

THÈSE

Présentée pour l'obtention du titre de
Docteur en Sciences de Gestion

des

FACULTÉS UNIVERSITAIRES CATHOLIQUES DE MONS

présentée par

SABINE LIMBOURG

PLANIFICATION STRATEGIQUE DE SYSTEMES DE TRANSPORT DE MARCHANDISES EN EUROPE :

MODÈLES DE LOCALISATIONS OPTIMALES DE HUBS DE
CONTENEURS SUR UN RÉSEAU MULTIMODAL.

18 septembre 2007

Président :

Professeur Rudy De Winne (Facultés Universitaires Catholiques de Mons)

Promoteur :

Professeur Bart Jourquin (Facultés Universitaires Catholiques de Mons)

Rapporteurs :

Professeur Michel Delattre (Facultés Universitaires Catholiques de Mons)

Professeur Isabelle Thomas (Université Catholique de Louvain)

Lecteurs :

Professeur Michel Beuthe (Facultés Universitaires Catholiques de Mons)

Professeur Philippe Mathis (Université de Tours)

Professeur Roger Vickerman (University of Kent)

Remerciements

En premier lieu, je voudrais remercier Monsieur Bart Jourquin qui m'a offert la possibilité de réaliser ce travail et qui m'a accordé sa confiance. Il a eu la patience de diriger cette thèse et de discuter régulièrement de l'avancée de mes travaux. Ses compétences, ses conseils et ses encouragements ont été un soutien précieux.

Ensuite, mes remerciements s'adressent à Monsieur Michel Beuthe qui, sans être officiellement impliqué dans l'encadrement de ce travail, fait certainement partie des personnes qui connaissent le mieux le contenu de ce manuscrit. Son enthousiasme, ses commentaires, son expertise et sa disponibilité m'ont été d'une grande aide.

Madame Isabelle Thomas et Monsieur Michel Delattre m'ont également accompagné dès le début de ce travail. Leurs remarques et suggestions très pertinentes ont permis d'améliorer la qualité de cette thèse. Je leur adresse également mes plus sincères remerciements.

Je tiens également à remercier Messieurs Rudy De Winne, Philippe Mathis et Roger Vickerman pour avoir accepté de participer à l'évaluation de cette thèse.

Pour m'avoir donné l'autorisation d'utiliser les données produites par son bureau d'étude, je tiens également à remercier Pieter Hilferink, Directeur de recherche à NEA.

Ma reconnaissance est adressée à Bénédicte Orban qui, bien qu'elle ait quitté le Groupe des Transports et Mobilité à la fin de ma deuxième année de thèse, a su continuer à travailler avec moi et a patiemment relu et corrigé mes travaux.

Pour avoir contribué à créer un cadre de travail aussi agréable, je tiens à remercier les membres du GTM, ainsi que les membres du GPO et de Marketing, Liliane, Sabine et Sonia et plus particulièrement Florence Pirard, Thomas Crépin et Jonathan Lechien pour leurs critiques constructives.

Mes remerciements vont aussi à ma famille, et plus particulièrement à Christine Beauchamps et à ma mère pour leur soutien, leur relecture, et leur patience.

Tables des matières

1. Introduction	1
1.1. Contexte général.....	1
1.2. Problématique de recherche	3
1.3. Aspects méthodologiques.....	4
1.4. Applications	5
2. Terminaux	1
Introduction	8
2.1. Terminologie du transport intermodal.....	8
2.2. Organisation de la chaîne de transport combiné	9
2.2.1. Avantages	11
2.2.2. Barrières au développement	13
2.2.3. Amélioration de l'efficacité du transport combiné.	15
2.3. Typologie des réseaux de consolidation.....	17
2.4. Typologie des terminaux	21
2.4.1. Typologie des terminaux sur base de leurs principales caractéristiques.....	21
2.4.2. Typologie des terminaux sur base du type de consolidation.....	24
2.4.3. Typologie des terminaux de conteneurs.....	25
2.4.4. Labellisation des terminaux de transport combiné.....	26
2.4.5. Conclusions	27
2.5. Principes de la chaîne logistique totale et des opérations	28
2.6. Fonctions de coûts généralisés	31
2.7. Coûts d'investissement des terminaux rail-route	34
2.7.1. Estimation par Recordit des coûts d'investissement des terminaux	34
2.7.2. Identification par Ballis des paramètres de conception des terminaux	35
2.7.3. Le modèle de Ballis (2002)	38
2.8. Economies d'échelle	41
2.8.1. Pour les acheminements par train.....	41
2.8.2. Pour les acheminements fluviaux.....	42
2.8.3. Pour les transbordements rail-route.....	42
2.9. Subventions possibles	43
2.10. Conclusions	45
3. Modèles de localisation	8

Introduction	47
3.1. Modèles de localisation	48
3.2. Problème de localisation dans un espace discret	50
3.2.1. Problème de couverture	51
3.2.2. Problème du p -centre	53
3.2.3. Problème de la p -médiane	54
3.3. Problèmes de localisation de hubs	56
3.3.1. Réseau Hub-and-Spoke	57
3.3.2. Typologie des réseaux de hubs	60
3.3.3. Formulations du problème du p -hub médian	61
3.4. Conclusions	69
4. Modélisation des flux de transport	47
Introduction	72
4.1. Modèle classique de planification des transports	73
4.2. Modèles spécifiques au transport de fret	76
4.3. Classification, discussion, choix	77
4.4. Modèles de réseau	79
4.5. Les réseaux virtuels	79
4.6. Techniques d'affectation sur réseaux virtuels	85
4.6.1. Les modèles d'affectation	86
4.6.2. Affectations multi-flux	90
4.6.3. Résultats d'une affectation multi-flux sur un réseau réel	96
4.7. Erreurs	107
4.8. Conclusions	108
5. Analyse des localisations potentielles	73
Introduction	111
5.1. Agrégation des nœuds de demande pour des problèmes de localisation de hub	112
5.1.2. Définition du problème de classification	113
5.1.3. Les méthodes de classification	113
5.1.4. Agrégation et erreurs	116
5.1.5. Test sur des données publiques	117
5.1.6. Conclusions sur l'agrégation des nœuds de demande	120
5.2. Détermination des localisations potentielles	120
5.2.1. Distance minimale inter-terminaux	121

5.2.2. Ventilation par groupe de marchandises	123
5.2.3. Consolidation des flux sur des couloirs.....	124
5.2.4. Sélection des localisations potentielles	127
5.3. Détermination des flux de conteneurs	130
5.3.1. Aire de marché du terminal	131
5.3.1.1. Aire de marché elliptique	131
5.3.1.2. Estimation de grandeur de l'aire de marché.....	134
5.3.1.3. Aire de marché hyperbolique	136
5.3.1.4. Aire de marché générale.....	137
5.3.2. Détermination des flux potentiels	138
5.4. Détermination des coûts de transport entre les localisations potentielles	138
5.5. Conclusions	139
6. Configurations optimales	111
Introduction	141
6.1. Modélisation d'un réseau de transport autorisant le transport combiné.....	142
6.1.1. Création du réseau hub-and-spoke	142
6.1.2. Identification du transport combiné	143
6.1.3. Affectation sur un réseau de transport autorisant le transport combiné.....	143
6.2. Résultats obtenus en utilisant les coûts internes.....	145
6.2.1. Configuration à deux hubs	145
6.2.2. Configuration à trois hubs	148
6.2.3. Configuration à quatre hubs	149
6.2.4. Configuration à cinq hubs	149
6.2.5. Configuration à six hubs	150
6.2.6. Configuration à sept hubs.....	154
6.2.7. Configuration à huit hubs.....	154
6.2.8. Configuration à plus de huit hubs	155
6.2.9. Situation existante	155
6.2.10. Ajout d'un hub à la situation existante.....	157
6.2.11. Sensibilité par rapport à la réduction inter-hub	158
6.2.12. Conclusions	158
6.3. Résultats obtenus en internalisant les coûts externes	161
6.3.1. Configuration à six hubs	162
6.3.2. Configuration à sept hubs.....	162

6.3.3. Configuration à huit hubs	163
6.3.5. Conclusions	164
7. Interprétation des résultats	165
8. Conclusions et perspectives	171
Annexe 1	176
1. Coûts des opérations de transport.....	176
1.2. Construction du modèle	176
1.2.1. Les déplacements et mouvements	176
1.2.2. Les unités de chargement	176
1.2.3. Les capacités des moyens de transport.....	177
1.2.4. Taux de chargement des moyens de transport et composition des trains de marchandises	178
1.2.5. Kilométrage et durée de vie	179
1.2.6. Consommation	179
1.2.7. Amortissement	179
1.2.8. Autres coûts et bénéfices brut du rail	180
1.2. Description des couloirs étudiés.....	181
1.3. Acheminement routier sur longue distance	183
1.4. Pré- et post-acheminements	185
1.5. Acheminement ferroviaire.....	186
1.6. Acheminement fluvial	189
1.7. Coûts de triage et de formation de train	192
1.8. Coûts de transbordement	194
1.8.1. Rail-Route	194
1.8.2. Rail-Rail	196
1.8.3. Rail-Voie d'eau	197
1.9. Coûts de chargement-déchargement	197
1.10. Coûts de l'unité de chargement	197
2. Coûts annuels des terminaux rail-route.....	200
3. Economie d'échelle pour les acheminements par train	201
Annexe 2	203
Formulations du problème du p -hub médian tenant compte de l'existence des hubs déjà implantés.	203
Annexe 3	204

Groupe et Chapitre NSTR	204
Annexe 4	205
Configuration à neuf hubs	205
Configuration à dix hubs	205
Annexe 5	207
Configuration à neuf hubs en utilisant les coûts externes	207
Glossaire.....	208
Bibliographie.....	212

