

# Optimisation des transports : de la mer à la terre

Sabine LIMBOURG

HEC Management School, QuantOM, University of Liege (ULg), Liège, Belgium

14 Rue Louvrex 4000 Liège

E-mail: Sabine.Limbourg@ulg.ac.be

## Résumé :

La recherche opérationnelle (RO) est une approche quantitative qui emploie des méthodes analytiques avancées pour aider les gestionnaires à prendre de meilleures décisions. L'application de ses techniques au transport de marchandises et à la gestion de la chaîne logistique soulève plusieurs défis dus à la complexité structurelle, aux objectifs conflictuels des différentes parties prenantes, aux variations prévisibles ainsi qu'aux incertitudes inhérentes aux situations étudiées. Cet article se concentre sur une collection de problèmes relatifs aux transports maritimes, terrestres et aériens qui permettent d'illustrer les trois niveaux de décision : le stratégique, le tactique et l'opérationnel. Les caractéristiques inhérentes à certains types de problèmes, leur taille ou leur complexité ont donné naissance au développement de nouvelles heuristiques. Toutefois, d'autres développements sont toujours nécessaires, beaucoup de recherches et d'études doivent encore être effectuées pour obtenir de bonnes solutions pour les nouveaux défis émergeant en transport et en logistique.

## Mots-clés :

Recherche opérationnelle ; optimisation ; aide à la décision ; transport, logistique.

## Abstract :

Operations research (OR) is a quantitative approach that uses advanced analytical methods to help managers make better decisions. The application of its techniques to freight transport and supply chain management raises challenges due to the structural complexity, the conflicting objectives of the various stakeholders, the foreseeable variations as well as the uncertainties inherent to studied cases. This article focuses on a collection of problems related to maritime, land and air transport that illustrate the three levels of decision-making: strategic, tactical and operational. The inherent characteristics of certain types of problems, their size or their complexity have given rise to the development of new heuristics. However, further developments are still needed. Research and studies have to be carried out to obtain good solutions for the new challenges arising from transport and logistics.

## Keywords :

Operations research, optimisation, decision support system, transport, logistics.

## 1. INTRODUCTION

La recherche opérationnelle (RO) est une approche quantitative qui applique des méthodes analytiques avancées pour aider les gestionnaires à prendre de meilleures décisions. Habituellement, le but est le contrôle ou l'optimisation : améliorer l'efficacité d'une organisation ou la qualité du service (Limbourg et al., 2016), gérer des ressources, planification de la production et des transports, diminuer les coûts, réduire des émissions polluantes ou de la consommation d'énergie, ... La RO s'appuie sur la disponibilité croissante de données recueillies à de multiples sources telles que les réseaux sociaux, les progiciels de gestion intégrés, la collecte automatique de données de production ou de consommation. L'approche générale utilisée dans la RO consiste à déterminer un modèle mathématique approprié pour un problème réel donné. Un modèle mathématique est une abstraction de la réalité. Il doit être moins complexe que le problème du monde réel (simple et compréhensible) tout en représentant les aspects importants du problème réel (Fig. 1).

Compte tenu du type et de la complexité de ce modèle, plusieurs techniques d'optimisation mathématique existent pour le résoudre. La technique la plus connue en RO est la programmation linéaire. Elle est conçue pour des modèles avec un objectif et des contraintes formulés par des fonctions linéaires. Certaines techniques incluent des variables entières, de la programmation dynamique qui décompose le problème en sous-problèmes plus facile à résoudre, la modélisation du problème par des graphes ou des réseaux ou encore de la programmation non linéaire pour les problèmes décrits par une fonction objectif ou des contraintes non linéaires. Dans la plupart des techniques de RO, les solutions sont obtenues

par des algorithmes. Ceux-ci fournissent des règles de calcul qui sont itérativement appliquées ; chaque itération permet de se rapprocher de la solution optimale. Certains problèmes sont si complexes qu'un algorithme exact (qui garantit de trouver la solution optimale) ne peut les résoudre. Dans de tel cas, une heuristique (qui permet de trouver une bonne solution mais sans garantie d'optimalité) doit être développée. Finalement, les outils de RO aident à estimer la qualité d'une solution pour des données réelles et à confirmer ou justifier des décisions.

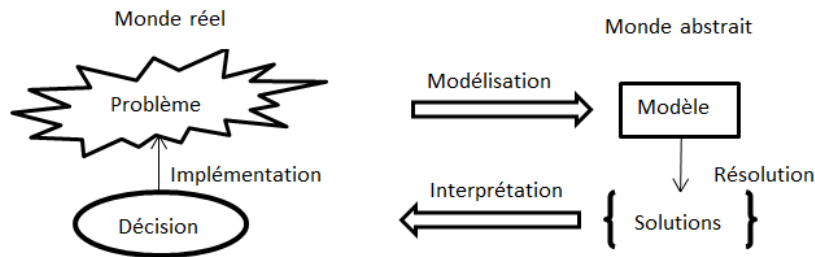


Fig. 1. Aide à la décision.

En fonction de la fréquence de décision et l'horizon de temps considéré, trois niveaux peuvent être définis : le stratégique, le tactique et l'opérationnel. Au niveau stratégique, les décisions ont un effet à long terme. Elles sont prises par les cadres supérieurs qui doivent prendre en considération quasiment toutes les fonctions de managements et l'incertitude des conditions du marché sur les années futures. Ces décisions stratégiques sont donc difficiles et très coûteuses à modifier, le degré d'incertitude et d'agrégation sont élevés. Un exemple de décision stratégique est celui de la localisation d'infrastructures qui attribue un capital important sur une longue période. Au niveau tactique, les décisions ont pour but de maximiser le profit pouvant être généré sur l'horizon de temps considéré, d'une année à 18 mois, étant données les contraintes liées aux décisions stratégiques. L'idée est de faire correspondre l'offre et la demande. Parmi les décisions tactiques, on peut citer les problèmes de tarification, du niveau de capacité des équipements, du nombre de travailleurs à engager. Finalement, au niveau opérationnel, les décisions prises ont pour but de gérer les fluctuations de l'offre et de la demande sur la semaine, la journée, voire l'heure, sous les contraintes découlant des décisions stratégiques et tactiques. Le but est de réduire l'incertitude et d'optimiser la performance. Puisque ces décisions opérationnelles sont prises pour un court terme, elles sont faciles et peu coûteuses à modifier, le degré d'incertitude et d'agrégation sont petits. Elles sont prises par des techniciens qui ne prennent en compte que quelques fonctions de managements. Ce sont des décisions telles que celles à considérer pour le routage des véhicules, la distribution des unités de chargement, l'ordonnancement et le séquençage des opérations de chargement ou déchargement.

Bien que les domaines d'application de la RO soient variés, cet article se base sur des problèmes relatifs aux transports et à la gestion de la chaîne logistique. Ces problèmes permettent de comprendre pourquoi la recherche sur les transports ou sur la gestion de la chaîne logistique sont intéressants pour les scientifiques en RO et d'explorer des formulations mathématiques et des techniques de RO qui ont été appliquées.

La section 2 présente un problème de planification dans le cadre du transport maritime. La section 3 décrit certains problèmes rencontrés à l'interface mer-terre, c'est à dire aux ports. Les ports qui se sont développés dans les dernières années ont été capable d'intégrer judicieusement les connexions avec son hinterland. C'est la raison pour laquelle la section 4 reprend, pour les trois niveaux de décision, des exemples caractéristiques de problèmes rencontrés lors des transports terrestres. La section 5. décrit des problèmes de chargements liés au transport aérien. Finalement, la section 6 reprend les conclusions de cet article.

## **2. EN MER**

Cette section, basée sur l'article de Christiansen et al. (2009), souligne l'importance d'une meilleure planification des opérations maritimes pour réduire les coûts et les émissions par volume transporté. En effet, l'exploitation des navires coûte des dizaines de milliers d'euros par jour, et le revenu de transport d'une seule cargaison peut atteindre des centaines de milliers d'euros. Malgré la complexité du problème de planification et les sommes d'argent en jeu, la plupart des planificateurs des compagnies maritimes les résolvent manuellement. De plus, la plupart des entreprises ont des outils qui permettent de considérer un navire à la fois au lieu de la flotte disponible, ce qui résulte en une planification sous optimisée.

Chaque jour, un certain nombre de cargaisons doivent être transportées. Chaque cargaison comprend une quantité spécifique de marchandises qui doit être chargée dans un port de chargement et livrée dans un port de déchargement. Il existe généralement une fenêtre de temps qui spécifie lorsque le chargement ou le déchargement peuvent commencer. Pour transporter ces cargaisons, le planificateur gère une flotte hétérogène de navires. Chaque navire a des caractéristiques spécifiques telles qu'une vitesse de service, une capacité de chargement, une consommation de carburant, un équipement de chargement, de déchargement ou une structure de coûts. Les navires de la flotte sont déjà partiellement chargés et leurs positions initiales sont différentes au moment de la planification. La tâche du planificateur est de trouver une solution correspondant au coût minimum ou au profit maximum en affectant les cargaisons aux navires disponibles en tenant compte des itinéraires et horaires existants, tout en satisfaisant un grand nombre de contraintes complexes comme la compatibilité navire-port. En outre, certaines compagnies de transport maritime peuvent recevoir des demandes de cargaison optionnelle. Elles doivent alors évaluer ces requêtes et décider si elles les acceptent ou les rejettent. Les compagnies maritimes peuvent également sous-traiter, les quantités de cargaison sont souvent assez flexibles ... ces caractéristiques augmentent la complexité du problème d'optimisation.

