



# L'algorithme de recherche en faisceau pour optimiser les trajectoires

22/03/2017 PAR ALEJANDRO MURRIETA-MENDOZA, BRUCE BEUZE, LAURANE TERNISIEN ET RUXANDRA MIHAELA BOTEZ

---

## RÉSUMÉ

Aujourd'hui, les aéronefs jouent un grand rôle dans le développement économique mondial. Ils requièrent toutefois une importante quantité de carburant. Une des façons de réduire la consommation de carburant pendant un vol consiste à fournir une trajectoire de référence de vol à consommation minimale de carburant. Le Laboratoire de recherche en commande active, avionique et aéroélasticité (**LARCASE**) a implanté un algorithme de recherche en faisceau qui permet de trouver les combinaisons les plus économiques de vitesses et d'altitudes pour la trajectoire de référence verticale. Il a été démontré que l'algorithme était capable de trouver, dans la plupart des cas, la solution optimale, ce qui a permis des économies de carburant allant jusqu'à 2,99 %

**Mots clés :** Optimisation, Trajectoire, Aéronef commercial, CO2, Carburant, Pollution, Système de gestion de vol

## INTRODUCTION

# INTRODUCTION

Aujourd'hui, les aéronefs jouent un grand rôle dans le développement économique mondial. Comme l'a signalé le Groupe d'action sur les transports aériens [1] en 2012, les avions ont transporté jusqu'au tiers de la valeur mondiale du fret commercial. En outre, plus de la moitié des personnes qui se rendaient dans d'autres pays l'ont fait par avion, car ce moyen de transport offre la façon la plus rapide et la plus commode de parcourir de longues distances. Cependant, des quantités importantes de carburant sont nécessaires pour ce mode de transport. Le carburant utilisé produit, entre autres, des particules polluantes telles que le CO<sub>2</sub>, les NO<sub>x</sub>, les hydrocarbures et la vapeur d'eau. Toutes ces particules polluantes appauvrissent la couche d'ozone, amplifient l'effet de serre et nuisent à la population. À l'heure actuelle, l'objectif aéronautique mondial est de réduire de 50 % les émissions de CO<sub>2</sub> d'ici 2050, comparativement aux niveaux enregistrés en 2005 [2].

Une des façons de réduire la consommation de carburant pendant un vol consiste à fournir une trajectoire de référence de vol à consommation minimale de carburant. La trajectoire de référence de vol peut être divisée en trajectoire de référence latérale et en trajectoire de référence verticale. La trajectoire de référence latérale se compose des points de cheminement (waypoints) en latitude et longitude sur une carte. La trajectoire de référence latérale est également connue sous le nom de tracé au sol puisqu'elle guide l'aéronef au-dessus de la surface terrestre, comme indiqué à la Figure 1. La trajectoire de référence verticale consiste à déterminer les vitesses et les altitudes de l'aéronef pour chaque point de cheminement, comme indiqué à la Figure 2.

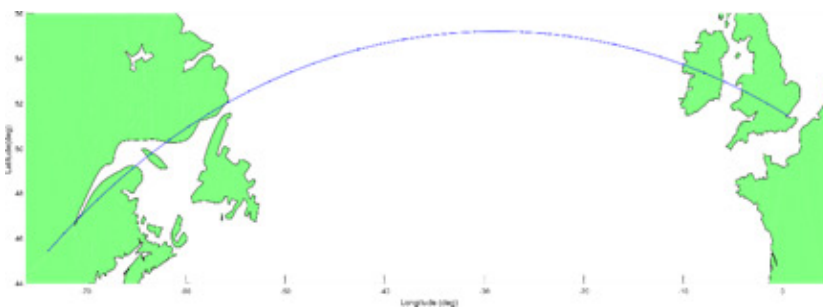


Figure 1 Trajectoire de référence latérale du chemin le plus court entre Montréal et Londres

