

Modèles de localisations optimales de hubs de conteneurs sur un réseau multimodal européen

Sabine Limbourg

QuantOM (Center for Quantitative Methods and Operations Management)

HEC Management School – Université de Liège

sabine.limbourg@ulg.ac.be

Résumé: *Le monde des transports et de la mobilité requiert une restructuration vu la croissance des échanges. Transférer une partie du trafic de marchandises de la route vers des modes de transports plus respectueux de l'environnement est un élément clé d'une politique de transport durable de marchandises sur des longues distances. Cette étude s'inscrit dans ce cadre en essayant d'évaluer l'opportunité de développer le transport combiné rail-route. Plus précisément, elle propose de localiser de manière judicieuse des terminaux dédiés au transbordement de fret continental, afin de permettre l'expédition de marchandises sur longues distances avec des volumes suffisamment grands pour que le transport combiné soit compétitif. Deux problèmes de localisation sont mis en évidence : le problème du p-hub médian qui répond au critère d'efficacité et le problème p-hub centre qui répond au critère d'équité. La méthodologie présentée, offre un outil de décision s'appuyant sur une modélisation du transport combiné et prend en compte la variation des coûts de transbordement en fonction du nombre de conteneurs transbordés. Elle permet également d'analyser les variations des aires de marché des terminaux en fonction de l'offre et de la demande de transport, ainsi que de mesurer les impacts sur la répartition modales.*

Mots-clés : Terminal, Rail-route, Localisation, Hub-and-spoke, Intermodal, Transport combiné

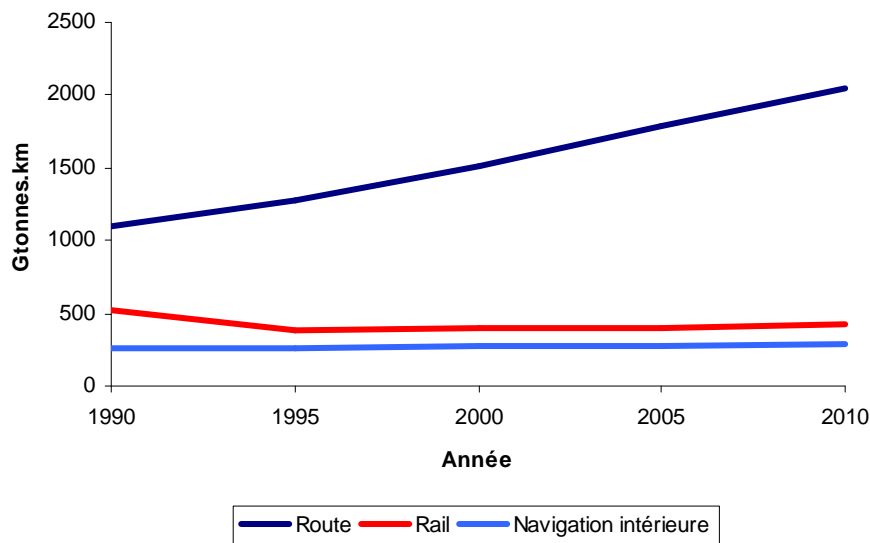
1. Introduction

Le monde des transports et de la mobilité requiert une restructuration vu la croissance des échanges. A titre d'illustration, dans l'Union européenne à 25 pays, l'évolution du trafic de marchandises sur vingt années, de 1990 à 2010, est représentée à la Figure 1. Le transport routier, mode dominant, a presque entièrement absorbé l'accroissement des flux de transport et assure plus de 74 % du transport de marchandises en 2010.

Le succès grandissant du transport routier a pour conséquence une aggravation de la congestion et des nuisances environnementales. C'est ce qui a poussé la politique européenne des transports à fixer l'objectif de rééquilibrer les parts de marché des différents modes de transport, notamment en développant le transport intermodal. Celui-ci consiste à acheminer la marchandise, dans la même unité de transport intermodal (UTI), en utilisant au moins deux modes différents. Une UTI est un matériel contenant des marchandises et facilitant leur passage d'un mode de transport à un autre. Les principales UTI sont les conteneurs, les caisses mobiles et les semi-remorques.

Afin de promouvoir le transport intermodal de marchandises, la Commission européenne a lancé les programmes Marco Polo (de 2003 à 2006) et Marco Polo II (de 2007 à 2013). Ces programmes visent à réduire l'engorgement des infrastructures routières et à améliorer les performances environnementales de l'ensemble du système de transport en transférant une partie du fret de la route vers le cabotage maritime, le rail et la navigation intérieure.

L'objectif annuel du premier programme est de libérer les routes européennes de 12 milliards de tonnes-km, tandis que celui du deuxième atteint de 20 milliards de tonnes-km.



Source : European Environment Agency

Figure 1. Évolution du transport de marchandises par mode de transport

Notre étude évalue l'opportunité de développer des alternatives intermodales. Elle se concentre essentiellement sur le transport combiné rail-route qui allie l'aptitude de la route à desservir l'ensemble du territoire et la capacité des chemins de fer à effectuer des transports de masse en réalisant des économies d'échelle.

Le transport combiné est intrinsèquement complexe. Il est un mode d'acheminement composé d'un enchaînement d'opérations : un pré-acheminement par la route, la plus grande partie du parcours s'effectue ensuite par les chemins de fer, un post-acheminement de nouveau par la route et deux transferts des UTI à chaque changement de mode de transport. Il utilise donc les réseaux des différents modes de transport et nécessite des infrastructures particulières aux nœuds intermodaux, dans lesquelles sont réalisées les opérations de transbordement des UTI d'un mode de transport à l'autre. Les infrastructures spécifiques au transport rail-route sont essentiellement présentes au niveau des terminaux de transbordement.

Cependant, le transport combiné ne peut pas être réduit à la simple juxtaposition d'opérations. Il est indispensable que chaque maillon de la chaîne offre des résultats optimaux, mais, en plus, que l'articulation entre les différentes étapes ne présente aucune défaillance. La multiplicité des intervenants (les gestionnaires de l'infrastructure ferroviaire, les entreprises ferroviaires, les opérateurs de transport combiné, les gestionnaires des terminaux et les clients) augmente l'incertitude du résultat global de cette prestation. De plus, la qualité du transport combiné dépendra fortement de celle des terminaux et de la capacité des multiples intervenants issus du monde routier et ferroviaire à se coordonner.

Les surcoûts dus à la manutention dans les deux terminaux de transbordement situés en bout de chaîne du transport combiné, doivent au minimum être compensés par les économies d'échelle dues à la concentration du trafic. Plus la distance de transport est grande, plus le transport combiné peut être économique. La substitution du service routier par le service ferroviaire intermodal dépend donc principalement de la longueur du parcours ; bien que le

transport combiné puisse aussi être pertinent, voire obligatoire, lorsqu'il faut franchir un obstacle naturel majeur (Manche, Alpes...).

Un transbordement efficace est une nécessité. La réalisation de nouveaux 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. De plus, la mise en réseau des terminaux requiert une coopération internationale. Un terminal situé à un point donné ne peut être profitable 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. La compétitivité du transport combiné rail-route dépend non seulement de ses coûts, mais également de la localisation de ces terminaux où sont effectués les transferts entre les deux modes.

Après une section sur les différentes typologies des terminaux, des réseaux hub-and-spoke et des problèmes de localisation associés sont décrits. Les sections suivantes apportent une attention particulière à la construction d'un scénario de référence et à la modélisation du transport combiné. Puisque les coûts de transbordement jouent un rôle important lors d'un transport intermodal ; la section 7 estime l'évolution du coût moyen de transbordement en fonction du flux, les résultats sont ensuite présentés à la section 8 avant de conclure cet article.

2. Typologie des terminaux

Le terminal intermodal est garant du traitement efficient du mouvement des marchandises entre les modes de transport. Cela peut comprendre la gestion des arrivées et des départs des véhicules, le pilotage des équipements de manutention, l'inventaire et l'entreposage temporaire de conteneurs. Le terminal peut également proposer des services douaniers dans les cas où des marchandises internationales devraient être traitées ou des services à valeur ajoutée comme la réparation, la location ou la vente de conteneurs, la recharge des groupes frigorifiques, un dispositif de transbordement et un entreposage spéciaux pour les marchandises dangereuses, etc.

Plus de mille terminaux intermodaux se partagent les marchés européens avec différents ensembles de services. Plusieurs études se sont attelées à définir une typologie de ces terminaux sur base de leur principales caractéristiques ou sur base du type de consolidation. Certaines de ces études sont décrites dans cette section afin de définir les spécificités des terminaux que nous cherchons à localiser dans cet article.

2.1. Typologie des terminaux sur base de leurs principales caractéristiques

Dans la thèse de Wiegman (2003), les terminaux sont groupés suivant six caractéristiques : la taille ; le volume maximum pouvant être manipulé par an ; les modes de transport disponibles ; les heures de fonctionnement ; le nombre d'unités chargées et les moyens de transport ainsi que le nombre et le type de matériels de manutention disponibles sur le terminal. Ces caractéristiques mènent à cinq catégories :

1. *XXL ou mainport terminal* sont dotés de connexions vers le monde entier par voie maritime, par rail, par route et par voie fluviale à grands gabarits. Ces terminaux peuvent être caractérisés par des volumes élevés ou l'utilisation de capacité élevée.
2. *XL ou terminal européen international* possèdent une liaison ferrée, routière et fluviale (grand tirant d'eau) à un niveau plus continental. Ce terminal est particulièrement utilisé comme centre de distribution international.

3. *L ou terminal national*. Le rail, le camion et la voie fluviale connectent ce terminal à l'échelle nationale.

4. *M ou terminal régional* est caractérisé par des volumes relativement bas, il est plus petit que les terminaux nationaux et relativement lents pour les différentes opérations, Ce terminal est utilisé comme centre de distribution régional. Il y a habituellement des raccordements à la route et soit au rail soit à la voie d'eau.

5. *S ou terminal local*. Il est servi par camions qui rassemblent et distribuent le fret à et de leur destination finale. Un raccordement simple avec le rail ou la voie d'eau est fourni.

2.2. Typologie des terminaux sur base du type de consolidation

La consolidation consiste à grouper les marchandises à transporter entre différentes origines et destinations dans des unités de transport communes pendant la majeure partie du trajet. Dans le cas de consolidation complexe, des nœuds intermédiaires permettent le triage ou le groupement des marchandises. Dans le cadre du ferroutage, les trains de groupage sont des trains constitués d'envois pour deux ou plusieurs destinations. Les groupes de wagons sont échangés entre les trains aux gares de triage pour former de nouveaux trains à destination unique.

En se basant sur les caractéristiques des flux de fret (Bowersox, 1986) combinée avec la manière de consolider les flux (TERMINET, 1997a et 1997c), quatre types de terminaux peuvent être mis en évidence :

1. Terminal de consolidation - consolidation point à point

Ces terminaux, ou mainport, disposent de connexions mondiales et de grandes zones de stockage ; les chargements et déchargements sont effectués rapidement,... Les grands flux de fret arrivent au terminal et sont répartis en plus petits flux. Ces plus petits flux sont cependant suffisamment importants pour remplir une péniche, un train ou un bateau entier.

2. Terminal de transfert - consolidation de type hub-and-spoke

Caractérisés par de grandes surfaces qui permettent le transbordement direct entre les trains ou les péniches, ces terminaux sont presque exclusivement dédiés au transbordement de fret continental. Les arrivées et les départs de conteneurs concernent des flux très importants.