Une compagnie maritime a comparé les plans obtenus par un outil d'aide à la décision basé sur les techniques de RO pour l'acheminement et l'ordonnancement du navire (Fagerholt 2004, Fagerholt et al. 2007) avec des solutions issues de la planification manuelle. Les plans générés par l'outil avaient une meilleure utilisation de la flotte. Au cours d'une période de trois semaines, deux cargaisons supplémentaires de dizaines de milliers de tonnes pouvaient être transportées. Les bénéfices de la compagnie ont augmenté de 1 à 2 millions de dollars au cours de cette courte période de temps. Ce nouvel outil a permis aux planificateurs d'évaluer et de comparer un grand nombre de solutions en très peu de temps. Un autre avantage est que le plan généré automatiquement peut être utilisé comme point de départ pour les changements manuels. Ce type de planification mixte bénéficie des compétences complémentaires des humains et des ordinateurs.

## **3. INTERFACE MER-TERRE**

Un port peut être défini comme une interface entre la mer et la terre où les flux, transbordés entre divers modes de transport, sont consolidés ou distribués. Il est constitué d'un ensemble de terminaux et d'entreprises. Sa mission est la gestion des navires et de la marchandise. En raison des coûts considérables inhérents à sa gestion, la performance globale d'un port est un élément essentiel. Alors que sa localisation et son accessibilité déterminent son aire de marché, c'est-à-dire les personnes ou activités industrielles qu'il peut servir, sa performance dépend également de la pertinence des décisions prises par les gestionnaires au niveau de l'interface maritime (par exemple : l'affectation optimale des navires aux quais ou gestion du transbordement des bateaux), de la zone de transfert interne (par exemple : la répartition des flux entre les terminaux ou l'affectation des ressources aux tâches), de la zone de stockage (par exemple : l'optimisation des espaces de stockage ou l'ordonnancement des équipements de manutention) et de l'interface terrestre

(par exemple : le choix du mode de transport, synchronisation des départs et arrivées des trains, des camions).

Les investissements massifs en infrastructure doivent correspondre au trafic actuel ainsi qu'anticiper les tendances futures, les changements technologiques et logistiques. Ces décisions stratégiques concernent par exemple la localisation et la conception des terminaux portuaires ; la détermination de leur capacité ou la conception d'un réseau de transfert. Depuis des décennies, la croissance des flux de conteneurs et l'augmentation liée de la capacité des porte-conteneurs ont favorisé le développement de terminaux à conteneurs. Les plus gros porte-conteneurs peuvent embarquer jusqu'à 18000 Equivalent Vingt Pieds. Pour rejoindre sa destination finale, un conteneur peut changer plusieurs fois de navire. Il sera déchargé puis rechargé par des grues portuaires gardant une cadence de transfert optimale pour réduire le temps d'immobilisation des navires à quai, élément substantiel du coût du transport et de la congestion, tout en assurant la sécurité des hommes et des marchandises. Ce problème de chargement n'est pas trivial. Les conteneurs sont placés sur le navire selon la méthode du dernier entré, premier sorti et, par conséquent, le déchargement et le rechargement temporaire dans les ports suivants le long de l'itinéraire, entraîne des coûts élevés en particulier si le plan de chargement est basé uniquement sur les contraintes de stabilité du navire. La génération de ces plans dépend du chargement, des contraintes techniques, des possibilités dans les ports, de la géométrie du navire, de la séquence des ports visités et d'autres contraintes techniques telles que le transport de produits dangereux (Giemsch et Jellinghaus, 2004).

#### **4. SUR TERRE**

Toutefois, aucun port ne peut se développer sans de bonnes connexions avec son hinterland (Lihoussou et Limbourg, 2012). Dès lors, cette section expose, pour les trois niveaux de décision, des études relatives aux transports terrestres. Au niveau stratégique, la sous-section 4.1 illustre les problèmes de conception des réseaux de distribution par des modèles de localisation. La sous-section 4.2. présente, au niveau tactique, le problème de conception de service de transport via un modèle de tarification tandis que la sous-section 4.3. inclut des problèmes opérationnels que sont les problèmes de routage riches.

##### **4.1. Conception des réseaux de distribution**

La prise de décision en matière de localisation a suscité un vif intérêt au sein de la communauté de RO et des sciences de gestion. Tout d'abord, ces décisions sont souvent prises à tous les niveaux de l'organisation humaine : des individus aux entreprises, jusqu'aux organismes gouvernementaux et internationaux. Dans le secteur privé, elles ont une influence sur la compétitivité d'une entreprise. Dans le secteur public, elles influencent l'efficacité des services publics et donc la capacité d'attraction des ménages et des activités économiques. De plus, elles occasionnent souvent des externalités telles que la pollution, la congestion ou le développement économique (Daskin, 1995).

Les modèles de localisation sont souvent difficiles à résoudre de manière optimale. Ils sont spécifiques à l'application, c'est-à-dire que leur forme structurelle (les objectifs, les contraintes et les variables) est déterminée par le problème particulier. Quelques exemples sont présentés dans la suite de ce chapitre. Nous référons le lecteur intéressé par ces problèmes au livre de Daskin (1995).

Le mot « installation » est utilisé au sens large, il inclut des entités telles que des aéroports, des ports, des entreprises, des entrepôts, des détaillants, des écoles, des hôpitaux, des gares, ...

C'est Weber (1909) qui élabore le premier modèle de localisation industrielle. Il a considéré le problème de la localisation d'un point d'offre de service de façon à ce que le coût de transport soit minimisé. Ce modèle est ensuite enrichi par de nombreux travaux. Les

modèles de localisation développés permettent de situer des installations dans un espace donné et nécessitent quatre entrées (ReVelle et Eiselt, 2005) :

- les clients dont la position est connue ;
- les installations à localiser ;
- l'espace où les clients et les installations sont situés ;
- une métrique qui indique les distances (ou les temps, les coûts de transport, ...) entre les clients et les installations.

La classification de ces modèles peut être basée sur la distinction du type d'espace dans lequel les installations doivent être localisées, sur la nature des entrées (par exemple : statiques ou dynamiques, déterministes ou probabilistes), sur le type de métrique utilisée, sur le nombre d'installations à localiser, sur la nature de la demande, selon la prise en compte ou non de la capacité des installations, etc. Si le critère de classification utilisé est le type d'espace dans lequel les installations doivent être localisées, alors les problèmes se différencient selon que l'espace considéré soit continu ou discret. La formulation de la localisation dans un espace continu suggère qu'un site peut être sélectionné n'importe où dans le plan. Tandis que la formulation de la localisation dans un espace discret considère qu'il n'y a qu'un nombre fini de sites potentiels.

La plupart des problèmes réels conduisent à la formulation de problèmes de localisation dans un espace discret. En effet, dans beaucoup de situations, seul un nombre fini de points peuvent être considérés comme des localisations potentielles. C'est le cas par exemple, de certaines installations qui ne peuvent pas être situées dans des régions difficiles d'accès ou à l'intérieur de ville.

D'autres distinctions encore peuvent être effectuées en fonction de l'objectif de la localisation (ReVelle et Eiselt 2005): les objectifs d'attraction, de répulsion, d'attraction-répulsion. Le premier type d'objectif concerne la localisation d'installation attractive où une proximité est désirable, par exemple un centre de distribution ; tandis que le deuxième concerne la localisation d'installation indésirable, par exemple une entreprise bruyante, où une proximité est à éviter. L'objectif mixte d'attraction-répulsion concerne des installations qui peuvent fournir des services à la communauté et nuire à l'environnement ; c'est notamment le cas d'une décharge publique. Les modèles caractérisés par des objectifs d'équité tentent de localiser les installations (écoles par exemple) pour que les distances qui les séparent de leurs points de demande soient plus ou moins équivalentes. Par contre, les modèles caractérisés par des objectifs d'efficacité tentent de localiser les installations pour que la somme des distances qui les séparent de leurs points de demande soit la plus petite possible.

Habituellement, voir par exemple Owen et Daskin (1998), les modèles de localisation sur un réseau sont classés en trois catégories :

- les problèmes de couverture ;
- les problèmes de type  $p$ -centre ;
- les problèmes du type  $p$ -médiane.

Bien que ces modèles soient basés sur des hypothèses simplificatrices, ils constituent la base à partir de laquelle de nombreux problèmes peuvent être résolus.

#### 4.1.1. Problème de couverture

Le service au client dépend souvent de la distance entre le client et l'installation à laquelle il est affecté. Les clients sont généralement affectés à l'installation la plus proche. Le service est considéré comme adéquat si la distance entre le client et l'installation à laquelle il est affecté est plus petite qu'une distance donnée, appelée distance de couverture ( $D_C$ ).

L'objectif de ce type de problème est de localiser des installations pour servir toutes les demandes, avec un coût total minimal. Un nœud de demande est couvert par un service, si la distance entre ce nœud et l'installation la plus proche n'est pas plus grande que  $D_C$ . Être plus proche d'une installation que cette valeur n'améliore pas la satisfaction. Dans le cas de la Fig. 2, si  $D_C = 50 \text{ km}$ , alors deux installations devront être localisées, l'une en A, l'autre en D.

