

Air Traffic Flow Management et le problème des traînées de condensation

Céline Demouge¹, Marcel Mongeau¹, Nicolas Couellan^{1,2}

¹ ENAC, Université de Toulouse, 7 avenue Edouard Belin, Toulouse, 31400, France

{prenom.nom}@enac.fr

² Institut Mathématiques de Toulouse, UMR 5219, Université de Toulouse, CNRS, UPS, Toulouse Cedex 9, 31062, France

Mots-clés : *Air traffic flow management, Contrails, Génération de colonnes, Impact climatique, Transport aérien*

1 Contexte

Une partie du forçage radiatif dû à l'activité humaine est imputable au transport aérien. En plus d'émettre du CO₂, le secteur occasionne un effet de serre autre que le CO₂. Parmi ces effets non-CO₂, on peut citer les traînées de condensation (*contrails*) [6]. Ces traînées blanches visibles à l'arrière des avions, peuvent sous certaines conditions se transformer en nuages et avoir un effet négatif ou positif sur le climat selon l'endroit et le moment de sa création.

A l'échelle européenne, plusieurs initiatives sont en cours pour limiter l'impact de ces traînées de condensation, notamment en modifiant les trajectoires de vol pour éviter le passage par des zones favorables aux contrails. Ces modifications de trajectoire ont un impact sur la congestion de certaines zones et ne doivent pas se faire aux dépens de la sécurité. Ainsi, se plaçant du point de vue du contrôle aérien, le problème présenté est de diriger les flux au-dessus de l'espace aérien français ou européen, en minimisant l'impact environnemental total, c'est-à-dire en trouvant un compromis entre CO₂ et contrails. Le problème est contraint par les capacités des secteurs aériens définies en amont en terme de nombre d'avions par période. Ces contraintes permettent de garantir que la charge de travail des contrôleurs sera acceptable et que la sécurité pourra être assurée.

2 Le problème ATFM appliqué aux contrails

Le problème proposé se rapproche du problème *Air Traffic Flow Management* (ATFM) proposé dans la littérature [4, 3, 8, 1, 2, 7]. Dans le cas général, les fonctions objectifs se concentrent sur le retard imputé aux vols et/ou sur le nombre de vols annulés, pour pouvoir respecter la capacité maximale des secteurs et/ou des infrastructures, comme les aéroports. Une étude [5] a proposé de changer la fonction objectif et de se concentrer sur le CO₂.

Nous nous proposons alors de modéliser le problème de l'évitement de contrails au niveau du réseau aérien, français ou européen, sous la forme d'un problème ATFM. La fonction objectif est ainsi modifiée pour prendre en compte le compromis entre le CO₂ et l'évitement de zones favorables aux contrails. De plus, nous modélisons des contraintes spécifiques pour garantir des trajectoires acceptables d'un point de vue opérationnel, notamment concernant le profil vertical des trajectoires (altitudes de vol). En effet, changer d'altitude est un moyen efficace de limiter les contrails mais n'est pas toujours physiquement possible et a un impact sur la charge de travail du contrôleur aérien, le confort passager, l'usure moteur et la consommation de carburant.

Nous proposons une méthode de résolution basée sur la génération de colonnes, de manière analogue à ce qui peut être fait dans [2, 7] pour le problème ATFM classique. Nous proposons

des instances que nous rendons publiques, basées sur des données publiques, sur les ciels français et européens. Nous testons notre approche sur ces instances, en autorisant ou non le changement d'altitude et avec plusieurs métriques standards associées aux contrails.

3 Conclusion

Nous avons présenté une modélisation et une approche de résolution adaptée qui permet de limiter l'impact des traînées de condensation à l'échelle d'un réseau aérien en optimisant les trajectoires de vol, en 2D ou en 3D, en respectant la capacité des espaces aériens et donc en assurant la sécurité. Les résultats numériques que nous obtenons montrent la viabilité de l'approche ainsi que son utilité opérationnelle. De plus, la modélisation mathématique proposée est adaptable à la prise en compte d'autres effets non-CO₂, comme les NO_x par exemple.

Cette étude ouvre la voie à plusieurs perspectives de recherche. D'abord, de nombreuses incertitudes sont à prendre en compte lorsqu'on considère les contrails, notamment leur prédiction basée sur des prévisions météorologiques par nature incertaines. La possibilité de créer un contrail et de déterminer son impact ne sont pas déterministes et ces incertitudes pourraient être modélisées mathématiquement via l'optimisation robuste/stochastique. De plus, l'étude se plaçant du point de vue du contrôle aérien, certains vols sont susceptibles d'être désavantagés par rapport à d'autres, il serait intéressant de proposer une modélisation qui prend en compte l'équité entre les compagnies aériennes.

Références

- [1] A. Agustín, A. Alonso-Ayuso, L. F. Escudero, and C. Pizarro. On air traffic flow management with rerouting. Part I : Deterministic case. *European Journal of Operational Research*, 219(1) :156–166, 2012.
- [2] H. Balakrishnan and B. G. Chandran. Optimal large-scale air traffic flow management. *Massachusetts Institute of Technology, Technical Report*, 2014.
- [3] D. Bertsimas, G. Lulli, and A. Odoni. An integer optimization approach to large-scale air traffic flow management. *Operations Research*, 59(1) :211–227, 2011.
- [4] D. Bertsimas and S. S. Patterson. The air traffic flow management problem with enroute capacities. *Operations Research*, 46(3) :406–422, 1998.
- [5] S. Hamdan, A. Cheaitou, O. Jouini, Z. Jemai, I. Alsyouf, and M. Bettayeb. An environmental air traffic flow management model. In *2019 8th International Conference on Modeling Simulation and Applied Optimization (ICMSAO)*, pages 1–5, 2019.
- [6] D. Lee, D. Fahey, A. Skowron, M. Allen, U. Burkhardt, Q. Chen, S. Doherty, S. Freeman, P. Forster, J. Fuglestvedt, A. Gettelman, R. De León, L. Lim, M. Lund, R. Millar, B. Owen, J. Penner, G. Pitari, M. Prather, R. Sausen, and L. Wilcox. The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. *Atmospheric Environment*, 244 :117834, 2021.
- [7] O. Richard, S. Constans, and R. Fondacci. Computing 4D near-optimal trajectories for dynamic air traffic flow management with column generation and branch-and-price. *Transportation Planning and Technology*, 34(5) :389–411, 2011.
- [8] L. Weigang, M. V. P. Dib, D. P. Alves, and A. M. F. Crespo. Intelligent computing methods in air traffic flow management. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 18(5) :781–793, 2010.