Liste des tableaux

Tableau 2.1. Types de terminaux de conteneurs.	23
Tableau 2.2. Types de terminaux existants.	25
Tableau 2.3. Caractéristiques du transport de marchandises pour les différents modes.	28
Tableau 2.4. Coûts des opérations.	34
Tableau 2.5. Technologies de manutention étudiées par Ballis.	35
Tableau 3.1. Classification du réseau de hubs (adapté de O’Kelly et Miller (1994)).	61
Tableau 4.1. Réseau réel	81
Tableau 4.2. Liens virtuels correspondant aux liens réels.	83
Tableau 4.3. Liens virtuels de connections aux nœuds b.	83
Tableau 4.4. Classification des modèles d'affectation (adapté de Ortúzar and Willumsen, 1990).	87
Tableau 4.5. Classification alternative des techniques d'affectation.	90
Tableau 4.6. Temps de calcul pour les affectations.	93
Tableau 4.7. Performance des affectations après calibration.	102
Tableau 4.8. Ecart sur les coûts et les flux en utilisant une agrégation des données au niveau NUTS2 plutôt qu’au niveau NUTS3.	107
Tableau 5.1. Variation de l’erreur d’optimalité en fonction du nombre p de hubs à localiser.	119
Tableau 5.2. Variation de l’erreur sur les coûts en fonction du nombre p de hub à localiser.	119
Tableau 6.1. Répartition modale pour le réseau à sept hubs proposé par Ballis.	156
Tableau 6.2. Flux non nuls captés par les hubs pour le réseau à sept hubs proposé par Ballis et pour le réseau optimal.	157
Tableau 6.3. Comparaison des répartitions modales de la configuration obtenue par l’ajout d’un hub à la configuration proposée par Ballis avec la configuration optimale à huit hubs.	158
Tableau 6.4. Localisations optimales obtenues en fonction du pourcentage de réduction et du nombre de hubs à localisés.	158
Tableau 6.5. Comparaison des répartitions modales entre les coûts internes et les coûts externes.	161
Tableau 7.1. Diminution des émissions de polluant en tonnes par le transfert de la route vers le rail dans le cas de la configuration optimale	167

Tableau A1.1.1. Dimensions des unités de chargement.....	177
Tableau A1.1.2. Poids des unités de chargement.....	177
Tableau A1.1.3. Capacité (en d'unités de chargement) pour chaque type de moyens de transport analysé dans Recordit.....	178
Tableau A1.1.4. Kilométrage annuel des moyens de transport et la durée de vie moyenne, pour les moyens de transport et les équipements.....	179
Tableau A1.1.5. Taux de consommation des différents moyens de transport.....	179
Tableau A1.1.6. Consommation des différents moyens de transport.....	179
Tableau A1.1.7. La description détaillée du couloir Patras-Gothenburg.....	181
Tableau A1.1.8. La description détaillée du couloir Gène-Manchester.....	182
Tableau A1.1.9. La description détaillée du couloir Barcelone-Warsaw.....	182
Tableau A1.1.10. Couloirs étudiés dans Recordit.....	183
Tableau A1.1.11. Exemple de calcul de coût d'un acheminement routier sur longue distance.....	183
Tableau A1.1.12. Coûts moyens d'un acheminement routier sur longue distance.....	184
Tableau A1.1.13. Coûts de pré- et post- acheminements.....	185
Tableau A1.1.14. Temps de conduite et temps supplémentaires pour l'acheminement ferroviaire entre Brindisi-Milan.....	187
Tableau A1.1.15. Coûts moyens d'un acheminement routier sur longue distance.....	188
Tableau A1.1.16. Coûts aux gares de triage étudiées dans Recordit.....	194
Tableau A1.1.17. Coûts de transbordement aux terminaux rail-route étudiés dans Recordit.....	196
Tableau A1.1.18. Coûts de transbordement aux terminaux rail-route étudiés dans Recordit.....	196
Tableau A1.2.1. Coûts annuels des terminaux rail-route.....	200
Tableau A1.3.1. Taux de chargement sur les différentes connexions ferroviaires.....	201
Tableau A1.3.2. Détermination de la réduction de coût possible sur différentes connexions ferroviaires.....	202
Tableau A3.1. Description des groupes de la NST-R.....	204

Liste des figures

Figure 1.1. Transport de marchandises - Évolution du trafic par mode de transport EU-15 (1970-1999).....	2
Figure 2.1. Exemples de chaîne de transport.	10
Figure 2.2. Avantages de la consolidation.	18
Figure 2.3. Consolidation point à point.....	19
Figure 2.4. Consolidation en ligne.....	19
Figure 2.5. Consolidation avec collecte/distribution.....	20
Figure 2.6. Consolidation « hub-and-spoke ».	20
Figure 2.7. Analyse comparative du coût pour des différentes conceptions de terminaux.....	40
Figure 2.8. Evolution du coût moyen de transbordement en fonction du flux.....	43
Figure 3.1. Un réseau de 6 nœuds et 30 paires origine-destination entièrement connecté.	58
Figure 3.2. Un réseau « hub-and-spoke » de 6 nœuds et 30 paires origine-destination.....	59
Figure 3.3. Un réseau « hub-and-spoke » de 3 hubs Les hubs sont localisés aux nœuds A, F et K.....	60
Figure 3.4. Exemple d'un trajet dans un réseau « hub-and-spoke ».	64
Figure 4.1. Modèles à quatre étapes (adapté de Ortúzar and Willumsen, 1990).	75
Figure 4.2. Réseau multimodal	81
Figure 4.3. Réseau virtuel partiel	82
Figure 4.4. Réseau virtuel détaillé au nœud b.....	84
Figure 4.5. Réseau théorique comprenant deux liens.....	88
Figure 4.6. Un arbre de Dijkstra calculé à partir de A.	92
Figure 4.7. Ensemble inexact de chemins entre A et C.	93
Figure 4.8. Réseau routier et lignes de ferry.	98
Figure 4.9. Réseau ferroviaire.....	99
Figure 4.10. Réseau fluvial.	100
Figure 4.11. Région NUTS2 et leur centroïde.	101
Figure 4.12. Affectation multi-flux pour le chapitre 9 et pour des déplacements de plus de 300 km sur le réseau routier du Benelux.....	103
Figure 4.13. Affectation multi-flux pour le chapitre 9 et pour des déplacements de plus de 300 km sur le réseau routier.	104
Figure 4.14. Affectation multi-flux pour le chapitre 9 et pour des déplacements de plus de 300 km sur le réseau ferroviaire.....	105

Figure 4.15. Affectation multi-flux pour le chapitre 9 et pour des déplacements de plus de 300 km sur le réseau fluvial.	106
Figure 5.1. Illustration du phénomène de chaînage	114
Figure 5.2: Ensemble des données AP.	118
Figure 5.3: Données AP réduites à 100 nœuds	118
Figure 5.4. Erreur d’optimalité pour 20 nœuds agrégés.....	119
Figure 5.5. Erreur d’optimalité pour 30 nœuds agrégés.....	119
Figure 5.6. Erreur d’optimalité pour 40 nœuds agrégés.....	119
Figure 5.7. Erreur sur les coûts pour 20 nœuds agrégés	119
Figure 5.8. Erreur sur les coûts pour 30 nœuds agrégés.	119
Figure 5.9. Erreur sur les coûts pour 40 nœuds agrégés.	119
Figure 5.10. Détermination des localisations potentielles.....	121
Figure 5.11. Distribution des EVP en fonction de l’éloignement des terminaux.	122
Figure 5.12. Répartition en milliers de tonnes par groupe de marchandises de la NST-R en 2003.	123
Figure 5.13. Répartition en millions de t.km par groupes de marchandises de la NST-R en 2003.	124
Figure 5.14. Affectation Tout-ou-Rien pour le chapitre 9 et pour des déplacements de plus de 300 km.....	126
Figure 5.15. Affectation multi-flux et multimodale - Wallonie.	127
Figure 5.16. Affectation Tout-ou-Rien sur le réseau routier uniquement – Wallonie	127
Figure 5.17. Globe scindé en zone de même intervalle de latitude et de longitude.	129
Figure 5.18. Ensemble des localisations potentielles.....	130
Figure 5.19. Choix possibles : transport combiné ou transport routier.....	131
Figure 5.20. Aire de marché d’un terminal : cas elliptique.....	132
Figure 5.21. Estimation des paramètres de l’aire de marché d’un terminal.....	134
Figure 5.22. Evolution des rayons des aires de marché en fonction de la distance entre les terminaux.....	135
Figure 5.23. Aire de marché d’un terminal : cas hyperbolique.....	136
Figure 5.24. Aire de marché d’un terminal pour les destinations dans une direction particulière.....	137
Figure 5.25. Aire de marché du terminal T.....	137
Figure 6.1. Quatre chemins entre une paire Origine-Destination	145
Figure 6.2. Chemins sélectionnés entre une paire Origine-Destination.....	145

Figure 6.3. Le mode routier est la solution la moins chère.	146
Figure 6.4. Le transport intermodal est la solution la moins chère.	147
Figure 6.5. Aire de marché lorsque deux hubs sont localisés.	147
Figure 6.6. Aire de marché lorsque trois hubs sont localisés.	148
Figure 6.7. Aire de marché lorsque quatre hubs sont localisés.	149
Figure 6.8. Aire de marché lorsque cinq hubs sont localisés.	150
Figure 6.9. Aire de marché de Paris lorsque le terminal de Namur est fermé.	151
Figure 6.10. Aire de marché de Namur lorsque le terminal de Paris est fermé.	152
Figure 6.11. Aire de marché de Namur et de Paris.	153
Figure 6.12. Réseau ferroviaire inter-hub et aire de marché pour une configuration à six hubs.	153
Figure 6.13. Réseau ferroviaire inter-hub et aire de marché pour une configuration à sept hubs.	154
Figure 6.14. Réseau ferroviaire inter-hub et aire de marché pour une configuration à huit hubs.	155
Figure 6.15. Réseau ferroviaire inter-hub et aire de marché de la configuration à sept hubs proposée par Ballis.	156
Figure 6.16. Réseau ferroviaire inter-hub et aire de marché de la configuration obtenue par l'ajout d'un hub à la configuration proposée par Ballis.	157
Figure 6.17. Evolution des flux transférés de la route vers le rail en fonction du nombre de hubs.	159
Figure 6.18. Evolution du coût total en fonction du nombre de hubs.	160
Figure 6.19. Evolution des flux transbordés aux hubs en fonction du nombre de hubs.	161
Figure 6.20. Réseau ferroviaire inter-hub et aire de marché pour une configuration à six hubs en tenant compte des coûts externes.	162
Figure 6.21. Réseau ferroviaire inter-hub et aire de marché pour une configuration à sept hubs en tenant compte des coûts externes.	163
Figure 6.22. Réseau ferroviaire inter-hub et aire de marché pour une configuration à huit hubs en tenant compte des coûts externes.	164
Figure 7.1. Vue aérienne de la région de Namur.	170
Figure A1.1. Principaux axes de navigation intérieure en Europe.	191
Figure A4.1. Réseau ferroviaire inter-hub et aire de marché pour une configuration à neuf hubs.	205

Figure A4.2. Réseau ferroviaire inter-hub et aire de marché pour une configuration à dix hubs.	206
Figure A5.1. Réseau ferroviaire inter-hub et aire de marché pour une configuration à huit hubs en tenant compte des coûts externes.	207

1. Introduction

1.1. Contexte général

Le monde des transports représente une part importante du secteur économique. Selon les statistiques de la communauté européenne, en 2001, ce secteur représente plus de 10 % du produit intérieur brut de l'Union européenne. En 2006, avec l'élargissement de l'Union, il représente environ 7 % du produit intérieur brut européen et quelque 5 % des emplois dans l'Union européenne.

