

# Apprentissage d'un modèle d'incertitude de la prévision de trajectoire pour le contrôle aérien en-route

Sarah Degaugue

ENAC Toulouse, France

sarah.degaugue@alumni.enac.fr

**Mots-clés :** *contrôle aérien, optimisation, prédiction de trajectoire, incertitudes, algorithme évolutionniste*

## 1 Introduction

L'émergence de nouveaux concepts d'Air Traffic Management (ATM) et l'augmentation du trafic impacteront directement les contrôleurs dans leur tâche de gestion des conflits à l'avenir. À l'heure actuelle, les contrôleurs aériens disposent d'une visualisation en deux dimensions du trafic et sont en contact radio avec les pilotes pour assurer la séparation des aéronefs dans l'espace aérien. Pour réduire les risques de collisions et les accidents dus aux turbulences de sillage ou au manque de précision du système de surveillance radar, il faut maintenir une distance minimale verticale de 1000 pieds et une distance minimale horizontale de 5 milles nautiques entre chaque avion. Les conflits sont évités par des manœuvres simples, telles que des changements de niveaux de vol, des changements de cap, ou de vitesse. De récentes recherches proposent des solutions pour optimiser la tâche des aiguilleurs du ciel à l'aide de modélisations plus ou moins réalistes concernant la prévision de trajectoire.

Un algorithme évolutionniste<sup>1</sup> développé au laboratoire d'optimisation de l'ENAC (École Nationale de l'Aviation Civile) propose d'ores et déjà des résolutions de conflits automatiques à l'aide de manœuvres simples conformes à la pratique des contrôleurs humains. Ces résolutions de conflits font appel à des prévisions de trajectoires précises, permettant de représenter diverses sources d'incertitude, telles que les variations de vitesses, les erreurs liées aux angles de changement de cap, ainsi que les délais d'exécution des manœuvres par les pilotes.

Étant donné que les contrôleurs aériens n'ont qu'un contrôle partiel sur la réaction des pilotes et les changements de trajectoire, ils doivent anticiper les manœuvres et prendre en compte certaines marges. Par conséquent, si l'on souhaite proposer au contrôleur un outil d'aide à la détection de conflits réaliste, il est nécessaire d'introduire des marges d'erreurs potentielles dans la prévision des trajectoires. Le calibrage du modèle d'incertitude est un enjeu majeur pour rendre l'outil d'aide à la décision acceptable par les contrôleurs aériens. En effet, si le modèle de prévision de trajectoire est trop précis, il risque de stresser le contrôleur car il engendrera des manœuvres trop proches des contraintes de séparation, pouvant parfois violer ces dernières. À contrario, si ce modèle prend en compte trop d'incertitude il perdra de son intérêt en détectant des conflits qui n'en sont pas, et qui gêneraient inutilement le contrôleur aérien.

## 2 Méthodologie

Dans un premier temps, nous introduisons un modèle d'incertitude sur la prédiction de trajectoire. Les données à évaluer sont des trajectoires finales après résolution, soit résolues

---

1. Les algorithmes évolutionnistes sont une famille d'algorithmes dont le principe s'inspire de la théorie de l'évolution, tels que les algorithmes génétiques introduits par Holland en 1975 [1].

par le solveur automatique dont nous disposons pour les cas nominaux, soit résolues par des contrôleurs aériens qualifiés pour les cas opérationnels. La principale hypothèse de notre travail concerne la norme de séparation visée par les contrôleurs aériens lors de leur tâche de résolution de conflits, qui est supposée être égale à 5 NM. Pour déterminer les paramètres d'incertitude nous utilisons un algorithme évolutionniste.

Les éléments de notre population correspondent à un type de donnée à quatre variables : l'incertitude de vitesse  $\varepsilon_s$ , l'incertitude de temps de réaction du pilote au début de la manœuvre  $\delta_{t_0}$ , l'incertitude de temps de réaction du pilote à la fin de la manœuvre  $\delta_{t_1}$ , et l'incertitude de cap pendant la manœuvre  $\varepsilon_\alpha$ . On définit également la fonction  $d_\omega$  qui calcule, sur un scénario résolu  $\omega \in \Omega$ , la distance minimale entre tous les volumes de trajectoires. On souhaite déterminer les paramètres d'incertitude  $(\varepsilon_s, \delta_{t_0}, \delta_{t_1}, \varepsilon_\alpha)$  pour lesquels les  $d_\omega$  sont les plus proches de  $n_d = 5\text{NM}$  quand ces incertitudes sont appliquées.

Étant donné que l'algorithme cherche à maximiser une fonction d'évaluation représentant une estimation heuristique de la qualité de la solution, notre fonction *fitness* est la suivante :

$$f : (\varepsilon_s, \delta_{t_0}, \delta_{t_1}, \varepsilon_\alpha) \longrightarrow \frac{|\Omega|}{|\Omega| + \sum_{\omega \in \Omega} (d_\omega(\varepsilon_s, \delta_{t_0}, \delta_{t_1}, \varepsilon_\alpha) - n_d)^2} \quad (1)$$

### 3 Résultats expérimentaux

Les premiers tests réalisés sur des cas nominaux s'avèrent bons : les incertitudes sur la vitesse, l'angle de changement de cap et le temps de réaction maximal du pilote pour commencer la manœuvre peuvent être théoriquement retrouvées. Après cette première étape concluante nous évaluons les paramètres d'incertitude sur des données issues d'expériences réalisées au centre de contrôle de Reims auprès de 17 contrôleurs aériens. Les résultats s'avèrent beaucoup moins exploitables. Deux principales causes ont été identifiées : premièrement, les contrôleurs n'ont probablement pas été assez bien informés concernant le fonctionnement de l'application utilisée pour résoudre les conflits, et deuxièmement, la quantité de données à analyser est nettement trop faible. C'est pourquoi, nous avons mis en place une nouvelle expérience au laboratoire de l'ENAC auprès d'instructeurs du contrôleur aérien. Les premiers résultats obtenus montrent que ces derniers semblent avoir des comportements différents lors des résolutions de conflits. D'autre part, nous avons envisagé d'ajouter la norme de séparation visée en paramètre d'incertitude puisqu'il est plutôt réaliste de penser que cette norme varie d'un contrôleur à un autre. Cette suggestion s'est avérée correcte puisque la norme de séparation visée, tout comme les autres paramètres d'incertitude, diffère d'un individu à l'autre.

### 4 Conclusions et perspectives

Finalement, même si nous ne pouvons pas conclure quantitativement à l'issue de cette étude, nous pouvons mentionner qu'il est préférable d'évaluer les contrôleurs aériens indépendamment les uns des autres sur des ensembles de scénarios suffisamment grands pour déterminer les paramètres d'incertitude de chacun. Il serait également intéressant, dans les travaux futurs, d'introduire le modèle d'incertitude élaboré sur un centre de contrôle existant et d'observer les comportements des contrôleurs aériens pendant leur tâche de résolution de conflits en situation réelle.

### Références

- [1] J. Holland. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, 1975.