

Soutenance de thèse

Antoine SALGAS soutiendra sa thèse de doctorat, préparée au sein de l'équipe d'accueil doctoral ISAE-ONERA EDyF et intitulée «*Modélisation de scénarios prospectifs pour l'aviation: régionalisation, étude des coûts d'abattement et optimisation technico-économique sous contraintes environnementales*»

Le 7 janvier 2025 à 9h30, salle des thèses à l'ISAE-SUPAERO

devant le jury composé de

M. Gilles LAFFORGUE	Toulouse Business School	Directeur de thèse
M. Scott DELBECQ	ISAE-SUPAERO	Co-directeur de thèse
M. Junzi SUN	Delft University of Technology	Examinateur
Mme Lynette DRAY	University College London	Rapporteuse
Mme Aude POMMERET	Université Savoie Mont Blanc	Rapporteuse
M. Russel MCKENNA	ETH Zürich	Examinateur
M. Thomas PLANÈS	ISAE-SUPAERO	Membre invité

Résumé : L'origine anthropique du changement climatique est désormais équivoque, et son atténuation nécessite des réductions drastiques des émissions de gaz à effet de serre. Bien que le secteur de l'aviation soit un contributeur relativement modeste, il représente environ 2,6 % des émissions de CO₂ et est responsable d'autres effets réchauffants, dits non-CO₂ significatifs. Plusieurs leviers de décarbonation sont disponibles pour inverser la tendance à la hausse des émissions, notamment l'amélioration de l'efficacité des avions et des opérations, ainsi que le remplacement du kérosène fossile par des alternatives moins émettrices sur l'ensemble de leur cycle de vie. Les avantages et les inconvénients de ces différentes options, ainsi que leurs interactions, peuvent être explorés dans des scénarios de transition prospectifs.

Bien qu'utilisés par plusieurs acteurs institutionnels, industriels ou académiques, ces scénarios manquent souvent d'une méthodologie détaillée et transparente, d'une couverture disciplinaire suffisante pour permettre des choix stratégiques éclairés, ou sont difficilement adaptables à des cas différents de leur contexte initial.

Cette thèse propose trois axes permettant de répondre partiellement à chacun de ces défis. Elle s'inscrit dans le cadre du développement continu d'un simulateur de scénarios prospectifs de décarbonisation du transport aérien.

Comme les opportunités de décarbonisation varient d'une région à l'autre (ressources naturelles et financières, niveaux de trafic, etc.), l'adaptabilité des scénarios de transition à ces différentes échelles est une question clé. Cette thèse contribue à y répondre en présentant une méthode d'estimation du trafic aérien et des flux d'émissions de CO₂ de manière ouverte, reproductible et partitionnable. Celles-ci sont utilisées pour permettre au simulateur de scénarios prospectifs de produire, de manière générique, des scénarios régionaux, nationaux, voire à l'échelle d'une compagnie aérienne. Parallèlement, ces données sont utilisées pour décrire de façon simplifiée, les inégalités dans l'utilisation du transport aérien dans le monde.

En suivant un second axe d'amélioration, ce travail enrichit la modélisation des scénarios de transition en adaptant et en intégrant différents modèles permettant d'évaluer leur coût économique.

En particulier, des modèles issus de la littérature pour l'estimation des prix de vente minimum de divers carburants alternatifs bas-carbone sont utilisés pour étudier l'évolution des coûts de l'énergie pour le secteur de l'aviation. Des modèles de coût d'exploitation avion sont également intégrés pour évaluer l'impact global des leviers de décarbonisation sur la structure de coût des compagnies aériennes. Ces

modèles sont également utilisés pour étudier l'impact technique et économique d'architectures d'avions alternatives dans un contexte environnemental contraint.

De manière simplifiée, les conséquences sur le trafic aérien sont évaluées en utilisant des élasticités-prix de la demande.

Enfin, l'intérêt économique des différents leviers de décarbonisation est étudié à travers le développement de métriques de coûts d'abattement et de courbes de coûts marginaux d'abattement associées.

Cela permet notamment de comparer le coût de la décarbonisation du transport aérien à différentes valeurs carbone de référence multisectorielles. Enfin, les différents modèles développés sont utilisés conjointement à travers l'optimisation économique de scénarios de transition pour l'aviation européenne sous contraintes de budget carbone sectoriel.

Mots-clés : Données de trafic aérien, Coûts d'abattement, Economie de l'environnement, Décarbonation, Aviation Durable, Source Ouverte

Summary: The anthropogenic origin of climate change is now equivocal, and its mitigation requires drastic reductions in greenhouse gas emissions. Although aviation is a relatively moderate emitter, it still accounts for about 2.6% of CO₂ emissions and is responsible for significant non-CO₂ warming effects. Several decarbonisation levers are available to reverse the upward emissions trend, including further improvements in aircraft and operational efficiency and the replacement of fossil kerosene with low-carbon alternatives. The advantages and disadvantages of these different options, as well as their interactions, can be explored in prospective transition scenarios.

Although used by several institutional, industrial or academic actors, they often lack either a detailed and transparent methodology, sufficient disciplinary coverage to make informed strategic choices, or limited adaptability to different cases of application.

This dissertation proposes three areas of improvement to address these issues, as part of the continuing development of a prospective scenario simulator specific to air transport decarbonisation. As decarbonisation opportunities vary from region to region (natural and financial resources, traffic levels, etc.), the adaptability of transition scenarios to these different scales is a key issue. This thesis contributes to addressing this issue by presenting a method for estimating air traffic and CO₂ emission flows in an open-source, reproducible and partitionable manner. These data are used to describe the inequalities in air transport use around the world. They are also used in a prospective scenario framework to generate scenarios at reduced scales, such as a country or an airline.

Then, this work enriches the modelling of transition scenarios by adapting and integrating different cost models into the same framework. In particular, models from the literature for estimating the minimum selling prices of various alternative low-carbon fuels are used to study the evolution of energy costs for the aviation sector. Similarly, operational cost models are implemented to model the overall impact of different decarbonisation levers on airline costs and air traffic. These models are also used to study the technical and economic impact of aircraft architectures in a constrained environmental context.

Finally, the economic interest of the different decarbonisation levers is investigated through the development of abatement cost metrics and sectoral marginal abatement cost curves. In particular, this allows the cost of decarbonising air transport to be compared with different reference values. The cost-efficiency of decarbonisation is also addressed through the optimisation of transition scenarios for European aviation under given carbon budget constraints.

Keywords : Air traffic data, Abatement costs, Environmental economics, Decarbonisation, Sustainable Aviation, Open-source