Nicolas Durand, Jean-Marc Alliot, and Jean-François Bosc. Cats, a complete air traffic simulator. In *Proceedings of DASC97*, 1997.
- [5] Nicolas Durand, Jean-Marc Alliot, Jean-François Bosc, and Lionel Maugis. An experimental study of atm capacity. In *Proceedings of Europe-USA conference on Air Traffic Management*, 1997.
- [6] Nicolas Durand, Jean-Marc Alliot, and Gerard Granger. Optimal resolution of en route conflicts. In *Proceedings of ATM2001*, 2001.
- [7] Frank Thomson Leighton. A graph colouring algorithm for large scheduling problems. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 84(6) :489–503, 1979.
- [8] Vincent Letrouit. *Optimisation du réseau des routes aériennes en Europe*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1998.
- [9] L. Maugis, J.-B. Gotteland, R. Zanni, and P. Kirlirzin. TOSCA-II - WP3 : Assessment of the TMA to TMA hand-over concept. Technical Report TOSCA/SOF/WPR/3/03, SOFREAVIA, 1998.
- [10] Karim Mehadhebi. A methodology for the design of a route network. In *Proceedings of the Third Air Traffic Management R & D Seminar ATM-2000*, Napoli, Italy, June 2000. Eurocontrol & FAA.
- [11] Craig Morgenstern and Harry Shapiro. Chromatic number approximation using simulated annealing. In *ACM Mountain Regional Meeting Proceedings*, 1986.
- [12] Judea Pearl. *Heuristics*. Addison-Wesley, 1984. ISBN : 0-201-05594-5.