

Chargement d'un avion cargo : le cas des marchandises nécessitant des précautions particulières

T. KLEYNTSSENS¹, S. LIMBOURG¹, M. SCHYNS¹

¹ HEC-University of Liège – Belgium ({tkleyntsens, Sabine.Limbourg, M.Schyns}@ulg.ac.be)

Abstract : *Le problème du chargement de marchandises dans un avion cargo est soumis à des contraintes strictes de sécurité. C'est un problème d'optimisation combinatoire d'une importance cruciale pour les compagnies aériennes. En effet, un mauvais chargement diminue l'efficacité d'un avion et impose des tensions importantes sur sa structure qui peuvent entraîner la destruction d'équipements de haute valeur, voire la perte de vies. De plus, certains colis spéciaux ont des contraintes très restrictives. C'est le cas notamment des produits dangereux, des animaux, des marchandises alimentaires et périssables. En plus des incompatibilités entre certains produits, il faut tenir compte des interactions possibles sur des équipements de l'avion. Par exemple, des produits émettant des émissions magnétiques doivent être placés de manière à ne pas avoir des effets néfastes avec les instruments de navigation. Dans cet article, nous proposons d'incorporer ces contraintes liées aux colis nécessitant des précautions particulières dans un programme d'optimisation linéaire mixte du problème de chargement d'un ensemble de Unit Loading Devices et de vrac dans un avion. Les résultats obtenus à partir de données réelles montrent que notre méthode permet d'obtenir des solutions optimales en seulement quelques secondes.*

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

1 Introduction

Plusieurs articles se penchent sur le problème du chargement de *Unit Loading Devices* (ULDs) et du vrac dans un avion. Un ULD est un assemblage de composants constituant un conteneur ou une palette avec un filet. Mongeau et Bès (2003); Souffriau et al. (2008); Limbourg et al. (2011) optimisent le positionnement des ULDs dans un avion en considérant l'impact sur le centre de gravité (CG). Mongeau et Bès (2003) optimisent le poids des marchandises chargées alors que Souffriau et al. (2008) maximisent la valeur du chargement total de l'avion. Ceci implique que l'avion doit toujours être chargé au maximum de sa capacité. Cependant, d'après les statistiques (IATA (2010)), la capacité maximum de chargement d'un avion est peu fréquemment atteinte. Il s'agit alors de s'assurer que le chargement est concentré autour du CG. C'est la raison pour laquelle Limbourg et al. (2011) propose une approche basée sur le moment d'inertie pour résoudre ce problème.

Selon IATA (2010), 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. De plus, la rapidité du transport aérien est un atout très important pour des produits de haute valeur ou périssables ou encore les animaux. Cependant, aucun des articles cités ne prend en compte les contraintes spécifiques liées à ce type de cargaisons et aux produits dangereux. C'est précisément l'objectif de cet article.

Selon le département du Transport des États-Unis (United

States Department of Transportation), un produit dangereux est défini comme une substance capable de provoquer des nuisances à l'être humain ou à l'environnement. Les Nations Unies classent les produits dangereux en neuf catégories liées à leurs propriétés physiques, chimiques et nucléaires (UN (2001)). Chaque catégorie est décomposée en plusieurs sous-catégories associées à un nombre réduit de symboles ou à des pictogrammes présents sur les étiquettes de sécurité.

De plus, la régulation des produits dangereux établie par l'Association internationale du transport aérien (International Air Transport Association, ou IATA) divise ces produits en trois catégories : les produits considérés comme trop dangereux pour être transportés par voie aérienne, les produits qui ne peuvent être transportés que par les avions cargo (ces produits sont désignés par l'acronyme CAO (cargo aircraft only)) et les produits qui peuvent être transportés par les avions mixtes, c'est-à-dire passagers-cargo.

Une revue de la littérature du transport des produits dangereux peut être trouvée dans Erkut et al. (2007). Vu le nombre important d'articles traitant ce sujet, les auteurs proposent une classification en quatre catégories : l'évaluation des risques, le routage, la combinaison de la localisation des installations et du routage, et la conception des réseaux. Une majorité significative de la littérature sur l'acheminement des produits dangereux se focalise sur le transport routier. Beaucoup moins d'attention est accordée au transport ferroviaire par les chercheurs. Quant à la littérature sur le transport des produits dangereux par voie maritime, aérienne et par canalisation, elle

semble n'être qu'à son commencement.