3. Terminal de distribution - consolidation en ligne

Egalement appelé « terminal intelligent », l'opérateur de ces terminaux offre des services supplémentaires.

4. Terminal d'hinterland - consolidation de type collecte-distribution

De petites expéditions continentales de marchandises sont acheminées et consolidées au terminal d'hinterland. Ensuite, elles sont transportées par de plus grands moyens tels que des trains ou des péniches. L'inverse se produit également : les grands moyens de transport apportent des flux de fret au terminal d'hinterland où ils sont repartis en plus petites expéditions et localement distribués.

2.3. Typologie des terminaux de conteneurs

L'étude SIMET (1995) définit un système hiérarchique à trois niveaux :

- *niveau 1* : trains directs entre les principaux ports et terminaux ;
- *niveau 2* : *hub-and-spoke* et train avec une consolidation en ligne, principalement pour le national mais également utile pour le transport international ou pour la distribution des conteneurs maritimes dans une grande région ou pays.
- *niveau 3* : pour toutes les demandes qui ne peuvent pas être couvertes par chemins de fer intermodaux spéciaux.

2.4. Labellisation des terminaux de transport combiné

Le Rapport Daubresse (1997) souligne deux logiques. La première est une *logique de polarisation*. Elle tend à concentrer les flux autour de grands terminaux européens, capables de capter le fret des grandes zones de production et de consommation du pays, afin de l'expédier à plus de 400 km vers d'autres grandes zones logistiques d'Europe. La seconde est une *logique d'essaimage*. Elle permet de redistribuer le fret collecté autour des grandes zones de production afin d'irriguer l'ensemble du territoire à partir de terminaux de dimension plus modeste au centre d'une zone de chalandise de 40 à 50 km de rayon.

Sur cette base, trois niveaux de hiérarchisation ont été définis :

- Les *terminaux d'intérêt européen* dont les infrastructures doivent être situées sur les corridors définis par la Commission européenne en 1993 et dans une métropole d'ambition internationale. Ces terminaux sont tri-modaux ou, à défaut, présentent un fort potentiel de transport combiné entre deux modes majeurs. Ils s'intègrent dans une logique d'aménagement Europe-Etat-Région et offrent des services logistiques à très haute valeur ajoutée.
- Les *terminaux d'intérêt national* dont les infrastructures doivent être dans une zone de production et de consommation et être reliées avec les terminaux d'intérêt européen par des réseaux d'infrastructures et de télécommunications. Ces terminaux sont bimodaux ; ils s'insèrent dans un schéma logistique régional et offrent des services logistiques à valeur ajoutée.
- Les *chantiers locaux de transport combiné* sont positionnés par des logiques historiques ou de marché local.

2.5. Conclusion

Les principaux terminaux en taille, volume ou nombre de transbordements possèdent une connexion maritime. Ce sont des ports tels que Rotterdam, Anvers, Le Havre, Algeciras, ... Ils sont parfois dénommés terminaux XXL ou XL ou terminaux de consolidation. Les flux de marchandises sont tellement importants que des trains complets (ou des bateaux, péniches ...) peuvent être formés.

Les terminaux les plus petits en taille et volume peuvent être dénommés terminaux M ou S, terminaux de distribution, ou d'hinterland ou encore, terminaux national ou régional. Les flux sont rassemblés par une consolidation en ligne ou une consolidation de type collecte-distribution.

Entre ces deux extrêmes, se trouvent les terminaux L, ou les terminaux de transfert, principalement dédiés au transbordement de fret continental. Les flux importants sont groupés via une consolidation de type hub-and-spoke afin d'expédier les marchandises à des distances et avec des volumes suffisamment grands pour que les économies d'échelle réalisées dépassent les coûts de transbordement.

C'est cette dernière catégorie de terminaux, ayant une consolidation de type hub-and-spoke, que notre étude cherche à localiser. Il s'agit donc de terminaux rail-route pour les UTI que sont les conteneurs, les caisses mobiles et les semi-remorques. Ces terminaux manipulent plus de 100.000 UTI par an. Les flux y sont consolidés afin de les expédier à des distances suffisamment grandes pour que le transport combiné soit compétitif par rapport au transport routier.

3. Réseau hub-and-spoke

Puisque les réseaux intermodaux sont des combinaisons de leurs réseaux modaux et qu'un des atouts principaux du transport combiné est la possibilité d'effectuer des économies d'échelle, le réseau hub-and-spoke a émergé comme la structure du réseau la plus appropriée pour la logistique intermodale (Slack, 1990 ; Bookbinder et Fox, 1998).

Dans une consolidation hub-and-spoke, le hub, ou point nodal, est défini comme un nœud particulier où le trafic, parfois faible, est consolidé et où des flux plus volumineux sont acheminés vers d'autres hubs. La Conférence Européenne des Ministres des Transports (CEMT) définit d'ailleurs le « hub » comme un « *point central pour la collecte, le tri, le transbordement et la redistribution des marchandises dans une zone géographique donnée* ».

Le réseau hub-and-spoke considéré dans cette étude, est un réseau rail-route. La collecte vers les hubs et la distribution à partir de ces hubs est réalisée par la route alors que l'acheminement des marchandises entre les hubs s'effectue par rail. La Figure 1. illustre un tel réseau comprenant 15 nœuds dont 3 (e, f, k) sont des hubs, les liens représentés en traits fins correspondent aux liaisons routières tandis que les liens représentés en traits gras correspondent aux liaisons ferroviaires. Une telle organisation permet d'offrir un service de fréquence et qualité supérieures entre hubs et d'assurer une utilisation plus efficace des ressources.

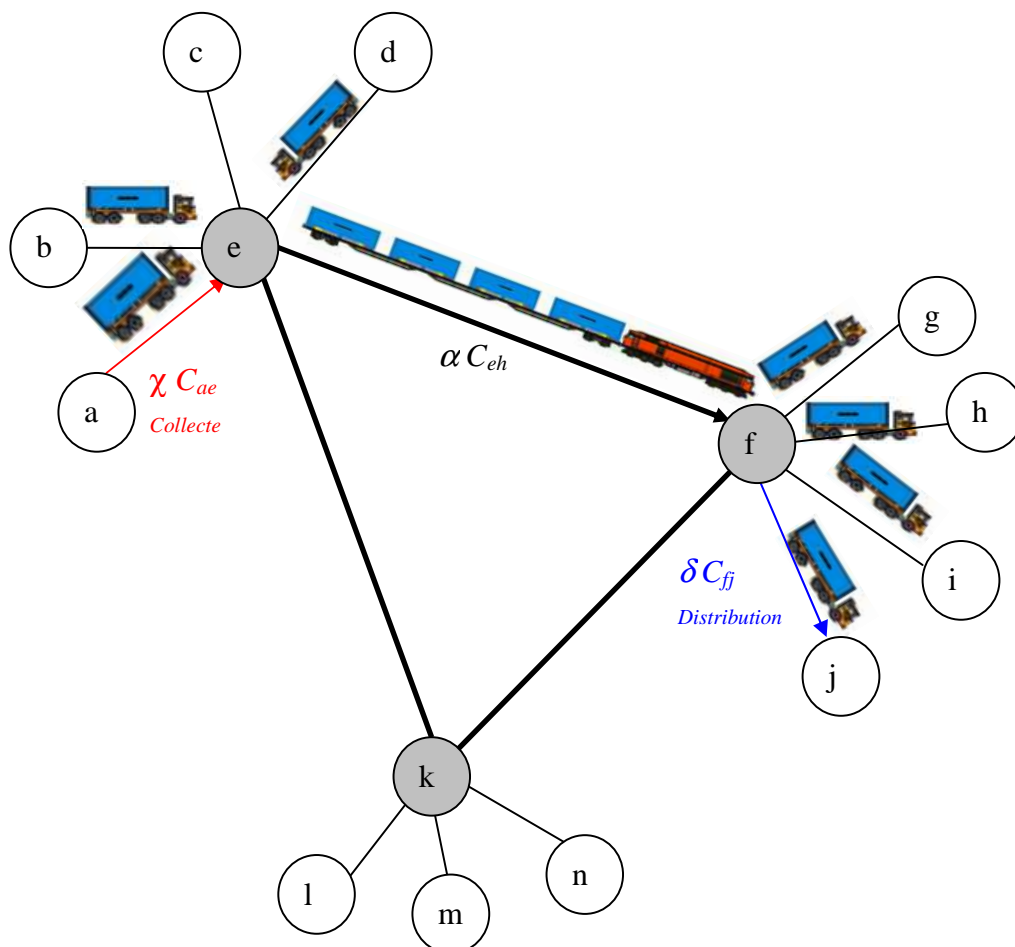


Figure 1. Un réseau « hub-and-spoke » de 3 hubs
Les hubs sont localisés aux nœuds e, f et k.

En effet, la structure hub-and-spoke engendre moins de liaisons qu'un réseau où chaque nœud est directement connecté à tous les autres nœuds et permet d'obtenir des coûts inférieurs de transport grâce aux économies d'échelle ici associées au transport ferroviaire.

La composition d'un train peut varier ; elle est généralement classée en deux catégories. Dans la première, aussi appelée train-bloc, le train est composé de wagons, appartenant au même chargeur, qui circulent entre une origine et une destination déterminées. Les principaux avantages sont la rapidité et la fiabilité. Dans la deuxième, le train circule sur une section de service et le groupe de wagons est dissocié du train à des gares de triage intermédiaires où certains wagons peuvent être retirés ou ajoutés. La composition du train n'est donc pas fixe. Ce service correspond à une offre commerciale, qui intéresse les clients ne disposant pas d'un potentiel de transport suffisant. Dans le cas d'un transport combiné, même si le chargeur a trop peu de marchandises pour remplir un train complet, il bénéficie de la rapidité et de la fiabilité du train bloc pour la partie ferroviaire du transport se situant entre les terminaux.

Les économies d'échelle réalisées sur la partie ferroviaire d'un transport combiné doivent compenser les coûts des transbordements et parfois le surplus des coûts des pré- et post-acheminements, souvent plus élevés que pour le transport routier sur longue distance. Les exemples étudiés dans l'étude Recordit (REal COst Reduction of Door-to-Door Intermodal Transport, 2002) indiquent une utilisation pauvre du fonctionnement des camions (qui peuvent effectuer jusqu'à 50% de retour à vide) et des temps d'attente souvent importants aux terminaux. Bontekoning *et al.* (2004) estiment que malgré la distance relativement courte accomplie par les camions par rapport à celle opérée sur le réseau ferroviaire, le coût des acheminements routiers représente une partie importante du coût du transport combiné (entre 25% et 40%).

L'inconvénient d'une structure hub-and-spoke est une augmentation des délais en raison d'itinéraires plus longs et du temps passé dans les terminaux. Cela explique en partie pourquoi il y a très peu de réseaux hub-and-spoke standards, comme ils viennent d'être présentés qualitativement. Le transport direct est généralement exploité dans le cas de demande importante ou de haute priorité.

Afin de classer les réseaux de hubs, O'Kelly et Miller (1994) partent des trois hypothèses d'un réseau hub-and-spoke standard. Ces trois hypothèses sont :

- tous les nœuds doivent être connectés directement à un seul hub ;
- tous les hubs sont entièrement interconnectés ;
- il n'y a pas de service direct de nœuds à nœuds, c'est-à-dire que les nœuds n'étant pas des hubs ne sont pas directement connectés.

