



Résolution de conflit aérien par contrôle optimal basé sur la régulation en vitesse

Loïc Cellier, Sonia Cafieri, Frédéric Messine

► To cite this version:

Loïc Cellier, Sonia Cafieri, Frédéric Messine. Résolution de conflit aérien par contrôle optimal basé sur la régulation en vitesse. ROADEF 2012, 13ème congrès annuel de la Société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision, Apr 2012, Angers, France. hal-00934804

HAL Id: hal-00934804

<https://enac.hal.science/hal-00934804>

Submitted on 8 Apr 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 conflit aérien par contrôle optimal basé sur la régulation en vitesse

Loïc Cellier^{1,2}, Sonia Cafieri¹, Frédéric Messine²

¹ ENAC (Lab. MAIAA) 7, av. Belin, 31055 Toulouse (France)

loic.cellier@recherche.enac.fr sonia.cafieri@enac.fr

² ENSEEIHT (IRIT CNRS) 2, r. Camichel, 31071 Toulouse (France)

frederic.messine@n7.fr

Mots-clés : *conflit aérien, régulation de vitesse, contrôle optimal, méthode directe*

1 Introduction

Dans le contexte du trafic aérien, pour éviter le risque de collision, des distances de *séparation* doivent être respectées. On dit que deux avions sont *en conflit* si les distances qui les séparent sont inférieures à 5 NM horizontalement ou à 1000 ft¹ verticalement. Motivées par des raisons de sécurité et d'efficacité pour des trafics en constante augmentation, diverses méthodes de détection et de résolution de conflit ont été proposées [1]. Plusieurs modèles de *contrôle optimal* sont apparus dans ce domaine [2, 3] ; et ces derniers, basés sur des changements de cap, placent la trajectoire comme commande sur le système. Nous proposons une approche contrôle optimal conservant les trajectoires prédéfinies et se focalisant sur les variations en vitesse.

2 Description du modèle

Nous présentons une modélisation du type contrôle optimal dans laquelle nous choisissons l'*accélération*, respective à chaque avion, comme commande sur le système. Nous choisissons aussi de minimiser un coût énergétique quadratique dépendant des variations en vitesse. Dans notre modèle (1), les variables t , x et u représentent respectivement le temps, la position et l'accélération. Les avions sont supposés à la même altitude (configuration plane, même niveau de vol). Nous notons n , t_0 et t_f le nombre d'avions concernés, l'instant initial et l'instant final respectivement. De plus, D correspond à la distance de séparation minimale horizontale entre deux avions et d_i à la direction propre du $i^{\text{ème}}$ avion. Le temps final t_f de manœuvre est fixé et identique pour tous.

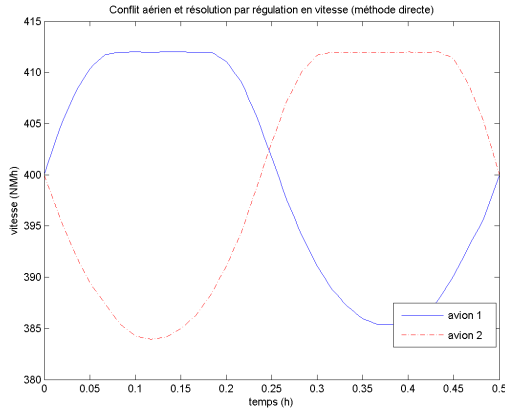
$$(1) \left\{ \begin{array}{llll} \min_{x, u} & \sum_{i=1}^n \int_{t_0}^{t_f} u_i^2(t) dt & & \\ \dot{x}_i(t) = v_i(t) d_i & \forall t \in [t_0, t_f], \forall i \in \{1, \dots, n\} & & \text{(dynamique du système)} \\ \dot{v}_i(t) = u_i(t) & \forall t \in [t_0, t_f], \forall i \in \{1, \dots, n\} & & \text{(dynamique du système)} \\ \underline{u}_i \leq u_i(t) \leq \overline{u}_i & \forall t \in [t_0, t_f], \forall i \in \{1, \dots, n\} & & \text{(accélération bornée)} \\ \underline{v}_i \leq v_i(t) \leq \overline{v}_i & \forall t \in [t_0, t_f], \forall i \in \{1, \dots, n\} & & \text{(vitesse bornée)} \\ x_i(t_0) = x_i^0 & v_i(t_0) = v_i^0 & \forall i \in \{1, \dots, n\} & \text{(conditions initiales)} \\ x_i(t_f) = x_i^f & v_i(t_f) = v_i^f & \forall i \in \{1, \dots, n\} & \text{(conditions terminales)} \\ D^2 - \|x_i(t) - x_j(t)\|^2 \leq 0 & \forall t \in [t_0, t_f], \forall (i, j) \in \{1, \dots, n\}^2 \text{ et } i < j & & \text{(séparation)} \end{array} \right.$$

