Ordonnancement des arrivées d'avions en présence d'incertitude : un modèle de programmation stochastique à deux étapes

Ahmed Khassiba, Fabian Bastin, Sonia Cafieri, Bernard Gendron, Marcel Mongeau

▶ **To cite this version:**

Ahmed Khassiba, Fabian Bastin, Sonia Cafieri, Bernard Gendron, Marcel Mongeau. Ordonnancement des arrivées d'avions en présence d'incertitude : un modèle de programmation stochastique à deux étapes. ROADEF 2019, 20ème congrès annuel de la société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision, Feb 2019, Le Havre, France. hal-02050023

HAL Id: hal-02050023
https://enac.hal.science/hal-02050023

Submitted on 12 Mar 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Ordonnancement des arrivées d'avions en présence d'incertitude : un modèle de programmation stochastique à deux étapes

Ahmed Khassiba[1,2], Fabian Bastin[2], Sonia Cafieri[1], Bernard Gendron[2], Marcel Mongeau[1]

[1] ENAC, Université de Toulouse, 31055 Toulouse, France
{sonia,mongeau}@recherche.enac.fr
[2] Université de Montréal, DIRO, H3T 1J4 Montréal, Québec, Canada
{khassiba,bastin,gendron}@iro.umontreal.ca

Mots-clés : *programmation stochastique à deux étapes, décomposition de Benders, ordonnancement des arrivées d'avions.*

1 Problématique

Arrival Manager (AMAN) est un outil d'aide à la décision assistant les contrôleurs aériens pour un ordonnancement efficace des atterrissages d'avions à destination d'un aéroport donné. L'horizon opérationnel actuel d'AMAN est de 100 à 200 miles nautiques (NM), soit 30 à 45 minutes de vols avant l'atterrissage. L'extension de cet horizon jusqu'à 500 NM, soit à quelques heures avant l'atterrissage, est prévue dans les programmes européen et américain de recherche et développement des systèmes de gestion de trafic aérien (SESAR et NextGen respectivement) [2]. En commençant l'ordonnancement plus tôt, d'une part, les avions pourront suivre des trajectoires de descente plus économiques, en termes de consommation de carburant. D'autre part, les situations de congestion proches des zones terminales, indésirables pour les passagers, les contrôleurs aériens, les pilotes et les riverains de l'aéroport, seront évitées. Toutefois, une telle extension apporte des difficultés nouvelles au problème de séquencement et d'ordonnancement des arrivées d'avions, notamment à cause de l'incertitude sur les heures prévues d'arrivée.

Dans la littérature, le problème d'*ordonnancement des atterrissages d'avions* consiste à trouver pour les avions se dirigeant vers le même aéroport de destination une séquence et des heures d'atterrissage, respectant des contraintes opérationnelles et de sécurité (notamment des séparations minimales entre les avions), optimisant certains critères donnés (par exemple, minimiser les retards, maximiser l'utilisation de la piste, etc) [1]. Même si dans la littérature récente certains travaux se sont penchés sur la variante sous incertitude de ce problème, les horizons opérationnels considérés restent limités à ceux d'AMAN actuellement, soit une quarantaine de minutes avant l'atterrissage.

2 Approche et contribution

Nous définissons le problème d'*ordonnancement des arrivées d'avions en présence d'incertitude* comme le problème consistant à trouver pour les avions se dirigeant vers le même aéroport de destination, quelques heures avant leur heure d'atterrissage prévue, une séquence et des heures cibles d'arrivée à l'*IAF* (*Initial Approach Fix*), un point prédéfini de l'espace aérien marquant le début de la dernière phase de vol précédant la phase d'atterrissage. Afin de simplifier la présentation, nous considérons le cas d'un seul IAF et d'une seule piste d'atterrissage. Nous proposons un modèle de programmation stochastique à deux étapes. Le cadre temporel de la première étape correspond à environ deux heures avant les heures *prévues* d'atterrissage