O'Kelly et Miller (1994) transforment ces hypothèses en trois variables de décision. La première variable est de décider si un nœud peut être affecté à plusieurs hubs ou juste à un seul hub, nous avons alors une distinction entre une affectation simple ou multiple. La deuxième est liée à l'existence, ou non, de toutes les connexions inter-hubs ; il s'agit donc d'avoir un réseau inter-hubs complet ou partiel. La troisième est d'autoriser, ou non, les connexions inter-nodales. Ces trois variables de décisions conduisent donc à $2^3=8$ classes de réseau de hubs.

4. Problèmes de localisation des hubs

Les problèmes de localisation de hubs surviennent lorsqu'il est souhaitable de consolider et de disséminer les flux à certains endroits. Un état de l'art de ces problèmes est effectué par

Alumur and Kara (2007) et une présentation approfondie de la théorie de la localisation des hubs et de ses applications est réalisée dans l'article de Campbell *et al.* (2001).

Deux problèmes de localisation de hubs sont mis en évidence dans notre étude sur le réseau transeuropéen. Le premier est le problème du p -hub médian (p -HMP) qui consiste à trouver la localisation d'un nombre p de hubs et à affecter les nœuds restants du réseau à ces hubs afin de minimiser le coût total du transport (critère d'efficacité). Le réseau obtenu par cette méthode peut cependant conduire à des résultats insatisfaisants lorsque des distances très grandes séparent certaines origines ou destinations des hubs les plus proches. Par conséquent, l'objectif du deuxième problème, le problème p -hub centre (p -HMC), est de minimiser le coût généralisé maximum entre toutes les paires origine-destination (critère d'équité).

4.1. Problème du p -hub médian

Le p -HMP a été modélisé sous la forme d'un programme quadratique en nombres entiers par O'Kelly (1987). Campbell (1994) a introduit le premier mécanisme de linéarisation. Ce processus produit une formulation linéaire en nombres entiers mixtes. Ce problème est NP-difficile et donc plusieurs heuristiques et métaheuristiques ont été proposées, par exemple : O'Kelly (1987), Aykin (1990), Klincewicz (1991), Campbell (1996), Smith *et al* (1996), Ernst et Krishnamoorthy (1996), Klincewicz (1992), Skorin-Kapov and Skorin-Kapov (1994).

Une des principales difficultés pour résoudre le p -HMP est que le nombre de variables d'affectation peut être très grand. En effet, le p -HMP implique $(N^4 + N)$ variables où N est le nombre de hubs candidats et exige $(I + N^2 + N^4)$ contraintes linéaires. Ernst et Krishnamoorthy (1996) ont trouvé une nouvelle formulation pour résoudre de plus grands problèmes. Ils définissent Y_{km}^i comme le trafic provenant du nœud i qui passe par les hubs k et m . Si le flux total partant du nœud i est noté : $O_i = \sum_{j \in N} h_{ij}$ et le flux total vers le nœud i est noté

$D_i = \sum_{j \in N} h_{ji}$ alors la formulation, adaptée à notre problème, est la suivante :

Entrées:

p = nombre de hubs à localiser
 h_{ij} = flux entre l'origine i et la destination j
 C_{ij}^{km} = coût unitaire d'un trajet entre les nœuds i et j (i et j n'étant pas des hubs) lorsque ce trajet passe par les hubs localisés aux nœuds k et m
 $= \chi C_{ik} + \alpha C_{km} + \delta C_{mj}$

où :

χ est le coût relatif de collecte (dans la formulation originale $\chi = 1$);
 α le facteur de réduction pour la liaison entre deux hubs ($0 \leq \alpha < 1$);
 δ est le coût relatif de distribution (dans la formulation originale $\delta = 1$)

C_{ij} = coût unitaire d'un trajet entre les nœuds i et j
 T_k = coût unitaire de transbordement au hub k
 N = ensemble des nœuds de demande

Variables de décision:

$X_{ij} = 1$ si le nœud i est affecté au hub localisé au nœud $j \forall i, j \in N$
0 sinon
 $Y_{km}^i \geq 0 \forall i, k, m \in N$

Minimiser:

$$\sum_{i \in N} \sum_{k \in N} (C_{ik} + T_k) X_{ik} (\chi O_i + \delta D_i) + \sum_{i \in N} \sum_{k \in N} \sum_{m \in N} \alpha C_{km} Y_{km}^i \quad (1)$$

Sous contraintes:

$$\sum_{x \in N} X_{kk} = p \quad (1.1)$$

$$\sum_{k \in N} X_{ik} = 1 \quad \forall i \in N \quad (1.2)$$

$$X_{ik} \leq X_{kk} \quad \forall i, k \in N \quad (1.3)$$

$$\sum_{m \in N} Y_{km}^i - \sum_{m \in N} Y_{mk}^i = O_i X_{ik} - \sum_{j \in N} h_{ij} X_{jk} \quad \forall i, k \in N \quad (1.4)$$

$$X_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in N \quad (1.5)$$

$$Y_{km}^i \geq 0 \quad \forall i, k, m \in N \quad (1.6)$$

La fonction objectif (1) minimise le coût de transport total. La contrainte (1.1) stipule qu'il y a exactement p hubs à localiser. Ensembles, les contraintes (2.2) et (2.6) assurent que chaque nœud soit affecté à un et un seul hub. Les contraintes (2.3) empêchent l'affectation à un nœud si ce dernier n'est pas un hub. Les équations (1.4) sont les équations de conservation des flux. Les contraintes (1.5) assurent que les variables X_{ij} soient binaires.

Cette formulation diminue la taille de problème. Ceci est dû au fait que les flux entre les paires de hubs ne sont plus traités séparément. Ce problème implique $(N^3 + N^2)$ variables et exige $(I + N + 2N^2)$ contraintes linéaires. La taille du problème a donc été réduite par un facteur N .

4.2. Problème du p -hub centre

Ce problème consiste à déterminer la localisation d'un nombre fixé, p , de hubs et d'affecter les autres nœuds à ces hubs en minimisant le coût maximum entre les paires origine-destination. La motivation initiale de ce critère d'équité est donnée par O'Kelly et Miller (1987). Ce problème est d'une importance cruciale pour le transport de denrées périssables ou de produits pour lesquels le facteur *temps* représente un aspect important de la fonction de coût généralisé.

Récemment, Ernest *et al.* (2009) ont présenté une formulation basée sur un concept appelé "rayon du hub k ". Ce dernier est défini par une variable strictement positive, rad_k , représentant la distance maximale (dans notre cas, le coût généralisé maximum) entre le hub k et les nœuds qui lui sont affectés. Nous avons supposé que les coûts de collecte et de distribution étaient identiques. Ensuite, nous avons inclus dans leur formulation les coûts relatifs de collecte, de distribution, le facteur de réduction pour la liaison entre deux hubs et les coûts de transbordement au terminal du hub k , T_k . Avec les mêmes notations qu'au point 4.1., la formulation devient alors :

Minimiser:

$$z \quad (2)$$

Sous contraintes:

$$\sum_{x \in N} X_{kk} = p \quad (2.1)$$

$$\sum_{k \in N} X_{ik} = 1 \quad \forall i \in N \quad (2.2)$$

$$X_{ik} \leq X_{kk} \quad \forall i, k \in N \quad (2.3)$$

$$rad_k \geq \chi c_{ik} X_{ik} \quad \forall i, k \in N \quad (2.4)$$

$$z \geq rad_k + rad_m + \alpha c_{km} + T_k + T_m \quad k \leq m \in N \quad (2.5)$$

$$X_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in N \quad (2.6)$$

L'objectif, représenté par la variable z , est de minimiser le coût unitaire maximum entre les nœuds i and j . La contrainte (2.1) stipule qu'il y a exactement p hubs à localiser. Ensembles, les contraintes (2.2) and (2.6) assurent que chaque nœud soit affecté à un et un seul hub. Les contraintes (2.3) empêchent l'affectation à un nœud qui n'est pas un hub. Les contraintes (2.4) stipulent que le rayon d'un hub est supérieur ou égal au coût de pré-ou post-acheminement nécessaire de ou vers n'importe quel nœud affecté à cet hub. Les contraintes (2.5) garantissent que l'objectif n'est pas inférieur au coût de transport entre les paires de nœuds affectés aux hubs k and m , puisque rad_k and rad_m représentent les coûts généralisés du nœud le plus éloigné affecté à k et m , respectivement.

4.3. Données requises

Les problèmes de localisation de hubs qui nous préoccupent nécessitent en entrée le coût pour chaque opération de transport, la demande sur le territoire européen, le réseau et le nombre de hubs à localiser.

La détermination des différents coûts de transport est basée essentiellement sur Recordit (2002). De plus, les fonctions de coûts utilisées tiennent compte d'un facteur vitesse : les coûts de déplacement sont multipliés par le facteur : *vitesse moyenne/vitesse* où la vitesse moyenne est la vitesse moyenne sur les liens pour le mode de transport considéré. Ainsi, plus la vitesse sur un lien est rapide par rapport à la moyenne pour le mode de transport considéré, plus le coût de déplacement est réduit.

La demande sur le territoire européen ou, en d'autres termes, les matrices origine-destination (O-D) pour les marchandises sont extraites de la base de données produite par le bureau de consultance : « NEA Transport Research and Training » pour l'année 2000. Cette base de données contient les relations de région à région au niveau 2 de la nomenclature des unités territoriales statistiques (NUTS 2) pour l'Europe élargie : EU25, Norvège et Suisse. Bien qu'il soit envisageable de conteneuriser plusieurs catégories de marchandises, seules les marchandises appartenant au chapitre 9 de la Nomenclature uniforme des marchandises pour les Statistiques de Transport Révisées (NST-R 9) sont affectées car ce chapitre contient essentiellement la demande de transport de conteneurs parmi d'autres produits manufacturés.

En ce qui concerne les réseaux des voies ferrées et des routes en Europe, les données de la *Digital Chart of the World* (DCW), mises à disposition gratuitement par l'*Environmental Systems Research Institute* (ESRI), ont été utilisées. Le réseau de voies navigables a été digitalisé au sein du Groupe de Transport et Mobilité des Facultés Universitaires Catholiques de Mons. Ces réseaux modaux ont été enrichis en introduisant les lignes de ferry et le Tunnel sous la Manche.

Finalement, les données correspondant aux frontières des régions NUTS 2 ont été fournies par la *Geophysical Instrument Supply Co*. Les centroïdes de chaque région ont été situés au centre de la zone la plus urbanisée de la région sur base de la carte fournie par la *Demis World Map*

(2006). Ces centroïdes sont utilisés comme origine ou destination pour les marchandises. Enfin, les réseaux ont été reliés entre eux à l'aide de connecteurs. Ces connecteurs relient chaque centroïde à chaque réseau modal, pour autant que le centroïde ne soit pas éloigné de plus de 100 km du réseau modal considéré. Ces connecteurs ont une longueur moyenne de 4,66 km pour la route, de 3,23 km pour le rail et de 32 km pour la voie d'eau ; avec des écarts-types respectifs de 9,95 ; 6,34 et de 38,85. Ceci permet l'obtention d'un graphe, de plus ou moins 110.000 arcs et de 90.000 nœuds.

4.4. Erreurs

Pour éliminer les erreurs dues à l'agrégation des données, il faudrait connaître les quantités de marchandises à transporter d'entreprise à entreprise. Afin d'évaluer l'erreur commise en utilisant le niveau NUTS 2 plutôt que le niveau 3, la demande de certaines régions NUTS 2 a été répartie sur les principales villes de ses régions NUTS 3. Le lecteur intéressé peut se référer à la thèse de Limbourg (2007).