Cependant, la politique européenne de transport est confrontée à de nombreux défis : l'augmentation continue du transport de marchandises et de passagers, la congestion des routes, la pollution causée par les transports, les problèmes liés à la sécurité et à la qualité de vie.

En 2001, la Commission a présenté un Livre blanc « *La politique européenne des transports à l'horizon 2010 : l'heure des choix* » proposant 60 mesures afin de réviser la politique européenne de transport pour la rendre plus durable et éviter ainsi de graves pertes économiques dues aux embouteillages, à la pollution ou encore aux accidents.

L'examen à mi-parcours du livre blanc sur les transports : « *Pour une Europe en mouvement. Mobilité durable pour notre continent* » reprend l'objectif de garantir une mobilité durable dans une Union élargie où la mobilité doit être considérée à l'échelle continentale. Le transfert modal est toujours un des objectifs prioritaires, comme le souligne Jacques Barrot, Vice-président de la Commission européenne chargé des transports : « ... nous voulons déconnecter la mobilité de ses effets négatifs: il faut pour cela promouvoir l'innovation technologique, le transfert modal vers des modes de transport les moins polluants et économes en énergie, notamment sur les longues distances ... ».

L'objectif général de cette politique est d'intégrer les transports dans le développement durable. Rappelons que le développement durable a été défini en 1987, dans un rapport de la commission mondiale de l'Organisation des Nations Unies sur l'Environnement et le Développement, comme une « *forme de progrès qui permette de satisfaire les besoins des générations actuelles sans compromettre la capacité des générations futures à satisfaire les leurs* ». Pour être durable, les transports doivent être envisagés dans leurs trois dimensions : environnementale, économique et sociale. Ils doivent tendre à réduire leur impact environnemental, à devenir accessibles en toute sécurité au plus grand nombre et être

compatibles avec les objectifs et contraintes économiques de tous ses acteurs, les pouvoirs publics et les entreprises notamment.

A titre d'illustration, dans l'Union européenne des quinze, l'évolution du trafic de marchandises sur trente années, de 1970 à 1999, est représentée à la Figure 1.1. Le cabotage maritime, ou le maritime courte distance, et la route restent plus que jamais les modes dominants. De plus, l'accroissement des flux de transport a été presque entièrement absorbé par le transport routier.

En ne considérant que les transports routiers, ferroviaires et fluviaux, en 2000, le trafic routier assume plus de 77,6 % du transport de marchandises et atteint, en 2005, 79,3 % dans l'Union européenne des quinze. Dans l'Union des vingt-cinq, le transport routier représente, en 2005, 76,5 %. En ce qui concerne le transport des marchandises, l'Union européenne doit faire face à un déséquilibre croissant des modes de transport et à une prédominance du transport routier.

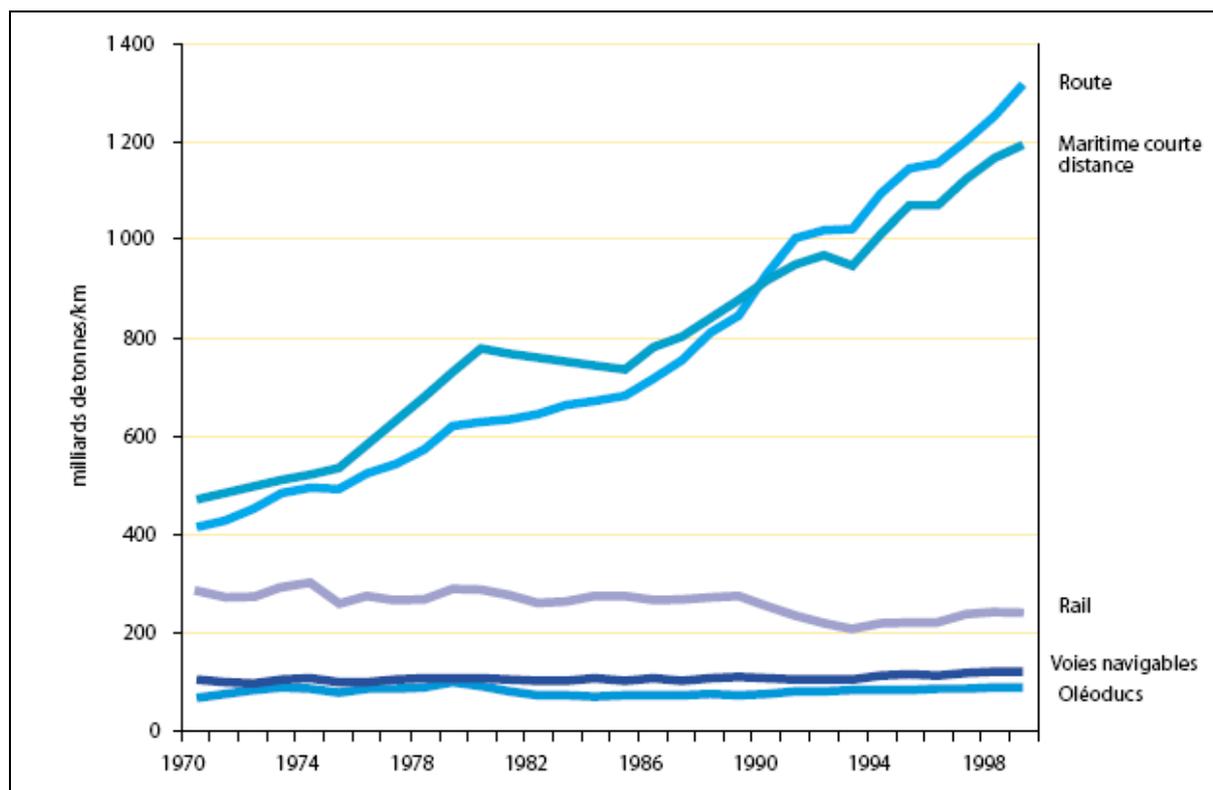


Figure 1.1. Transport de marchandises - Évolution du trafic par mode de transport EU-15 (1970-1999).
Source : Livre Blanc 2001

Le succès grandissant de la route a comme conséquence une aggravation de la congestion et des nuisances environnementales ainsi qu'une augmentation du nombre d'accidents. C'est ce qui a poussé la politique européenne des transports à établir plusieurs objectifs dont celui de

rééquilibrer les parts de marché des différents modes de transport, notamment en développant le transport intermodal. Celui-ci consiste à acheminer une marchandise en utilisant deux modes de transport différents ou plus mais dans la même unité de chargement ou le même véhicule routier.

Pour promouvoir le transport intermodal, la Commission européenne a lancé le programme Marco Polo (de 2003 à 2006). Ce programme vise 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. Cela représente un objectif, selon la Commission européenne, de 12 milliards de tonnes-km par an.

1.2. Problématique de recherche

La problématique des transports intermodaux est étudiée tout au long de cette thèse qui se concentre essentiellement sur le transport 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. Ce type de transport repose sur la succession 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 à nouveau par la route et deux transferts des unités de transport intermodal à chaque changement de mode de transport. Le transport rail-route 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 unités de transport intermodal d'un mode de transport à l'autre. Les besoins d'infrastructures spécifiques au transport rail-route sont essentiellement présents au niveau des terminaux de transbordement. Un terminal est un lieu équipé pour le transbordement et le stockage des unités de transport intermodal.

Dans le but de mieux cerner le problème de localisation des terminaux, les systèmes de transport intermodaux sont décrits. Les différentes caractéristiques des terminaux et des réseaux dans lesquels ils peuvent être insérés sont analysés pour permettre de proposer une typologie des terminaux. Parmi les types identifiés, les terminaux de conteneurs intégrés dans un réseau de type « *hub-and-spoke* » sont étudiés. Le coût de transport étant un critère déterminant dans le choix d'un mode de transport, une estimation des coûts des différentes opérations de transport est donnée.

Puisque le transport rail-route utilise les réseaux routiers et ferroviaires et nécessite les infrastructures de transbordement présentes aux terminaux, sa compétitivité dépend non seulement de ses coûts mais aussi de la localisation de ces terminaux. Après une courte introduction sur les modèles de localisation, les modèles classiques de localisation basés sur la demande sont présentés. D'autres méthodes de localisation nécessitent de connaître les flux. En effet, il peut être avantageux de consolider les flux à certains nœuds appelés « *hubs* ». Des réseaux particuliers appelés réseaux « *hub-and-spoke* » sont ensuite décrits et classifiés. La recherche d'une configuration optimale de ce type de réseau conduit à un problème localisation-allocation, car il faut déterminer simultanément la localisation des « *hubs* » et l'allocation des utilisateurs potentiels à ces derniers afin d'augmenter l'efficacité du système de transport. Ce problème nécessite la définition d'un ensemble de localisations potentielles ainsi que les matrices de coûts de transport et de flux de conteneurs entre celles-ci.

Bien que le cabotage maritime soit un mode de transport important dans l'Union européenne, notre étude se porte sur les transports ferroviaires, routiers, fluviaux ainsi que sur le transport combiné. Les méthodes étudiées sont destinées à modéliser les flux de transport de marchandises sur un réseau comprenant ces différents modes : routes, chemins de fer et voies d'eau, c'est-à-dire un réseau multi-modal, sur le territoire européen. La modélisation est effectuée en utilisant la technique dite du « réseau virtuel » qui permet de prendre en compte la multi-modalité et l'inter-modalité lors de la phase d'affectation du trafic. L'affectation consiste en la répartition du trafic sur un réseau, considérant la demande de transport entre les différentes origines et destinations ainsi que l'offre déterminée par les coûts de transport associés à l'infrastructure disponible. Comme entrées, l'affectation du trafic requiert donc une description complète du système de transport considéré et une matrice décrivant les quantités à transporter entre les différentes zones.