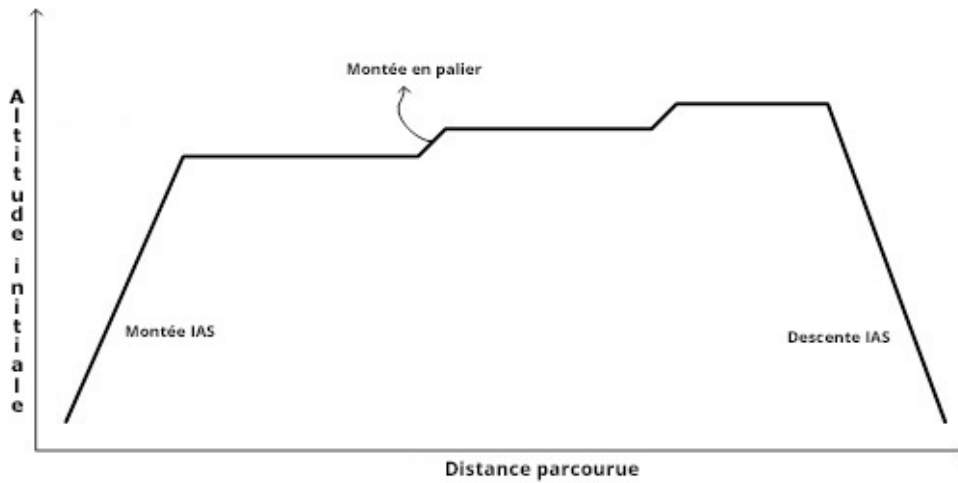


Figure 2 Trajectoire de référence verticale

Les trajectoires sont normalement optimisées avant le décollage; toutefois, un instrument avionique appelé système de gestion de vol (FMS) peut optimiser la trajectoire de référence pendant que l'avion est en vol. Le LARCASE a conçu différents algorithmes pour optimiser les trajectoires de référence verticales de vol, soit avant le décollage, soit pendant que l'avion vole vers sa destination.

## MÉTHODOLOGIE

Le LARCASE a conçu un algorithme qui permet de trouver les combinaisons les plus économiques de vitesses et d'altitudes pour la trajectoire de référence verticale. Cet algorithme tient compte de l'ensemble du vol (phases de montée, de croisière et de descente), des conditions météorologiques, des contraintes du trafic aérien, des changements d'altitude de croisière et d'un modèle de performance numérique obtenu à partir des données expérimentales de vols, qui indique la consommation de carburant.

La combinaison de vitesses et d'altitudes qui définissent la trajectoire de référence verticale peut être illustrée dans un graphique comme celui de la Figure 3, où chaque niveau représente soit la vitesse de montée initiale (IAS), le nombre de Mach, l'altitude de croisière initiale ou la vitesse de descente IAS. L'algorithme de recherche en faisceau a été conçu afin de trouver les combinaisons les plus économiques de nœuds pour la trajectoire de référence verticale.



Figure 3. Le problème de trajectoire de référence verticale vu sous forme de graphique

La recherche en faisceau est une variante de l’algorithme par séparation et évaluation (branch and bound) bien connue, où une fonction capable d’estimer le coût de vol avec un minimum d’information (appelée heuristique) est utilisée pour prédire la combustion minimale de carburant pour un nœud donné. L’algorithme visite systématiquement les nœuds (au niveau actuel de l’avion en vol) et compare le coût heuristique du vol au coût réel de référence le plus économique. Si le coût heuristique à un certain nœud est plus élevé que le coût de référence, ce nœud et les nœuds situés dessous sont rejetés. Si le coût heuristique est inférieur au coût de référence, le niveau suivant est élargi et chaque nœud de ce niveau est analysé. Lorsque l’algorithme évalue les nœuds au dernier niveau de l’arbre, tous les éléments nécessaires pour calculer le coût du vol sont connus. Pour cette raison, on a recours à une méthode plus complexe, capable de calculer un coût de vol précis. Si le coût de vol calculé est plus économique que le coût réel de référence, le nouveau coût de vol calculé devient le coût réel le plus économique.

La fonction heuristique constitue l’aspect le plus important de cet algorithme, car elle sert à écarter les parties du graphe en arbre qui sont peu susceptibles d’assurer la consommation de carburant la plus économique. En coupant des parties de l’arbre, il est possible de converger rapidement vers la solution optimale ou une autre très bonne solution. Par exemple, les branches coupées sont en rouge et les solutions optimales sont indiquées en vert, à la Figure 4.



Figure 4. En rouge, branches coupées. En vert, la solution optimale.

La partie de l’arbre en rouge a été rejetée parce que son coût heuristique était plus élevé que la solution réelle la plus économique. La partie verte représente une solution qui restait à analyser. Puisque la partie verte est au dernier niveau de l’arbre, son coût de vol correspondant n’est pas calculé de façon heuristique.

## RÉSULTATS

Différents vols ont été évalués afin de trouver la trajectoire de référence verticale la plus économique pour un avion bimoteur long-courrier d’une capacité d’environ 220 passagers. Le premier ensemble de résultats consistait à comparer la solution optimale fournie par le

nouvel algorithme à la solution optimale. L'objectif de ce test était d'analyser la différence de coût entre la solution globale optimale et la solution fournie par l'algorithme. Dans la plupart des cas, le nouvel algorithme était capable de trouver la solution optimale. Lorsque l'algorithme ne pouvait trouver la solution optimale, la différence de coût la plus élevée n'a été que de 0,4 %. Cette valeur a été considérée comme acceptable, car l'algorithme fournissait une solution plus rapidement que l'évaluation de toutes les combinaisons possibles.