1. unités de mesure : 1 NM (nautical mile) = 1852 m, et 1 ft (feet) = 0.3048 m

3 Un exemple numérique

Nous résolvons une instance du problème (1) en utilisant une *méthode directe* [4] ; le temps est discrétisé et les variables du problème deviennent uniquement les commandes, les positions et vitesses sont déduites via un intégrateur numérique (on utilise la méthode d'Euler). Nous nous plaçons dans une situation simple de phase tactique de conflit entre deux avions (i.e. quelques minutes avant le conflit et $n = 2$) : nous regardons sur une fenêtre de temps de 30 min (i.e. $t_0 = 0$ et $t_f = 0.5$ h, le conflit aura lieu près de la 15^{ème} minute). Les conditions initiales sont données par : $x_1^0 = (0, 100)^T$, $x_2^0 = (85, 0)^T$ et $v_1^0 = v_2^0 = 400$ NM.h⁻¹. Les conditions finales sont : $v_1^f = v_2^f = v_1^0$, $x_1^f = x_1^0 + (t_f - t_0)v_1^0 d_1$ et $x_2^f = x_2^0 + (t_f - t_0)v_2^0 d_2$. Les bornes sur les vitesses sont : $\underline{v}_1 = \underline{v}_2 = 0.94v_1^0$ et $\overline{v}_1 = \overline{v}_2 = 1.03v_1^0$. Les bornes sur l'accélération sont : $\overline{u}_1 = \overline{u}_2 = -\underline{u}_1 = -\underline{u}_2 = 4000$ NM.h⁻². Enfin les directions correspondent à : $d_1 = (1, 0)$ et $d_2 = (\cos(5\pi/11), \sin(5\pi/11))$; et nous réalisons ce test avec la commande nulle pour point de départ de la méthode locale d'optimisation.

Avec un pas de discrétisation correspondant à 1 minute, nous obtenons un problème d'optimisation continue non linéaire de 60 variables, de 360 contraintes d'égalités et de 390 contraintes d'inégalités. Pour la résolution, nous utilisons la fonction *fmincon* de *Matlab v. 7*. Nous obtenons une solution optimale (minimum local) dont les vitesses des deux avions sont représentées sur la Figure 1, et correspondent aux manœuvres des deux avions ; des informations numériques supplémentaires sont indiquées dans le Tableau 1 (test effectué sur un PC portable à 2.53 GHz et possédant 4 Go de RAM).



pas de la discrétisation	nombre de variables	temps de calculs	nombre d'itérations
5'	12	0''54	65
3'	20	0''56	50
1'*	60	21''65	298
30''	120	15'54''	799

TAB. 1 – Exemple de régulation en vitesse pour deux avions avec des pas de discrétisation de plus en plus petits (* Le pas de discrétisation à 1' est le plus satisfaisant alliant précision et rapidité de résolution.)

FIG. 1 – Régulation en vitesse pour les deux avions

Nous avons comme perspectives la résolution d'un cas plus concret, impliquant plus d'avions ; mais aussi l'adaptation de notre modèle à une méthode indirecte reposant sur le *principe de maximum de Pontriaguine*. [4]

Références

- [1] J.K. Kuchar & L.C. Yang. "A review of conflict detection and resolution modeling methods". *IEEE Transactions on Intelligent Transportations Systems*, vol.1, no.4, pp.179 – 189, 2000.
- [2] A. Bicchi, A. Marigo, G. Pappas, M. Pardini, G. Parlangeli, C. Tomlin & S.S. Sastry. "Decentralized air traffic management systems : performance and fault tolerance". *IFAC International Workshop on Motion Control*, Grenoble, FRA, pp.279 – 284, 1998.
- [3] Y. Zhao & R.L. Schultz. "Deterministic resolution of two aircraft conflict in free flight". AIAA-97-3547, *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference*, New Orleans, LA, pp.469 – 478, 1997.
- [4] E. Trelat. "Contrôle optimal : théorie et applications". Book. Vuibert, 2008.