

23 NOV 2020

Article de recherche

AÉROSPATIALE

Des trajectoires de décollage qui réduisent l'impact environnemental

Texte rédigé à partir de l'article "Cessna Citation X Takeoff and Departure Trajectories Prediction in Presence of Winds", sous presse dans le *AIAA Journal of Aerospace Information Systems*.



Georges Ghazi



Nicolas Maniette



Ruxandra Botez





Achetée sur Istock.com. Droits d'auteurs

RÉSUMÉ:

L'optimisation des procédures de décollage et de départ a été identifiée comme un moyen efficace pour réduire l'impact environnemental des avions. C'est la raison pour laquelle, au laboratoire de recherche en commande active, avionique et aéroservoélasticité (LARCASE), des chercheurs élaborent des algorithmes et des outils pour prédire, analyser et optimiser les trajectoires et les performances au décollage des avions. Ces algorithmes ont été conçus et testés sur l'avion d'affaires Cessna Citation X puisque le LARCASE possède un simulateur de vol de recherche hautement qualifié. Les résultats obtenus ont montré que les algorithmes du LARCASE étaient capables de prédire les trajectoires de vol et les performances de l'avion Cessna Citation X avec moins de 5 % d'erreur.

Introduction

Le transport aérien, comme tout autre mode de transport, affecte notre environnement au quotidien et à différentes échelles. En brûlant de grandes quantités de kérosène, les moteurs d'avions produisent diverses substances qui sont directement relâchées dans l'atmosphère. Parmi ces substances, on retrouve principalement du dioxyde de carbone

(CO₂) bien connu pour sa contribution au réchauffement climatique, mais également des oxydes d'azote (NO_x) qui détruisent la couche d'ozone [1].

Selon des statistiques de l'Association internationale du transport aérien (IATA), au cours de l'année 2018, l'industrie aéronautique a été responsable à elle seule d'environ 2 % des émissions de CO₂ mondiales [2].

Cependant, l'impact environnemental du transport aérien ne se limite pas uniquement au rejet de polluants dans l'atmosphère. En effet, le bruit généré par les moteurs d'avion lors des procédures de décollage et de départ est aussi une autre source de pollution. Plusieurs experts s'accordent pour dire qu'une exposition prolongée au bruit des avions peut avoir des effets négatifs sur la santé des personnes vivantes à proximité des aéroports [3].

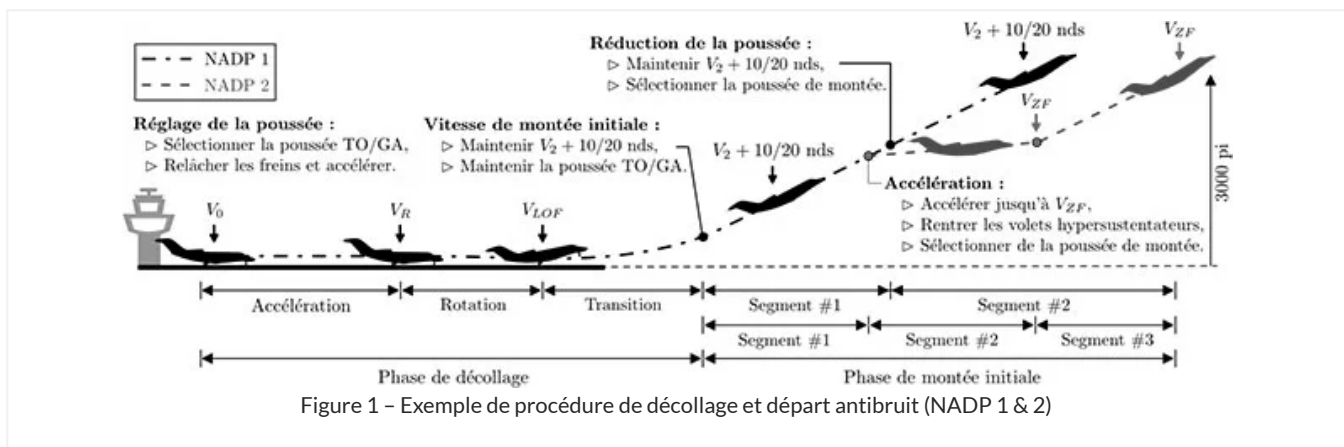
Bien que les avions de nouvelle génération soient 80 % plus économes en carburant et 75 % plus silencieux que leurs prédécesseurs, ces gains d'efficacité ne suffisent pas pour atténuer l'impact environnemental du transport aérien. En effet, étant donné la forte croissance du trafic aérien (+3.5 % par an), les émissions liées aux avions pourraient passer de 2 à 18 % d'ici 2037 [4]. L'impact acoustique, quant à lui, reste difficilement quantifiable.