Le second ensemble de résultats était une comparaison entre la solution fournie par le nouvel algorithme et la solution fournie par l'algorithme d'optimisation intégré à un système de gestion de vol commercial. Le même vol a été évalué dans les mêmes conditions à l'aide des deux algorithmes. Dans tous les cas, le nouvel algorithme a donné des trajectoires plus efficaces que l'algorithme du FMS. Le pourcentage d'optimisation est illustré à la Figure 5.

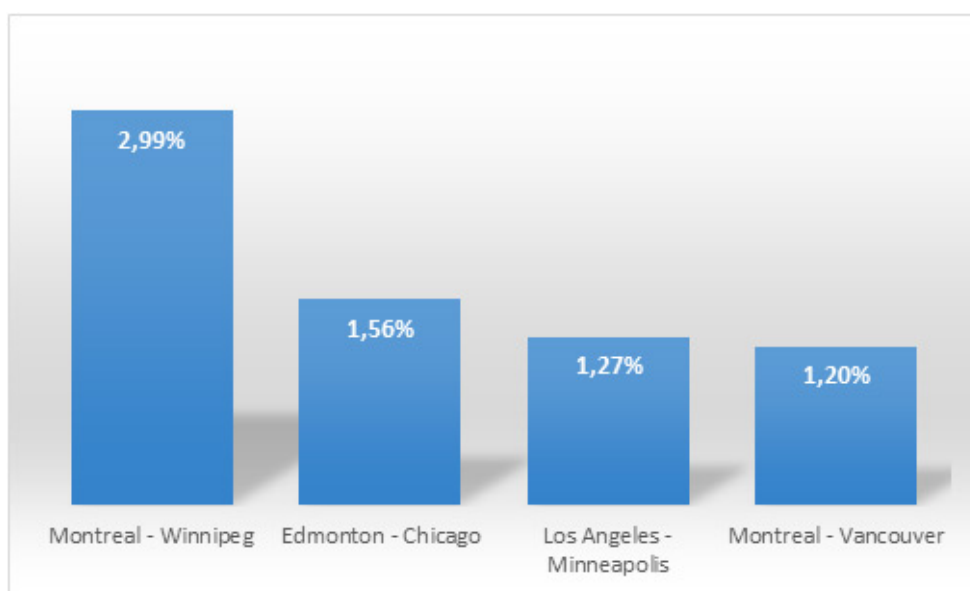


Figure 5. Économies de consommation de carburant atteintes à l'aide du nouvel algorithme

Ses économies permettent de brûler moins de carburant, ce qui entraîne moins de pollution attribuable aux vols d'aéronefs. En outre, ce pourcentage élevé d'économie de carburant se traduit en gains pour les compagnies aériennes, leur donnant la possibilité d'investir ces sommes dans d'autres projets.

L'article suivant fournit une explication plus détaillée de cet algorithme et plus de résultats sur cette recherche :

**Alejandro Murrieta-Mendoza**, Bruce Beuze, Laurane Ternisien et Ruxandra Botez, « **Branch & Bound-Based Algorithm for Aircraft VNAV Profile Reference Trajectory Optimization** ». L'article a été présenté à la « 15th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, AIAA AVIATION 2015 » à Dallas, Texas.

Ce projet a été mené au Laboratoire de recherche en commande active, avionique et aéroserveélasticité (**LARCASE**) et financé par le Programme des réseaux de centres d'excellence dirigés par l'entreprise **GARDN** en collaboration avec **CMC Electronique – Esterline**, qui a pour mission d'encourager le développement de technologies aéronautiques vertes au Canada. Découvrez d'autres approches de ce type de recherche chez **LARCASE** à [3] – [14].



Si ce projet vous intéresse, ou tout autre projet du Laboratoire de recherche en commande active, avionique et aéroserveélasticité (**LARCASE**), consultez le [site web](#) et n'hésitez pas à prendre rendez-vous avec **Mme Botez**, professeure, pour discuter avec son équipe de recherche.

## Auteurs



**Alejandro Murrieta-Mendoza** est étudiant au **doctorat à l'École de technologie supérieure (ÉTS)** de Montréal, et assistant de recherche au Laboratoire de recherche en commande active, avionique et aéroserveélasticité (**LARCASE**). Il poursuit des recherches en optimisation de trajectoire de vol des aéronefs.



**Bruce Beuze** a effectué un stage professionnel de six mois à titre d'étudiant à la maîtrise à l'École de technologie supérieure (**ÉTS**) et assistant de recherche au Laboratoire de recherche en commande active, avionique et aéroserveélasticité (**LARCASE**). Ses tâches ont porté sur l'optimisation de trajectoires de vol et la commande de vol. Bruce a récemment obtenu sa maîtrise en génie de l'aéronautique et de l'espace à l'EPF, l'École d'ingénieurs de France.