4. 5. Localisations potentielles

Le problème du p -hub médian étant NP-difficile, le temps nécessaire pour le résoudre augmente comme le nombre de nœuds exposant trois (Ernst et Krishnamoorthy, 1996). Ainsi, afin de modéliser le transport rail-route sur les réseaux transeuropéens, un sous-ensemble de nœuds, des localisations potentielles, est nécessaire.

A l'exception des travaux d'Arnold (2002) et d'Arnold *et al.* (2004) et de ceux de Macharis (2004), la littérature est presque toujours muette sur la façon dont l'ensemble des localisations potentielles est choisi. Macharis (2004) a effectué son étude sur des zones géographiques plutôt restreintes, comme la région flamande en Belgique. La méthodologie utilisée pour déterminer les localisations potentielles requière la récolte de beaucoup de données. Cette approche est difficile à mettre en œuvre sur l'ensemble du territoire européen pour lequel une approche plus systématique est nécessaire.

Une systématisation peut être trouvée dans la thèse d'Arnold (2002) où trois approches sont présentées :

- *une étude de cas belge* : les localisations potentielles sont les nœuds connectés aux voies de chemins de fer et aux routes ;
- *une étude de cas ibérique* où le territoire est divisé en grilles de 200 km, dans lesquelles le point le plus accessible est gardé en tant que localisation potentielle ;
- *une étude de cas européenne* : les terminaux existants sont considérés comme localisation potentielle pour un hub.

Notons également que l'agrégation spatiale des nœuds de demande est une technique très couramment utilisée pour la résolution des problèmes de localisation. Elle a comme conséquence une réduction de la taille de ces problèmes mais induit des solutions entachées d'erreurs. Ces erreurs sont discutées dans Current and Schilling (1987).

Proposer une méthodologie qui permet d'identifier les localisations potentielles a donc tout son sens. En plus de ces aspects, les méthodes de localisation se basent uniquement sur les nœuds où se localise la demande pour déterminer leur ensemble de localisations potentielles. Dès lors, ils ignorent la répartition géographique des flux de marchandises et comment le réseau les capture. Or, la répartition des flux sur le réseau est un élément essentiel. En effet, l'une des principales raisons d'être d'un hub est de consolider les flux. C'est pourquoi, nous

proposons de déterminer l'ensemble des localisations potentielles à partir des flux de marchandises entre les différents nœuds du réseau. De plus, des critères de sélection (par exemple, une localisation potentielle ne peut être retenue si la distance qui la sépare d'un nœud ferroviaire est supérieure à 5 km) permettent de mettre en évidence des sites propices à l'installation d'un terminal rail-route de conteneurs.

L'ensemble de ces sites obtenus par cette méthodologie, reste important. Ceci est dû principalement à effet de chaîne : certains sites, proches l'un de l'autre, ont des caractéristiques plus ou moins identiques. S'il est vrai que, au niveau régional, ces nœuds peuvent avoir des caractéristiques très différentes, comme la disponibilité du terrain, au niveau européen, l'important est de déterminer la région dans laquelle un terminal pourrait être utile. Une sélection, par corridor, doit donc encore être effectuée. Les nœuds retenus seront les nœuds isolés, les nœuds aux extrémités d'une chaîne de flux importants ainsi que les nœuds se trouvant à l'intersection de flux.

Dans Limbourg and Jourquin (2007), le *p*-HMP a été résolu à partir de deux ensembles contenant le même nombre de localisations potentielles. Le premier a été obtenu par une méthode de classification, méthode d'agrégation fréquemment employée, et le deuxième par notre approche basée sur les flux. Le coût total de transport est systématiquement moins élevé avec notre méthode et ce pour toutes les configurations testées. Ceci est un avantage, puisque l'objectif du *p*-HMP est de maximiser l'efficacité du système de transport.

5. Scénario de référence

Afin de mesurer l'impact des réseaux hub-and-spoke, un scénario de référence doit être élaboré à partir d'une demande de transport pour laquelle le transport combiné peut être compétitif par rapport au mode routier. Cette section commencera donc par la détermination de la distance minimale acceptable, en termes de compétitivité, entre les terminaux intermodaux. Cette distance nous permettra ensuite de filtrer la matrice O-D afin de ne garder que les parcours qui pourraient éventuellement être effectués par transport combiné. Ensuite, la demande obtenue devra être affectée sur les réseaux routiers, ferroviaires et des voies navigables européens. La procédure d'affectation utilisée est détaillée au point 5.2.

5.1. Distance minimale inter-terminaux

La distance communément admise à partir de laquelle le transport intermodal rail-route peut être rentable est de 500 km à 600 km. Cependant la CEMT, dans le rapport de 1998, prévoit que la distance la plus courte sur laquelle l'offre du transport combiné rail-route pourrait être concurrentielle est de 300 km.

Pour l'année 2000, les statistiques de l'Union Internationale des sociétés de transport combiné Rail-Route (UIRR) donnent une distance moyenne de 734 km. Ces statistiques ont été utilisées pour tracer l'histogramme de la Figure 2. Celles-ci représentent le nombre d'Equivalent Vingt Pieds (EVP) transporté entre deux terminaux, classé en fonction de la distance séparant ces terminaux.

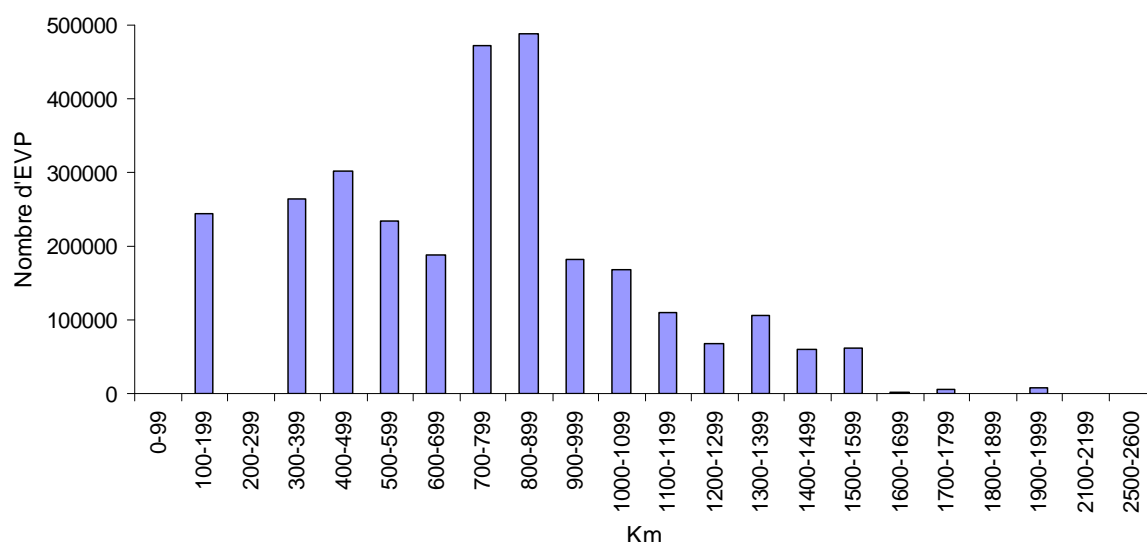


Figure 2. Distribution des EVP en fonction de l'éloignement des terminaux.

Il ressort de cet histogramme que le transport combiné est utilisé sur des distances relativement courtes puisque 8 % des envois circulent entre des terminaux éloignés de moins de 200 km. De ces 8 %, 99,83 % proviennent d'échange de conteneurs entre l'Allemagne et la Tchécoslovaquie. Excepté cette liaison spécifique, les EVP du transport combiné circulent entre des terminaux éloignés de plus de 300 km. Cette distance corrobore la distance minimale prévue par la CEMT. Cette dernière valeur est utilisée comme distance minimale pour laquelle le transport combiné peut être compétitif par rapport à la route et a été utilisée pour élaborer le scénario de référence.

Afin de sélectionner les paires O-D séparées d'au moins 300 km, il est nécessaire d'ajouter à la matrice O-D les distances entre chaque paire. Cette distance ne peut pas être une distance euclidienne, ou une distance du grand cercle (distance orthodromique) sous peine de sous-estimer largement certaines distances, comme celle qui sépare la Bretagne au nord du Portugal par exemple. Le calcul de cette distance s'effectue par l'algorithme de Dijkstra (1959) de recherche du chemin le plus court. Une sélection est ensuite effectuée pour filtrer les paires O-D dont la distance qui les sépare est supérieure à 300 km et qui pourront être concernées par le transport intermodal.

5.2. Affectation

La matrice O-D ainsi obtenue, pour laquelle le transport rail-route peut être une alternative, doit à présent être affectée sur les réseaux routiers, ferroviaires et fluviaux européens. L'affectation consiste en la répartition du trafic sur un réseau, considérant la demande entre les différentes origines et destinations ainsi que l'offre déterminée par les coûts de transport associés à l'infrastructure disponible. Les méthodes d'affectation cherchent à modéliser cette répartition du trafic en respectant un ensemble de contraintes notamment liées à la capacité, au temps de parcours et au coût de transport. Elles peuvent être groupées en quatre catégories, selon qu'elles tiennent compte des contraintes de capacité et qu'elles considèrent la perception que les utilisateurs ont de leurs coûts de transport. Ces deux critères classent généralement les modèles d'affectation de passagers (Thomas (1991), Ortúzar *et al.* (1990)).

Dans les modèles qui considèrent que le coût des liens ne dépend pas du flux, le risque est d'avoir un flux qui dépasse largement la capacité du lien. Dans un tel cas, en effet, le coût réel

du lien peut être nettement plus élevé que celui qui a été pris en compte dans le processus de choix de l'itinéraire, ce qui remet en cause les choix du transporteur. Ce type de modèle n'est donc applicable que sur des réseaux non ou très faiblement congestionnés.

Dans les modèles qui ne prennent pas en compte le caractère probabiliste de l'utilité, on considère que tous les transporteurs perçoivent d'une manière identique le coût d'un lien ou d'un itinéraire. Cependant, la perception des éléments constituant le coût généralisé peut être différente selon les transporteurs. De plus, les transporteurs ne disposent le plus souvent que d'une information partielle sur l'ensemble des itinéraires alternatifs. Il existe aussi un ensemble de facteurs de choix non pris en compte dans la fonction de coût généralisé : la qualité, le climat... Par ailleurs, l'estimation des grandeurs entrant dans le coût généralisé est elle-même entachée d'incertitude.

Parmi les techniques d'affectation, la plus simple est l'algorithme du Tout-ou-rien (ToR). Cette méthode suppose qu'il n'y a pas d'effet de congestion, et que tous les transporteurs perçoivent le coût d'un lien de manière identique. L'absence d'effet de congestion implique que le coût d'un lien est fixe et ne dépend donc pas du flux. L'hypothèse sur la perception identique des coûts signifie que tous les transports d'une origine i vers la destination j doivent choisir le même itinéraire. Dès lors, tous les transporteurs sont affectés à un et un seul itinéraire.

Cependant, le niveau d'agrégation utilisé dans cette recherche est tel qu'on ne peut supposer que, pour une catégorie donnée de marchandises, toutes les marchandises doivent être transportées par le même mode de transport et sur itinéraire identique. En effet, une usine localisée près d'une gare utilisera probablement plus souvent le transport ferroviaire que les autres usines placées dans la même région mais situées loin du chemin de fer. De plus, même pour une relation entre deux usines, des considérations logistiques internes, comme par exemple le respect des délais de livraison, peuvent privilégier un mode particulier.

