



**HAL**  
open science

## Résolution de conflit dans le trafic aérien via l'algorithme de la propagation de la lumière

Nour Elhouda Dougui, Daniel Delahaye, Stéphane Puechmorel, Marcel  
Mongeau

► **To cite this version:**

Nour Elhouda Dougui, Daniel Delahaye, Stéphane Puechmorel, Marcel Mongeau. Résolution de conflit dans le trafic aérien via l'algorithme de la propagation de la lumière. ROADEF 2011, 12ème congrès annuel de la Société française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision, Mar 2011, St-Etienne, France. hal-00934801

**HAL Id: hal-00934801**

**<https://hal-enac.archives-ouvertes.fr/hal-00934801>**

Submitted on 6 Mar 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.

# Résolution de conflits dans le trafic aérien via l'algorithme de propagation de la lumière

Nour Elhouda Dougui<sup>1,2</sup>, Daniel Delahaye<sup>1</sup>, Stéphane Puechmorel<sup>1</sup>, Marcel Mongeau.<sup>2,3\*</sup>

<sup>1</sup> ENAC ; 7 Avenue Edouard Belin, 31055 Toulouse, France

nour@recherche.enac.fr delahaye@recherche.enac.fr puechmor@recherche.enac.fr

<sup>2</sup> Université de Toulouse ; UPS, INSA, UT1, UTM ; Institut de Mathématiques de Toulouse ; F-31062 Toulouse, France

<sup>3</sup> CNRS ; Institut de Mathématiques de Toulouse UMR 5219 ; F-31062 Toulouse, France.  
mongeau@math.univ-toulouse.fr

**Mots-clés :** *Planification de trajectoires, géodésiques, Branch and Bound.*

## 1 Introduction

L'analyse de la croissance du trafic aérien prévoit un doublement du nombre de vols dans les vingt prochaines années. Le système de gestion du trafic aérien (ATM) devra augmenter en conséquence la capacité de l'espace aérien tout en assurant un niveau de sécurité au moins équivalent à ce qui existe actuellement. Le projet européen SESAR a été initié afin de proposer des solutions à ce problème. Il s'appuie sur un nouveau concept de contrôle du trafic, appelé trajectoire 4D, et qui consiste à garantir les positions des avions à un temps donné. Pour chaque vol, une trajectoire de référence, appelée RBT, est demandée par la compagnie opératrice. Au cours du vol, il peut apparaître des situations dites de conflit, dans lesquelles un rapprochement dangereux des aéronefs a lieu. Dans ce cas, il est nécessaire de modifier une ou plusieurs trajectoires afin de s'assurer que les normes de séparation minimales entre avions (actuellement 5 Nm en horizontal et de 1000 ft en vertical) soient respectées. Il est souhaitable de plus que les nouvelles trajectoires proposées soient aussi proches que possible des RBT. Il existe actuellement deux classes de méthodes permettant cette opération : les algorithmes génétiques [1] et les fonctions de navigation [2]. Chacune n'apporte qu'une réponse partielle au problème : les algorithmes génétiques permettent l'obtention de façon asymptotique de la solution optimale, mais ne garantissent pas l'obtention d'une solution admissible en un temps borné ; les fonctions de navigations quant à elles assurent l'absence de conflit mais génèrent des trajectoires qui ne sont pas forcément volables par un aéronef. L'objectif de la méthode que nous proposons, basée sur une analogie avec l'optique, est de trouver pour chaque avion une trajectoire optimale 4D évitant les conflits et minimisant un critère basé sur une métrique locale.