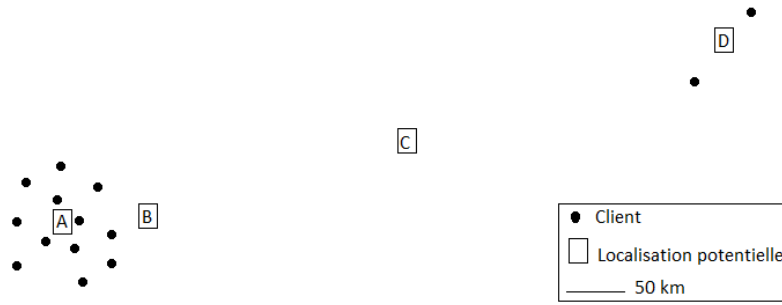


Fig. 2. Demandes et localisations potentielles

La formulation de ce problème se base sur un ensemble de données, ou paramètres :

$I$  = l'ensemble des nœuds de demande (clients) indexés par  $i$

$J$  = l'ensemble des sites potentiels indexés par  $j$

$d_{ij}$  = distance (ou une mesure plus ou moins liée à la distance telle que le temps de parcourt ou le coût) entre le nœud de demande  $i$  et le site potentiel  $j$

$D_C$  = distance de couverture

$N_i = \{j | d_{ij} \leq D_C\}$  = l'ensemble de toutes les localisations potentielles qui peuvent couvrir la demande du nœud  $i$

De plus, pour l'ensemble des décisions : localiser ou pas une installation à un site potentiel ( $\forall j$ ), une variable de décision est associée :  $y_j = 1$  si une installation est localisée en  $j$ , 0 sinon. L'objectif est de minimiser le nombre d'installations à localiser, ce qui peut s'écrire sous la forme :

$$\text{Minimiser } \sum_{j \in J} y_j \quad (1)$$

Sous les contraintes suivantes :

$$\sum_{j \in N_i} y_j \geq 1 \quad \forall i \in I \quad (1.1)$$

$$y_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (1.2)$$

L'ensemble des contraintes (1.1) garantit que chaque nœud de demande soit couvert part au moins une installation. L'ensemble des contraintes (1.2) force la nature binaire des décisions de localisation.

L'une des principales hypothèses du modèle ci-dessus est que tous les nœuds doivent être couverts, il n'y a donc pas de contrainte budgétaire. Si (i) le nombre d'installation à localiser est connu, (ii) toutes les installations ont le même coût fixe d'implantation et (iii) sans limite de capacité alors le problème devient celui de trouver une couverture maximale. Notons que si le coût fixe pour localiser une installation à l'emplacement potentiel  $j$  et que sa capacité sont connus, alors, les trois hypothèses ne sont plus nécessaires et le modèle peut être adapté.

Dans le cas de la Fig. 2, si les contraintes budgétaires imposent de localiser une seule installation, cette dernière sera localisée en A. Tous les clients seront alors couverts excepté les deux clients proches de D.

Les paramètres restent identiques à ceux de la formulation précédente auxquels un nombre prédéterminé,  $p$ , d'installations à localiser est ajouté. En plus des variables de décision  $y_j$ , on ajoute les variables  $z_i \forall i \in I$   $z_i$  telles que  $z_i = 1$  si la demande du nœud  $i$  est couverte et 0 sinon ; la maximisation de la demande couverte est formulée comme suit :

Fonction objectif :

$$\text{Maximize } \sum_{i \in I} z_i \quad (2)$$

Sous contraintes :

$$\sum_{j \in J} y_j = p \quad (2.1)$$

$$\sum_{j \in N_i} y_j \geq z_i \quad \forall i \in I \quad (2.2)$$

$$y_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (2.3)$$

$$z_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in I \quad (2.4)$$

La fonction objectif (2) maximise la demande couverte. La contrainte (2.1) limite à  $p$  le nombre d'installations à être localisées. Les contraintes (2.2) assurent que la demande au

nœud  $i$  n'est pas comptabilisée tant qu'il n'y ait pas au moins une installation localisée sur l'un des sites potentiels couvrant ce nœud  $i$ . Les contraintes (2.3) et (2.4) reflètent respectivement la nature binaire des décisions de localisation et de la couverture des nœuds de demande.

#### 4.1.2. Problèmes du $p$ -centre

Dans les deux problèmes présentés à la section 4.1.1., la distance de couverture est fixée alors que dans d'autres situations, cette distance peut être une cible à atteindre. Ce problème est alors appelé, le problème du  $p$ -centre. Le but est de localiser un nombre prédéterminé,  $p$ , d'installations pour minimiser la distance maximale entre une demande et l'installation la plus proche. En reprenant les notations utilisées à la section 4.1.1. pour les paramètres, et les variables de décision :

$$y_j = 1 \text{ si une installation est localisée en } j, 0 \text{ sinon} \quad ; \forall j \in J$$

$$x_{ij} = 1 \text{ si la demande du nœud } i \text{ est affectée à l'installation localisée en } j;$$

$$0 \text{ sinon; } \forall i \in I, j \in J$$

$w$  = distance maximale

La fonction objectif s'écrit :

$$\text{Minimiser } w \quad (3)$$

Sous contraintes :

$$\sum_{j \in J} y_j = p \quad (3.1)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ij} \leq y_j \quad (3.2)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (3.3)$$

$$w \geq \sum_{j \in J} d_{ij} x_{ij} \quad \forall i \in I \quad (3.4)$$

$$x_{ij}, y_j \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.5)$$

La fonction objectif (3) minimise the distance maximale  $w$ . La contrainte (3.1) limite à  $p$  le nombre d'installations à être localisées. Les contraintes (3.2) garantissent qu'une demande ne peut être affectée qu'à une installation implantée. Les contraintes (3.3) assurent que chaque nœud de demande soit servi. Les contraintes (3.4) certifient que  $w$  est la plus grande des distances pour chaque  $i$ . Finalement, les contraintes (3.5) reflètent respectivement la nature binaire des décisions d'affectation et de localisation.

Si nous reprenons le cas de la Fig.2, avec des contraintes budgétaires qui imposent de localiser une seule installation, cette dernière sera localisée en C car c'est la situation qui minimise la distance entre l'installation et le client le plus éloigné.

#### 4.1.3. Problème de la $p$ -médiane

Dans beaucoup de cas, le coût pour desservir une demande dépend de la distance entre cette demande et son installation la plus proche. Par exemple, le coût pour desservir un magasin de détail à partir d'un entrepôt peut dépendre du temps pris par un conducteur pour effectuer le déplacement de l'entrepôt au magasin de détail. Le problème de la  $p$ -médiane n'est pas de maximiser le nombre de nœuds de demande couverts mais de minimiser les coûts de déplacement. Dans le cas de la Fig.2, la localisation optimale serait en B.

Le problème de la  $p$ -médiane, Hakimi (1964), Hakimi (1965), consiste à localiser  $p$  installations et à servir chaque client à partir des installations établies de façon à ce que les demandes de tous les clients soient servies et que les coûts totaux soient minimisés. Il repose sur les trois hypothèses déjà définies à la section 4.1.1. : (i) le nombre d'installations à localiser est connu a priori ; (ii) le coût d'implantation d'une installation est identique quel que soit le site potentiel et (iii) les installations n'ont pas de contrainte de capacité.

Si on reprend les paramètres définis à la section 4.1.1. et les variables de décision de la section 4.1.2., la fonction objectif devient :

$$\text{Minimiser } \sum_{i \in I, j \in J} d_{ij} x_{ij} \quad (4)$$

Sous contraintes :

$$\sum_{j \in J} y_j = p \quad (4.1)$$

$$x_{ij} \leq y_j \quad \forall i \in I, j \in J \quad (4.2)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (4.3)$$

$$x_{ij}, y_j \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (4.4)$$

La fonction objectif (4) minimise le coût total nécessaire pour desservir chaque nœud de demande à partir de l'installation la plus proche. La contrainte (4.1) stipule que  $p$  installations doivent être localisées. Les contraintes (4.2) limitent l'affectation des nœuds de demande aux installations ouvertes. Les contraintes (4.3) exigent que chaque nœud de demande  $i$  soit affecté à exactement une installation  $j$ . L'ensemble des contraintes (4.4) sont les contraintes d'intégrité standard.

#### 4.1.4. Problème de localisation de hubs

Lorsque la demande de transport est liée à un grand nombre de paires d'origine-destination, le coût total de transport peut alors être moins important lorsque l'acheminement direct entre toutes les paires origines-destinations est évité. Dans les réseaux de type hub-and-spoke, les passagers ou les marchandises doivent se déplacer de leur origine à un hub puis de là vers un autre hub pour finalement continuer jusqu'à leur destination finale. Par exemple, dans le réseau à 14 nœuds dont trois hubs représenté à la Fig. 3., le transport de  $a$  à  $j$ , s'effectue en passant par les hubs en  $e$  et  $f$ . Notons que 28 connexions (chaque lien doit être dédoublé : par exemple, la connexion de  $f$  à  $g$  n'est pas équivalente à la connexion de  $g$  à  $f$ ) sont nécessaires pour relier l'ensemble des nœuds alors que un réseau point à point, c'est-à-dire avec des connexions directes entre chaque nœuds nécessiterait  $14 \times 13 = 182$  connexions.