Finalement, lors d'un transport de marchandises dangereuses, il faut tenir compte du fait que certains produits peuvent réagir les uns avec les autres. Pour éviter ces interactions, une table de ségrégation résume les incompatibilités entre les produits. Le problème de stockage séparé (*segregated storage problem*, SSP) consiste à déterminer la distribution optimale des produits dans des compartiments de stockage; un compartiment donné peut stocker au plus un produit. Plusieurs auteurs ont étudié ce problème. Shilfer, E. et Naor, P. (1961) introduisent une formulation du SSP. White, J.A. et Francis, R.L. (1971); Dannenbring, D.G. and Khumawala, B.M. (1973) proposent une procédure de type branch-and-bound pour le résoudre. Neebe, A.W. et Rao, M.R (1976) proposent une méthode basée sur la génération de colonnes pour la version linéaire du problème et Evans, J.R. and Cullen, F.H. (1977) introduisent une formulation linéaire entière mixte du problème.

Barbucha, D (2004) introduit et définit formellement un nouveau problème appelé le problème de stockage séparé généralisé (*generalized segregated storage problem*, GSSP). Il implique le positionnement de marchandises dans des compartiments disponibles soumis à des contraintes de ségrégation (séparation physique). Ce sujet a été motivé par le transport maritime de marchandises incluant des produits dangereux. Vu que les deux problèmes sont NP-complets (une preuve du caractère NP-complet de SSP est présentée dans Barbucha, D (2004)), il est possible d'obtenir des solutions dans un temps raisonnable seulement pour des instances de tailles réduites.

En plus des produits dangereux, d'autres marchandises, souvent transportées par voie aérienne pour bénéficier de la rapidité de ce mode, sont également soumises à des contraintes de ségrégation. C'est le cas des films non-développés (FIL), des cercueils (HUM), des marchandises alimentaires et périssables (EAT), des oeufs qui vont éclore (HEG), des animaux (AVI) et des animaux de laboratoires (LAB AVI).

L'originalité de notre modèle est sa capacité de résoudre le problème du chargement d'un ensemble d'ULDs dans un avion cargo, en garantissant que le CG soit dans les limites requises et que le chargement soit concentré autour de celui-ci, tout en tenant compte des spécificités des marchandises.

La première partie de cet article donne une vue d'ensemble des flux de fret aérien et présente brièvement un modèle mathématique qui optimise le chargement d'un ensemble d'ULDs standards, c'est-à-dire ne nécessitant pas de précaution particulière, dans un avion cargo compartimenté. Les incompatibilités entre les types de cargaisons sont résumées à la Section 4 tandis que la Section 5 propose un algorithme permettant l'incorporation des contraintes de ségrégation dans le modèle. Ensuite différents cas sont présentés avant de conclure.

2 Flux du fret aérien

Le conseil international des aéroports (Airports Council International) publie annuellement un rapport sur le trafic aérien mondial (Airport Council International (2009)), basé sur les données d'un nombre d'aéroports, représentant approximativement 98% du trafic aérien total. Des distinctions doivent être faites entre le transport de fret au niveau national, qui représente 37% du volume du fret total, et international, qui en représente 63%. Les trois régions les plus importantes au niveau du transport de fret sont : l'Asie-Pacifique (35%), l'Amérique du Nord (32%) et l'Europe (19%), voir Table 1.

Table 1: Volume de cargo par régions (Source: WATR reports 2009)

Régions	Nombre d'aéroports	Total du cargo (tonnes)
Afrique	176	1 944 332
Asie-Pacifique	185	27 700 660
Europe	459	15 445 874
Amerique Latine-Caraïbes	269	4 178 183
Moyen Orient	53	5 144 183
Amerique du Nord	212	25 403 389
Total	1 354	79 817 412

Quelques produits régissent le commerce aérien entre les principaux partenaires commerciaux. Selon Boeing World Air Cargo Forecast (WACF) (2010), les produits industriels et les produits manufacturés font partie des flux les plus importantes entre l'Europe et l'Amérique du Nord.

71% du trafic de fret de l'Asie vers l'Amérique du Nord est composé de machines de bureau, d'ordinateurs, de vêtements, d'équipements de télécommunication, d'équipements électriques, d'équipements industriels en général et d'équipements spécialisés et scientifiques; par contre de l'Amérique du Nord vers l'Asie ce sont les équipements industriels en général, les documents et petits paquets, les machines électriques, les équipements scientifiques et spécialisés, et le matériel chimique (5%) représentent une grande partie du trafic de fret (47%) .

72,6% des flux de l'Asie à l'Europe consistent, par ordre décroissant, en machines industrielles en général, des machines et appareils électriques, des colis express, des produits pharmaceutiques, des parties et accessoires d'auto et des différents produits manufacturés, alors que les flux entre l'Europe et l'Asie sont principalement constitués de produits manufacturés.

L'Europe représente 66% du marché africain du point de vue du transport international de fret aérien. Les principaux produits allant vers le nord sont des denrées périssables. Les articles allant vers le sud sont plus variés et incluent des produits pharmaceutiques, des machines et des équipements de transport, des approvisionnements liés au pétrole et des produits manufacturés. La même tendance est observée entre l'Amérique Latine et l'Amérique du Nord où 69% du trafic vers le nord est constitué de produits périssables, alors que les flux vers le sud incluent des documents, des petits colis, des machines et pièces industrielles, des ordinateurs, des machines de bureau et des équipements spécialisés.