Au LARCASE, différentes solutions sont étudiées par les chercheurs pour réduire les émissions des avions [5–10]. Parmi les solutions envisagées, l'optimisation des trajectoires de vol semble être très prometteuse [11–16]. De plus, étant donné que l'essentiel du bruit généré par un moteur d'avion est créé lors du décollage, optimiser les procédures de décollage pourrait aussi être un bon moyen pour réduire l'empreinte sonore des avions.

Procédures normales de décollage et de départ

Lors d'un départ, les avions doivent suivre un itinéraire bien défini appelé départ normalisé aux instruments (SID). Les SID sont spécifiques à chaque aéroport et à chaque piste de décollage et sont utilisées pour guider latéralement les avions vers une route de sortie bien précise. À cela, s'ajoute aussi un ensemble de procédures d'atténuation du bruit auxquelles les pilotes doivent se conformer pour limiter les nuisances sonores sur les zones résidentielles proches de l'aéroport.

La **Figure 1** illustre deux types de procédures standards d'atténuation du bruit (NADP). Ces deux procédures ont été initialement élaborées par l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI), et sont de nos jours, utilisées dans la majorité des aéroports pour limiter les nuisances sonores des avions.



De façon générale, une procédure est composée de plusieurs phases, aussi appelées segments. Chaque segment permet en quelque sorte de décrire un ensemble de manœuvres que les pilotes doivent réaliser.

Le premier segment est appelé « segment d'accélération ». Ce segment est amorcé lorsque le pilote relâche les freins de l'avion et avance les manettes des gaz jusqu'à la position TO/GA pour mettre les moteurs à pleine puissance. Dans certains cas, les pilotes peuvent également utiliser une poussée plus petite que la poussée maximale. L'avantage d'utiliser une poussée réduite est que cela permet de prévenir l'usure des moteurs, mais aussi de réduire la consommation de carburant. Une fois la poussée établie, l'avion accélère le long de la piste.

Lorsque l'avion atteint la vitesse de rotation (VR), le pilote débute le « segment de rotation » au cours duquel il tire sur le manche pour faire pivoter l'avion autour de ses roues arrière. L'objectif de cette manœuvre est de lever le nez de l'avion pour créer une force aérodynamique de portance (force qui permet de maintenir l'avion en l'air). Lorsque la force de portance devient plus grande que le poids de l'avion, ce dernier décolle alors du sol. À cet instant, le pilote amorce le « segment de transition » durant lequel il ajuste l'assiette de l'avion pour capturer la vitesse de sécurité au décollage ($V2$).

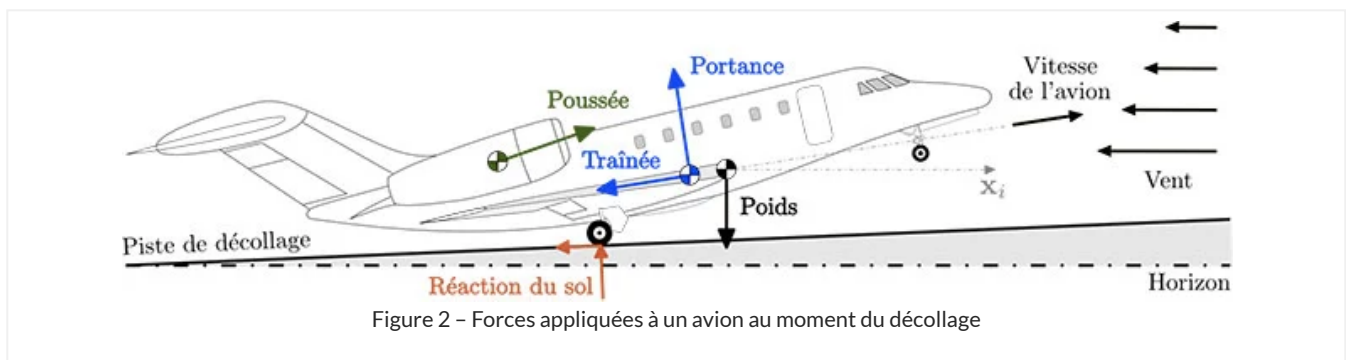
Par la suite, le pilote peut alors commencer la montée initiale vers l'altitude de croisière en se conformant à l'une des deux procédures d'atténuation du bruit illustrées à la **Figure 1** :