Les modèles de localisation de hubs s'appliquent lorsqu'il faut déterminer simultanément la localisation des hubs et l'allocation des utilisateurs potentiels à ces derniers. Il s'agit donc d'un problème d'affectation-localisation. Le modèle de base suppose qu'il n'y a pas de contrainte de capacité aux « hubs », qu'il n'y a pas de coût d'implantation (ou que celui-ci est identique à chaque localisation potentielle), que le transport direct n'est pas permis entre les paires origines-destinations qui ne sont pas des hubs, et que tout le trafic d'une origine à une destination passe par les hubs. Le transport entre les hubs est également supposé plus efficace en raison de la concentration des flux, ce qui entraîne un coût unitaire inférieur à ceux des autres mouvements dans le système. C'est notamment le cas du transport intermodal rail-route schématisé à la Fig. 3 où des économies d'échelle peuvent être effectuées par la consolidation des marchandises sur la partie ferroviaire du transport reliant les hubs entre eux.

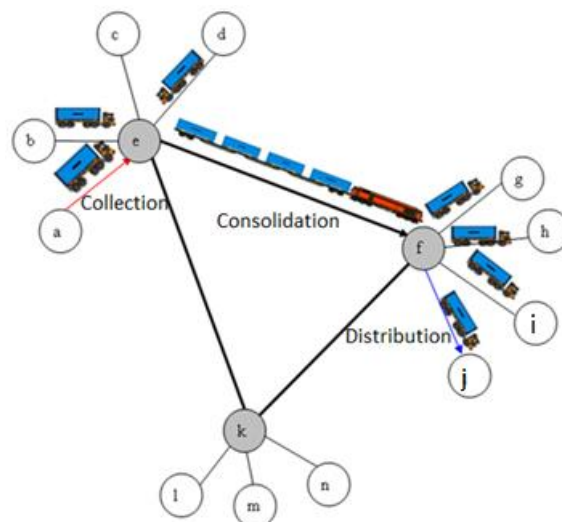


Fig. 3. Un réseau « hub-and-spoke » de 3 hubs Les hubs sont localisés aux nœuds  $e$ ,  $f$  et  $k$ . Source : Auteur, adapté de Daskin (1995)

L'objectif poursuivi en combinant plusieurs modes de transport est de tirer parti des atouts de chaque mode : allier l'aptitude de la route à desservir l'ensemble du territoire et la capacité



du fer (ou de la voie d'eau ou du maritime) à effectuer des transports de masse en réalisant des économies d'échelle. De plus, dans le cas du transport intermodal, le passage d'un mode de transport à l'autre s'effectue sans rupture de charge de la marchandise (la marchandise reste dans son contenant) ce qui contribue à une amélioration de la productivité de toute la chaîne du transport. Un transbordement efficace est une nécessité. La localisation de ces terminaux doit faire l'objet de choix rationnels et coordonnés. Il s'agit d'éviter les goulots d'étranglement et de canaliser les flux d'origines diverses sur des flux communs à plus fort débit. Ces terminaux doivent aussi offrir une valeur ajoutée et des services tels que l'entreposage, le dédouanement ou la gestion de l'information à l'échelle européenne. De plus, la mise en réseau des terminaux nécessite une coopération internationale. Un terminal situé à une localisation donnée ne peut être utile que s'il y a, à l'autre bout de la chaîne, très probablement dans un autre pays, un homologue possédant des caractéristiques techniques similaires.

Tout comme le problème du  $p$ -hub médian est une extension du problème de la  $p$ -médiane, les problèmes du  $p$ -hub centre et de couverture par des hubs sont des extensions respectivement des problèmes du  $p$ -centre et de couverture. Le lecteur intéressé par le problème du  $p$ -hub centre trouvera sa définition dans O'Kelly et Miller (1991). Campbell (1994) en donne une formulation quadratique puis donne une linéarisation qui a le désavantage d'augmenter significativement le nombre de variables de décision. Plusieurs linéarisations sont également proposées et comparées par Kara-Yetis et Tansel (2000). Des variantes à ce problème existent, en particulier, le problème peut tenir compte d'affectation nœud/hub simple ou multiple (Limbourg et Jourquin 2007, 2009 et 2010).

#### *4.1.5. Localisation bi-objectif des terminaux intermodaux.*

D'un point de vue environnemental, le transport intermodal est une solution encouragée par les différentes autorités politiques. Certains articles scientifiques présentent des modèles qui mettent l'accent sur un ensemble d'externalités. L'article de Santos et al. (2015), par exemple, examine les conséquences de trois politiques de transport de marchandises : subventionner les opérations de transport intermodal, internaliser les coûts externes et adopter une perspective systémique dans l'optimisation de la localisation des terminaux intermodaux. Les auteurs recommandent des transports innovants pour la logistique du dernier kilomètre pour réduire les coûts externes des opérations de pré- et post-acheminement. Mostert et Limbourg (2016) ont également souligné l'importance d'avoir des pré- et post-acheminements courts en termes de compétitivité intermodale, surtout du point de vue des externalités.

L'étude de cas effectuée par Mostert et al. (2017a) présente des résultats intéressants concernant l'impact sur la distribution des flux, sur le type de terminal et leur localisation. Un modèle bi-objectif : minimisation des coûts opérationnels (coûts de possession, d'assurance, de réparation et d'entretien, du travail, d'énergie, des taxes et d'utilisation du réseau) et des émissions de CO<sub>2</sub> est développé et tenant compte des économies d'échelle. Notons qu'un modèle bi-objectif similaire a été développé dans Belaid et al. (2016) pour la conception d'un réseau routier-canalisation pour le transport du pétrole dans la région de Sfax en Tunisie. De plus, dans Mostert et al. (2017b), un modèle d'affectation du trafic est appliqué au réseau belge de façon à identifier l'impact sur la répartition modale d'une minimisation des coûts opérationnels, des coûts externes liés à la santé (pollution de l'air) ou des taxes routières. Les auteurs concluent que les transports ferroviaires et fluviaux sont à privilégier pour limiter la pollution et son influence sur la santé. Leur conclusion est nuancée par une réduction probable des nuisances environnementales du transport routier grâce à l'introduction de véhicules plus propres, limitant ainsi la pertinence d'un transfert modal. Dès lors, si l'objectif à atteindre est la réduction des impacts environnementaux, les investissements devraient concerner l'infrastructure ferroviaire ou fluviale (Caris et al., 2014) afin de favoriser le développement du transport intermodal. Par contre, si l'objectif est l'optimisation des coûts directs de transport, ou si des camions plus propres remplacent les véhicules actuels, le transport routier garde toute sa place dans la chaîne logistique. Une décision d'investir dans

l'ouverture d'un nouveau terminal doit, en plus de s'évaluer au regard des flux de transport nationaux et internationaux, s'évaluer en fonction des impacts environnementaux.

#### 4.1.6. Perspectives

Toutes les formulations de localisation présentées dans cette section 4.1. sont statiques et déterministes. Les paramètres tels que la demande ou le coût sont supposés constants dans la période de temps considérée. Or, l'évolution des paramètres dans le temps peut ne pas être négligeable. En effet, la nature stratégique des problèmes de localisation implique que le modèle considère l'évolution de la demande. L'investissement exigé pour implanter des installations est généralement important, les installations doivent demeurer fonctionnelles pendant une période de temps suffisante. Les décideurs doivent non seulement choisir les localisations en fonction de l'évolution de la demande, mais doivent également considérer la synchronisation des expansions et des relocalisations de service après l'horizon de temps étudié. L'objectif des problèmes dynamiques est de déterminer où et quand il faut implanter ou fermer une installation. Les modèles dynamiques et stochastiques incorporent dans leur formulation la complexité et l'incertitude inhérentes aux situations réelles. Par exemple, les appels pour un service ambulancier peuvent fluctuer de façon importante en nombre mais aussi dans le temps et dans l'espace. Les paramètres d'entrée (temps du trajet, coûts de construction, la demande, ...) ne sont pas des valeurs connues exactement et ils peuvent ne pas évoluer de façon déterministe. Des recherches considérant l'aspect stochastique dans le temps sont nécessaires. L'objectif est de déterminer des localisations robustes à la variation des paramètres.

## 4.2. Conception des services de transport

Les stratégies de tarification se distinguent par la manière dont elles traitent l'interaction entre l'efficacité et la compétitivité. Le prix d'un service doit être suffisamment élevé pour couvrir ses coûts et générer un bénéfice mais aussi assez bas pour rester attrayant pour les clients. Un tel équilibre peut être un processus compliqué exigeant une estimation précise des coûts et une vision claire de la situation du marché. En dépit d'être identifiée à la fois comme une faiblesse importante et hautement probable du transport intermodal (Troch et al., 2015), cette classe de problèmes a singulièrement reçu peu d'attention parmi les chercheurs. Tawfik et Limbourg (2015) montrent que les modèles à deux niveaux sont peu utilisés dans les problèmes de planification du transport intermodal.

Les problèmes d'optimisation à deux niveaux, introduits par Bracken et McGill (1973), forment mathématiquement le concept de la théorie des jeux (Stackelberg, 1952). Le problème implique deux niveaux séquentiels à deux joueurs, communément appelées: le leader et le(s) suiveur(s). Dans le jeu, le leader, doté d'un privilège de précedence et d'une capacité à anticiper la logique de décision du suiveur, joue d'abord et décide d'une stratégie avantageuse en tenant compte de la réaction optimale du suiveur à sa stratégie.