Un examen plus approfondi des produits dangereux peut être obtenu dans le Commodity Flow Survey, Hazardous Materials (2007). Cette enquête fournit des données sur le transport de fret classées selon le type de produits expédiés et selon le mode de transport. Plus de 90% du fret transporté par voies aériennes pour les Etats-Unis est non-dangereux. En terme de tonnes transportées, les principales marchandises dangereuses sont des produits de parfumerie (qui contiennent des solvants inflammables) et des produits radioactifs.

3 Modèle mathématique sans le chargement spécial

Dans cette partie, nous présentons un modèle linéaire à valeurs entières mixtes pour le chargement de fret dans un avion cargo (Limboung et al. (2011)). Ce modèle considère que tous les ULDs contiennent des produits qui ne requièrent pas de ségrégation. L'objectif est de trouver un positionnement optimal d'un ensemble d'ULDs de différents types, contours et poids, dans un avion compartimenté. Cet objectif est atteint par la minimisation du moment d'inertie sous des contraintes liées au CG.

Notons \mathbb{U} l'ensemble des ULDs, w_i le poids du i^{me} ULD (U_i) et \mathbb{P} l'ensemble des positions prédéfinies dans l'avion (la j^{me} position est notée P_j). Nous notons P_L (resp. P_R) l'ensemble des positions se situant sur le côté gauche (resp. droite) de l'avion. La position longitudinale de chaque position est donnée en pouces par rapport à sa distance d'un point virtuel appelé *datum*. Nous définissons également le centre a_j de la position P_j comme le point où le poids de l'ULD sera concentré, L représente la longueur totale de l'avion (en pouces), ID est la valeur de l'*index datum* qui représente l'endroit idéal du CG et le poids total du chargement est dénoté $W = \sum_{i \in \mathbb{U}} w_i$.

$$\text{minimiser } \sum_{i \in \mathbb{U}} \sum_{j \in \mathbb{P}} w_i (a_j - ID)^2 x_{ij} + L^2 W y$$

sous contraintes

$$x_{ij} = 0 \quad \forall i \in \mathbb{U}, \forall j \in \mathbb{P} \mid U_i \text{ ne convient pas à } P_j \quad (1)$$

$$\sum_{i \in \mathbb{U}} x_{ij} \leq 1 \quad \forall j \in \mathbb{P} \quad (2)$$

$$x_{ij} + x_{i'j'} \leq 1 \quad \forall i, i' \in \mathbb{U}, \forall j \in \mathbb{P}, \forall j' \in \mathbb{O}_j \quad (3)$$

$$\sum_{j \in \mathbb{P}} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in \mathbb{U} \quad (4)$$

$$-\epsilon \leq \sum_{i \in \mathbb{U}} \sum_{j \in \mathbb{P}} w_i (a_j - ID) x_{ij} / W \leq \epsilon \quad (5)$$

$$-\bar{D} \leq \sum_{i \in \mathbb{U}} w_i \left(\sum_{j \in \mathbb{P}_R} x_{ij} - \sum_{j \in \mathbb{P}_L} x_{ij} \right) \leq \bar{D} \quad (6)$$

$$\sum_{i \in \mathbb{U}} \sum_{j \in \mathbb{P} \mid P_j \cap O_k^D \neq \emptyset} x_{ij} o_{ijk}^D \leq \bar{O}_k^D \quad \forall D \in \mathbb{D}, \forall k \in \mathbb{O}^D \quad (7)$$

$$\sum_{i \in \mathbb{U}} \sum_{j \in \mathbb{P} \mid P_j \cap \bigcup_{c=1}^k F_c \neq \emptyset} \sum_{l=1}^k x_{ij} f_{ijl} \leq \bar{F}_k \quad \forall k \in \mathbb{F} \quad (8)$$

$$\sum_{i \in \mathbb{U}} \sum_{j \in \mathbb{P} \mid P_j \cap \bigcup_{c=1}^k T_c \neq \emptyset} \sum_{l=1}^k x_{ij} t_{ijl} \leq \bar{T}_k \quad \forall k \in \mathbb{T} \quad (9)$$

$$\sum_{i \in \mathbb{U}} \sum_{j \in \mathbb{P} \mid P_j \cap \bigcup_{c=1}^k T_c \neq \emptyset} \sum_{l=1}^k x_{ij} t_{ijl} - W y \leq \bar{R}_k \quad \forall k \in \mathbb{T} \quad (10)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in \mathbb{U}, \forall j \in \mathbb{P} \quad (11)$$