La stratégie adoptée dans cette recherche pour calculer un ensemble de chemins alternatifs peut se résumer de la manière suivante : lorsqu'un chemin le moins coûteux a été calculé, les coûts sur tous les liens de ce chemin sont artificiellement augmentés avant qu'un autre chemin soit calculé.

Sur un réseau multimodal, le deuxième meilleur itinéraire emploie souvent le même mode de transport que le meilleur. En effet, l'écart des coûts pour deux modes différents de transport entre une paire donnée d'origine-destination est souvent plus grand que l'écart des coûts entre le chemin le moins coûteux et le deuxième. C'est la raison pour laquelle, le coût pour chaque opération de chargement au nœud d'origine pour le mode de transport utilisé sur le premier lien du chemin est également artificiellement augmenté. Ainsi, lors de la prochaine itération, l'utilisation du même mode de transport pour un itinéraire alternatif sera découragée. Cette solution pragmatique s'apparente à la création d'une congestion artificielle importante qui force la recherche d'un nouveau chemin. Elle est facile à mettre en œuvre et assure que chaque nouvel itinéraire essaiera d'éviter des liens déjà utilisés, puisque les coûts sur les liens utilisés sont graduellement augmentés.

Sur cette base, il reste maintenant à répartir la demande entre les différents chemins identifiés reliant chaque paire O-D. Le modèle Logit Multinomial définit la probabilité de choisir le chemin i parmi l'ensemble K des alternatives par :

$$P_i = \frac{e^{(\theta C_i)}}{\sum_{j \in K} e^{(\theta C_j)}}$$

où C_i est le coût du chemin i et θ un paramètre à estimer qui influe sur la dispersion du trafic sur l'origine-destination considérée entre les différentes routes.

Ne disposant pas d'estimation sur le paramètre θ , l'hypothèse simplificatrice que le flux pourrait être réparti sur les différents chemins alternatifs selon leur coût relatif a été émise. Si Q est la quantité totale à transporter, la quantité $Q(\mu_n)$ à affecter sur le chemin μ_n est :

$$Q(\mu_n) = \frac{\frac{1}{C(\mu_n)}}{\sum_i \frac{1}{C(\mu_i)}} Q.$$

Des éléments tels que la qualité du service n'ont pas été incorporés dans les fonctions de coût du modèle et un calibrage est donc nécessaire. La procédure d'affectation permet de calculer plusieurs chemins différents en essayant d'en trouver au moins un pour chaque mode (routier, ferroviaire, fluvial et, par la suite, intermodal).

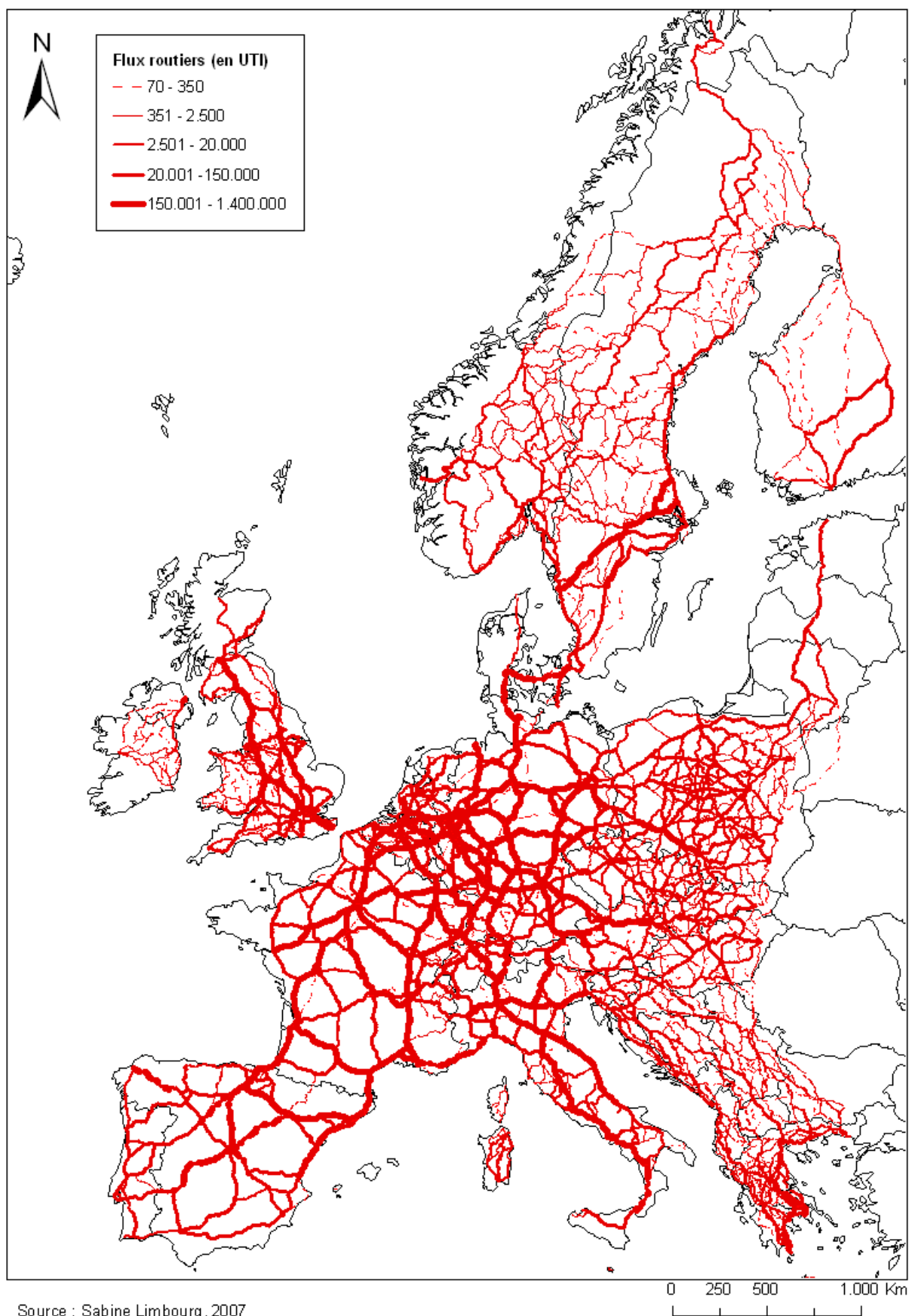
Les flux, obtenus par cette procédure d'affectation et après calibration, sont représentés à la Figure 3. pour les flux routiers, et à la Figure 4 pour les flux ferroviaires et fluviaux.

Les résultats agrégés sur l'ensemble du territoire européen (Tableau 2) montrent qu'il est possible d'obtenir un modèle calibré à la fois sur les quantités transportées, exprimées en tonnes, et sur les flux, exprimés en tonnes.km. Une connaissance fine du terrain permet toutefois de déceler certaines anomalies. Par exemple, entre Poitiers et Bordeaux, l'affectation utilise essentiellement sur l'A10 alors que les poids lourds empruntent plutôt la N10.

	En tonnes		En tonnes.km	
	Données	Données	Modèle	Modèle
Voies d'eau	1,73 %	1,96 %	1,83 %	1,50 %
Chemins de fer	13,55 %	15,10 %	15,12 %	14,17 %
Route	84,72 %	82,94 %	83,05 %	84,33 %

Tableau 2. Performance des affectations après calibration.

Toutefois, Les Figures 3 et 4 montrent que les grands couloirs de flux sont bien représentés par notre affectation. Cette dernière permet donc, dans les limites qui viennent d'être énoncées, une identification des localisations potentielles de hubs.



Source : Sabine Limbourg, 2007

Figure 3. Affectation multi-flux pour le chapitre 9 et pour des déplacements de plus de 300 km sur le réseau routier.

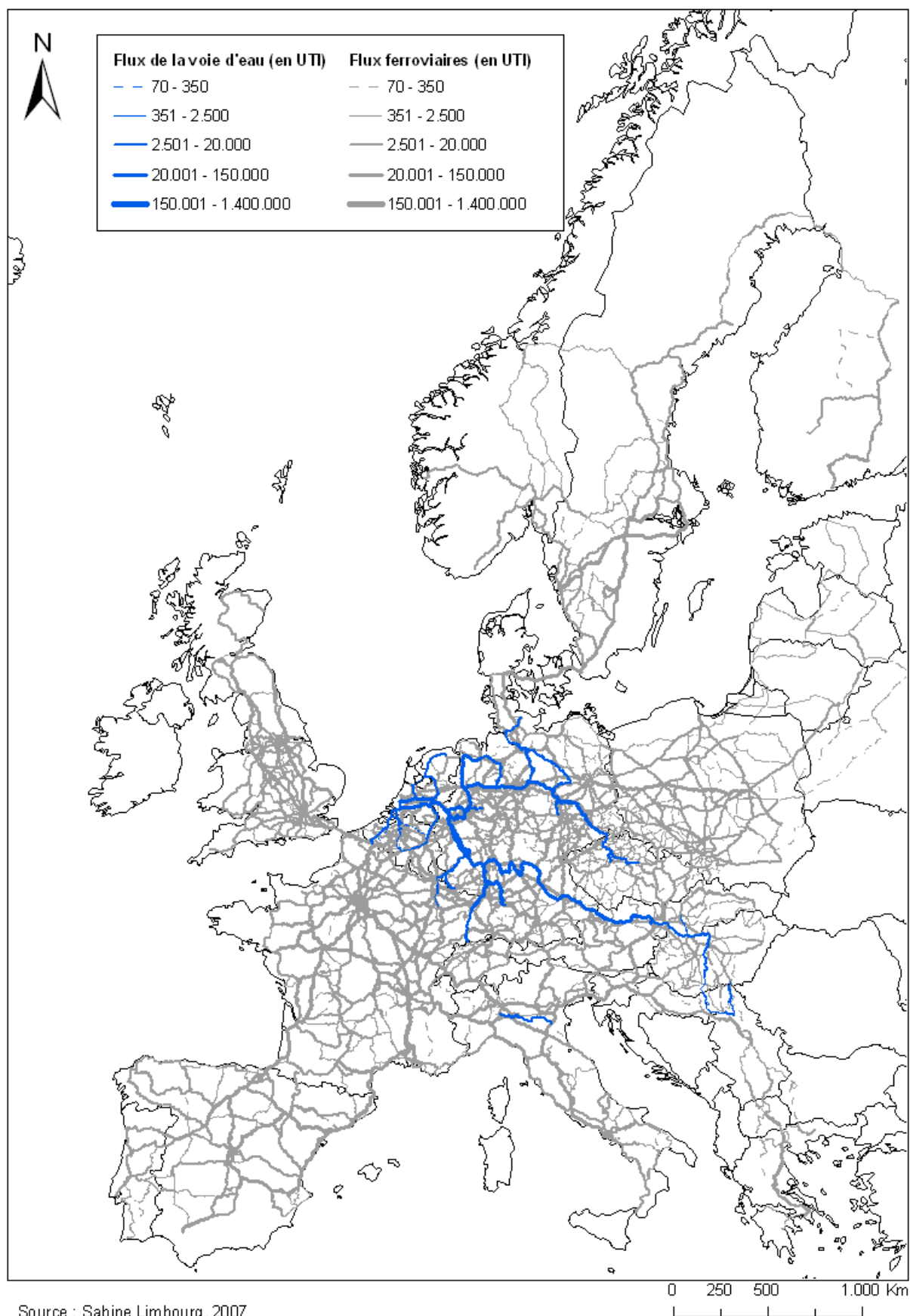


Figure 4. Affectation multi-flux pour le chapitre 9 et pour des déplacements de plus de 300 km sur les réseaux ferroviaires et fluviaux.