Dans le cadre du transport intermodal, il y a un compromis non trivial, représenté à la Table 1, entre la génération de revenu et les dépenses liées aux services opérés. La performance d'un service peut être augmentée, et donc plus de clients seraient attirés par ce service, mais il y aurait des coûts supplémentaires. La première décision est celle de l'opérateur du transport intermodal. Celui-ci doit déterminer la fréquence et le prix des services dans le but de maximiser son profit ; sachant que les capacités des services ne doivent pas être dépassées et que les services aller-retour sont forcés. Deuxièmement, chaque client doit prendre une décision en choisissant d'effectuer soit le transport entièrement par la route soit un transport intermodal. Son objectif est de minimiser ses coûts logistiques totaux sachant que toutes les demandes doivent être livrées et que les demandes ne peuvent être transportées que sur des services intermodaux offerts.

Niveau supérieur (leader)	Niveau inférieur (suiveurs)
Preneur de décision : Opérateur intermodal.	Preneur de décision : Entreprises d'expédition.
Décisions : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Prix des services.</li> <li>• Fréquences des services.</li> </ul>	Décisions : Volume de la demande sur les itinéraires <ul style="list-style-type: none"> <li>• intermodaux.</li> <li>• routiers.</li> </ul>
Objectif : Maximisation du profit.	Objectif : Minimisation des coûts.
Contraintes : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacités des services</li> <li>• Services aller-retour forcés.</li> </ul>	Contraintes : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Satisfaction des demandes.</li> <li>• Les demandes ne peuvent être transportées que sur des services intermodaux offerts.</li> </ul>

Table 1. Modèles à deux niveaux pour la planification du transport intermodal.

En termes plus mathématiques, un sous-ensemble des variables du problème d'optimisation du leader est contraint par une solution optimale au problème d'optimisation du suiveur. En désignant les vecteurs de décision du leader et du suiveur respectivement par  $x$  et  $y$ , les fonctions objectifs par  $F$  et  $f$ , et les contraintes par  $G$  et  $g$  la formulation du problème est (Colson et al., 2007) :

$$\text{Min}_{x \in X, y} F(x, y) \quad (5)$$

Contraintes:

$$G(x, y) \leq 0 \quad (5.1)$$

$$\text{Min}_y f(x, y) \quad (5.2)$$

Contraintes :

$$g(x, y) \leq 0 \quad (5.3)$$

où les contraintes (5.1) impliquent des variables des deux niveaux.

Il peut y avoir plusieurs solutions optimales pour le problème de niveau inférieur pour un ensemble donné de valeurs pour les variables de décision de niveau supérieur. Le comportement du suiveur a alors deux approches possibles. La première, et la plus couramment choisie, est une approche optimiste qui suppose la coopération du suiveur, c'est-à-dire que son choix sera celui qui conduira à la solution la plus rentable pour le leader. Alors que la seconde est une approche pessimiste qui suppose un comportement agressif du suiveur, menant le leader à supporter les dommages résultant de la réaction la plus indésirable du suiveur.

Le problème d'optimisation à deux niveaux s'est révélé être fortement NP-Hard (Hansen et al., 1992). Le lecteur intéressé par l'optimisation à deux niveaux, y compris les propriétés mathématiques, les discussions sur les conditions d'optimalité et les méthodes de résolution, peut se référer à Dempe (2002) et Colson et al. (2007). Un examen rigoureux de la bibliographie, contenant plus d'une centaine de références, est également disponible auprès de Vincente et Calamai (1994). La structure du problème correspond à plusieurs domaines d'application du monde réel ayant une hiérarchie de décision.

### 4.3. Gestion de la flotte et problème de chargement

Les problèmes de tournées de véhicules (en anglais Vehicle Routing Problem, ou VRP) comptent parmi les problèmes les plus étudiés en RO. Ils peuvent être décrits comme un problème de conception d'itinéraires efficaces pour fournir des biens d'un dépôt à un ensemble de clients satisfaisant un ensemble de contraintes spécifiques. D'un point de vue économique, l'application de techniques d'optimisation pour résoudre ces problèmes a conduit à des économies allant de 5% à 20% des coûts de transport aux USA et dans l'UE (Toth et Vigo, 2002.). De même, les avantages environnementaux ont été remarquables en contribuant à réduire la congestion et le bruit généré par le transport de marchandises. Au

cours des dernières années, l'intérêt a évolué vers des variantes de VRP plus réaliste communément appelées VRP riche. Elles prennent en compte par exemple l'aspect stochastique ou dynamique, les problèmes de chargement (section 4.3.1.), environnementaux ou énergétiques (section 4.3.2.) ou encore d'inventaire (section 4.3.3.).

#### 4.3.1. Organisation des tournées avec la contrainte de charge aux essieux

Les programmes commerciaux actuels de planification des itinéraires ne tiennent pas compte de la plupart de ces contraintes de chargement, ce qui rend la planification souvent impossible dans la pratique. Cela entraîne des changements de dernière minute dans la planification qui peuvent entraîner des coûts supplémentaires. Le développement de modèles de routage de véhicules qui intègrent des contraintes de chargement est donc essentiel pour une planification plus efficace des itinéraires. Les camions avec des essieux surchargés représentent une menace importante pour la sécurité routière et peuvent causer de graves dommages à la surface de la route. Les transporteurs sont confrontés à des amendes élevées en cas de violation de ces limites. Les systèmes de pesée en mouvement (en anglais weigh-in-motion, ou WIM) sur les autoroutes augmentent les chances que des violations de charge à l'essieu soient détectées. Ce sont les raisons pour lesquelles Pollaris et al. (2015) mettent l'accent sur l'intégration des contraintes de chargement dans les VRP. L'objectif de l'article de Pollaris et al. (2016 et 2017) est la combinaison d'un VRP avec le chargement de palettes homogènes à l'intérieur d'un véhicule, il s'agit d'un problème de configuration souvent rencontré par les distributeurs. Les palettes peuvent être placées en deux rangées à l'intérieur du véhicule mais ne peuvent pas être empilées les unes sur les autres en raison de leur poids, de leur fragilité ou des préférences des chargeurs. Le chargement doit garantir que lorsque le camion arrive chez un client, aucun élément appartenant aux clients desservis plus tard ne bloque le déchargement des palettes du client actuel.

La législation sur les limites la charge par essieu varie selon les pays. La charge à l'essieu est le poids qui est placé sur les essieux du camion. Un camion à cinq essieux est illustré à la Fig. 4. Lorsque la palette  $j$  (item  $j$ ) est placée sur un véhicule, le poids de cette palette est divisé sur les essieux du tracteur et les essieux de la remorque. Le poids du couplage est porté par les essieux du tracteur,  $a_{ij}^F$  représente le poids des palettes du client  $j$  placés sur le couplage du camion (qui est le lien entre le tracteur et la remorque). Sur les essieux de la remorque,  $a_{ij}^R$  représente le poids des palettes du client  $j$ .

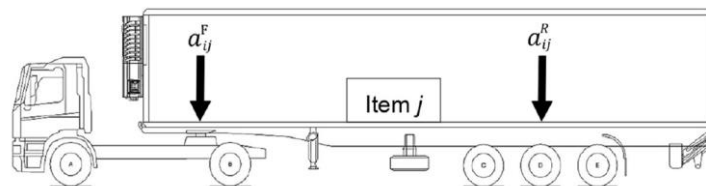


Fig. 4. Charge par essieu : tracteur et remorque. Source : Pollaris et al. (2017)

Puisqu'un camion délivre des palettes à plusieurs clients sur un itinéraire, le poids sur les essieux du camion change. Une palette placée à l'arrière du véhicule (derrière les essieux de la remorque) a un poids négatif sur les essieux du tracteur. Pour cette raison, il est possible que, en déchargeant cette palette, il y ait une violation des limites de poids des essieux du tracteur. Il est donc important que les charges par essieu soient également prises en considération lors de la tournée du véhicule et pas seulement lorsque le véhicule part du dépôt. La Fig. 5. est une représentation graphique de tournées optimales selon que les contraintes de charge par essieu soient considérées ou non.

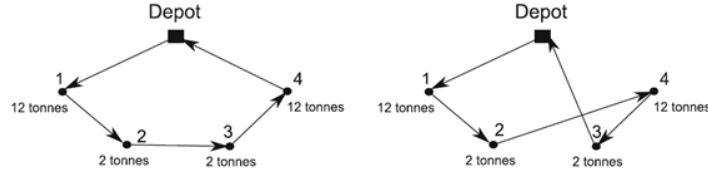


Fig. 5. Tournée optimale lorsque (a) on ne considère pas les contraintes de charge par essieu et (b) avec cette contrainte (Source : Pollaris et al. 2017)

La Fig. 6. représente une vue du dessus du chargement pour ces deux tournées. Les charges des clients 1, 2, 3 et 4 sont indiquées par C1, C2, C3 et C4 respectivement.



Fig. 6. Vue du dessus du chargement lorsque (a) on ne considère pas les contraintes de charge par essieu et (b) avec cette contrainte (Source : Pollaris et al. 2017)

#### 4.3.2. Organisation des tournées des véhicules électriques

La plupart des méthodes de résolution pour les VRP ne peuvent être utilisées dans le contexte des véhicules électriques. En effet, les variantes classiques considèrent que les routes sont effectuées par des véhicules alimentés par des moteurs à combustion interne. Ces véhicules ont une grande autonomie, le réseau d'approvisionnement est dense et le temps nécessaire au ravitaillement peut être négligé. En revanche, en raison d'une plus petite autonomie, du temps nécessaire pour recharger la batterie des véhicules électriques et de la disponibilité limitée des infrastructures de recharge, les algorithmes de tournées de véhicules électriques doivent être développés. Maximiser l'autonomie entre deux recharges ou le niveau d'énergie (état de charge de la batterie) à destination conduit à examiner les principaux facteurs de consommation d'énergie qui sont: le poids du véhicule et sa charge, l'efficacité du moteur, la vitesse, la conduite, la pente de la route et les possibilités de recharge du véhicule pendant la conduite (comme la capture de l'énergie cinétique sur les chemins de descente).