$$y \in \{0, 1\}. \quad (12)$$

Dû à leurs dimensions, certains ULDs ne peuvent pas être placés dans toutes les positions, i.e. chaque position accepte seulement certains types d'ULD ; ceci est représenté par l'ensemble des contraintes (1). Un second ensemble de contraintes (2) assure que chaque position n'accepte qu'au plus un ULD. Le troisième ensemble de contraintes considère le cas des ULDs qui peuvent être placés dans des positions qui recouvrent plusieurs positions plus petites. Quand un ULD est chargé sur une telle position, les positions recouvertes par celles-ci doivent être vides. Inversement, lorsqu'un ULD est chargé sur une position élémentaire, les positions qui peuvent la recouvrir ne doivent contenir aucun ULD. Dans (3), O_j représente l'ensemble des indices des positions qui sont recouvertes par la position P_j . Les contraintes (4) assurent que chaque ULD est chargé, et la contrainte (5) assure que l'écart du CG par rapport à ID est très petit. La contrainte (6) garantit que le déséquilibre latéral est inférieur à un certain seuil (noté \bar{D}). Les contraintes de poids combinés (7) garantissent que le poids dans les différentes sections données de l'avion ne dépasse pas le poids maximal autorisé. Ceci est vérifié sur le pont principal, le point inférieur et sur les deux ponts réunis. Nous notons \mathbb{D} un ensemble de trois indices qui permet de différencier ces différents cas. Pour $D \in \mathbb{D}$, la k^{me} section est notée O_k^D , le poids maximal dans celle-ci est noté \bar{O}_k^D et o_{ijk}^D est la proportion de w_i se trouvant dans $\{P_j \cap O_k^D\}$. Les contraintes (8) stipulent que la distribution cumulative du poids partant du nez jusqu'au centre de l'avion doit être inférieure à une fonction linéaire par morceau et les contraintes (9) régissent le même type de contraintes mais cette fois-ci, partant de la queue jusqu'au centre de l'avion. Nous notons par F_k (resp. T_k) les zones consécutives avant (resp. arrière), f_{ijk} (resp. t_{ijk}) la proportion de w_i appartenant à $\{F_k \cap P_j\}$ (resp. $\{T_k \cap P_j\}$) et \bar{F}_k (resp. \bar{T}_k) le poids cumulatif maximal pour la section commençant au nez (resp. queue) et finissant à F_k (resp. T_k). Pour le Boeing 747, nous ajoutons la contrainte (10) car il est fortement conseillé, pour cet avion, que la zone arrière satisfasse une contrainte plus restrictive de poids cumulés. C'est pourquoi, nous avons une nouvelle limite \bar{R}_k à la place de \bar{T}_k (avec $\bar{R}_k \leq \bar{T}_k$) et une variable binaire y qui vaut 0 si ces nouvelles contraintes sont respectées et 1 sinon. Nous ajoutons une pénalité $L^2 W y$ à la fonction objective. Le lecteur intéressé trouvera des explications détaillées

de ce modèle dans (Limbourg et al. (2011)).

4 Incompatibilités entre les différents types de chargements

Pour transporter des produits dangereux, les contraintes de ségrégation doivent être satisfaites. Celles-ci peuvent varier selon le mode de transport: terrestre, aérien ou maritime. De plus, la distance minimale requise entre les ULDs dépend du type d'avions, du type de rangements (vertical ou horizontal), du type d'emballages (fermés ou ouverts), de la place de rangement (sur le pont principal ou inférieur), etc. La ségrégation peut être obtenue en séparant les ULDs incompatibles par une certaine distance ou en plaçant un ou plusieurs ULD(s) compatible(s) entre ces ULDs incompatibles.

Pour le transport aérien, l'Organisation de l'aviation civile internationale (*International Civil Aviation Organization*, (ICAO)) impose des contraintes légales pour la manipulation des produits dangereux. Sur base de ces contraintes légales, IATA définit et impose une régulation spécifique sur les produits dangereux aux compagnies aériennes membres. Néanmoins, chaque compagnie est libre d'ajouter des contraintes tant que les exigences légales sont respectées.

Les règles générales qui peuvent être extraites de ces règlements sont :