1.3. Aspects méthodologiques

Les problèmes de localisation des hubs nécessitent un ensemble de localisations potentielles, ainsi que les matrices des flux et des coûts entre ces localisations. La localisation des hubs sur un réseau réel, comme le réseau européen, est un problème complexe, le nombre de localisations potentielles devenant rapidement trop important pour que ce problème puisse être résolu par une méthode exacte. A l'exception des travaux d'Arnold et Thomas (2002, 2004) ou ceux de Macharis (2004), peu de travaux, se sont penchés sur la détermination de localisations potentielles qui sont souvent choisies parmi les nœuds d'origine et de destination de transport. 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, car l'une des principales raisons d'être d'un hub est de consolider les flux. C'est pourquoi une approche innovante basée sur les flux de transport est proposée et constitue notre principale contribution. Elle comprend également des critères de sélection qui permettent de réduire le nombre de localisations potentielles.

Les localisations potentielles ne sont pas les seules entrées au problème de localisation qui nécessite également de fixer le nombre de hubs à implanter ainsi que d'évaluer les flux de marchandises et les coûts de transport entre chaque paire de localisations potentielles. Les flux de conteneurs sont évalués en tenant compte des demandes liées aux aires de marché de chaque localisation potentielle. En ce qui concerne les coûts de transport entre chaque paire de localisations potentielles, la détermination de la longueur du chemin le plus court entre chacune de ces paires permet d'estimer les coûts de transport.

Ces différentes entrées permettent alors de résoudre le problème de localisation pour un nombre fixé de hubs. Le problème est enrichi d'une procédure itérative qui permet d'ajuster les coûts de transbordement en fonction des flux captés par les différents terminaux. Cependant, notre approche dépasse l'étude de la localisation des hubs. Elle permet notamment de prendre en compte des variations de l'offre de transport en internalisant ou non les coûts externes, par exemple. De plus, partant d'une configuration existante, elle permet la détermination de la localisation optimale de hubs supplémentaires.

La méthodologie proposée permet de minimiser les coûts totaux mais 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 conséquences sur les flux des différents modes de transport.

1.4. Applications

Une situation de référence pour le réseau de transport européen, dans laquelle le transport de conteneurs peut s'effectuer par route, chemin de fer ou voie d'eau, mais où le transport intermodal n'est pas autorisé dans la modélisation, est élaborée.

Ensuite, le problème de localisation de hubs de conteneurs est considéré dans le cas d'un réseau rail-route où les pré- et post-acheminements s'effectuent par la route et les liaisons inter-hubs sont des liaisons ferroviaires. Les localisations optimales obtenues, ou hubs, sont ensuite introduites dans le réseau de référence. Sur base des localisations optimales obtenues, un réseau « *hub-and-spoke* » est créé où un transbordement rail-route est autorisé aux hubs.

Une nouvelle affectation, autorisant cette fois le transport intermodal, est alors effectuée. Celle-ci permet de calculer les coûts de transbordement propres à chaque hub en fonctions des flux qui y sont transbordés. Une procédure itérative est utilisée pour tenir compte de la relation entre les coûts de transbordement et le nombre d'unités de transport intermodal transbordés. Les résultats obtenus, parmi lesquels les coûts totaux de transport ou la répartition modale des flux, sont ensuite comparés au scénario de référence afin de mesurer l'impact de différents scénarios. Pour terminer, le même problème est étudié en tenant compte de l'internalisation des coûts externes.

2. Terminaux

Ce chapitre débute par une description des systèmes de transports intermodaux dans le but de mieux cerner le problème de localisation des terminaux. Les différentes caractéristiques de ces terminaux et des réseaux dans lesquels ils peuvent être insérés sont également analysés pour permettre de proposer une typologie des terminaux. Parmi les catégories identifiées, les terminaux de consolidation intégrés dans un réseau de type « hub-and-spoke » sont étudiés. Le coût généralisé de transport étant un critère déterminant dans le choix d'un mode de transport, ce chapitre se termine par une estimation des coûts des différentes opérations de transport et par une évaluation des économies d'échelle envisageables.

Introduction

La définition de terminal est liée à celle du transport intermodal. Afin de clarifier les différents termes employés, ce chapitre débute par une terminologie des transports intermodaux. Il continue ensuite par l'organisation de la chaîne de transport combiné, ses avantages, les barrières à son développement et les améliorations possibles pour augmenter son efficacité. Dans le but d'identifier les caractéristiques des terminaux que nous cherchons à localiser, différentes typologies de terminaux et de réseaux de consolidation sont analysées.

Pour effectuer la comparaison des différents modes de transport, il est nécessaire de considérer, en plus des coûts de transport, les autres coûts de la chaîne logistique totale. C'est pourquoi, avant de déterminer les fonctions de coûts, le concept de la chaîne logistique totale et des opérations sont explicités. Les différents coûts des opérations de transport sont ensuite estimés. Les opérations de transport suivantes sont considérées: l'acheminement routier sur longue distance, l'acheminement ferroviaire et fluvial, les pré- et post-acheminement routier, le triage et la formation de train, les transbordements rail-route, rail-rail et rail-voie d'eau, le chargement, le déchargement, et les coûts liés à l'unité de chargement. Les coûts de fonctionnement des terminaux sont également estimés.

Ce chapitre se termine par une présentation des économies d'échelle pouvant être réalisées pour les acheminements ferroviaires et fluviaux ainsi que pour les transbordements. Il faut toutefois savoir que, pour promouvoir son développement, le transport combiné bénéficie de subventions. C'est pourquoi, quelques subventions sont également présentées.

2.1. Terminologie du transport intermodal

Les termes : « intermodal », « combiné » et « multimodal », variant d'un document à l'autre, nous utiliserons le cadre terminologique défini par la Conférence Européenne des Ministres des Transports (C.E.M.T., 1998).

Les transports multimodaux et intermodaux acheminent les marchandises en empruntant deux modes de transport différents ou plus. La particularité du transport intermodal est que les marchandises passent d'un mode à un autre sans changer de contenant. Les contenants spécifiques du transport intermodal sont principalement les conteneurs, les caisses mobiles et les semi-remorques. Le terme conteneur est un terme générique employé pour une boîte conçue pour le transport de marchandises, suffisamment solide pour un usage répété, généralement empilable et dotée d'éléments permettant le transfert entre modes. La caisse

mobile est une unité conçue pour le transport de marchandises, adaptée de manière optimale en fonction des dimensions des véhicules routiers et équipée d'éléments de préhension permettant le transbordement entre modes, habituellement rail-route.

Le transport combiné est un transport intermodal dont les parcours principaux, en Europe, s'effectuent par rail, voies navigables ou mer et dont les parcours initiaux et/ou terminaux, par route, sont les plus courts possible. Le transport combiné peut mettre à contribution l'ensemble des modes existants. Lorsque la partie intermédiaire recourt au transport ferroviaire, on parle également de ferroutage. Le ferroutage reste l'activité prédominante dans la mesure où il s'appuie sur les modes de transport les plus utilisés dans l'Union européenne.

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 combiné, 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.

Le transport combiné repose sur la succession d'opérations : un pré-acheminement par la route, une partie intermédiaire ferroviaire, fluviale ou maritime, un post-acheminement à nouveau par la route et deux transferts des marchandises à chaque changement de modes de transport. Le transport combiné utilise donc les infrastructures des différents modes de transport et nécessite des infrastructures particulières, aux nœuds intermodaux, dans lesquelles sont réalisées les opérations de transbordement des marchandises d'un mode de transport à l'autre. Les besoins d'infrastructures spécifiques au transport combiné sont essentiellement présents au niveau des terminaux de transbordement. Un terminal est un lieu équipé pour le transbordement et le stockage des unités de transport intermodal (U.T.I.). Le terminal est un lieu d'émission et de réception des flux de marchandises.

2.2. Organisation de la chaîne de transport combiné

Le transport combiné est intrinsèquement complexe. Il est un mode d'acheminement composé d'un enchaînement d'opérations. Les deux exemples de chaîne de transport de la Figure 2.1. illustrent des situations différentes. Ils sont non limitatifs puisque toutes les combinaisons d'enchaînement sont possibles, le transport combiné peut être organisé de multiples façons.

Le premier exemple est un cas simple routier-ferroviaire-routier à vocation intracontinentale. Le second illustre une liaison à vocation intercontinentale dans laquelle intervient le transport maritime.

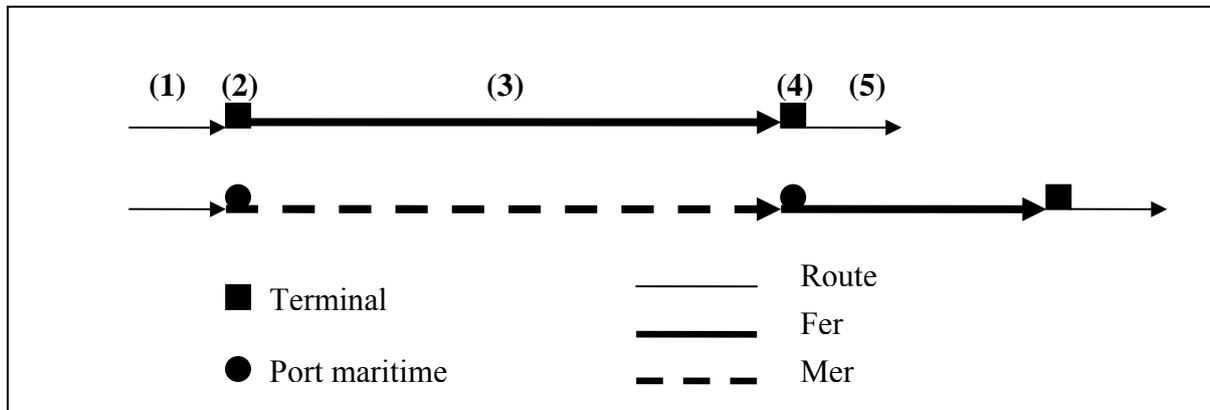


Figure 2.1. Exemples de chaîne de transport.