- La **NADP 1** vise principalement à réduire le bruit autour et au-dessus de l'extrémité de la piste en forçant l'avion à s'éloigner le plus vite de l'aéroport en altitude.
- La **NADP 2** vise principalement à atténuer le bruit dans les zones plus éloignées de l'extrémité de la piste en forçant l'avion à s'éloigner le plus vite de l'aéroport en distance.

Méthode de prédiction des trajectoires de décollage et de départ

Au LARCASE, différents algorithmes ont été développés pour prédire les trajectoires de vol des avions durant les procédures de décollage et de départ. La stratégie considérée pour atteindre cet objectif consistait à décomposer la trajectoire de l'avion en 5 segments types, et à résoudre les équations de mouvement de l'avion sur chacun de ces segments.

Les équations de mouvement de l'avion permettent de décrire l'influence des forces qui s'appliquent sur ce dernier ainsi que (voir **Figure 2**) les accélérations.



Ainsi, en partant d'une condition initiale, les algorithmes développés au LARCASE calculent les forces à partir de bases de données et d'équations mathématiques. Ces forces sont ensuite combinées pour déterminer les accélérations de l'avion. Connaissant les accélérations, il est alors possible de réaliser une intégration numérique pour estimer les vitesses et les positions de l'avion pour un court intervalle de temps. Ce processus est ainsi répété autant que nécessaire pour obtenir la trajectoire complète de l'avion sur un segment.

De cette façon, les chercheurs du LARCASE peuvent construire différentes procédures en connectant les segments les uns après les autres, un peu comme des « blocs à assembler ».

Une fois la procédure définie, les algorithmes calculent la trajectoire de vol, les performances et la consommation de carburant de l'avion, puis affichent les résultats sous forme de divers graphiques, tels que ceux présentés aux **Figures 3 et 4**.

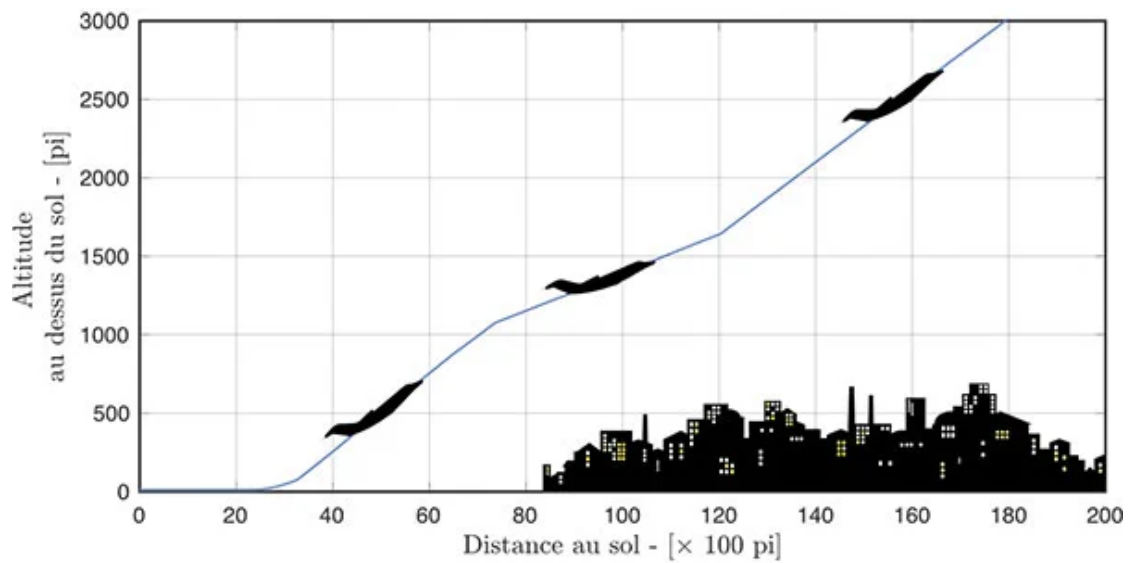


Figure 3 – Exemple de trajectoire verticale (altitude vs distance) pour un décollage de l'aéroport d'Innsbruck en Autriche