- Les produits dangereux de classe 1 (explosifs) ne peuvent pas être chargés à proximité de produits dangereux de classe 2 (gaz), 3 (liquides inflammables), 4 (solides inflammables et substances réactives), 5 (Oxydants et peroxydes organiques) et 8 (articles et substances corrosives).
- Les produits dangereux de classe 7 (matériaux radioactifs) doivent être séparés des animaux, des oeufs et des films non-développés. De plus, des distances minimales horizontales et verticales doivent être respectées entre les produits radioactifs entre eux et les passagers.
- Les animaux ne peuvent pas se trouver à proximité de nourriture ou de restes humains.
- Les animaux et les oeufs qui vont éclore ne peuvent pas être chargés à proximité de la glace carbonique utilisée pour réfrigérer les marchandises périssables.
- Les animaux doivent être séparés des animaux pour laboratoires.
- Les animaux qui sont naturellement ennemis (comme les chiens et les chats), doivent être placés de manière à ne pas se voir mutuellement, ni s'entendre, ni se sentir.
- La nourriture ne doit pas être chargée à proximité de restes humains.
- Les animaux et les marchandises périssables ont des contraintes très restrictives dans le transport. Premièrement,

ils ne peuvent pas être chargés à même le sol dans l'avion. Deuxièmement, en plus de la température, d'autres facteurs sont à prendre en compte : d'une part, les animaux et les denrées périssables ont besoin d'un air relativement frais, mais d'autre part ils dégagent des substances qui peuvent être nocives. Troisièmement, la règle de base pour le transport d'animaux et de marchandises périssables est "dernier rentré et premier sorti". Pour que la cargaison arrive dans les meilleures conditions, l'heure de son chargement doit être aussi proche que possible de l'heure du départ de l'avion et elle doit être déchargée le plus rapidement possible lorsque l'avion arrive à destination. Ceci signifie que les animaux et les marchandises périssables doivent être chargés le plus près possible des portes de chargement.

- Pour les produits qui émettent des radiations, comme les matériaux magnétiques ou radioactifs, la distance de séparation dépend du niveau de radiations. Les matériaux magnétiques ne doivent pas être placés à une position où ils auraient des effets néfastes sur des appareils de l'avion (boussoles, détecteurs, etc.). En ce qui concerne les matériaux radioactifs, la distance qui doit les séparer des passagers est basée sur des doses de référence. Par ailleurs, si plus d'un ULD placé dans l'avion, contient du matériel radioactif, la distance minimum de séparation pour chaque ULD, prise individuellement, doit être déterminée sur base de la somme des doses de référence.

Finalement, certains produits dangereux sont soumis à des limitations de poids ou de quantités. C'est le cas de la glace carbonique, la valeur limite acceptable dépend aussi de la présence d'animaux. En outre, la concentration de certains produits corrosifs est également limitée.

5 Incorporation des contraintes de ségrégation dans le modèle

Pour déterminer les contraintes de ségrégation entre les ULDs, nous définissons m catégories de marchandises en accord avec la section précédente (pour le moment, nous tenons compte des réglementations ICAO et IATA). La première catégorie correspond à celle des produits neutres, c'est-à-dire les produits qui ne présentent aucune incompatibilité. Nous émettons l'hypothèse simplificatrice qu'un ULD peut contenir au plus un seul type de chargement spécial en plus des produits neutres. Ceci nous permet d'associer à chaque ULD un label qui correspond à une des m catégories. La généralisation à plusieurs marchandises spéciales est directe. Nous définissons également une matrice de ségrégation S de taille $m \times m$. Chaque élément s_{ij} de S est un entier positif et correspond à la distance minimale (en pouces) requise entre les produits des catégories i et j . Remarquons que S est une matrice symétrique et que les éléments diagonaux sont nuls.

Chaque position de l'avion est définie par deux valeurs : la distance *forward* et la distance *aft* (calculée à partir du *datum*),

voir la Figure 1. La distance d_{kz} entre la position P_k et la position P_z est définie comme la différence entre la distance aft (resp. forward) de P_z et la distance forward (resp. aft) de P_k quand P_z est situé après (resp. avant) P_k .

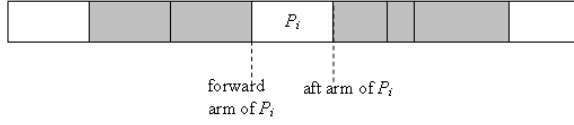


Figure 1: Positions voisines

Pour ajouter les contraintes de ségrégation, nous proposons l'algorithme suivant :

```

For each  $U_i$  ( $i \in \mathcal{U}$ )
For  $j = i + 1$  to the number of ULDs
   $i'$  = the category index of  $U_i$ 
   $j'$  = the category index of  $U_j$ 
  For each  $P_k$  in which  $U_i$ , can fit
    For each  $P_z$  of the same deck in
      which  $U_j$ , can fit
        If  $s_{i'j'} > d_{kz}$  then
           $x_{ik} + x_{jz} \leq 1$ 
        End if
      Next  $P_z$ 
    Next  $P_k$ 
  Next  $j$ 
Next  $U_i$ 

```

(13)

Chaque contrainte (13) indique que deux ULDs i et j incompatibles ne peuvent pas être en même temps dans la position k et z respectivement, si la distance entre ces deux positions est inférieure à la distance de la ségrégation nécessaire. D'un point de vue théorique, nous pouvons nous demander si ces contraintes sont difficiles à satisfaire mathématiquement. Chacune d'entre elles est une simple combinaison linéaire de deux variables. Cependant, la difficulté réside dans leur nombre qui explose rapidement. La taille du problème devient rapidement énorme même si la matrice des contraintes est creuse. Heureusement, nous pouvons observer que seulement un sous-ensemble des contraintes (13) est réellement utilisé pendant l'optimisation, ce qui permet d'avoir un temps de calcul acceptable.