Tout service de transport combiné comprend au moins cinq étapes :

- (1) enlèvement par voie routière chez le client expéditeur (ramassage ou pré-acheminement) ;
- (2) transbordement dans le terminal de départ ;
- (3) trajet central effectué par la voie ferroviaire, fluviale ou maritime à grande distance (parcours principal) ;
- (4) transbordement dans le terminal d'arrivée ;
- (5) livraison par voie routière chez le client destinataire (livraison ou post-acheminement).

Nous nous intéressons plus particulièrement au transport combiné rail-route tout en sachant que celui-ci peut se trouver en amont ou en aval d'un transport maritime et donc au contact d'opérateurs maritimes et portuaires.

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 des différentes étapes ne présente aucune défaillance. La multiplicité des intervenants rend bien évidemment le résultat global de cette prestation incertain. De plus, le résultat final du transport combiné dépendra fortement de la qualité des zones où les marchandises sont transférées d'un mode à l'autre et de la capacité des multiples intervenants issus du monde routier, ferroviaire, fluvial à se coordonner. Or, les acteurs qui doivent à cette occasion collaborer, ont plutôt l'habitude de se percevoir comme des concurrents.

2.2.1. Avantages

Le transport routier devrait être avant tout un transport de proximité, le transport combiné ne peut sur de petites distances être un substitut crédible. Cependant, le transfert d'une partie du transport à longue distance de la route vers le rail ou le fluvial peut être une solution attractive, et ce d'autant que le transport combiné possède des qualités propres. Selon l'Union Internationale des sociétés de transport combiné Rail-Route (U.I.R.R.), les principaux avantages du transport combiné peuvent être résumés comme suit :

Effets économiques attendus du transport combiné

Réduction des frais d'infrastructure :

- délestage du réseau routier (décongestion des routes) ;
- meilleure rentabilité du rail ;
- meilleure répartition des volumes entre les différents modes de transport et donc meilleur respect du principe du marché pertinent ;
- combinaison des avantages propres à la route (flexibilité) et au rail (plus économique, transport massif sur de longues distances).

Réduction des coûts externes :

- sécurité routière ;
- pollution de l'air ;
- bruit ;
- environnement ;
- consommation d'énergie et de matières premières.

Il faut toutefois nuancer certains de ces avantages. En effet, le transport combiné requiert qu'une partie des opérations de transport, les pré- et post-acheminements, soient effectuées par la route. Ces deux opérations ont plutôt lieu en zone urbaine, où des problèmes demeureront. Or, la congestion et la pollution de l'atmosphère est justement une question particulièrement sensible dans les agglomérations. Il est donc essentiel de réduire autant que possible le parcours routier.

De même, le transport combiné améliore la sécurité routière en réduisant le nombre d'accidents impliquant des poids lourds. De plus, le transfert de transport de matières dangereuses sur le rail, par exemple, serait souhaitable, car il s'agit d'un moyen de transport relativement sûr. Cependant, un accident aurait des conséquences accrues, du fait de la

massification des marchandises. Il est donc nécessaire d'éviter, si possible, le passage de tels produits dans les grandes agglomérations.

Outre ces effets économiques globaux, l'U.I.R.R. reprend également les avantages pour les clients des transports combinés :

Bénéfices réalisables pour les clients :

- compétitivité ;
- baisse au niveau des frais de personnel : économies réalisées sur les coûts variables, réduction du personnel (conducteurs, heures de conduite, travail de nuit).
- pétrole ;
- usure du matériel (carburant, pneus, maintenance), allongement de la durée de vie des camions et diminution du parc de véhicules si la société investit dans du matériel de transports combinés approprié, réduction du parc automobile ;
- diminution des coûts variables pour le carburant, les pneus et les réparations ;
- exonération, réduction ou remboursement des taxes automobiles, donc économies relatives aux taxes de la circulation.

Les bénéfices indirects suivants peuvent encore être ajoutés :

- interdiction de conduire : pas ou moins d'autorisations de transport routier nécessaires, parcours en train reconnu comme temps de repos du conducteur ;
- réglementation sur les heures de travail : meilleure application ou contrôle concernant la législation du travail ;
- plus grandes charges transportables lors du transit transalpin ;
- exemptions des interdictions de circuler les dimanches et jours fériés ;
- simplification des formalités douanières accomplies dans les terminaux.

Insistons également sur l'amélioration des conditions de travail des chauffeurs routiers et la meilleure application de la réglementation sur les heures de travail. Ainsi, les transports de longue distance, pénibles, en raison de leur durée sont moins nombreux. Une part de l'activité consiste à acheminer des marchandises sur des distances relativement courtes. De plus, si le transport combiné est géré efficacement et que les flux de marchandises entre les terminaux représentent un volume suffisamment important, ces flux peuvent être consolidés pour avoir des trains complets sur grandes distances. De la consolidation des flux découlerait une

réduction des coûts et donc des prix des prestations, permettant au transport combiné de gagner en compétitivité.

Certains des avantages cités sont en fait des services logistiques supplémentaires, comme, par exemple, allier les fonctions de transport et d'entreposage, programmer les livraisons, effectuer des stockages intermédiaires, ... Le transport combiné permet aussi une meilleure répartition des volumes entre les différents modes de transport, l'exemption des interdictions de circuler (dimanches, jours fériés, ...), la simplification des formalités douanières accomplies dans les terminaux et, par conséquent, un franchissement des frontières facilité.

Ces avantages pour le ferroutage peuvent facilement être transposés aux autres types de transport combiné. De plus, l'U.I.R.R. reprend les avantages par rapport à la situation actuelle. Or, la demande de transport devrait continuer à croître, et ce surplus de demande ne saurait être assuré par le transport routier uniquement. Dans ce cas, le transport combiné sera une nécessité.

2.2.2. Barrières au développement

L'efficacité du transport combiné repose sur la coopération de nombreux intervenants : le client, l'organisateur du transport combiné de bout en bout (filiale de compagnie ferroviaire ou opérateur de ferroutage), le gestionnaire du réseau ferré (réservation de sillons), la compagnie ferroviaire (traction de wagons), les transporteurs fluviaux, le gestionnaire des voies navigables, les ports, les compagnies maritimes, les transporteurs routiers, le gestionnaire des voies routières ainsi que les intermédiaires. Pour pouvoir acheminer les marchandises à destination dans le délai imparti, le transport combiné nécessite une gestion et un contrôle efficaces de toute la chaîne de transport de porte à porte. Il rencontre une série d'obstacles qui peuvent être de différents ordres : techniques, économiques ou financiers. Un certain nombre d'obstacles s'opposant à sa généralisation ont été recensés en se référant aux informations disponibles au Comité national routier français (C.N.R.), à la C.E.M.T., à l'U.I.R.R. et à l'U.E.

Du point de vue financier, le transport combiné est une option valable pour les transports sur longue distance en raison des difficultés liées au transbordement. Tout changement de mode au sein d'un parcours équivaut à un changement de système au lieu d'un simple transbordement technique. Il en résulte :

- des coûts qui peuvent être plus élevés ;

- des parcours plus longs ;
- des délais moins fiables (difficulté à respecter les horaires prévus) ;
- une certaine rigidité (horaires de départ et d'arrivée ainsi que leur régularité) ;
- des restrictions sur le type de marchandises ;
- un risque d'endommagement de la cargaison dû à des manutentions supplémentaires ;
- des procédures administratives plus complexes.

Ces obstacles se trouvent renforcés par des obstacles de nature technique ou juridique. Un manque d'interopérabilité est constaté à différents niveaux :

1) Infrastructure et matériel de transport

On remarque l'absence d'un réseau cohérent de modes et d'interconnexions avec un accès inadéquat par rail, route, voie fluviale ou maritime aux points de transfert existants. Pour certains couloirs européens, des tronçons d'infrastructure manquent (« missing links »). D'autres obstacles, comme notamment différents systèmes de signalisation ferroviaire, des différences d'écart de voies ferrées, différents types de courant électrique et divers gabarits de chargement ainsi que des hauteurs différentes de ponts sur les voies fluviales européennes. Cette diversité des spécifications techniques concerne aussi les unités de chargement. Celles-ci peuvent avoir des dimensions variables d'un mode de transport à l'autre, d'un pays à l'autre, voire selon le type de marchandises. L'incompatibilité des matériels de transport utilisés pour le trafic routier, ferroviaire, fluvial et maritime à courte distance fait croître les coûts de transfert et de manutention et exige des techniques de transbordement complexes. Le recours à des unités de chargement spécialisées augmente également la fréquence du retour à vide de ces unités.

2) Opérations et utilisation de l'infrastructure

Les opérateurs ont souvent tendance à se cantonner à un seul mode de transport et à ignorer les options que pourraient proposer d'autres modes. L'inégalité du temps de travail dans les différents modes et l'absence d'harmonisation des horaires entre les différents modes sont d'autres sources de coûts pour le transport intermodal. En tant qu'interfaces entre les modes, les terminaux ne peuvent pas toujours s'adapter aux horaires des trains et des navires qui sont exploités 24 heures sur 24.

3) Services et réglementations

L'absence d'un système harmonisé pour la communication électronique entre les différents partenaires de la chaîne intermodale, la « non-traçabilité » de la cargaison, empêche une planification adéquate des opérations. En l'absence de systèmes de suivi et de repérage des envois couvrant la totalité du parcours effectué selon les différents modes, il est difficile de détecter rapidement les problèmes et les erreurs d'acheminement. Les documents de transport diffèrent suivant les modes, notamment pour le transport maritime, ferroviaire, routier ou aérien. Les règles régissant les opérations de transit douanier diffèrent également en fonction du mode.

De plus, le développement du transport combiné entraînerait la diminution du trafic routier et représenterait une perte de revenu importante pour les entreprises pétrolières, routières, ... qui auraient tout intérêt à freiner tout développement rapide du transport combiné, ce qui constituerait un nouvel obstacle.