Bay et Limbourg (2015) définissent ce problème sur un graphe complet  $G = (N, \mathcal{A})$  où  $N$  est l'ensemble des nœuds indexés par  $i, j \in \{0, \dots, n+1\}$  et  $\mathcal{A} = \{(i, j) \in N, i \neq j\}$  est l'ensemble des arcs. L'ensemble  $N \setminus \{0, n+1\}$  dénote la localisation des clients tandis que le dépôt unique est dupliqué en un dépôt origine, identifié comme nœud 0 lorsque le véhicule commence sa tournée, et un dépôt destination, identifié comme nœud  $n+1$ , où le véhicule termine sa tournée.

L'objectif est de maximiser le niveau  $L$  de l'énergie disponible (ou état de charge de la batterie) à la fin de la tournée. Au début de la tournée, le niveau disponible d'énergie  $L_0$  est connu. Le niveau d'énergie est limité par la capacité maximale de la batterie,  $C$ , et ne la dépasse jamais même si plus d'énergie pourrait être disponible grâce à la récupération. Comme, le niveau  $L_j$  d'énergie disponible à chaque nœud  $j$  ne peut pas tomber en dessous de zéro ; le niveau d'énergie est calculé comme suit :

$$L_j = \begin{cases} 0 & \text{si } \sum_{i=0}^n (L_i - e_{ij}) x_{ij} \leq 0 \\ C & \text{si } \sum_{i=0}^n (L_i - e_{ij}) x_{ij} \geq C \\ \sum_{i=0}^n (L_i - e_{ij}) x_{ij} & \text{sinon} \end{cases} \quad \forall (i, j) \in L_0 \quad (6)$$

où  $x_{ij}$  sont des variables binaires de décision ;  $x_{ij} = 1$  si la tournée inclut l'arc  $(i, j) \in \mathcal{A}$  ; 0 sinon. L'énergie dépensée ou récupérée pour parcourir un arc  $(i, j) \in \mathcal{A}$  est représentée par  $e_{ij}$ . Elle est égale à la multiplication du temps de parcourt de l'arc  $(i, j) \in \mathcal{A}$  par la puissance totale, c'est-à-dire la puissance déployée  $p_{ij}$  (respectivement capturée), (7), plus la puissance utilisée pour les appareils auxiliaires (tels que l'air conditionné).

$$p_{ij} = M_{ij} g v_{ij} \sin \theta_{ij} + 0.5 c_d A \rho v_{ij}^3 + M_{ij} g c_r v_{ij} \cos \theta_{ij} \quad (7)$$

où  $M_{ij}$  est la masse du véhicule ;  $g$  est la constante gravitationnelle ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ) ;  $v_{ij}$  représente la vitesse du véhicule sur l'arc  $(i, j) \in \mathcal{A}$  ;  $\theta_{ij}$  est la pente de l'arc  $(i, j) \in \mathcal{A}$  ;  $A$  est la surface frontale du véhicule (en  $\text{m}^2$ ) ;  $\rho$  est la densité de l'air ( $\text{kg/m}^3$ ) ;  $c_r$  est le coefficient de résistance au roulement et  $c_d$  est le coefficient de traînée. Comme dans le modèle développé par Bektas et Laporte (2011) tous les paramètres sont constants sur un arc donné, mais la charge et la vitesse peuvent varier d'un arc à l'autre.

Pour résoudre ce modèle de programmation non linéaire en variables mixtes, l'algorithme de décomposition par *Outer Approximation* est utilisé grâce à l'outil d'optimisation AIMMS, un acronyme pour Advanced Interactive Multidimensional Modeling System. Les chemins optimaux obtenus permettent de réduire la consommation d'énergie et d'avoir la recharge la plus efficace du véhicule pendant la conduite. De plus, les demandes plus lourdes sont déchargées en priorité tandis que les demandes plus légères ont tendance à être déchargées plus tard. Les résultats de cette recherche permettent la gestion optimale de la logistique du dernier kilomètre dans des zones urbaines, ils peuvent contribuer à améliorer l'environnement urbain et la mobilité des villes.

#### 4.3.3. Problème de livraison et de ramassage

À la suite de la première Conférence des Nations Unies sur l'environnement en 1972 et d'autres sommets sur le sujet, le paradigme de la responsabilité environnementale des entreprises a pris une importance croissante parmi les principales préoccupations des gestionnaires. Les entreprises cherchent constamment de nouvelles solutions innovantes pour rendre leurs chaînes logistiques durables (Sarkis, 2006). Cependant, du point de vue de Guide et Van Wassenhove (2009), les améliorations environnementales ne peuvent pas être, seules, un objectif commercial. Les améliorations de cette nature ont un sens si elles apportent une valeur économique supplémentaire.

Les préoccupations croissantes concernant l'impact environnemental des activités industrielles et la recherche d'avantages économiques ont donné naissance à la notion de chaîne d'approvisionnement en boucle fermée (en anglais closed loop supply chain ou CLSC). Comme l'ont décrit Akçali et Çetinkaya (2011), une chaîne logistique en boucle fermée comprend à la fois les activités traditionnelles et des processus de flux de retour supplémentaires. Une chaîne logistique directe comprend toutes les activités, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la distribution du produit aux clients finaux. Les processus de retour incluent (1) l'acquisition de produits auprès des utilisateurs finaux; (2) la logistique inverse pour rapporter ces produits; (3) les tests, les tris pour déterminer les options de réutilisation les plus avantageuses sur le plan économique; (4) le reconditionnement; et (5) la re-commercialisation pour créer et exploiter de nouveaux marchés (Guide et Van Wassenhove, 2003).

Il existe différentes opportunités de recherche pour la CLSC, dont les activités d'emballage. Selon la « Sustainable Packaging Coalition » (2011), l'un des critères nécessaires à la réalisation d'emballages durables est la réutilisation et la récupération des emballages à la fin de leur durée de vie. L'un des moyens développés pour atteindre cet objectif fait appel à des ressources de transport partagées (en anglais returnable transport items ou RTI). Ces ressources correspondent à tous les moyens utilisés pour le transport, le stockage, la manutention et la protection des produits dans une chaîne d'approvisionnement et qui sont réutilisés ultérieurement (IC-RTI, 2003). Les exemples comprennent les palettes ainsi que toutes les formes de caisses réutilisables, des plateaux, des boîtes, des palettes roulantes, des barriques ou des chariots. Les RTI sont souvent utilisés pour des emballages secondaires et tertiaires, toutefois certains d'entre eux sont également utilisés comme emballages primaires. C'est le cas pour les bouteilles en verre tant qu'elles ne sont pas collectées à des fins de recyclage (pour transformer les bouteilles en verre en calcin).

La réduction de l'impact sur l'environnement, les réglementations connexes et le potentiel des avantages opérationnels sont donc les principales raisons pour lesquelles les entreprises ont partagés des RTI parmi les différentes organisations d'une chaîne logistique. Cependant, la gestion des RTI est une composante essentielle de la performance de

l'ensemble de la chaîne logistique. En effet, une rupture de stock de RTI aurait une incidence sur l'ensemble des produits manufacturés. Par exemple, une telle rupture entraînerait une augmentation des délais de livraison pour les clients, des arriérés et des coûts de stockage induits. De plus, de nombreuses difficultés se produisent lors de la tentative de gestion des RTI. La première complication vient du fait que, dans la plupart des cas, une importante quantité de RTI sont engagés et peuvent être dispersés dans l'espace. Deuxièmement, ces importants stocks de RTI peuvent être gérés par plusieurs acteurs, chacun d'entre eux étant responsable d'une partie différente du processus. Enfin, le suivi efficace des mouvements entre les organisations d'une chaîne logistique et le contrôle des stocks des RTI peuvent se révéler particulièrement compliqué.

Dans leur article, Iassinovskaia et al (2017) considèrent le cas d'une chaîne logistique composée d'un producteur et de plusieurs clients. Le producteur fabrique et distribue ses produits aux clients en utilisant des RTI. Étant donné que certains clients ne disposent que d'un court laps de temps pour recevoir les produits, ils peuvent exiger une fenêtre de temps pour le service. Le producteur prend en charge la collecte des RTI vides pour réutilisation. Chaque partenaire (c'est-à-dire le producteur ou les clients) dispose de deux zones de stockage, l'une pour les RTI vides, l'autre pour RTI chargé. Chacun de ces stocks se caractérise par des niveaux initiaux et une capacité de maximale. Ce problème de gestion des stocks pilotée par le fournisseur permet au fournisseur de développer une stratégie de distribution qui minimise les coûts de stockage et permet d'économiser sur les coûts de distribution en permettant de mieux coordonner les ramassages et les livraisons chez les clients.

## 5. PAR AIR

Bien que le problème de chargement d'un avion-cargo n'ait pas encore été entièrement considéré dans la littérature, ce problème a été décomposé en deux sous problèmes (sections 5.1. et 5.2.) dont la charnière est l'Unit Loading Devices (ULD). Un ULD est un assemblage de composants constituant un conteneur ou une palette avec un filet (Fig. 7).