En plus de ces ségrégations entre les ULDs, il faut également tenir compte des interactions que certains produits ont avec des équipements de l'avion ou avec l'équipage. Par exemple, des produits émettant des émissions magnétiques doivent être placés dans l'avion de manière à ne pas avoir des effets néfastes avec les instruments de navigation. Ceci est facile à incorporer en faisant une extension des contraintes (1). Finalement, des ULDs doivent de préférence être dans des positions spécifiques pour faciliter leur maniement. De nouveau, ces contraintes sont obtenues en modifiant les contraintes (1) vu que l'espace non réalisable est le complémentaire de l'espace réalisable. C'est pourquoi nous avons modifié le programme

de manière à ce que le load master puisse placer certains ULDs dans une position spécifique ou définir un ensemble de positions dans lequel celui-ci doit être chargé et la solution optimale est trouvée en tenant compte de ces dernières contraintes.

6 Cas étudiés

Nous avons écrit un programme JAVA testé sous Windows XP et sous Linux (Ubuntu 10.04). Celui-ci utilise la librairie d'optimisation IBM ILOG CPLEX avec son solveur classique branch-and-bound avec les paramètres par défaut. Les instances testées nous ont été fournies par nos partenaires industriels. L'optimisation a été mesurée sur un ordinateur portable personnel (Windows XP, Dual-Core 2.5GHz, 2.8GB of RAM) avec CPLEX 12.

Les cas étudiés contiennent un grand nombre d'ULDs (42) à charger dans un Boeing 747, l'un des avions-cargos les plus courants. Celui-ci contient généralement 67 positions de bases et 10 positions plus grandes qui recouvrent des positions de bases. Nous avons donc théoriquement $4 \cdot 10^6$ (A_{77}^{42}) possibilités de charger cet avion. Nous connaissons la localisation et les dimensions exactes de chaque position, ainsi que la liste des types d'ULDs qu'elle peut accepter. Les positions sont représentées par des rectangles à la Figure 2. Sur la première ligne, ce sont les positions du pont principal et la deuxième ligne représente le pont inférieur. Chaque position est identifiée par un code repris au-dessus ou en dessous du rectangle.

La Figure 2 illustre aussi la solution obtenue par notre programme. Chaque rectangle en vert est un ULD avec son type et son poids. Toutes les contraintes présentées dans la Section 3 (quand aucune marchandise spéciale n'est présente) sont satisfaites.

Concernant la qualité de la solution, nous pouvons mesurer la déviation entre le CG obtenu et sa position idéale. Dans ce cas, le positionnement de celui-ci est exprimé en pourcentage de la *Corde Moyenne Aérodynamique* (en anglais *Mean Aerodynamic Chord* (MAC)) et doit valoir 28 avec une précision de 0.01. Nous obtenons 27.997, par conséquent, l'objectif est atteint. Le temps nécessaire pour obtenir cette solution optimale est de moins de 2 secondes.

Plusieurs tests utilisant la matrice de ségrégation reprise dans la Table 2 (cette table est un aperçu de la table présente dans Tusek A. (2011) dans laquelle nous tenons compte des réglementations des produits dangereux de IATA) ont été réalisés. Comme souvent en pratique, la distance minimale de ségrégation entre deux produits incompatibles est un multiple d'une taille typique D d'une position. La Figure 3 représente un cas où 7 ULDs contiennent des marchandises spéciales. Ce problème a été résolu en 4.9 secondes. Le *cargo-Interchange Message Procedures* (IMP) de ces ULDs est noté en rouge sur les rectangles verts. Nous présentons également un autre test comprenant 15 ULDs contenant des marchandises spéciales. Ce cas a été résolu en 7 secondes (Figure 4).

Table 2: Matrice de ségrégation

	R C	R X	R X	R X	R N	R F	R S	R F	R O	R O	R Y	R C	I C	F I	A V
	X	B	D	G	L	C	C	W	X	P	Y	C	E	L	I
RCX	0	D	0	D	D	D	D	D	D	0	D	0	0	0	D
RXB	D	0	D	D	D	D	D	D	D	0	D	0	0	0	D
RXD	0	D	0	D	D	D	D	D	D	0	D	0	0	0	D
RNG	D	D	D	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RFL	D	D	D	0	0	0	0	0	D	0	0	0	0	0	0
RSC	D	D	D	0	0	0	0	0	0	0	D	0	0	0	0
RFW	D	D	D	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ROX	D	D	D	0	D	D	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ROP	D	D	D	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RRY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5D	1	
RCM	D	D	D	0	0	0	D	0	0	0	0	0	0	0	0
ICE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4D	
FIL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5D	0	0	0	0	0
AVI	D	D	D	0	0	0	0	0	0	1	0	4D	0	0	0