2.2.3. Amélioration de l'efficacité du transport combiné.

En raison des distances concernées, le territoire européen serait parfaitement adapté au transport combiné. La Commission européenne propose une série de mesures visant à l'amélioration du transport intermodal. Au niveau du réseau d'infrastructures, il s'agit d'établir une coordination intermodale cohérente, d'harmoniser rapidement le réseau ferré européen et les normes des unités de chargement quant à leurs dimensions, leurs poids, et les autres caractéristiques qui font obstacle à un transbordement facilité. Elle propose la séparation des activités de gestion des infrastructures et de leur exploitation, le but étant de créer un réseau ouvert aux nouveaux opérateurs de transport combiné. C'est aussi l'une des composantes du projet des « freeways », qui relie les réseaux nationaux et tentent d'éliminer toute forme de frontière.

Des systèmes informatique et de télécommunication amélioreraient l'information disponible pour l'utilisateur du transport combiné : possibilité de se renseigner sur les prestations offertes par le transport combiné, de choisir des formules personnalisées et d'être informé sur la situation de sa cargaison. De plus, la gestion des terminaux et nœuds de transfert serait plus performante, car la planification des opérations de transbordement limiterait les coûts.

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 est économique. La substitution du service routier par le service ferroviaire intermodal dépend donc principalement de la longueur du parcours. Bien que le transport combiné peut aussi être pertinent ou obligatoire lorsqu'il faut franchir un obstacle naturel majeur (Manche, Alpes...).

Un transbordement efficace est une nécessité. La réalisation de nouvelles plate-formes multimodales 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 plate-formes doivent utiliser effectivement trois modes sur le site ou à défaut présenter un fort potentiel de transport combiné entre deux modes majeurs. Elles 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 un point donné 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.

Actuellement, un système commun de gestion du trafic ferroviaire européen (ERTMS : European Rail Traffic Management System) vise à standardiser les multiples systèmes de signalisation qui coexistent. Sa mise en place permettra d'améliorer la circulation des passagers et des marchandises transfrontaliers ainsi que la sécurité et la fiabilité du transport ferroviaire. L'accès facilité au réseau transeuropéen permettra d'accroître les performances et de diminuer les coûts. Il présente aujourd'hui deux composantes de base :

- le **GSM-R** : Il est fondé sur le standard GSM de téléphonie mobile mais utilise des fréquences différentes propres au rail, ainsi que certaines fonctions avancées. Il permet au conducteur de dialoguer avec les centres de régulation et il peut être utilisé pour transmettre au train la vitesse maximale permise. Le déploiement du GSM-R en Europe est déjà (2005) bien amorcé. Les réseaux allemands, suédois ou néerlandais sont presque totalement équipés.
- l'**ETCS** (European Train Control System) : il s'agit du système européen de contrôle des trains, qui permet non seulement de transmettre au conducteur les informations relatives à la vitesse autorisée, mais aussi de contrôler en permanence le respect des indications. Un ordinateur embarqué compare, en effet, la vitesse du train avec la

vitesse maximale permise ; il freine, par exemple, automatiquement le train en cas de dépassement de celle-ci.

Un troisième « composant » relatif à la gestion du trafic devrait s'ajouter à ces deux premières composantes.

Au-delà du seul système ERTMS, l'Agence Ferroviaire Européenne a également pour mandat de travailler sur les spécifications d'interopérabilité (en matière d'infrastructures, de matériels roulants ou de types d'électrification, par exemple).

2.3. Typologie des réseaux de consolidation

La consolidation consiste à grouper les marchandises à transporter entre différentes origines et/ou destinations dans des unités de transport communes pendant la majeure partie du trajet. Dans le cas de consolidation complexe, il y a des nœuds intermédiaires où les marchandises sont triées et/ou rassemblées. Dans le cadre du ferroulage, 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.

Les avantages de la consolidation sont :

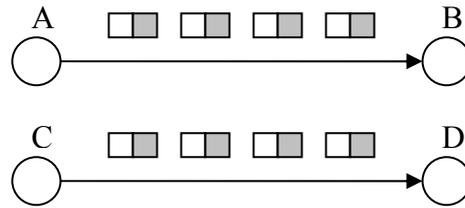
- un taux de chargement plus élevé des unités de transport, ce qui conduit à une réduction du coût du transport principal (fluvial ou ferroviaire) ;
- une plus grande fréquence de liaison ;
- un grand nombre de destinations à partir de chaque terminal de départ.

Ces avantages, illustrés par la Figure 2.2., améliorent la qualité du service intermodal ou permettent des réductions d'échelle en employant des trains ou des péniches plus grandes.

Les désavantages de la consolidation sont :

- les transbordements supplémentaires qui augmentent les coûts totaux et le temps de transport ;
- les détours pour la plupart des trajets.

Transport direct entre A et B



Consolidation

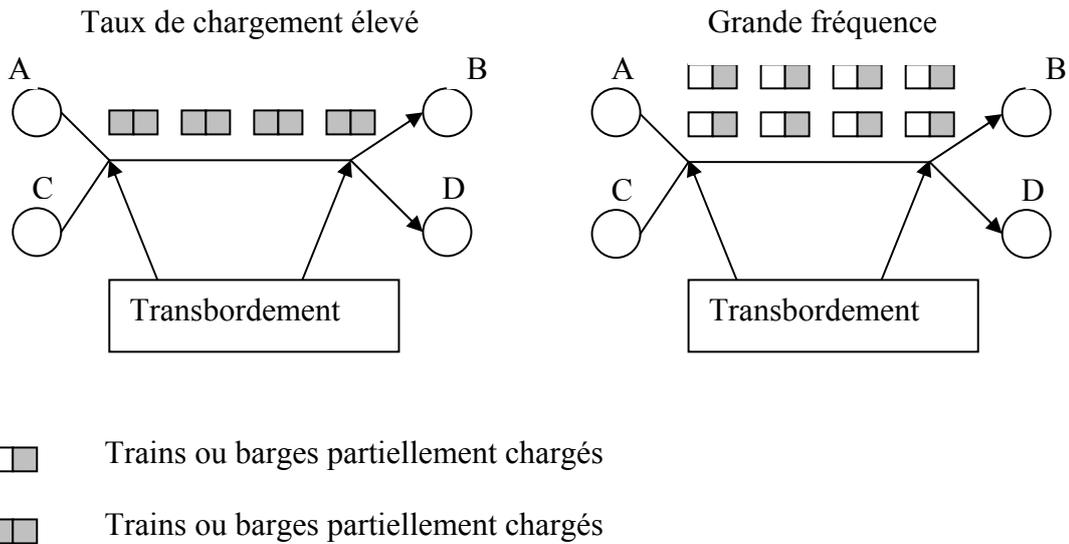


Figure 2.2. Avantages de la consolidation.

Source : TERMINET

Selon TERMINET (1997 a-c et 1996) et Bontekoning, (2002), il y a quatre types de consolidation des flux. La consolidation « point à point », Figure 2.3., est la plus commune, les petits flux sont regroupés et transportés sur une grande partie de leur trajet par rail. Nous parlons ici de petits flux lorsque le volume entre deux terminaux n'est pas suffisant pour avoir une liaison quotidienne viable entre ces deux terminaux.

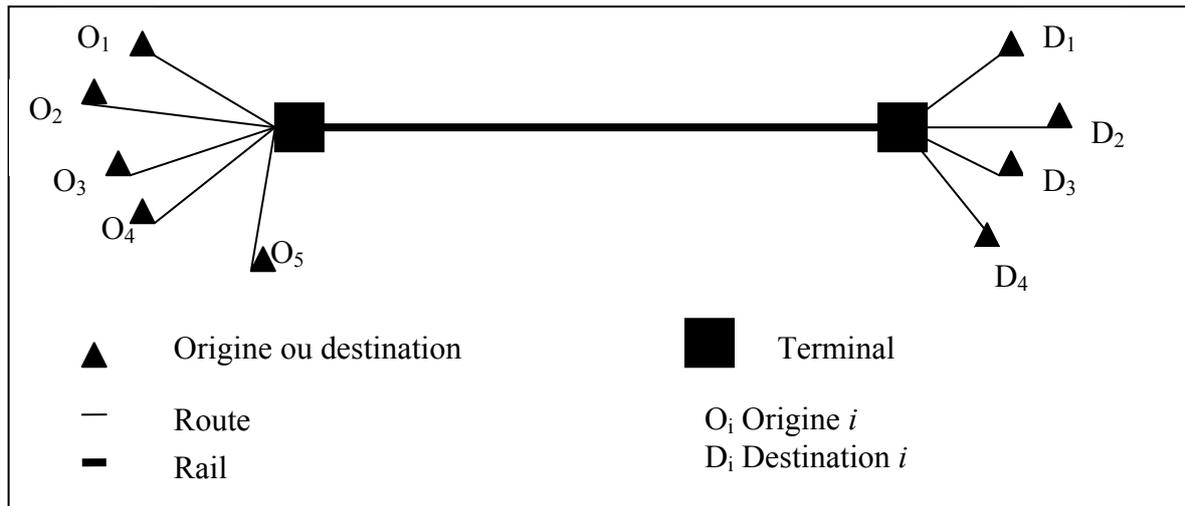


Figure 2.3. Consolidation point à point.

Il existe également des consolidations complexes. La consolidation « *en ligne* », Figure 2.4., inclut des arrêts intermédiaires pour le chargement et le déchargement. Les services offerts sont réguliers et permettent l'intégration aux terminaux de demandes plus petites. Dans le cas rail-route, habituellement, l'arrangement des trains repose sur une composition fixe des wagons, qui sont chargés et déchargés pendant l'arrêt. Certains trains désaccouplent des wagons à chaque arrêt terminal.

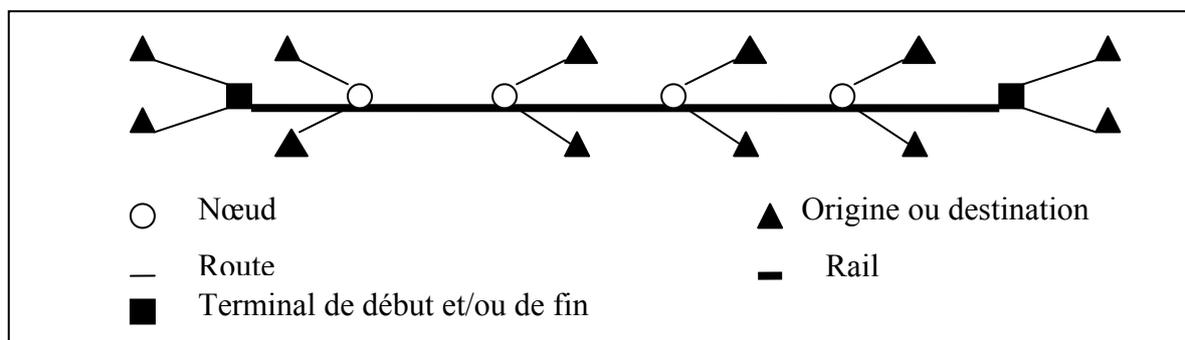


Figure 2.4. Consolidation en ligne.