6. Modélisation du transport combiné

Un réseau de transport peut être représenté par un graphe dans lequel toutes les opérations de transport (déplacement, chargement, déchargement, transbordement, simple transit,...) sont identifiées. La plupart de ces opérations peuvent être effectuées de différentes manières et à des coûts différents. Ainsi par exemple, des camions de tailles diverses, qui ont des frais d'exploitation différents, peuvent utiliser la route. Dans un terminal, la cargaison d'un camion peut être transbordée sur un train ou simplement être déchargée si elle a atteint sa destination finale.

Harker (1987) et Crainic *et al.* (1990) ont proposé de créer un lien virtuel avec des coûts spécifiques pour chaque utilisation particulière d'une infrastructure. Le concept des "supernetworks" proposé par Sheffi (1985), qui ajoute des liens de "transfert" entre les réseaux de différents modes suit la même logique. Le logiciel NODUS (Jourquin et Beuthe (1996)) présente une méthodologie et un algorithme qui crée, d'une manière systématique et automatique, un réseau virtuel complet avec tous les liens virtuels correspondants aux différentes opérations réalisables sur chaque lien ou nœud réel.

Il est important de noter qu'un réseau virtuel permet d'affecter des flux non seulement entre différents itinéraires, mais également entre divers modes (et moyens) de transport et ceci de manière simultanée. En effet, contrairement aux modèles classiques à quatre étapes (la génération, la distribution, la répartition modale et l'affectation), les réseaux virtuels, qui décomposent explicitement toutes les opérations de la chaîne de transport, combinent la répartition modale et l'affectation en une seule étape. Ainsi, un chemin le plus court dans un tel réseau peut emprunter différents modes de transport, et ainsi représenter un parcours intermodal réel. Ceci est une caractéristique importante notamment dans le cadre d'études de chaînes de transports comme c'est le cas pour le transport combiné.

Le cas d'un réseau multimodal simple va être utilisé pour expliquer la méthodologie de façon intuitive. Le graphe orienté de la Figure 5 se compose de quatre nœuds (a , b , c , d) et de quatre arcs (1, 2, 3, 4). Les arcs caractérisés par la lettre R représentent des routes et l'arc caractérisé par la lettre F , la voie ferroviaire. Pour aller du nœud a au nœud d , deux itinéraires sont possibles. Le premier passant par l'arc 1 est entièrement routier, le deuxième passant par les arcs 2, 4 et 3 est un transport rail-route. Le calcul des coûts et des itinéraires sur ce genre de réseau n'est pas immédiat.

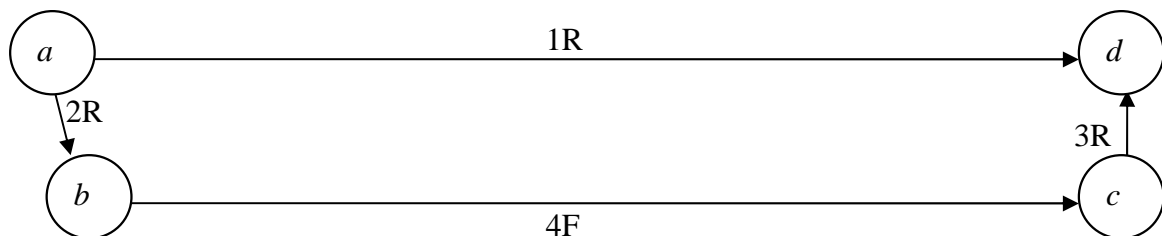


Figure 5. Réseau multimodal

Différents coûts peuvent être affectés à un arc; dans cet exemple, un pré- ou post-acheminement est plus cher qu'un transport entièrement routier, et la partie ferroviaire d'un transport combiné moins cher qu'un transport ferroviaire traditionnel. Un problème similaire se pose aux nœuds : au nœud b , par exemple, il peut y avoir un déchargement ou le transbordement d'un camion (arc 2) sur un train (arc 4).

Pour modéliser le transport combiné, chaque arc du transport routier est triplé (Figure 6.). Le premier correspond au transport uniquement par route, un chargement (C) et un déchargement (D) sont possibles. Le deuxième correspond au pré-acheminement routier, un chargement et un transbordement (T) sont autorisés mais pas le déchargement. Finalement, le troisième type correspond au post-acheminement routier, un déchargement et un transbordement sont autorisés mais pas le chargement.

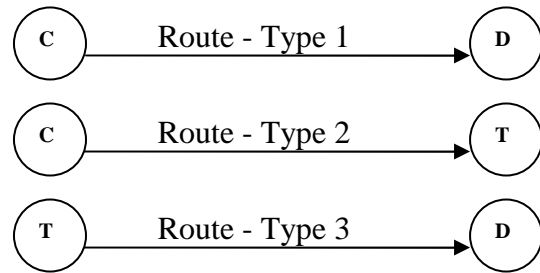


Figure 6. Types d'arcs routiers

De même, pour différencier le transport par rail traditionnel de la partie ferroviaire d'un transport combiné, les arcs du réseau ferroviaire sont doublés (Figure 7.). Le premier type correspond au transport uniquement par rail, un chargement et un déchargement sont possibles. Le deuxième type de liens correspond à la partie ferroviaire d'un transport combiné, les transbordements sont autorisés mais pas de chargement ou de déchargement possible.

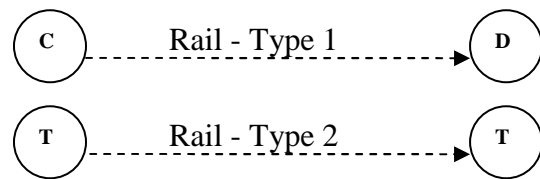


Figure 7. Types d'arcs ferroviaires

Puisqu'il n'y a pas de déchargement associé au pré-acheminement et de chargement associé au post-acheminement par camions, ces deux types d'arc doivent donc être combinés avec un arc ferroviaire de deuxième type pour modéliser le transport intermodal (Figure 8).

Routier longue distance	Route – Type 1		
	<hr/>		
Ferroviaire	Rail – Type 1		
	<hr/>		
Combiné	Route –Type 2	Rail – Type 2	Route – Type 3
	<hr/>		

Figure 8. Modélisation du transport combiné

Le graphe virtuel ainsi obtenu peut alors être utilisé pour calculer des chemins entre les différentes paires d'O-D au moyen d'un algorithme tel que l'algorithme proposé par Dijkstra (1959). Les solutions résultantes tiennent alors compte de tous les choix modaux possibles.

La Figure 9.1. illustre une situation dans laquelle le chemin routier, le chemin ferroviaire et le chemin fluvial sont des alternatives très proches les unes des autres. Le quatrième chemin, constitué de deux parties routières qui relient les nœuds d'origine et de destination à leur terminal le plus proche et d'une partie ferroviaire entre les terminaux, représente l'alternative de transport combiné. Cette alternative, trop coûteuse, n'est pas gardée parmi les choix possibles et le flux est donc réparti sur les trois autres chemins, représentés à la Figure 9.2. Ainsi, un chemin intermodal est retenu comme chemin alternatif uniquement s'il constitue la solution la moins chère.

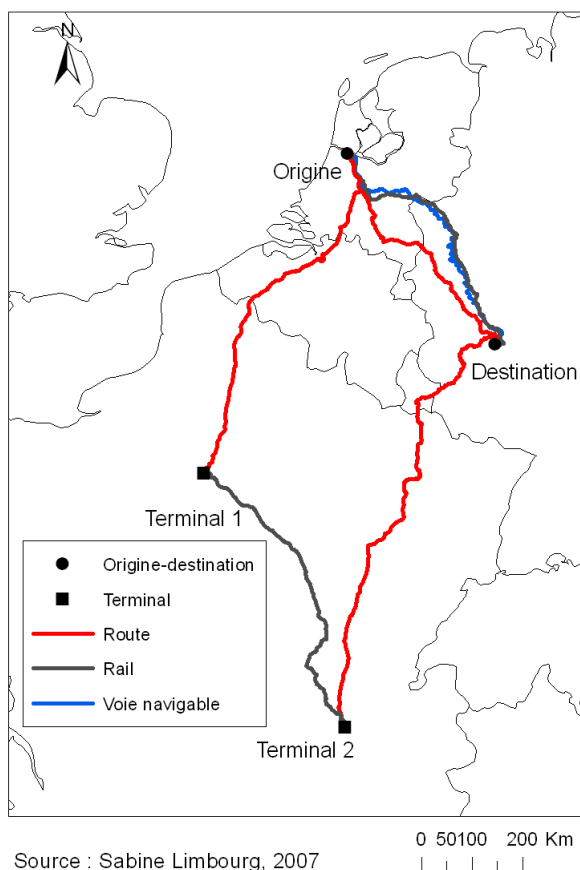


Figure 9.1. Quatre chemins entre une paire Origine-Destination

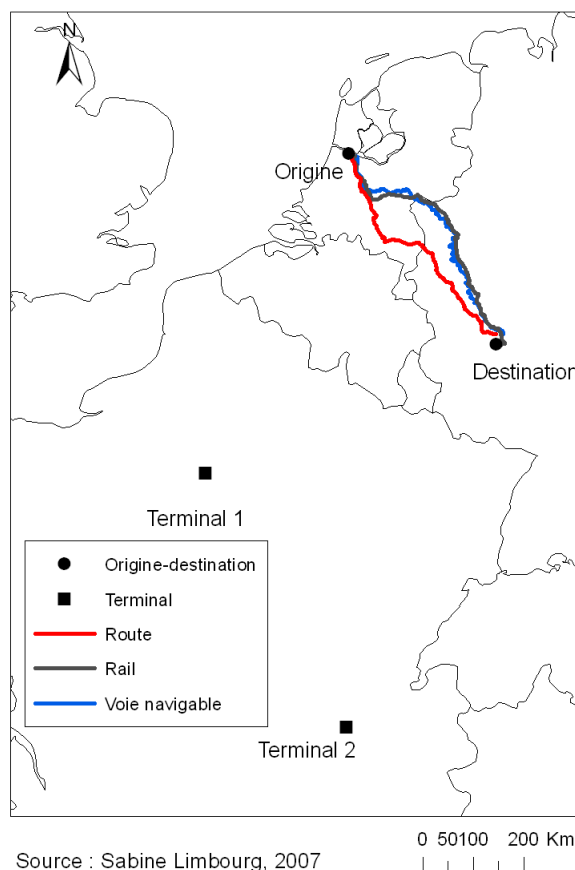


Figure 9.2. Chemins sélectionnés entre une paire Origine-Destination

7. Coût de transbordement

Des paramètres comme la localisation du terminal, sa situation spatiale par rapport aux centres de production et de consommation, l'existence de terminaux concurrents, l'accès aux voiries principales et au rail, ... affectent de manière significative le volume de cargaison et le mélange des UTI manutentionnées. D'autres paramètres comme le coût et la disponibilité de terrain industriel sont déterminés principalement par les conditions locales. Finalement, un certain nombre de paramètres sont déterminés ou imposés par les autorités terminales. Parmi ces paramètres, les appareils de manutention jouent un rôle dominant puisqu'ils décrivent l'agencement du terminal et déterminent ses limites et sa productivité.