RCX : Explosive ; RXB : Explosive ; RXD : Explosive ; RNG : Non-flammable Gas ; RFL : Flammable Liquid ;
RSC : Spontaneously Combustible ; RFW : Dangerous when Wet ; ROX : Oxidiser ; ROP : Organic Peroxide ;
RRY : Radioactive ; RCM : Corrosive ; ICE : Dry Ice ; FIL : Undeveloped Film ; AVI : Live Animals

D est la taille typique d'une position

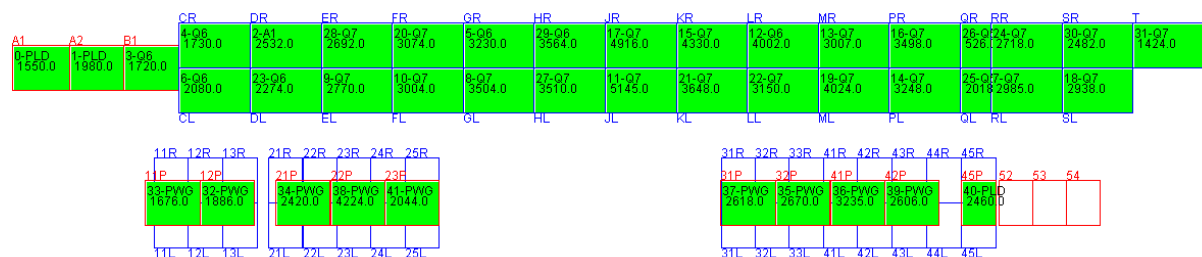


Figure 2: Chargement sans contrainte d'incompatibilité

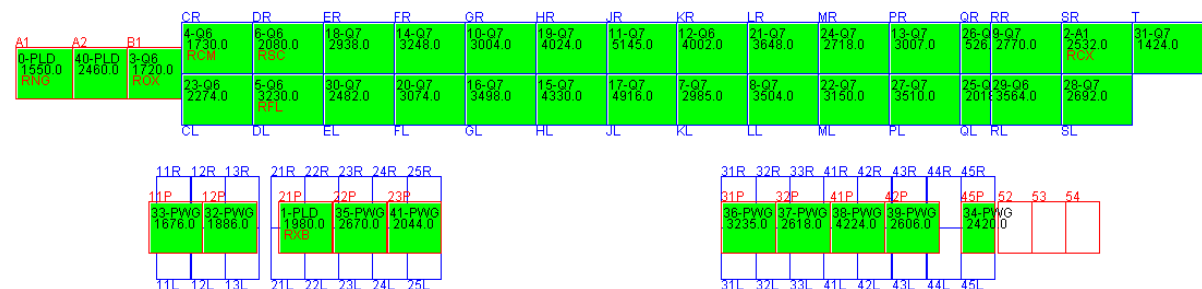


Figure 3: Chargement comprenant 7 ULDs spéciaux

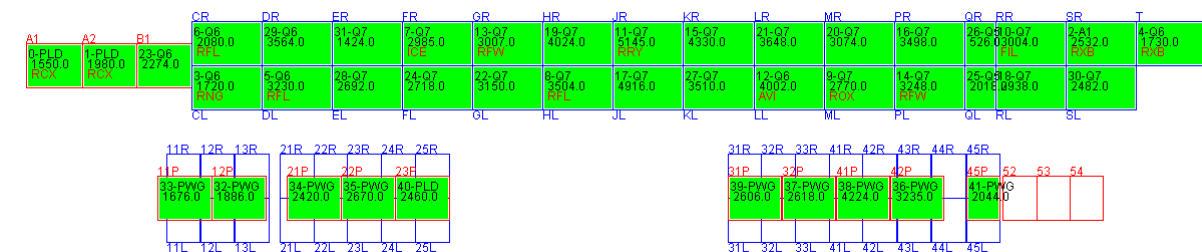


Figure 4: Chargement comprenant 15 ULDs spéciaux

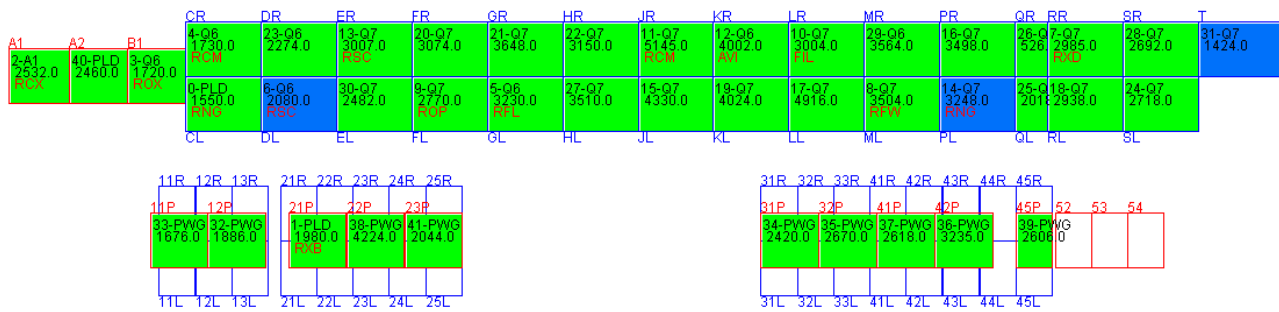


Figure 5: Positions fixées pour 3 ULDs

Finalement, dans le cas présenté à la Figure 5, nous avons 3 contraintes supplémentaires : les ULDs 6 et 14 doivent être proches des portes et l'ULD 31 contient un composant magnétique et doit donc être loin des équipements magnétiques de l'avion, si possible dans la queue (T) de l'avion. Le load master impose ces restrictions via le programme en fixant ces ULDs dans les positions particulières reprises en bleu sur la Figure 5. Moins de 4 secondes ont été nécessaires pour obtenir la solution optimale.

7 Conclusion

Certains types de chargements sont soumis à des contraintes très restrictives. C'est le cas des animaux, de la nourriture et des produits dangereux. Notre but est de tenir compte des contraintes de ségrégation liées à ces chargements spéciaux dans un programme linéaire à valeur entière mixte pour le chargement optimal d'un ensemble de conteneurs et palettes dans un avion compartimenté. Pour résoudre ce problème, à chaque ULD est associé un label correspondant à une catégorie de produits. Ce label permet d'identifier les incompatibilités entre les produits. Un algorithme pour ajouter les contraintes de ségrégation dans le modèle est proposé.

A notre connaissance et selon les données sur les flux des marchandises, le nombre d'ULDs incompatibles entre eux par vol n'est pas trop important. Ceci explique pourquoi nous avons étudié des chargements qui comptent moins de 15% de produits spéciaux. Les résultats expérimentaux montrent que notre méthode obtient des solutions optimales en quelques secondes.