**Laurane Ternisien** est ingénieure dans le secteur aérospatial en France. Elle a terminé un stage professionnel de 6 mois à titre d'étudiante au baccalauréat de l'EPF à l'École de technologie supérieure (**ÉTS**) et d'assistante de recherche au Laboratoire de recherche en commande active, avionique et aéroserveélasticité (**LARCASE**).



Dr Ruxandra Botez est professeure titulaire au Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure (ÉTS). Elle est la fondatrice et directrice du Laboratoire de recherche en commande active, avionique et aéroélasticité (LARCASE) et titulaire de la Chaire de recherche du Canada en technologies de modélisation et simulation des aéronefs.

## + RÉFÉRENCES

- [1] ATAG. « Aviation Benefits Beyond Borders. » Air Transport Action Group, Geneva, Switzerland, 2013.
- [2] ICAO. « Aviation's contribution to climate change. » International Civil Aviation Organization, Montreal, 2010, p. 260.
- [3] Murrieta-Mendoza, A., Ruiz, S., Kessaci, S., and Botez, R. M. « Vertical Reference Flight Trajectory Optimization with the Particle Swarm Optimisation, » The 36th International Conference on Modelling, Identification and Control (MICC2017). Innsbruck, Austria, 2017.
- [4] Murrieta-Mendoza, A., Mugnier, P., and Botez, R. M. « Vertical Reference Trajectory Optimization and Simulation for a Commercial Aircraft , » 11th International Conference on Modelling, Optimization and Simulation – MOSIM'16. Montreal, QC, Canada, 2016.
- [5] Murrieta-Mendoza, A., Botez, R. M., and Ford, S. « New method to compute the missed approach fuel consumption and its emissions, » The Aeronautical Journal Vol. 120, No. 1228, 2016, p. 18. doi: <http://dx.doi.org/10.1017/aer.2016.37>
- [6] Murrieta-Mendoza, A., Félix-Patrón, R. S., and Botez, R. M. « Flight Altitude Optimization Using Genetic Algorithms Considering Climb and Descent Costs in Cruise with Flight Plan Information, » SAE 2015 AeroTech Congress & Exhibition. SAE International, Seattle, USA, 2015, p. 9. doi: <http://dx.doi.org/10.4271/2015-01-2542>
- [7] Murrieta-Mendoza, A., and Botez, R. M. « Aircraft Vertical Route Optimization Deterministic Algorithm for a Flight Management System, » SAE 2015 AeroTech Congress & Exhibition. Vol. SAE Technical Paper 2015-01-2541, SAE International, Seattle, USA, 2015, p. 13. doi: <http://dx.doi.org/10.4271/2015-01-2541>
- [8] Murrieta Mendoza, A., Felix-Patron, R. S., and Botez, R. M. « Genetic Algorithm for Altitude Optimization during Cruise, » AHS Sustainability 2015. Montreal, Canada, 2015.
- [9] Félix-Patrón, R. S., and Botez, R. M. « Flight Trajectory Optimization Through Genetic Algorithms for Lateral and Vertical Integrated Navigation, » Journal of Aerospace Information Systems Vol. 12, No. 8, 2015, pp. 533-544. doi: <http://dx.doi.org/10.2514/1.1010348>
- [10] Murrieta-Mendoza, A., and Botez, R. M. « Vertical Navigation Trajectory Optimization Algorithm For A Commercial Aircraft , » AIAA/3AF Aircraft Noise and Emissions Reduction Symposium, 2014. doi: <http://dx.doi.org/10.2514/6.2014-3019>

- [11] Félix-Patrón, R. S., Berrou, Y., and Botez, R. M. « New Methods of Optimization of the Flight Profiles for Performance Database-Modeled Aircraft », » Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2014. doi: 10.1177/0954410014561772
- [12] Sidibe, S., and Botez, R. M. « Trajectory optimization of FMS-CMA 9000 by dynamic programming, » CASI AÉRO 2013 conference, 60th Aeronautics Conference and AGM. Toronto, Canada, 2013.
- [13] Dancila, B., Botez, R. M., and Labour, D. « Fuel Burn Prediction Algorithm for Cruise, Constant Speed and Level Flight Segments, » The Aeronautical Journal Vol. 117, No. 1191, 2013.

## RÉFÉRENCES DES IMAGES

L'image d'en-tête a été achetée sur Istock.com. Des droits d'auteurs s'appliquent. Les autres images sont des auteurs. La [licence CC](#) de Substance s'applique.