Les terminaux rail-route peuvent être réduits à de simples installations permettant le transfert ou s'étendre à des centres fournissant un certain nombre de services à valeur ajoutée tels que le stockage, le dépôt, l'entretien, la réparation. Selon Ballis et Golias (2002 et 2004), les terminaux rail-route européens typiques comprennent les éléments suivants :

- clôture, embranchement particulier pour les trains/wagons à des fins de stockage, de triage, de rassemblement et d'inspection ;
- voies de transbordement pour les opérations de chargement ou de déchargement de train ;
- voies de stockage ou d'attente pour unités de transport intermodal ;
- chargements et voiries pour les camions ;
- quais et voiries internes.

Dans le cas le plus simple, le train arrive sur la voie de transbordement, le chargement ou le déchargement y est effectué puis le train repart. Cependant, la réalité est souvent plus complexe. Si la longueur du train qui arrive excède la longueur de la voie, le train doit être réparti sur plusieurs voies. De plus, si le nombre de trains qui arrivent (ou partent) excède la capacité de la voie de transbordement, certains trains doivent être retirés de la voie de transbordement après la phase de chargement ou de déchargement pour laisser la place aux autres trains. Les wagons vides sont transférés à des embranchements de stockage, les autres wagons peuvent être triés et un nouveau train est composé. Un ajustement des wagons par rapport à leurs nouvelles unités de chargement, des inspections et des tests sont effectués.

Prenant en compte la situation existante en Europe, Ballis et Golias (2002) distinguent les paramètres de conception suivants :

- La longueur des voies de transbordement. Celle-ci affecte à la fois les dimensions du terminal et les opérations quotidiennes. Elle est déterminée par trois facteurs : la longueur des trains, la disponibilité des terrains et les contraintes de coûts.
- L'utilisation des voies de transbordement.
- Les fréquences et la façon dont les trains et les camions partent. Les arrivées de camions sont déterminées par l'horaire du train, les heures de travail aux terminaux et par les convenances du marché.
- Le type et le nombre des équipements de manutention. Les équipements de manutention conventionnels pour le transbordement des UTI sur un terminal rail-route sont de deux types : *reach stackers* ou grues automobiles et les *gantry cranes* ou grues portiques. Les grues automobiles sont principalement utilisées dans de petits terminaux car elles ont un coût plus bas -mais des coûts d'exploitation plus élevés- que les grues portiques. Elles ont une grande flexibilité, elles peuvent accéder à tout le terminal. Les grues portiques, prisonnières de la voie, sont actuellement l'équipement dominant des terminaux combinés dont le volume transbordé est important. En plus de ces équipements, un nombre limité de technologies innovatrices existent en Europe. La caractéristique commune de toutes ces technologies est qu'elles offrent une manutention rapide et un degré avancé d'automation.
- La hauteur moyenne d'empilage. L'empilement d'UTI réduit les zones de stockage et la distance moyenne pour la manipulation par des équipements mobiles ou par des portiques où la zone de stockage est située entre les jambes de ce portique. D'un autre côté, l'empilement des unités de chargement augmente les activités de manipulation.
- Les systèmes et les procédures d'accès au terminal. L'accès au terminal du côté du rail est organisé par les chemins de fer. De préférence, le terminal devrait être accessible des deux sens, avec des trains entrants des deux directions. Cependant, beaucoup de terminaux ont des voies avec une seule direction d'accès. L'accès n'est pas toujours électrifié et l'utilisation d'une locomotive diesel est donc obligatoire.

Dans le modèle de Ballis et Golias (2002), l'évaluation comparative des technologies conventionnelles et de pointe est basée sur un système expert, un générateur d'arrivée de train et de camion, un module de simulation et un module de calcul de coûts. Le système expert offre des alternatives de conception de terminaux (quantité et type d'équipement, terrains requis, hauteur moyenne d'empilement, heures de travail, personnels requis, ...). Chaque conception proposée est examinée par le module de simulation et peut être acceptée ou non. Une conception est acceptable si tous les trains sont desservis pendant les heures d'ouverture et si les temps d'attente des camions dans le terminal sont conformes à un critère de qualité de service. Dans cette recherche, le critère de qualité de service adopté impose que 95 % des arrivées de camions soient desservies dans les 20 minutes. Ce critère a été utilisé dans des

projets de recherches européens et a été confirmé par plusieurs opérateurs de terminaux. Chaque conception acceptée et le temps d'attente des camions correspondant sont utilisés comme entrées pour le module du calcul de coût qui fournit la valeur associée du coût par unité de transport intermodal. En répétant la procédure de calcul, une courbe de coût en fonction du volume est obtenue pour chaque configuration spécifique de terminal ; cette courbe se termine au volume correspondant à la capacité du terminal. Le calcul des coûts incorpore les éléments suivants :

- l'infrastructure (acquisition du terrain, formation des voies, voies, aiguillages, signaux, grues, routes, quais, bâtiments, éclairage, clôture,...) ainsi que les équipements de manutention et autres équipements des terminaux. Le calcul du coût annuel pour ces éléments s'est basé sur une période d'amortissement de 30 ans pour le terrain et pour les ouvrages de génie civil.
- la maintenance et l'énergie ;
- le personnel requis pour les opérations aux terminaux a été calculé en fonction du volume du terminal. Il a été supposé que ce personnel s'occupe des opérations de manutention, comme par exemple l'ajustement des wagons ;
- les procédures d'accès des trains ainsi que le matériel roulant et les inspections comme la vérification des freins ;
- le coût de temps de service de camion dans le terminal a été calculé en tenant compte du temps d'attente moyen dans le terminal.

Dix-sept technologies de manutention ont été étudiées par Ballis et Golias (2002). Différentes configurations de voie ont été utilisées et trois types de grues portiques ont été considérés. L'étude montre que les coûts de transbordement varient fortement en fonction du volume annuel manutentionnés et des équipements de ces terminaux. Les coûts diminuent lorsque les volumes augmentent mais une tendance asymptotique est observée au niveau de 30 € par UTI. Toutefois, les coûts calculés sont plus élevés que les prix du marché. Selon les auteurs, cette différence est expliquée par le fait que le modèle prend en compte les coûts d'investissement qui représentent environ 50 % des coûts totaux du terminal. Cette différence peut aussi s'expliquer en partie par les subsides publics.

Grâce à ces résultats, la variation des coûts en fonction du nombre d'UTI transbordées par an peut être estimée. Une régression logarithmique est présentée sur la Figure 10. où y correspond au coût moyen de transbordement et x au nombre d'UTI transbordées par an. Cette régression est valable pour un nombre d'UTI transbordées par an compris entre 25.000 et 300.000 et en considérant les configurations d'équipement exigeant un système où un rendez-vous est fixé pour l'arrivée du camion. Si ces dernières ne sont pas reprises, la limite inférieure de coûts de transbordement obtenus est de 30 €/UTI, ce qui est conforme à l'étude Recordit (2002) ainsi qu'aux coûts repris dans Terminet (1997) et dans le rapport de la CEMT (1998).

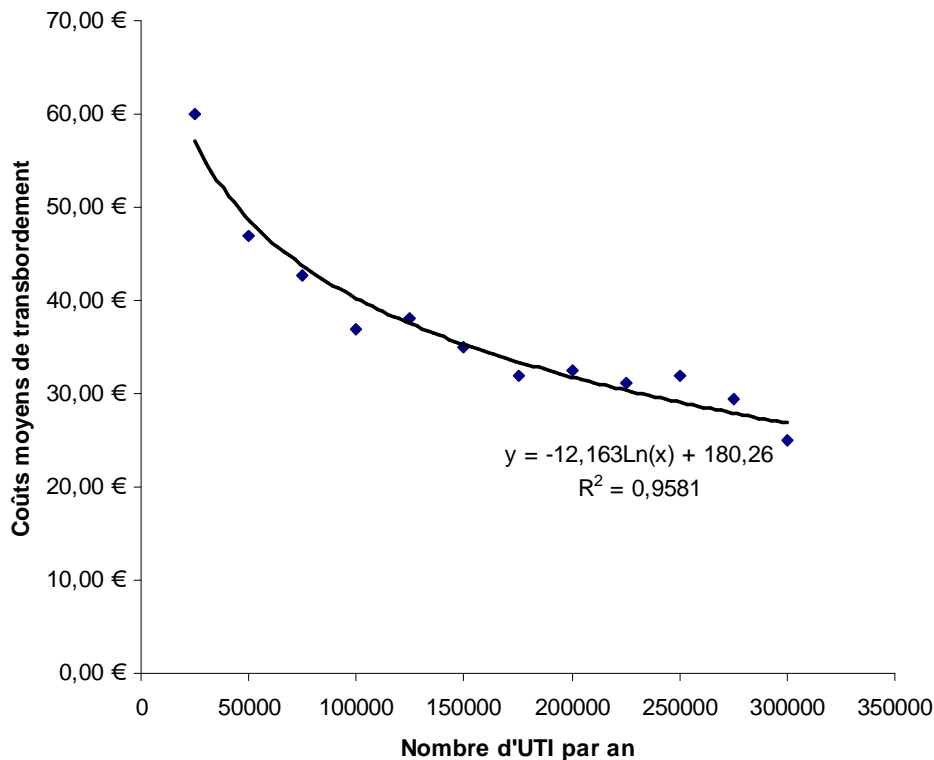


Figure 10. Evolution du coût moyen de transbordement en fonction du flux.

8. Résultats

Dans l'article de Limbourg et Jourquin (2009), une procédure itérative basée sur le p -HMP et sur l'affectation multimodale telle que décrite au point 5.2. a été proposée. La fonction objectif du p -HMP a été modifiée pour inclure les coûts de pré-acheminement, de post-acheminement, de transbordement en fonction du nombre de conteneurs manipulés et les coûts des transports routiers et ferroviaires. De plus, les trois restrictions simplificatrices du p -HMP (section 3), ont été relaxées puisque un nœud de demande peut être affecté à plusieurs hubs, les connexions inter-hubs non viables ne sont pas créées et la demande peut être affectée sur tous les modes de transport avec la possibilité -et non l'obligation- d'utiliser le transport combiné.

Cette procédure itérative a été appliquée au réseau transeuropéen, pour un nombre de hubs variant de deux à dix. La minimisation des coûts totaux de transport sur l'ensemble des réseaux routiers, ferroviaires et fluviaux du territoire européen permet d'identifier une configuration optimale comprenant huit grands terminaux situés aux alentours de grandes villes telles que par exemple Milan et Lyon. Bien que ces villes soient situées à un peu plus de 300 km l'une de l'autre, le transport intermodal est compétitif pour certaines régions aux alentours de ces terminaux. La chaîne de montagne séparant ces deux villes est certainement un élément qui contribue à la compétitivité du transport combiné.

La diminution du coût total de transport ainsi que le nombre de tonnes.km transférées de la route au rail sont estimés en comparant les résultats obtenus avec la configuration optimale à ceux du scénario de référence où le transport combiné n'est pas autorisé. Limbourg et Jourquin (2009) montrent que plus d'un tiers de l'objectif annuel du programme Marco Polo est atteint avec une configuration de sept terminaux, soit une diminution du trafic routier de plus de 4 milliards de tonnes.km par an.

La question de recherche supplémentaire de déterminer la localisation optimale de terminaux additionnels par rapport à la situation actuelle a également été étudiée dans cet article.