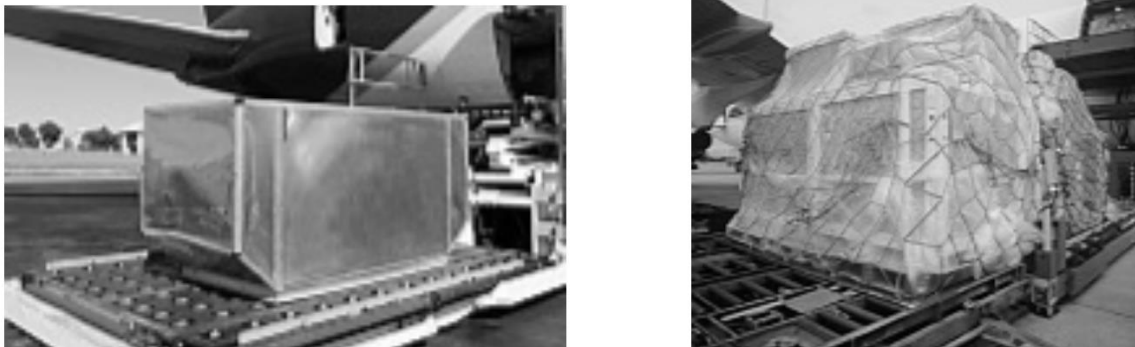


Fig. 7. Différents types d'ULD.

### 5.1. Chargement des avions

Le problème du chargement de marchandises dans un avion-cargo est soumis à des contraintes strictes de sécurité. C'est un problème d'optimisation 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.

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 de l'association du transport aérien international (en anglais International Air Transport Association, ou IATA), 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. Le problème considéré est donc de trouver le chargement optimal d'ULD de types, formes et contours différents. L'ensemble des ULD à charger ainsi que l'ensemble des positions disponibles sont connues avant le début de la planification. Le CG de la solution doit être aussi proche que possible de la position idéale du CG recommandée pour des raisons de sécurité et de consommation énergétique. De plus, les ULD doivent être chargés de façon compacte autour de cette position. Ceci est particulièrement important lorsque l'avion n'est pas entièrement chargé. La solution doit aussi satisfaire plusieurs contraintes : chaque position ne peut accepter qu'un certain type d'ULD en fonction de leur contour, type et poids ; l'avion doit être équilibré longitudinalement et transversalement ; le point total sur chaque unité de surface de chaque pont doit être moindre qu'un certain plafond ; le poids cumulé par unité de surface du nez de l'avion à son milieu doit aussi être moindre qu'un autre plafond et deux plafonds limite également la partie arrière de l'avion.

Le chargement des avions cargo est géré par des *loadmasters* qui utilisent des outils graphiques interactifs. Cela signifie que le *loadmaster* peut générer plusieurs solutions dont la qualité est évaluée par un ensemble d'indicateurs. Cela fonctionne bien dans la pratique mais consomme du temps. Par exemple, un *loadmaster* expérimenté peut charger 40 ULD sur un Boeing 747 en environ 15 min. La solution répond généralement aux contraintes de base mais peut ne pas être optimale. La planification est souvent exécutée au dernier moment avant le départ de l'avion, ce qui signifie qu'un réglage fin n'est pas toujours une option pratique ; alors que chaque jour ce problème est résolu des dizaines de milliers de fois dans le monde. L'approche développée par Limbourg et al. (2011) permet de trouver une solution optimale à ce problème en quelques secondes.

## 5.2. Chargement des ULD

Le problème développé au point 5.1 considère des ULD chargées. Toutefois, le chargement de ces ULD est également crucial. Premièrement, un chargement correct et stable des ULD empêche d'endommager leur contenu. En particulier, la fragilité éventuelle de certaines boîtes doit être prise en compte. Deuxièmement, parmi l'ensemble des opérations au sol, les ULD sont la cause principale des dommages causés à l'avion. Pour cette raison, IATA développe des normes et des procédures concernant les spécifications, la gestion, les manipulations et la maintenance des ULD (IATA, 2016). Par exemple, un ULD non équilibré peut entraîner des erreurs dans le calcul du centre de gravité de l'avion (section 5.1.) et l'instabilité de la cargaison. Troisièmement, les ULD sont coûteux et nécessitent une gestion correcte. Chaque année, le coût total de la réparation et de la perte des ULD des avions est estimé à environ 300 millions de dollars, sans tenir compte des retards et des annulations des vols en raison de leur indisponibilité et des dommages causés par un mauvais fonctionnement de l'ULD (IATA, 2016). Pour ces raisons, le chargement des colis dans les ULD représente un élément clé pour la sécurité de la cargaison et de l'avion, ainsi que pour l'économie des compagnies aériennes. Cependant, en pratique, cette phase de chargement est réalisée manuellement sans garantie stricte que les contraintes soient respectées et sans que le volume dans les ULD soit correctement exploité. Paquay et al. (2016) ont proposé une formulation pour résoudre le problème du chargement d'un ensemble de boîtes dans des ULD de diverses formes en minimisant l'espace de chargement. Il y a peu de boîtes identiques et elles doivent toutes être chargées. En fonction de l'application choisie, d'autres objectifs peuvent être définis, notamment minimiser les coûts des ULD sélectionnés. Une description formelle de la solution proposée, appelée schéma de chargement, est fournie.

L'une des principales contributions de leur recherche est l'ensemble des contraintes prises en compte. Toutes les boîtes doivent être chargées sans chevauchement. La capacité de poids de chaque ULD doit être respectée. Les boîtes peuvent tourner orthogonalement



(Fig. 8), c'est-à-dire que les bords des boîtes doivent être soit parallèles soit perpendiculaires à ceux des ULD.

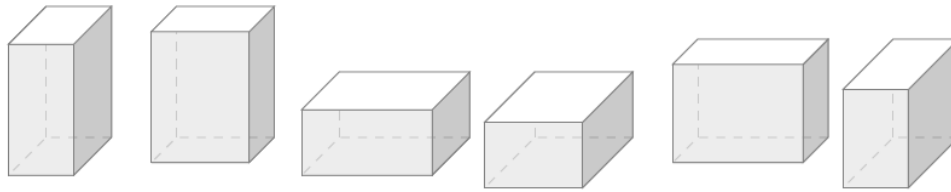


Fig. 8. Six orientations possibles pour une boîte. Source : Paquay et al. (2016)

Parfois, seul un nombre limité d'orientations est autorisé en raison du contenu des boîtes. Certaines boîtes peuvent être fragiles et ne peuvent donc pas supporter d'autres boîtes. Chaque boîte doit être correctement supportée pour être stable. Dans le transport aérien, le CG doit être proche du centre géométrique de sa base. Chaque boîte doit être affectée à exactement un ULD. Chaque boîte respecte les limites de l'ULD, y compris les formes spéciales éventuelles (Fig. 9). Les boîtes sont verticalement stables.

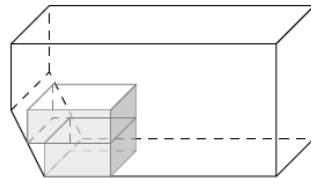


Fig. 9. ULD de forme spéciale contenant deux boîtes. Source : Paquay et al. (2016)

Cette formulation a été utilisée pour le développement de mathéuristiques (Paquay et al. 2017a). De plus, une heuristique constructive plus rapide a également été développée par les auteurs (Paquay et al 2017b).

Des perspectives de recherche sont d'envisager d'autres contraintes telles que les contraintes de ségrégation des produits dangereux ou le fait que certains colis doivent être chargés ensemble car leur destination finale est identique. Une autre extension concerne la séquence de boîtes à charger. Dans le travail de Paquay et al. (2016), la liste des boîtes est connue or, dans certaines situations, les boîtes doivent être chargées sans connaître les boîtes qui devront être chargées par la suite (Seiden, 2001).

Evidemment, ce travail peut être étendu à de nombreuses autres applications de chargement. Par exemple, les ULD peuvent être remplacés par des palettes ou par le volume de chargement des véhicules ; dans ce cas, la contrainte sur la distribution du poids devrait être modifiée pour tenir compte des contraintes de poids aux essieux (Pollaris et al. 2015).

## CONCLUSIONS

L'application des techniques de recherche opérationnelle au transport de marchandises et à la logistique soulève plusieurs défis dus à la complexité structurelle, aux objectifs conflictuels des différentes parties prenantes, aux variations prévisibles ainsi qu'aux incertitudes inhérentes aux problèmes. Une grande variété de méthodes scientifiques et de techniques de RO ont été appliquées. Leurs résultats permettent aux gestionnaires de prendre de meilleures décisions. Les caractéristiques inhérentes à certains types de problèmes, leur taille ou leur complexité ont donné naissance au développement de nouvelles heuristiques. Toutefois, d'autres développements sont toujours nécessaires, beaucoup de recherches et d'études doivent encore être effectuées pour obtenir de bonnes solutions pour les nouveaux défis émergeant des problèmes de transport et de logistique.