des avions considérés. Les décisions de première étape concernent la *séquence* et les *heures cibles de passage à l'IAF*. En plus de satisfaire les contraintes de séparation à l'IAF, ces heures cibles doivent respecter des fenêtres de temps à l'IAF propres à chaque avion. À la première étape, les heures *effectives* de passage à l'IAF sont considérées comme des variables aléatoires. Afin de se protéger contre les violations des contraintes de séparation au niveau de l'IAF après levée de l'incertitude, le modèle de première étape est enrichi par des contraintes en probabilité. L'objectif de la première étape est de minimiser le temps total requis par la séquence d'atterrissage. Après réécriture des contraintes en probabilité, le problème de première étape s'identifie à une instance du problème de voyageur de commerce avec fenêtres de temps.

Le cadre de la deuxième étape correspond à celui d'AMAN actuellement, soit une quarantaine de minutes avant l'atterrissage. Les heures effectives de passage à l'IAF sont supposées alors connues avec certitude. La décision de deuxième étape consiste à trouver des heures d'atterrissage respectant les contraintes de séparation au seuil de piste ainsi que des fenêtres de temps à l'atterrissage. Quant à la séquence des atterrissages, elle doit se conformer à la séquence cible de passage à l'IAF, déterminée en première étape, même si la *séquence effective* à l'IAF était différente après levée de l'incertitude. En deuxième étape, plusieurs objectifs sont candidats : minimiser l'heure du dernier atterrissage, minimiser le coût du retard, minimiser la charge de travail du contrôleur-séquenceur etc. En proposant des formes convexes linéaires ou convexes linéaires par morceaux de la fonction objectif de deuxième étape, le modèle de deuxième étape est un modèle de programmation linéaire.

Comme le problème de deuxième étape est un problème hypothétique, car conditionnel à la levée de l'incertitude, l'objectif de notre modèle de programmation stochastique à deux étapes est de minimiser la somme du coût de première étape et de l'espérance du coût de deuxième étape.

Afin de résoudre efficacement ce problème à deux étapes, nous étudions plusieurs approches de décomposition de Benders (Benders classique, Benders Branch-and-Cut, coupes agrégées, coupes désagrégées), ainsi que la forme étendue (appelée également l'équivalent déterministe).

3 Étude numérique

Des tests numériques sur des instances réalistes d'arrivées d'avions sur l'aéroport de Paris Charles-de-Gaulle montrent l'intérêt de prendre en compte l'incertitude pour l'ordonnancement des arrivées d'avions, aussi bien par la formulation d'un modèle de programmation stochastique à deux étapes, que par l'ajout des contraintes en probabilités. Le calcul de la valeur de la solution stochastique dans le cas d'une grande incertitude montre une amélioration de 20% de la valeur de la fonction objectif par rapport à la solution déterministe. Par ailleurs, nous étudions l'effet de plusieurs paramètres tels que la largeur des fenêtres de temps à l'IAF, ainsi que l'amplitude de l'incertitude, sur la difficulté du problème et la qualité de la solution.

Nous validons l'intérêt de notre approche en étudiant l'impact d'un ordonnancement optimisé à l'IAF sur la performance de la politique *premier arrivé, premier servi*, considérée comme la politique d'ordonnancement des atterrissages appliquée aux avions arrivés à l'IAF. Nous montrons que grâce à notre approche, il y a une diminution importante du retard maximal espéré par avion (moins de 4 minutes par avion), pouvant s'interpréter comme une décongestion de la zone terminale autour de l'aéroport considéré.

Références

[1] Julia A. Bennell, Mohammad Mesgarpour, and Chris N. Potts. Airport runway scheduling. *4OR*, 9(2) :115–138, 2011.

[2] Maarten Tielrooij, Clark Borst, Marinus M. Van Paassen, and Max Mulder. Predicting arrival time uncertainty from actual flight information. In *Proceedings of the 11th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar*, pages 577–586, 2015.