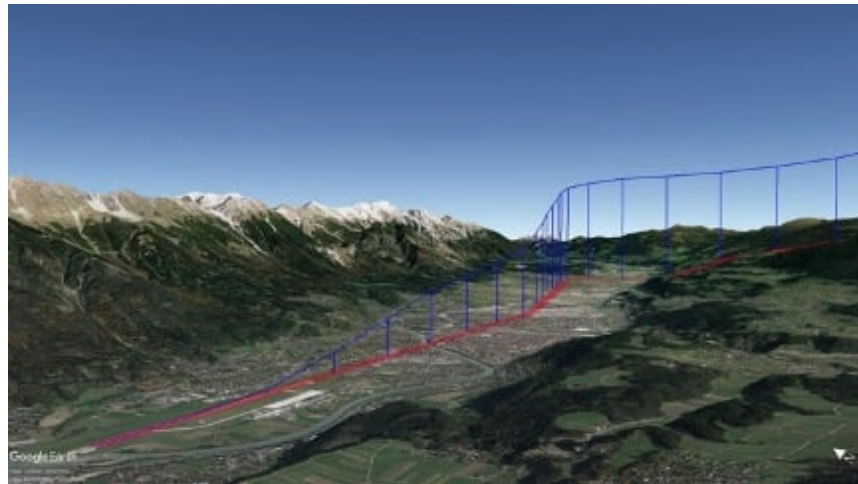


Figure 4 – Exemple de trajectoire en 3-Dimensions générée sur Google Earth pour un décollage de l'aéroport d'Innsbruck en Autriche

Enfin, une reconstruction 3D de la trajectoire est également réalisée pour mieux analyser les résultats de la simulation (voir **Figure 5**). Cette reconstruction est réalisée à partir des résultats issus des algorithmes et à l'aide du logiciel FlightGear, qui est un simulateur de vol à code source ouvert.

Cessna Citation X takeoff trajectory prediction - LAR...



Figure 5 – Exemple de visualisation 3D d'une trajectoire de décollage de l'aéroport d'Innsbruck en Autriche

Validation des algorithmes

Afin de valider l'ensemble des algorithmes développés au LARCASE, plusieurs essais de décollage ont été réalisés à l'aide d'un simulateur de vol pour la recherche de l'avion Cessna Citation X. Ce simulateur, présenté à la **Figure 6**, a été conçu et fabriqué par la compagnie CAE inc., et dispose d'une qualification de niveau D pour ses modèles de dynamique du vol et de propulsion. En parallèle, chaque test a été ensuite reproduit avec les algorithmes du LARCASE.



Figure 6 – Simulateur de vol pour la recherche

La **Figure 7** illustre un exemple de résultats obtenus pour deux procédures de départ (NADP1 & 2). Sur cette figure, les courbes en bleu représentent les performances de l'avion Cessna Citation X mesurées à partir du simulateur de vol, tandis que les courbes en noire représentent les performances calculées par les algorithmes.

