

***Développement des Systèmes de Systèmes Produits et Services -
Approches de Caractérisation, Modélisation, et Analyse - Application
dans l'industrie automobile en vue de nouvelles solutions de mobilité***

***Product Service Systems of Systems Development
Characterization, Modeling, and Analysis Approaches Application in the
automotive industry in view of new mobility solutions***

par Sadèque HAMDAN

Résumé de thèse

Doctorat d'Ingénierie des Systèmes Complexes

Laboratoire Génie Industriel - CentraleSupélec

N° 2020 – .07.

Thèse soutenue le 14 décembre 2020 à CentraleSupélec

Devant le jury composé de :

Alexandre Dolgui Professeur, IMT Atlantique	Examineur
Jean-Philippe Gayon Professeur, Université Clermont Auvergne	Rapporteur
Olga Battaia Professeure, KEDGE Business School	Rapporteur
Céline Gicquel Maîtresse de Conférences, Université Paris-Saclay	Examineur
Xavier Delorme Professeur, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne	Examineur
Oualid Jouini Professeur, Université Paris-Saclay	Directeur de Thèse
Ali Cheaitou Professeur associé, University of Sharjah	Co- Directeur de Thèse
Zied Jemai Professeur, Université Paris-Saclay	Co- Directeur de Thèse
Imad Alsyouf Professeur, University of Sharjah	Invité
Maamar Bettayeb Professeur, University of Sharjah	Invité
Tobias Andersson Granberg Professeur associé, Linköping University	Invité

Résumé:

Les retards et les émissions CO₂ font partie des sujets critiques dans l'industrie aéronautique. Les principales sources de retard sont le déséquilibre entre la demande et la capacité, la dotation en personnel des contrôleurs du trafic aérien et les conditions météorologiques extrêmes. Dans certains cas, les compagnies aériennes peuvent choisir d'augmenter la vitesse de l'avion au-delà de celle programmée, ce qui engendre une augmentation des émissions. Plusieurs projets ont été lancés pour améliorer le partage d'informations et, par conséquent, la prise de décision au profit de tous les acteurs ou toutes les parties prenantes de l'aviation et ainsi réduire les retards et les émissions. Dans cette thèse de doctorat, nous visons à étudier le problème de la gestion des flux du trafic aérien (Air Traffic Flow Management (ATFM)) du point de vue de la recherche opérationnelle / management des opérations. Nous étudions le modèle ATFM largement utilisé dans la littérature et l'analysons. Nous corrigeons les lacunes de formulation de la littérature et étendons la conception du réseau et les fonctionnalités considérées pour atteindre une meilleure représentation du réseau réel. Dans cette extension, nous considérons plusieurs types de vols et plusieurs décisions, comme le changement de trajectoire et d'aéroport d'atterrissage. L'objectif de ce travail peut être résumé dans les points suivants.

- Étudier l'impact de la centralisation du processus de prise de décision dans le problème ATFM par rapport à la situation actuelle où les décisions de l'autorité ATFM et des compagnies aériennes sont prises indépendamment.
- Analyser l'équité inter-vols et inter-compagnies dans le problème ATFM.
- Construire un modèle de capacité météorologique de décision pour les aéroports et développer des arbres de scénarios pour les réseaux ATFM stochastiques basés sur des données réelles.
- Intégrer la configuration dynamique de l'espace aérien dans le problème ATFM et analyser son impact.
- Tenir compte des émissions CO₂ et des différents types de carburant dans l'ATFM.

Nous développons dans cette thèse plusieurs extensions du modèle ATFM pour analyser ces problématiques. Tout d'abord, nous proposons un modèle ATFM déterministe qui centralise les décisions de l'autorité ATFM et des compagnies aériennes, et qui considère différentes options de réacheminement. Ensuite, nous formulons un modèle ATFM stochastique qui tient compte des incertitudes météorologiques du trafic aérien. La relation météo-capacité et les arbres de scénarios stochastiques sont élaborés à l'aide des rapports d'aérodrome météorologiques, de la base de données Airport Corner et de la technique de regroupement des k-means. Ensuite, nous nous concentrons sur l'optimisation de la configuration de l'espace aérien en même temps que le problème ATFM en minimisant la capacité totale de l'espace aérien inutilisé et le coût total du réseau. Enfin, nous intégrons les émissions CO2 dans la modélisation ATFM à travers un modèle d'optimisation bi-objectif. Le modèle permet d'étudier l'impact des émissions de CO2 sur le coût du réseau et l'effet du type de combustible sur les décisions du réseau. Les modèles développés sont résolus en utilisant l'approche exacte, et dans le cas de temps de calcul longs, une heuristique du type fix-and-relax. Dans l'heuristique fix-and-relax, le problème est assoupli et résolu par un processus itératif. Dans chaque itération, un ensemble de variables de décision est défini comme binaire et les variables de décision binaires précédentes sont fixées à leurs valeurs optimales obtenues. Plusieurs analyses ont été menées et les principaux résultats de cette thèse peuvent être résumés comme suit