Le but de la consolidation avec « *collecte-distribution* », Figure 2.5., est de lier des terminaux d'une région à un nœud de collecte où les marchandises regroupées sont transportées par de plus grands moyens de transport. Ensuite, les flux sont répartis en plus petites expéditions à un nœud de distribution et localement distribués.

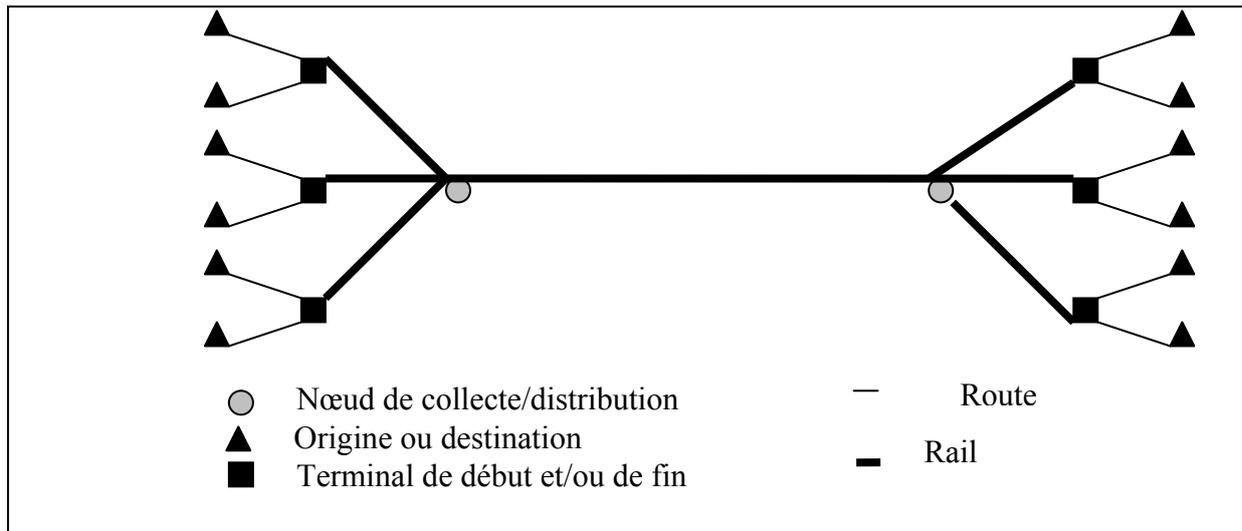


Figure 2.5. Consolidation avec collecte/distribution.

La consolidation « *hub-and-spoke* », Figure 2.6., comporte un point nodal (ou « hub ») où les trains de différentes origines se réunissent et sont façonnés en des trains pour différentes destinations. Avec un tel système, il est possible d'offrir plus de raccords entre les terminaux.

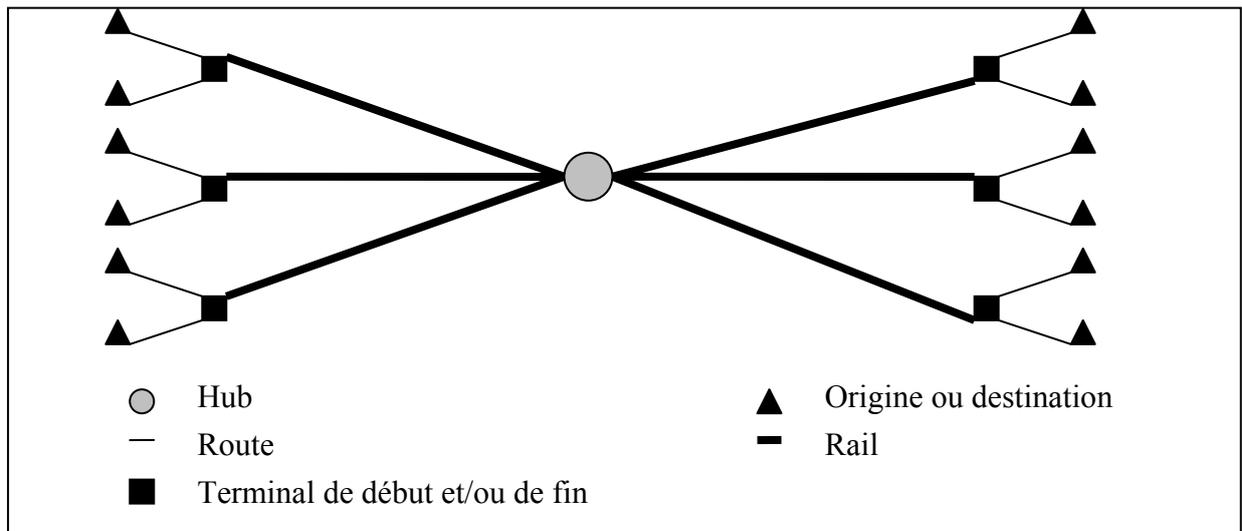


Figure 2.6. Consolidation « *hub-and-spoke* ».

Cette typologie des réseaux de consolidation reprend quatre catégories. Celle-ci est très semblable aux différents types de consolidation identifiés dans Ballis *et al.* (2002). Bien que ces typologies soient reprises dans la majorité de la littérature existante, celles-ci ne couvrent pas l'ensemble des réseaux de consolidation européens qui combinent souvent des caractéristiques de plusieurs catégories.

2.4. Typologie des terminaux

Il est important de donner les principales caractéristiques des terminaux en Europe puisqu'ils ne servent pas tous le même marché avec le même ensemble de services.

Un certain nombre de documents et d'études se sont attelés à définir une typologie des terminaux en général. Parmi ces études, nous pouvons citer les études suivantes :

- Wiegmans (2003) qui dans sa thèse de doctorat reprend notamment les travaux suivants :
 - Bontekoning et E. Kreutzberger (2001) ;
 - Wiegmans, Masurel et Peter Nijkamp (1998) ;
- Ballis dans son étude pour le projet de la Communauté Européenne : « *Technologies innovatrices pour les points intermodaux de transfert* » (2002).

D'autres études fournissent une typologie des terminaux de conteneurs. C'est le cas notamment de

- SIMET « *Optimum Terminals for Intermodal Transport* » (1995) ;
- Le rapport de Daubresse « *Schéma national des plates-formes multimodales* » (1997).

2.4.1. Typologie des terminaux sur base de leurs principales caractéristiques

Dans Wiegmans (2003), les terminaux sont groupés suivant six caractéristiques principales :

1. le volume maximum qu'un terminal peut manipuler par an. Il peut être exprimé en tonnes/an, TEU/an, conteneurs/an, mouvements/an, ... ou nombre de camions/heure, nombre de camions/jour, nombre de trains/ jour, ...
2. le nombre de modes de transport disponibles : le nombre de voies ferrées, le nombre de bandes de circulation, la longueur des trains qui peuvent être manipulés, la longueur et le nombre de quais, la longueur et le nombre des voies, le tirant d'eau, le tirant d'air, ...
3. les heures de fonctionnement du terminal. Par exemple, les heures d'ouverture par semaine, les heures d'ouverture par an, les heures d'ouverture par jour, ...
4. la taille du terminal. La surface du terminal est donnée en hectares mais le terminal est divisé en différentes zones : zone de transbordement, zone de stockage (à court terme et à long terme), secteur ferroviaire, aire de stationnement, secteur routier et les bâtiments, les aires de service, ...

5. le nombre d'unités chargées et les moyens de transport : conteneurs (20-30-40-45 pieds), caisses mobiles, camions, semi-remorques, péniches, locomotives, wagons, ...
6. le nombre et le type de matériels de manutention disponibles sur le terminal : grues (envergures, hauteur de levages, ...), grues portiques¹, « reach stackers² », ...

Ces caractéristiques sont employées pour décrire les types de terminaux de conteneurs actuellement en service. Elles conduisent aux catégories suivantes :

1. *XXL ou mainport terminal*

Ils ont habituellement doté de connexions vers le monde entier par voie maritime, par rail, par route et par voie fluviale à grand gabarits. Ce type de terminal peut être caractérisé par des coûts initiaux bas, des volumes élevés, l'utilisation de capacité élevée. En général, un mainport sera un port maritime important ou un grand aéroport avec des connexions mondiales. Exemple : port d'Anvers

2. *XL ou terminal européen international*

Ils sont caractérisés par 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. Exemple : le port de Zeebrugge.

3. *L ou terminal national*

Le rail, le camion et la voie fluviale connectent ce terminal à l'échelle nationale. Ce terminal est utilisé comme centre de distribution. Exemple : le port de Liège.

4. *M ou terminal régional.*

Il est caractérisé par des coûts bas, des volumes relativement bas, relativement lents pour les différentes opérations, il est plus petit que les terminaux nationaux. 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. C'est le cas du terminal d'Athus, par exemple.

5. *S ou terminal local* : 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. Exemple : le terminal de Ghlin.

¹ Une grue portique peut faire évoluer la charge dans les trois dimensions, hauteur, largeur, longueur et évolue elle-même en site propre, soit sur rails, soit sur pneus, couramment affectée à une surface de manœuvre limitée.

² Grue automobile équipée d'un dispositif de levage frontal lui permettant de déplacer ou gerber des unités de transport intermodal.

Le Tableau 2.1. reprend la classification de Wiegmans (2003).

	Volumes (TEU)	Infrastructure	Surface du terminal
XXL-Terminal	>500.000	12-24 voies ferroviaires	40-50 ha
XL-Terminal	100.000-500.000	6-12 voies ferroviaires	5-40 ha
L-Terminal	30.000-100.000	3-6 voies ferroviaires	2-5 ha
M-Terminal	10.000-30.000	1-3 voies ferroviaires	1-2 ha
S-Terminal	<10.000	1-2 voies ferroviaires	<1 ha

Tableau 2.1. Types de terminaux de conteneurs.