De plus, nous avons modifié le programme de manière à ce que le load master puisse bénéficier à la fois d'une approche manuelle basée sur son expérience et de la puissance de l'optimisation. Ceci signifie que le load master peut placer certains ULDs sur des positions spécifiques (afin de satisfaire des contraintes supplémentaires) avant de lancer la procédure d'optimisation.

References

- Airports Council International (2009). Worldwide Airport Traffic Report. http://www.airports.org/aci/aci/file/Press%20Releases/2010/PR_WATR2009_050810_FINAL.pdf
- Barbucha, D (2004). Three approximation algorithms for solving the generalized segregated storage problem. *European Journal of Operational Research* 156(1), 54–72.
- World Air Cargo Forecast (WACF) (2010). www.lb.boeing.com/commercial/cargo/wacf.pdf
- Commodity Flow Survey, Hazardous Materials (2007). http://www.bts.gov/publications/commodity_flow_survey/2007/hazardous_materials/
- Dannenbring, D.G. and Khumawala, B.M. (1973). An investigation of branch and bound methods for solving segregated storage problem. *AIIE Transactions* 5(3), 265–274.
- Evans, J.R. Cullen, F.H. (1977). The segregated storage problem: Some properties and an effective heuristic. *AIIE Transactions* 9(4), 409–413.
- Erkut, E., S. Tjandra and V. Verter (2007). Hazardous Materials Transportation. *Handbooks in Operations Research and Management Science* 14, 539–621.
- International Air Transport Association (IATA) (2010). <http://www.iata.org/whatwedo/Documents/economics/eChartbook-Q4-2010.pdf>
- Limbourg, S., Schyns, M., and Laporte, G. (2011). Automatic Aircraft Cargo Load Planning. *Journal of the Operations Research Society*

- Mongeau, M. and Bès, C. (2003). Optimization of Aircraft Container Loading, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 39, pp. 140–150.
- Neebe, A.W. and Rao, M.R. (1976). An algorithm for the segregated storage problem. *Naval Research Logistics* 23, 406–420.
- Shilfer, E. and Naor, P. (1961). Elementary theory of the optimal silo storage problem. *Operational Research Quarterly* 12, 54–65.
- 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.
- Tusek A. (2011). Dangerous goods panel (DGP) meeting of the working group of the whole. <http://www.icao.int/anb/fls/dangerousgoods/dgp/WorkingGroups/WG11/IPs/DGPWG.2011.IP.004.3.en.pdf>
- 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*.
- 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.