Le processus décisionnel centralisé améliore l'efficacité du réseau de 3,1% en moyenne par rapport au cas où les décisions sont prises indépendamment.

- L'augmentation du coût du réseau (coût des retards, du réacheminement et de l'annulation) de 5 % peut améliorer l'équité inter-vols du réseau de plus de 80% par rapport au cas où l'équité inter-vols n'est pas prise en compte.
- Il a été constaté que le coût du pire cas augmentait le coût de 48,2 et 368 % par rapport au cas réel rapporté dans le référentiel de données de demande d'EUROCONTROL.
- Le compromis entre le coût du réseau et la capacité totale inutilisée a révélé que la réduction du coût du réseau de 1% nécessite d'augmenter la capacité inutilisée de 0,41%.
- Le retard aérien a été la décision de réseau la plus impactée avec la réduction de la capacité totale de l'espace aérien inutilisé.
- Il a été constaté que l'utilisation du coût du carburant dans le modèle de réseau entraîne une réduction de 5% des émissions pour chaque augmentation de 1% du coût total.
- Le prix du carbone doit être augmenté jusqu'à N235 par tonne de CO2, ou le prix du carburant durable doit être ramené à N1,40 par litre afin que l'utilisation du carburant durable devienne économiquement intéressante pour les compagnies aériennes.

Les modèles proposés peuvent aider les décideurs à analyser l'impact des décisions à prendre sur le réseau et les acteurs impliqués. Par conséquent, les conséquences et les coûts associés pourront être calculés. En outre, ces modèles aident les décideurs à affiner et à vérifier les résultats de plusieurs projets et initiatives ATFM. Ils suggèrent également aux décideurs comment les plans de vol peuvent être mis à jour en cas de perturbation du réseau et les coûts associés aux changements.

Mots clés :

Management des flux de trafic aérien, retards au sol, retards aériens, réacheminement, déviation, optimisation stochastique, optimisation déterministe, heuristiques, analyse statistiques, configuration dynamique de l'espace aérien, émissions de l'aviation, programme de compensation et de réduction des missions de carbone pour l'aviation internationale (COR- SIA), autorité centrale

Abstract:

Delays and emissions are critical topics in the aviation industry. The major delay sources are imbalanced demand and capacity, air traffic controller staying, and severe weather conditions. In some cases, flights can choose to fly at a higher speed than the scheduled one, which increases emissions. Moreover, several projects have been initiated to improve information sharing, and consequently, decision making in order to benefit all aviation parties and reduce delays and emissions. In this Ph.D. thesis, we aim at studying the air traffic flow management (ATFM) problem from an operations research/operations management perspective. We study the ATFM model, a widely used model in the literature, and analyze it. We correct the formulation deficiencies, and we extend the network design and the considered features to reach a better representation of the real-life network. In this extension, we consider several types of flights and several decision options, such as changing the path or the landing airport. The objectives of this research can be summarized in the following points.

- To study the impact of centralizing the decision-making process in the ATFM problem compared to the current situation where decisions by ATFM authority and airlines are made independently.
- To analyze the inter-flight and inter-airline fairness in the ATFM problem
- To construct a weather-capacity model for airports and develop scenario trees for stochastic ATFM networks based on real data.
- To integrate dynamic airspace configuration in the ATFM problem and to analyze the impact.
- To account for CO₂ emissions and different fuel types in the ATFM.