## 2 L'algorithme de propagation de la lumière

On supposera que la valeur du critère à optimiser est une application associant à une courbe de classe  $C^1$  de  $\mathbb{R}^3$  une valeur réelle positive obtenue en intégrant une métrique locale le long de la courbe. On peut ainsi représenter, par un choix adéquat de métrique locale, la longueur, le temps de parcours ou un coût compagnie associé à une trajectoire. Déterminer une trajectoire optimale reviendra donc à rechercher une géodésique. Dans cet algorithme, nous utiliserons le fait bien connu qu'un rayon lumineux a pour trajectoire une géodésique en considérant l'indice de réfraction du milieu

---

\*ACKNOWLEDGMENT : This work has been supported by French National Research Agency (ANR) through COSI-NUS program (project ID4CS n°ANR-09-COSI-005)

traversé comme métrique locale. Pour représenter les problèmes de congestion et de conflits qu'on rencontre dans la gestion du trafic aérien, on considérera l'indice comme mesure de la congestion ou de la complexité du trafic, une valeur d'indice barrière étant choisie dans les zones interdites (en particulier pour les volumes de protection entourant chaque aéronef). La solution sera obtenue par une technique de lancer de rayons, le premier rayon atteignant son but correspondant à une géodésique approchée. L'indice de l'environnement dans les zones congestionnées sera calculé en utilisant un modèle basé sur les exposants de Lyapunov [3].

Pour générer une trajectoire, on utilise un algorithme de propagation de fronts d'onde en 2D + temps avec un échantillonnage temporel (la propagation de l'onde est faite avec un pas de temps  $dt$ ). Afin d'éviter une explosion combinatoire, la propagation sera couplée avec un algorithme de branch and bound (B&B) qui permettra d'éviter des lancers de rayons inutiles. L'arbre initial du B&B est constitué d'un unique noeud qui est le point de départ. La règle de branchement consiste à lancer des rayons lumineux à partir du noeud courant, dans le cône d'ouverture  $30^\circ$  dirigé vers la destination. Les points atteints par ces rayons constitueront de nouveaux noeuds de l'arbre comme le montre la figure 1.

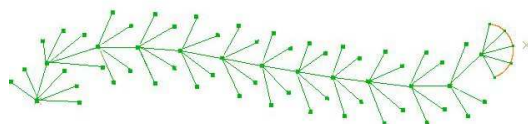


FIG. 1 – Arbre initial pour l'algorithme branch and bound

Une borne inférieure approximative "*lowerBound*" est calculée au niveau de chaque noeud. Il s'agit de la somme de deux termes. Le premier, "*TimeToDest*", représente le temps pour atteindre la destination, à partir du noeud courant, en prenant en compte l'indice le long de la route directe. Le second, "*TimeToNode*", représente le temps pour atteindre le noeud courant à partir de l'origine :

$$lowerBound := TimeToNode + TimeToDest.$$

L'exploration de l'arbre se fait en profondeur d'abord et en commençant par le noeuds qui a la borne la moins élevée pour les noeuds qui se trouvent à la même profondeur. La solution obtenue sera une géodésique approché, garantissant une vitesse minimale, point fondamental pour une trajectoire avion.

Pour résoudre des situations de conflit impliquant plusieurs avions, on applique l'algorithme pour chaque avion de façon séquentielle. Le premier avion considère qu'il est seul dans l'espace. Le second considère la trajectoire du premier comme contrainte. Et ainsi de suite, le nième avion considère la trajectoire des n-1 premiers avions comme des contraintes. L'algorithme est actuellement testé sur une journée de trafic sur la France et les premiers résultats sont très encourageants.

## Références

- [1] Nicolas Durand. *Optimisation de trajectoires pour la résolution de conflits en Route*. ENSEEIHT, Institut National Polytechnique de Toulouse, 1996.
- [2] G. Roussos, G. Chaloulos, K. Kyriakopoulos and J. Lygeros. *Control of multiple non-holonomic air vehicles under wind uncertainty using model predictive control and decentralized navigation function*, IEEE Conference on Decision and Control, December, 2008.
- [3] S. Puechmorel and D. Delahaye. *Dynamical Systems Complexity with a view towards air traffic management applications*, IEEE Conference on Decision and Control, 2009.