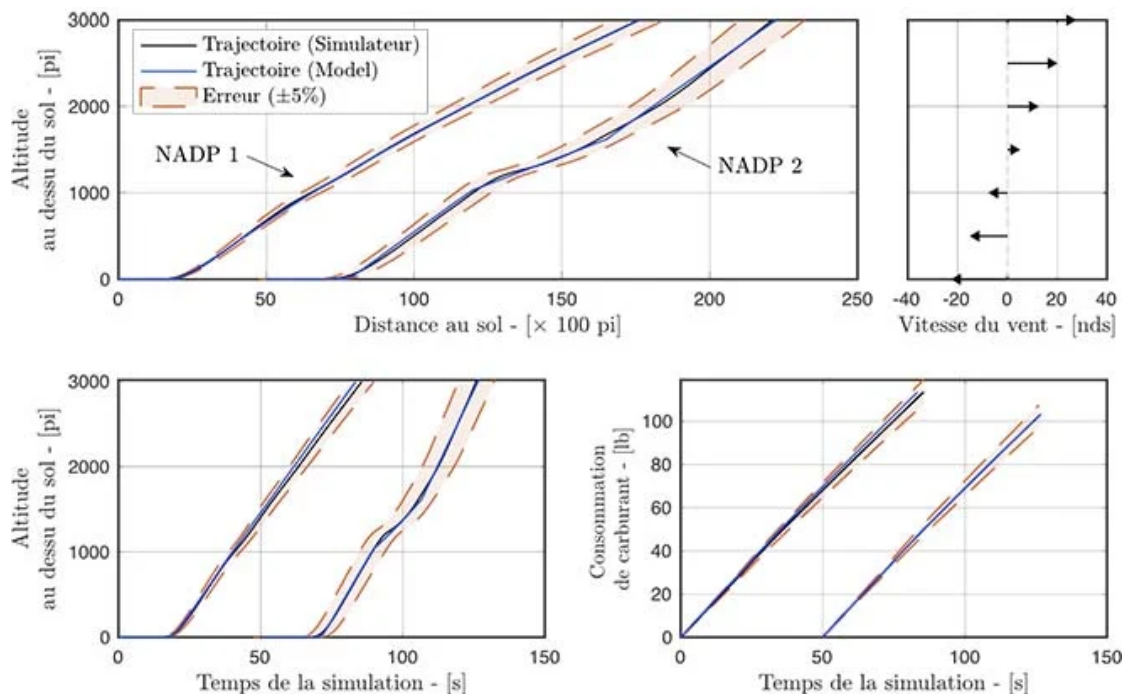


Figure 7 – Exemple de résultats de comparaison
pour deux décollages avec un profil de vent non nul

De façon générale, les résultats de comparaison ont montré que les algorithmes du LARCASE étaient capables de prédire la trajectoire de vol, les performances et la consommation de carburant de l'avion avec moins de 5 % d'erreur.

Ce projet a été mené au Laboratoire de recherche en commande active, avionique et aéroserveoélasticité (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.

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

Information supplémentaire

Pour plus d'information sur cette recherche, consulter l'article suivant :

Ghazi, G.; Botez, Ruxandra; Maniette, Nicolas. 2020. « Cessna Citation X Takeoff and Departure Trajectories Prediction in Presence of Winds ». *AIAA Journal of Aerospace Information Systems*.



Georges Ghazi

[Profil de l'auteur\(e\)](#)

Georges Ghazi est étudiant au doctorat et assistant de recherche au Département de génie de la production automatisée de l'ÉTS. Ses recherches portent sur la modélisation et la prédiction des trajectoires de vol.

Programme : [Génie de la production automatisée](#) [Génie aérospatial](#)

Chaire de recherche : [Chaire de recherche du Canada en technologies de modélisation et simulation des aéronefs](#)

Laboratoires de recherche : [LARCASE – Laboratoire de recherche en commande active, avionique et aéroserveoélasticité](#)



Nicolas Maniette

[Profil de l'auteur\(e\)](#)

Nicolas Maniette a effectué un stage professionnel de 5 mois au LARCASE en tant qu'étudiant à la maîtrise et assistant de recherche.

Programme : [Génie aérospatial](#) [Génie de la production automatisée](#)

Chaire de recherche : Chaire de recherche du Canada en technologies de modélisation et simulation des aéronefs

Laboratoires de recherche : LARCASE – Laboratoire de recherche en commande active, avionique et aéroserveoélasticité



Ruxandra Botez

Profil de l'auteur(e)

Ruxandra Mihaela Botez est professeure au Département de génie des systèmes à l'ÉTS. Elle est spécialiste en modélisation et simulation de vols d'aéronefs, d'hélicoptères, de systèmes de vol, et d'ailes déformables.