Therefore, we develop several extensions to the ATFM model to accommodate these issues. First, we propose a deterministic ATFM model that centralizes the decisions of the ATFM authority and the airlines, and that considers different rerouting options. Then, we formulate a stochastic ATFM model that accounts for airports' weather uncertainties. The weather-capacity relationship and the stochastic scenario trees are developed using meteorological aerodrome reports, the Airport Corner database, and the k-means clustering technique. After that, we focus on optimizing the airspace configuration simultaneously with the ATFM problem by minimizing the total unused airspace capacity and the total network cost. Finally, we integrate the CO₂ emissions in the ATFM model through a bi-objective optimization approach. The model is used to study the CO₂ emissions' impact on the network's cost and the effect of fuel type on the network decisions.

The developed models are solved using the exact approach, and in the case of long computational times, a fix-and-relax heuristic is used. In the fix-and-relax heuristic, the problem is relaxed and solved in an iterative process. In each iteration, a set of decision variables are set as binary, and the previous binary decision variables are fixed to their obtained optimal values. Several analyses were conducted, and the main findings of this thesis can be summarized as follows.

- The centralized decision-making process improves the network efficiency by an average of 3.1% compared to the case where decisions are made independently.
- Increasing the network cost (cost of delays, rerouting, and cancellation) by 5% can improve the network inter-flight fairness by more than 80% compared to the case where inter-flight fairness is not considered.
- The worst-case scenario cost was found to increase the cost by 48.2 and 368% compared to the actual case reported in the Demand Data Repository of EUROCONTROL.
- The trade-off between the network cost and the total unused capacity revealed that reducing the network cost by 1% requires increasing the unused capacity by 0.41%.
- Air delay was the most impacted network decision with the reduction in the total unused airspace capacity.
- It was found that using the fuel cost in the network model results in 5% reduction in emissions for each 1% increase in the total cost.
- Carbon prices need to be increased up to N235 per CO₂ tonne, or sustainable fuel price needs to be reduced to N1.40 per liter so that the use of sustainable fuel becomes economically attractive to airlines

The proposed models can help decision-makers through analyzing the impact of the decisions to be made on the network and the stakeholders involved. Therefore, the consequences and the associated costs can be calculated. In addition, these models help decision-makers fine-tune and verify findings of several ATFM projects and initiatives. They also suggest to decision makers how flight plans can be updated in cases of network disturbance and the as-sociated costs of the changes.

Key words:

Air Traffic Flow Management, Ground Delays, Air Delays, Rerouting, Diversion, Stochastic Optimization, Deterministic Optimization, Heuristics, Statistical Analysis, Dynamic Airspace Configuration, Aviation Emissions, Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA), Central Authority.

L'Ecole Doctorale Interfaces de l'Université Paris-Saclay

L'Ecole Doctorale **INTERFACES - Approches interdisciplinaires: fondements, applications et innovations** rassemble des équipes dont les sujets de recherche se caractérisent par un positionnement principalement au **croisement de plusieurs disciplines** : la physique, la chimie, la biologie, mais également les mathématiques appliquées ou l'informatique.

L'ED Interfaces est co-opérée par 4 établissements de l'Université Paris-Saclay : Ecole Polytechnique, Université de Versailles - Saint-Quentin, CentraleSupélec, Ecole Nationale Supérieure des Techniques Avancées.

Le Laboratoire Génie Industriel

Le Génie Industriel se donne comme **défi scientifique** de "**maîtriser la conception et le management des systèmes complexes**".

- Maîtriser c'est modéliser, simuler, optimiser, dimensionner, spécifier ...
- La conception est traitée en terme de faisabilité, utilité, utilisabilité, opérabilité, maintenabilité
- Le management est vu sous ses aspects performance, création de valeurs, risques, sûreté de fonctionnement, métriques

Les systèmes complexes abordés sont indifféremment des systèmes techniques, organisationnels, opérationnels, informationnels, décisionnels, tactiques, stratégiques

Le Laboratoire s'organise en quatre équipes de recherche :

↪ **Equipe DE : Design Engineering**

↪ **Equipe OM: Operations Management for production and distribution systems of goods and services**

↪ **Equipe SR : Safety & Risks**

↪ **Equipe SE : Sustainable Economy**

Les thèses se font principalement dans l'un des domaines scientifiques relatifs à une équipe, même s'il peut arriver qu'elles se fassent transversalement à ces dernières. C'est la complexité des approches (robust-design, axiomatic-design, approche systémique, recherche opérationnelle, modèles stochastiques, évaluation des performances ...) qui fait la force, la performance et l'originalité du Laboratoire.