De plus, dans l'article de Limbourg et Jourquin (2010), une méthodologie basée sur les travaux de Niérat (1997) permet de déterminer l'aire de marché d'un terminal, c'est-à-dire l'aire pour laquelle le transport combiné rail-route est moins cher que le transport entièrement routier. La méthodologie présentée prend en compte la structure des réseaux et donc leur hétérogénéité, les coûts des différentes opérations de transport et la localisation des terminaux.

Pour évaluer la part modale du transport combiné pour chaque région au niveau NUTS 3, il est supposé que chaque centroïde est une origine et une demande de transport. Cela correspond à un réseau dans lequel chaque centroïde est connecté à tous les autres et à une matrice O-D dont tous les éléments sont strictement positifs.

Cette étude est un complément aux modèles de localisation. Elle met en évidence des phénomènes de cannibalisation lorsque des hubs localisés près l'un de l'autre desservent le même marché. Elle compare également les configurations optimales obtenues par la résolution du p -HMP et du p -HCP pour l'ensemble du réseau transeuropéen. L'objectif d'efficacité du p -HMP conduit à une configuration optimale où la plupart des hubs sont situés dans le centre de l'Europe, où les flux sont très importants. D'un autre côté, l'objectif d'équité du p -HCP conduit à une configuration où les terminaux sont répartis sur toute la zone dans laquelle le transport combiné peut être utilisé. Cependant, cette dernière configuration ne capte pas suffisamment de flux pour être viable sans subvention.

9. Conclusions

A l'heure actuelle, il n'est plus à démontrer que le monde des transports et de la mobilité nécessite une restructuration vu la hausse sans cesse croissante des échanges. L'engorgement des routes, l'augmentation de l'insécurité, la hausse perpétuelle du trafic et des nuisances environnementales poussent les différentes instances à s'attarder sur cette question.

Le transport intermodal est un élément clé d'une politique de transport durable de marchandises sur des longues distances (supérieures à 300 km). Cependant, son efficacité dépend fortement de la localisation de ces terminaux au niveau européen. La méthodologie présentée dans cet article offre un outil de décision pour le transport combiné rail-route.

Les résultats obtenus et présentés dans les articles de Limbourg et Jourquin (2009 et 2010) dépendent de la qualité de la matrice des flux et des interactions avec les autres types de terminaux et les ports. Ils démontrent que plus d'un tiers de l'objectif annuel du programme Marco Polo est atteint avec une configuration de sept terminaux. L'élargissement de l'Europe, l'augmentation des coûts du pétrole, la conteneurisation de plus en plus de catégories de marchandises et l'internalisation des coûts externes (coûts dus aux diverses émissions par les différentes opérations de transport, aux accidents, à la perte de temps subie par les utilisateurs routiers dans des situations de congestion, à la pollution sonore et au réchauffement global dû aux émissions de CO₂) devraient renforcer ce résultat.

Il faut toutefois attirer l'attention sur le fait que les avantages de la structure hub-and-spoke considérée sont des avantages globaux. En effet, le transport combiné requiert qu'une partie des opérations de transport, les pré- et post-acheminements, soit effectuée par la route. Ces deux opérations ont plutôt lieu dans les zones proches des terminaux où les problèmes

demeureront, s'ils ne sont pas accrus. Des solutions au cas par cas doivent pouvoir être envisagées pour éviter au maximum les pré- et post-acheminements dans les zones urbanisées. Au niveau européen, l'important est de déterminer la région dans laquelle un terminal pourrait être utile car au niveau régional, les localisations retenues peuvent avoir des caractéristiques très différentes (disponibilité du terrain, coûts de manutention ...).

Rappelons également que ce travail s'inscrit dans une démarche de planification stratégique des transports européens et que l'hypothèse d'une capacité ferroviaire infinie a été retenue, alors que des rapports tels que celui de KombiConsult (2004) indiquent que certains tronçons ferroviaires n'ont pas une capacité suffisante pour absorber une augmentation de 15 % des tonnes.km. Bien que nos résultats restent légèrement en dessous de ce seuil, le problème de la capacité du réseau ferroviaire mérite une attention particulière. Une solution pourrait être trouvée dans le rapport ESPON (2004) qui envisage plusieurs pistes comme la transformation des lignes ferroviaires classiques en lignes dédiées au fret ou la réutilisation de lignes traditionnelles laissées libres du fait de la création de réseaux ferroviaires à grandes vitesses.

Remerciements

Nous tenons à remercier Pieter Hilferink, Directeur de recherche à NEA qui nous a permis d'utiliser leurs matrices origine-destination pour le transport de fret européen. L'utilisation d'une telle base de données a grandement contribué à l'élaboration d'une étude de cas crédible.

Références

- Alumur S, Kara B, 2007, « *Network hub location problems: The state of the art* ». European Journal of Operational Research 190: 1–21
- Arnold, P., 2002, « Localisations optimales, logique multi-réseaux et terminaux de transport multimodal: formalisation et applications ». Thèse, Département de Géologie et Géographie, de l'Université Catholique de Louvain, Belgique.
- Arnold P., Peeters D. et Thomas I, 2004, « *Modelling a rail/road intermodal transportation system* », Transportation Research Part E 40, 255-270.
- Aykin T, 1990, « *On a quadratic integer program for the location of interacting hub facilities* ». European Journal of Operational Research 46: 409–411.
- Ballis A et Golias J, 2002, « *Comparative evaluation of existing and innovative rail-road freight transport terminals* », Transportation Research Part A 36 p 593-611.
- Ballis A et Golias J, 2004, « *Towards the improvement of a combined transport chain performance* », European Journal of Operational Research 152 (2004) 420-436.
- Bookbinder, J.H., Fox, N.S., 1998, « Intermodal routing of Canada–Mexico shipments under NAFTA », Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review 34 (4), 289–303.
- Bontekoning, Y.M., Macharis, C., Trip, J.J., 2004. « Is a new applied transportation research field emerging? A review of intermodal rail-truck freight transport literature » Transportation Research Part A 38, 1–34.
- Bowersox, D.J., Closs, D.J. et Helferich O.K., 1986, « *Logistical management* », Macmillan Publishing Company, New York.

- Campbell J.F., 1994, « *Integer Programming Formulations of Discrete Hub Location Problems* », European Journal of Operational Research 72(2), 387-405.
- Campbell, J.F., 1996, « *Hub location and the p-hub median problem* » Operations Research 44 (6), 923–935.
- Campbell J. F., Ernst A., et Krishnamoorthy M., 2001, « *Hub location problems* » In H. Hamacher and Z. Drezner, editors, Location Theory: Applications and Theory, pages 373-406. Springer-Verlag, 2001.
- C.E.M.T., 1998, « *Rapport sur la situation actuelle du transport combiné en Europe* »
- Crainic T.G., Florian M., Guélat J., et Spiess H., 1990, « *Strategic planning of freight transportation: Stan, an interactive graphic system* », Transportation research record, 1283, pp. 97-124.
- Current JR, Schilling DA., 1987, « *Elimination of source A and source B errors in p-median location problem* », Geographical Analysis;19(2):95-110.
- Daubresse, Mp, 1997, « *Schéma national des plates-formes multimodales* ». La Documentation Française.
- Dijkstra E.W., 1959, « *A note on two problems in connection with graphs* », Numerische Mathematik, Vol 1, pp. 269-271.
- ESPON, 2004, « *Transport services and networks: territorial trends and basic supply of infrastructure for territorial cohesion* », www.espon.lu.
- Ernst A.T. et Krishnamoorthy M., 1996, « *Efficient Algorithms for the Uncapacitated Single Allocation p-Hub Median Problem* », Location Science, 4(3):139–154.
- Ernst, A.T., Hamacher H., Jiang H., Krishnamoorthy M. et Woeginger G., 2009, « *Uncapacitated Single and Multiple Allocation p-Hub Center Problems* », Computers and Operations Research 36: 2230–2241.
- Harker P.T., 1987, « *Predicting intercity freight flows* », VNU Science Press.
- Jourquin B. et Beuthe M., 1996, « *Transportation policy analysis with a geographic information system: The virtual network of freight transportation in Europe* », Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Volume 4, Issue 6, December 1996, Pages 359-371.
- Klincewicz, J.G., 1991, « *Heuristics for the p-Hub location problem* » European Journal of Operational Research 53, 25–37.
- Klincewicz, J.G., 1992, « *Avoiding local optima in the p-hub location problem using tabu search and GRASP* » Annals of Operations Research 40, 283–302.
- KombiConsult, 2002, « *Study on infrastructure capacity reserves for combined transport by 2015* », prepared for international union of railways combined transport group, Freiburg/Frankfurt am Main/Paris.
- 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.
- Limbourg, S., 2007. Planification stratégique de systèmes de transport de marchandises en Europe: modèles de localisations optimales de hubs de conteneurs sur un réseau multimodal. Thèse, Louvain School of Management – FUCaM – Mons Campus, Belgium.

- Limbourg S., Jourquin B., 2009, « *Optimal rail-road container terminal locations on the European network* », Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review 45 (4), 551-563.
- Limbourg S., Jourquin B., 2010, « *Market area of intermodal rail-road container terminals embedded in a hub-and-spoke network* », vol. 89, issue 1, pages 135-154
- Macharis C., 2004, « *A Methodology to Evaluate Potential Location for Intermodal Barge Terminals: A Policy Decision Support Tool* » in: Beuthe, M.; Himanen, V. and A. Reggiani (eds.): European Strategies in the Globalising Markets.
- Niérat P., 1997, « Market area of rail-truck terminals: Pertinence of the spatial theory », Transportation Research Part A: Policy and Practice, Volume 31, Issue 2, pp 109-127
- O'Kelly M., 1987, « *A quadratic integer program for the location of interacting hub facilities* », European Journal of Operational Research 32, 393-404.
- O'Kelly M. E. et 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.
- O'Kelly M. et Miller H., 1994, « *The hub network design problem. A review and synthesis* », Journal of Transport Geography 2(1) 31-40.
- Ortúzar J.D., Willumsen L.G., 1990, « *Modelling Transport* », John Wiley & Sons, Chichester, UK.
- RECORDIT, 2001, « *REal COst Reduction of Door-to-door Intermodal Transport* », <http://www.recordit.org/>.
- SIMET project, 1995, « *Future Optimum Terminals for Intermodal Transport* », Doc.Euret/411/95 Brussels.
- Smith, K., Krishnamoorthy, M., Palaniswami, M., 1996, « *Neural versus traditional approaches to the location of interacting hub facilities* », Location Science 4(3), 155-171.
- Skorin-Kapov D, Skorin-Kapov J, 1994, « *On Tabu search for the location of interacting hub facilities* », European Journal of Operational Research 73: 502-509.
- Sheffi, Y., 1985, « *Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods* », Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Slack, B., 1990. « *Intermodal transportation in North America and the development of inland load centers* », Professional Geographer 42 (1), 72-83.
- TERMINET, « *Innovative bundling network concepts in Europe* », Delft University of Technology, Delft, July 1997a.
- TERMINET, « *Quality jump in intermodal transport: theory and practice* », Delft University of Technology, Delft, July 1997c.
- Thomas R., 1991, « *Traffic Assignment Techniques* », Avebury Technical, England
- U.I.R.R., Union Internationale des sociétés de transport combiné Rail-Route, <http://www.uirr.com/>.
- Wiegman B, 2003, « *Performance conditions for container terminals* », Thesis, Vrije Universiteit Amsterdam.