Programme : Génie de la production automatisée Génie aérospatial

Chaire de recherche : Chaire de recherche du Canada en technologies de modélisation et simulation des aéronefs

Laboratoires de recherche : LARCASE – Laboratoire de recherche en commande active, avionique et aéroserveoélasticité

CACHER LES RÉFÉRENCES

AFFICHER LES RÉFÉRENCES DES IMAGES

VOIR LES COMMENTAIRES

Références

- [1] Lee, D. S., Fahey, D. W., Forster, P. M., Newton, P. J., Wit, R. C. N., Lim, L. L., Owen, B., and Sausen, R. "Aviation and Global Climate Change in the 21st Century." *Atmospheric Environment*, Vol. 43, Nos. 22–23, 2009, pp. 3520–3537. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.04.024>.
- [2] International Air Transport Association (IATA). Fact Sheet: Climate Change & CORSIA. <https://www.iata.org/en/iata-repository/pressroom/fact-sheets/fact-sheet—climate-change/>.
- [3] Basner, M., Clark, C., Hansell, A., Hileman, J. I., Janssen, S., Shepherd, K., and Sparrow, V. "Aviation Noise Impacts: State of the Science." *Noise Health*, Vol. 19, No. 87, 2017, pp. 41–50. https://doi.org/10.4103/nah.NAH_104_16.
- [4] International Air Transport Association (IATA). IATA Forecast Predicts 8.2 Billion Air Travelers in 2037. <https://www.iata.org/en/pressroom/pr/2018-10-24-02/>.
- [5] Segui, M., Mantilla, M., Ghazi, G., and Botez, R. M., "New Economical Cruise Methodology for the Cessna Citation X Business Jet by an Original Morphing Horizontal Tail Application," Modeling and Simulation Technologies Conference, Atlanta, GA, USA, 2018.

- [6] Segui, M., Rogoli, V., and Botez, R. M., "Cessna Citation X Static Cruise Improvement Using Morphing Wing Application on Its Horizontal Tail," 8th European Conference for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS), Madrid, Spain, 2019.
- [7] Murrieta-Mendoza, A., and Botez, R. M. "Methodology for Vertical-Navigation Flight-Trajectory Cost Calculation Using a Performance Database." *Journal of Aerospace Information Systems*, Vol. 12, No. 8, 2015, pp. 519–532. <https://doi.org/10.2514/1.I010347>.
- [8] Murrieta-Mendoza, A., Hamy, A., and Botez, R. M. "Four- and Three-Dimensional Aircraft Reference Trajectory Optimization Inspired by Ant Colony Optimization." *Journal of Aerospace Information Systems*, Vol. 14, No. 11, 2017, pp. 597–616. <https://doi.org/10.2514/1.I010540>.
- [9] Murrieta-Mendoza, A., Botez, R. M., and Bunel, A. "Four-Dimensional Aircraft En Route Optimization Algorithm Using the Artificial Bee Colony." *Journal of Aerospace Information Systems*, Vol. 15, No. 6, 2018, pp. 307–334. <https://doi.org/10.2514/1.I010523>.
- [10] Murrieta-Mendoza, A., Beuze, B., Ternisien, L., and Botez, R. M. "New Reference Trajectory Optimization Algorithm for a Flight Management System Inspired in Beam Search." *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 30, No. 4, 2017, pp. 1459–1472. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2017.06.006>.
- [11] 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.I010348>.
- [12] 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>.
- [13] 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: <http://dx.doi.org/10.1177/0954410014561772>.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Felix Patron, R. S., Botez, R. M., and Labour, D. "New Altitude Optimisation Algorithm for the Flight Management System CMA-9000 Improvement on the A310 and L-1011 Aircraft," *The Aeronautical Journal* Vol. 117, No. 1194, 2013, pp. 787-805.

Chaire de recherche : Chaire de recherche du Canada en technologies de modélisation et simulation des aéronefs

Laboratoires de recherche : LARCASE – Laboratoire de recherche en commande active, avionique et aéroserveoélasticité

Domaines d'expertise : Dynamique de vol Optimisation des trajectoires de vol sur le système de gestion de vol Modélisation et simulation des aéronefs



SUBSTANCE

ACTUALITÉ SCIENTIFIQUE
ET INNOVATION DE L'ÉTS

CATÉGORIES

AÉROSPATIALE

AIDE À LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ÉNERGIE

ENTREPRENEURIAT ET GESTION

INFRASTRUCTURES ET MILIEUX BÂTIS

L'EXPÉRIENCE ÉTS

MATÉRIAUX ET FABRICATION

TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION ET DES COMMUNICATIONS

SANTÉ

ROBOTIQUE

À PROPOS

À PROPOS

NOUS JOINDRE

ÉVÉNEMENTS

POLITIQUE ÉDITORIALE