

# Chargement de marchandises dans un avion cargo : le cas des marchandises nécessitant des précautions particulières

Michaël Schyns, Sabine Limbourg, Thomas Kleyns

Université de Liège, HEC-Ecole de Gestion, QuantOM  
14, rue Louvrex, 4000 Liège (Belgique)  
{M.Schyns,Sabine.Limbou}@ulg.ac.be

**Mots-clés :** *Chargement d'avion, weight and balance, produits dangereux*

## 1 Positionnement

Selon un rapport de l'Association Internationale du Transport Aérien (IATA) en 2010 (voir [4]), les entreprises de transport aérien ont acheminé environ 40 millions de tonnes de fret, soit plus d'un tiers de la valeur des exportations mondiales. La dernière prévision de Boeing, datant de 2010, est le triplement du trafic aérien de fret sur les 20 prochaines années. Face à cette croissance prévue du trafic, à la hausse du prix du kérosène et à la nécessité de réduire les nuisances environnementales, chaque amélioration d'efficacité est bénéfique, à la fois pour le secteur de l'aviation et pour la communauté mondiale.

L'optimisation du chargement d'un avion-cargo est une première problématique d'une importance cruciale pour les compagnies aériennes pour au moins deux raisons. Premièrement, le chargement des avions est soumis à des contraintes strictes de sécurité. En effet, les tensions imposées sur la structure d'un avion mal chargé peuvent entraîner la destruction d'équipements de haute valeur, voire la perte de vies. Deuxièmement, un mauvais chargement diminue l'efficacité d'un avion par rapport à l'altitude, la manoeuvrabilité, le taux d'ascension et la vitesse. A l'inverse, un chargement optimal implique une consommation moindre de carburant et, par conséquent, conduit à une diminution des coûts et de l'impact environnemental. Afin de résoudre une formulation de base de ce problème, une approche basée sur le moment d'inertie a été proposée dans [5]. Le modèle de base est un modèle à variables entières hautement combinatoire. Ce travail a été présenté lors de ROADEF 2011. Des problèmes similaires ont été considérés dans [6, 8] entre autres.

Notre travail est une extension de ces travaux à d'autres contraintes importantes du transport aérien. En effet, nous considérons aussi des chargements spéciaux qui impliquent des précautions particulières. Tout d'abord, nous incluons les produits dangereux. Les Nations Unies les classes en neuf catégories liées à leurs propriétés physiques, chimiques et nucléaires (voir [9]). Une revue de la littérature concernant le transport de produits dangereux est proposée dans [3]. Il existe aussi d'autres produits imposant des contraintes supplémentaires lors du chargement (animaux, aliments,...). En plus des incompatibilités entre certains produits, il faut tenir compte des interactions que certains produits ont avec des équipements de l'avion (par exemple, des émissions magnétiques). Finalement, nous considérons le cas du chargement de marchandises de plus grande taille qui pourraient empiéter sur plusieurs positions ou s'interpénétrer dans d'autres ULDs (Unit Load Devices).

L'ajout de ces types de contraintes se justifie par la grande fréquence de ces situations dans des problèmes réels rencontrés par nos partenaires industriels. Au niveau de la recherche opérationnelle, il ne s'agit pas non plus d'une extension immédiate et triviale du modèle existant. En effet, notre problème est proche du *segregated storage problem* (SSP) qui est NP-difficile (voir [1, 2, 7, 10]).

## 2 Méthodologie employée

La méthodologie suivie est similaire à celle de [5]. Nous cherchons d'abord à formuler mathématiquement les nouvelles contraintes en nous basant sur des standards de l'aviation. Vu l'augmentation de la complexité du problème, un soin particulier a dû être apporté à l'écriture du nouveau modèle. Nous analysons ensuite si une solution exacte peut être obtenue comme précédemment dans un temps raisonnable à l'aide du branch-and-bound. Enfin, nous analysons les résultats et performances de notre approche sur des données réelles.

L'approche utilisée pour tenir compte des contraintes sur les marchandises qui nécessitent des précautions particulières entre elles est basée sur une matrice de ségrégation  $S$ . Chaque type de marchandise est associée à une catégorie définie dans les standards de l'ICAO (International Civil Aviation Organization) et de IATA. Chaque élément  $s_{ij}$  de  $S$  spécifie ensuite la distance minimale qui doit séparer deux chargements  $i$  et  $j$  en fonction de leur catégorie. Le modèle proposé permet de s'assurer que la distance entre chaque paire d'ULDs placés dans l'avion est toujours plus grande que la distance minimum requise. Pour gérer les ULDs assemblés (ou qui nécessitent plusieurs positions), nous avons écrit de contraintes supplémentaires qui permettent de s'assurer que les ULDs souhaités soient bien mis dans des positions contiguës en respectant les orientations. Ces contraintes viennent s'ajouter aux contraintes de base formulées par [5], qui doivent toujours être satisfaites.

Nous avons écrit un programme JAVA pour tester notre approche. Nous utilisons la librairie d'optimisation IBM ILOG CPLEX. Les instances testées nous ont été fournies par nos partenaires industriels. Les premiers résultats sont très encourageants. Pour le chargement de 42 ULDs, dont 15% correspondent à des produits dangereux, dans un Boeing 747 configuré avec 77 positions, il y a en théorie  $1.4E73$  possibilités ( $A_{77}^{42}$ ) à considérer. Nous obtenons une solution optimale en moins de 7 secondes. D'autres tests doivent encore être réalisés, notamment pour considérer les ULDs assemblés. Le logiciel qui a été développé est de plus interactif et permet au loadmaster de garder la main sur le processus de chargement. Une petite vidéo de démonstration est disponible sur notre site <http://www.quantom.hec.ulg.ac.be>.

## Références

- [1] Barbucha, D (2004). Three approximation algorithms for solving the generalized segregated storage problem. *European Journal of Operational Research* 156(1), 54–72.
- [2] Evans, J.R. Cullen, F.H. (1977). The segregated storage problem : Some properties and an effective heuristic. *AIIE Transactions* 9(4), 409–413.
- [3] Erkut. E., S. Tjandra and V. Verter (2007). Hazardous Materials Transportation. *Handbooks in Operations Research and Management Science* 14, 539–621.
- [4] International Air Transport Association (IATA) (2010). <http://www.iata.org/whatwedo/Documents/economics/eChartbook-Q4-2010.pdf>
- [5] Limbourg, S., Schyns, M., and Laporte, G. (2011). Automatic Aircraft Cargo Load Planning. *Journal of the Operational Research Society*
- [6] Mongeau, M. and Bès, C. (2003). Optimization of Aircraft Container Loading, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 39, pp. 140–150.
- [7] Neebe, A.W. and Rao, M.R. (1976). An algorithm for the segregated storage problem. *Naval Research Logistics* 23, 406–420.
- [8] Souffriau, W., Demeester, P. and Vanden Berghe, G. and De Causmaecker, P. (2008). The Aircraft Weight and Balance Problem. *Proceedings of ORBEL 22*, Brussels, 44–45.
- [9] UN (2001). UN Recommendations on the Transport of Dangerous Goods, model regulations. *United Nations Economic and Social Council's Experts on the Transport of Dangerous Goods*.
- [10] White, J.A. and Francis, R.L. (1971). Solving a segregated storage problem using branch-and-bound and extreme point ranking methods. *AIIE Transactions* 3(1), 37–44.