## **Bibliographie :**

- Akçali, E. & Çetinkaya S., 2011, Quantitative models for inventory and production planning in closed-loop supply chains. *International Journal of Production Research* 49 (8), 2373-2407.
- Bay, M., & Limbourg, S., 2015, Constrained Vehicle Routing and speed optimization Problem (CVRsoP) for electric vehicles. Paper presented at 27th European Conference on Operational research EURO 2105, Glasgow, United Kingdom.
- Bektas T., & Laporte G., 2011, The Pollution-Routing Problem, *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 45, no 8, p. 1232 - 1250, Supply chain disruption and risk management.
- Belaid, E., Limbourg, S., Mostert, M., Rigo, P., & Cools, M., 2016, Bi-objective Road and Pipe Network Design for Crude Oil Transport in the Sfax Region in Tunisia. *Procedia Engineering*, 142, 108-115.
- Bracken, J. & McGill, J., 1973. Mathematical programs with optimization problems in the constraints. *Operations Research* 21(1), pp. 37–44.
- Campbell J.F., 1994, Integer Programming Formulations of Discrete Hub Location Problems, *European Journal of Operational Research* 72(2), 387-405.
- Caris, A., Limbourg, S., Macharis, C., van Lie, T., & Cools, M., 2014, Integration of inland waterway transport in the intermodal supply chain: a taxonomy of research challenges. *Journal of Transport Geography*, 41, 126–136.
- Christiansen, M., Fagerholt, K., Hasle, G., Minsaas, A., & Nygreen, B., 2009, An ocean of opportunities, *OR/MS TODAY*
- Colson, B., Marcotte, P., & Savard. G., 2007. An overview of bilevel optimization. *Annal Operations Research* 153, pp. 235–256.
- Daskin, M. S., 1995, *Network and Discrete Location: Models, Algorithms and Applications*, John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Dempe, S., 2002, *Foundations of bilevel programming, nonconvex optimization and its applications*, vol 61, Kluwer, Dordrecht.
- Fagerholt, K., 2004, A computer-based decision support system for vessel fleet scheduling – experience and future research, *Decision Support Systems*, Vol. 37, No. 1, pp. 35-47.
- Fagerholt, K. & Lindstad, H. 2007, TurboRouter: An interactive optimisation-based decision support system for ship routing and scheduling, *Maritime Economics and Logistics*, Vol. 9, pp. 214-233.
- Giemsch P. & Jellinghaus A., 2004, Optimization Models for the Containership Stowage Problem. In: Ahr D., Fahriou R., Oswald M., Reinelt G. (eds) *Operations Research Proceedings 2003. Operations Research Proceedings (GOR (Gesellschaft für Operations Research e.V.))*, vol 2003. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Guide, V. D. R. & L. N. Van Wassenhove, 2003, *Business aspects of closed-loop supply chains*, Volume 2. Carnegie Mellon University Press Pittsburgh, PA.
- Guide, V. D. R. & L. N. Van Wassenhove, 2009, The evolution of closed-loop supply chain research. *Operations research* 57 (1), 10-18.
- Hakimi S., 1964, Optimum Location of Switching Centers and the Absolute Medians of a Graph, *Operations Research* 12, 450-459.
- Hakimi S, 1965, Optimal distribution of switching centers in a communication network and some related theoretic graph theoretic problems, *Operations Research* 13, 462–475.
- Iassinovskaia, G., Limbourg, S., & Riane, F., 2016, The inventory-routing problem of returnable transport items with time windows and simultaneous pickup and delivery in closed-loop supply chains. *International Journal of Production Economics*, (183), 570-582.
- Kara-Yetis B. & Tansel. B., 2000, On the single assignment p-hub center problem, *European Journal of Operational Research*, 125.
- Lihoussou, M., & Limbourg, S., 2012, Network design model for intermodal transport: the case of the hinterland of the Port of Cotonou. *ILS 2012 Proceeding*.
- Limbourg, S., Giang, H. T. Q., & Cools, M., 2016, Logistics Service Quality: The Case of Da Nang City. *Procedia Engineering*, 142, 124-130.
- Limbourg, S., Schyns, M., & Laporte, G., 2012, Automatic Aircraft Load Planning. *Journal of the Operational Research Society*, 63, 1271–1283.
- Limbourg, S., & Jourquin, B., 2010, Market area of intermodal rail-road container terminals embedded in a hub-and-spoke network, *Papers in Regional Science*, 89(1), 135–154.

- Limbourg, S., & Jourquin, B., 2009, Optimal rail-road container terminal locations on the European network. *Transportation Research. Part E: Logistics and Transportation Review*, 45(4), 551-563.
- Limbourg, S., & Jourquin, B., 2007, Rail-Road terminal locations: aggregation errors and best potential locations on large networks. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 7(4), 317-334.
- O'Kelly M. E. & Miller H. J., 1991, Solution strategies for the single facility minimax hub location problem, *Papers in Regional Science: The Journal of the RSAI*, 70:367-380.
- Mongeau M & Bès C., 2003, Optimization of aircraft container loading. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 39: 140–150.
- Mostert, M., Caris, A., & Limbourg, S., 2017a, Intermodal network design: a three-mode bi-objective model applied to the case of Belgium. *Flexible Services and Manufacturing Journal*.
- Mostert, M., Caris, A., & Limbourg, S., 2017b, Road and intermodal transport performance: the impact of operational costs and air pollution external costs. *Research in Transportation Business & Management*.
- Mostert, M., & Limbourg, S., 2016, External Costs as Competitiveness Factors for Freight Transport - A State of the Art. *Transport Reviews*, 36(6), 692-712.
- Owen S.H. & Daskin M.S. 1998, Strategic facility location: A review, *European Journal of Operational Research* 111 423-447.
- Paquay, C., Limbourg S., Schyns M. & Oliveira J.F., 2017a, MIP-based constructive heuristics for the three-dimensional Bin Packing Problem with transportation constraints, to appear in the *International Journal of Production Research*.
- Paquay, C., Limbourg S. & Schyns M., 2017b, A tailored two-phase constructive heuristic for the three-dimensional Multiple Bin Size Bin Packing Problem with transportation constraints, submitted to *European Journal of Operational Research*.
- Paquay, C., Schyns, M., & Limbourg, S., 2016, A Mixed Integer Programming formulation for the three dimensional bin packing problem deriving from an air cargo application. *International Transactions in Operational Research*, 23(1-2), 187-213.
- Pollaris, H., Braekers, K., Caris, A., Janssens, G. K., & Limbourg, S., 2017, Iterated local search for the capacitated vehicle routing problem with sequence-based pallet loading and axle weight constraints. *Networks*.
- Pollaris, H., Braekers, K., Caris, A., Janssens, G. K., & Limbourg, S., 2016, Capacitated vehicle routing problem with sequence- based pallet loading and axle weight constraints. *EURO Journal on Transportation and Logistics*.
- Pollaris, H., Braekers, K., Caris, A., Janssens, G. K., & Limbourg, S., 2015, Vehicle routing problems with loading constraints: State-of-the-art and future directions. *OR Spectrum*, 37(Issue 2), 297-330.
- ReVelle C.S. et Eiselt H.A., 2005, Location analysis: A synthesis and survey, *European Journal of Operational Research* 165 1–19.
- Santos, B. F., Limbourg, S., & Carreira, J. S., 2015, The impact of transport policies on railroad intermodal freight competitiveness – The case of Belgium. *Transportation Research. Part D : Transport and Environment*, 34, 230-244.
- Sarkis, J., 2006, *Greening the supply chain*. Springer.
- Seiden, S. S., 2001, *On the Online Bin Packing Problem*, pp. 237-248. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Souffriau W, Demeester P, Vanden Berghe G & De Causmaecker P., 2008, The aircraft weight and balance problem. *Proceedings of ORBEL 22. SOGESCI: Brussels*, pp 44–45.
- Stackelberg, H. 1952. *The theory of market economy*.
- Tawfik, C. M. F., & Limbourg, S., 2015, Bilevel optimization in the context of intermodal pricing: state of art. *Proceedings of the 18th Euro Working Group on Transportation, EWGT 2015*. Elsevier.
- Toth P. et Vigo D., 2002, An overview of vehicle routing problems. In P. Toth and D. Vigo, editors, *The Vehicle Routing Problem, Monographs on discrete mathematics and applications*, pages 1-51. SIAM.
- Troch, F., Vanellander, T., Sys, C., Belboom, S., Léonard, A., Limbourg, S., Merchan Arribas, A., Mostert, M., Stevens, V., Tawfik, C. M. F., & Verhoest, K., 2015, Brain Trains: Intermodal Rail Freight Transport and Hinterland Connections - A Swot Analysis to Assess the Belgian Rail Practice. *Proceedings of the IAME Annual Conference*.

Vincente, L.N., Calamai, P.H., 1994, Bilevel and multilevel programming: A bibliography review. *Journal of global optimization* 5, pp. 291–306.

Weber A., 1909, *Theory of the Location of Industries*, University of Chicago.

**Sitographie :**

IC-RTI, 2003, Reusable transport items (RTI) - organizational recommendations. [http://ecr-all.org/wp-content/uploads/pub\\_2003\\_RTI\\_organisational\\_recommendations.pdf](http://ecr-all.org/wp-content/uploads/pub_2003_RTI_organisational_recommendations.pdf).

International Air Transport Association, 2016,. IATA Cargo Strategy. [Online; accessed 18-August-2016]. [www.iata.org/whatwedo/cargo/ Documents/cargo-strategy.pdf](http://www.iata.org/whatwedo/cargo/Documents/cargo-strategy.pdf).

Sustainable Packaging Coalition, 2011, Definition of sustainable packaging. <http://sustainablepackaging.org/uploads/Documents/Definition%20of%20Sustainable%20Packaging.pdf>.