Cette subdivision des caractéristiques en cinq groupes terminaux ne couvre pas tous les terminaux européens. Certains terminaux combinent des caractéristiques de plusieurs catégories.

Cet auteur insiste sur les caractéristiques générales des terminaux continentaux actuels:

- ils occupent une grande surface ;
- ils sont habituellement localisés dans ou près d'un secteur urbain ;
- il y a un nombre maximum de clients (limite de la capacité du terminal) ;
- il y a un nombre minimum de kilomètres de route qui est desservi (idéalement limité à 50 kilomètres) ;
- les plages horaires d'ouverture d'un terminal sont très importantes.

Il cite encore une autre typologie des terminaux de transport combiné de l'Union européenne. Cette classification recense par pays les différents types de terminaux de transport combiné : ferroviaire, fluvial, maritime, ferroviaire-fluvial, ferroviaire-maritime, fluvial-maritime, ferroviaire-fluvial-maritime. Tous ces terminaux sont également connectés au réseau routier. La situation en juillet 1999 était de plus de 1000 terminaux en Europe, les terminaux ferroviaire-routier étant le groupe principal avec plus de 400 terminaux. Ensuite viennent les terminaux routier-maritime et routier-ferroviaire-maritime dont le nombre tourne autour de 250 pour chacun de ces deux types.

2.4.2. Typologie des terminaux sur base du type de consolidation

Une autre typologie des terminaux est basée sur les caractéristiques des flux de fret (Bowersox, 1986) combinée avec la façon de consolider les flux (TERMINET, 1997).

Les quatre types de consolidation : point à point, « hub-and-spoke », en ligne et de type collecte/distribution mènent aux quatre types de terminaux suivants :

1. Terminal de consolidation
2. Terminal de transfert
3. Terminal de distribution
4. Terminal d'hinterland

1. Terminal de consolidation

C'est le mainport : de grands volumes et des connexions mondiales de fret. Les grands flux de fret arrivent au terminal et sont répartis en plus petits flux. Ces plus petits flux ont cependant assez de volume pour remplir une péniche, un train ou un bateau entier. Ces terminaux ont de grandes zones de stockage, des chargements et déchargements rapides (exemple : Singapour, Hong Kong, Anvers, ...). On a une consolidation *point à point*.

2. Terminal de transfert

Ce type de terminal est presque exclusivement dédié au transbordement de fret continental. Il n'y a presque aucune collecte et distribution dans la région où le terminal est localisé (exemple : Duisburg, Felixstowe). Les arrivées et les départs de conteneurs concernent des flux très importants. Le terminal est caractérisé par de grandes surfaces qui permettent le transbordement direct entre les trains et/ou les péniches. On a une consolidation de type « *hub-and-spoke* ».

3. Terminal de distribution

Egalement appelé « terminal intelligent ». Le terminal a une valeur ajoutée sous forme de services supplémentaires fournis par l'opérateur de terminal. De A, B et C le fret arrive au terminal et est consolidé dans des expéditions pour des clients X, Y, et Z. On a une consolidation *en ligne* (exemple : MTC Valburg).

4. Terminal d'hinterland

De petites expéditions continentales de marchandises sont apportées au terminal d'hinterland et consolidées. Les marchandises regroupées sont transportées par de plus grands moyens de transport tels que des trains ou des péniches (exemple : UCT, Frankfurt). Les relations des flux de frets peuvent également être inversées. 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. On a une consolidation de type *collecte-distribution*.

2.4.3. Typologie des terminaux de conteneurs

Une telle classification, présentée au Tableau 2.2., a été développée dans l'étude SIMET (1995).

Modes	Unités de transport	Intervalle de volume actuel (unités/an) pour des terminaux <ul style="list-style-type: none"> • petits • moyens • grands 	Intervalle de volume futur (unités/an) pour des terminaux <ul style="list-style-type: none"> • petits • moyens • grands
Route-Rail combi terminal	Caisses mobiles Semi-remorques Conteneurs	<ul style="list-style-type: none"> • <20.000 • 20.000-100.000 • >100.000 	<ul style="list-style-type: none"> • <30.000 • 30.000-150.000 • >150.000
Barge-Route Terminal de conteneurs	Conteneurs	<ul style="list-style-type: none"> • <30.000 • 30.000-50.000 • >50.000 	<ul style="list-style-type: none"> • <50.000 • >50.000
Barge-Rail-Route Terminal de conteneurs	Conteneurs	<ul style="list-style-type: none"> • <50.000 • >50.000 	<ul style="list-style-type: none"> • <100.000 • >100.000
Terminal de conteneurs maritimes avec des connexions Rail-Route	Conteneurs	<ul style="list-style-type: none"> • <100.000 • >100.000 	<ul style="list-style-type: none"> • <200.000 • >200.000
Terminal de conteneurs maritimes avec des connexions Rail-Route-Barge	Conteneurs	<ul style="list-style-type: none"> • <200.000 • 200.000-500.000 • >500.000 	<ul style="list-style-type: none"> • <300.000 • 300.000-500.000 • >500.000

Tableau 2.2. Types de terminaux existants.

Il faut noter que les interfaces barge-rail ne sont pas très utilisées dans les terminaux Barge-Rail-Route. De plus, certains terminaux maritimes n'ont que des connexions routières.

Dans cette étude, un système hiérarchique à trois niveaux est défini :

- *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 et 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.

2.4.4. Labellisation des terminaux de transport combiné

Une labellisation des terminaux de transport combiné en trois niveaux d'enjeux a été définie dans le Rapport Daubresse (1997). Dans ce rapport, l'analyse des organisations en particulier de l'Allemagne et de l'Italie, fait apparaître deux logiques :

- une *logique de polarisation* tendant à concentrer les flux autour de grands terminaux européens du transport combiné, 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.
- une *logique d'essaimage* articulée sur la notion de réseau, permettant de redistribuer le fret collecté autour des grandes zones de production afin d'irriguer l'ensemble du territoire à partir de chantiers 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, les terminaux d'intérêt national et les chantiers locaux de transport combiné.

- Les *terminaux d'intérêt européen* dont leurs infrastructures doivent :
 - être situées sur les corridors définis par la Commission européenne en 1993 ;
 - utiliser effectivement trois modes sur le site ou à défaut présenter un fort potentiel de transport combiné entre deux modes majeurs ;
 - s'intégrer dans une logique d'aménagement Europe-Etat-Région, offrir des services logistiques périphériques à très haute valeur ajoutée ;
 - être situés dans une métropole d'ambition internationale (au centre d'une grande zone de production et de consommation, au point d'entrée d'un grand trafic international de marchandises, ou sur une façade portuaire importante).
- Les *terminaux d'intérêt national* dont leurs infrastructures doivent :
 - utiliser effectivement deux modes sur le site ;
 - s'insérer dans un schéma logistique régional ;
 - être reliées en réseau (infrastructures et télécommunications) avec les terminaux d'intérêt européen ;
 - offrir des services logistiques à valeur ajoutée (traitement de flux et prestations productives) ;
 - être dans une zone de production et de consommation significative ;
 - offrir des services d'échanges de données informatisées aux PME.

- Les *chantiers locaux de transport combiné* : positionnés par des logiques historiques ou de marché local.

2.4.5. Conclusions

Sur base de ces différentes classifications, nous pouvons maintenant déterminer le type de terminal que nous cherchons à localiser dans cette thèse.

Les principaux terminaux en taille, volume ou nombre de transbordement possèdent une connexion maritime. Ce sont des ports tels que Rotterdam, Anvers, Hambourg, Le Havre, Marseille, 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 ou bien terminaux de distribution ou d'hinterland ou encore, suivant la terminologie employée, terminaux national ou régional. Les types de consolidation sont la consolidation en ligne et consolidation de type collecte-distribution.

Entre ces deux extrêmes, nous avons les terminaux L, ou les terminaux de transfert. Ce type de terminaux est dédié principalement au transbordement de fret continental. Les arrivées et les départs de conteneurs concernent des flux très importants. Ces terminaux ont une consolidation de type « *hub-and-spoke* ». C'est la raison pour laquelle nous utilisons également le terme « *hub* » pour les désigner. D'après Ballis (2002), les hubs internationaux existants pour le rail-route sont : Metz, Villeneuve-Saint-Georges, Schaerbeek, Cologne, Hanover et Mannheim. Ils sont tous situés dans la partie nord de l'Europe, Ballis indique également qu'un hub situé aux alentours de Milan aurait tout son sens.

C'est cette dernière catégorie de terminaux, ayant une consolidation de type « *hub-and-spoke* », que nous cherchons à localiser. Il s'agit donc de terminaux rail-route pour les unités de transport suivantes : conteneurs, caisses mobiles et semi-remorques. Ce type de 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.

Lorsque ces terminaux, ou hubs, sont localisés et le réseau « *hub-and-spoke* » créé, la configuration obtenue est comparée à la situation identifiée par Ballis.

2.5. Principes de la chaîne logistique totale et des opérations

La comparaison de différents modes de transport ne doit pas se faire uniquement sur les coûts de transport. Le Tableau 2.3. résume l'analyse de PINE (Prospects of Inland Navigation within the enlarged Europe, 2004) sur les caractéristiques du transport de marchandises des différents modes. Cette analyse se focalise sur les coûts du transport de fret et sur les critères de performance (vitesse, fiabilité, flexibilité, etc.). Elle est complétée par l'aspect de la sûreté et par d'autres particularités sur les conditions de transport (structure de chargement, réseau et navigabilité, etc.). De plus, elle inclut les effets que ces critères ont sur la structure de transport puisqu'elle est définie par des types de produits, tailles d'expéditions, distance de transport et relations de transport.

Caractéristiques	Voies navigables	Rail		Route
		Tout	Combiné	
Taille du réseau	EU : 30.000 km EU25 : 37.200 km	EU : 156.000 km EU25 : 207.000 km		EU 51.000 km d'autoroute + 270.000 km de route nationales CC13 : 4.800 km d'autoroutes
Type de commodité	Vrac sec et liquide, conteneur, marchandise de volume exceptionnel ou dangereuse	Tout sauf certaines marchandises périssables	Conteneur, caisse mobile	Tout
Taille	Importante, dépend de la voie navigable et de la configuration de la barge	Chargement et longueur du train, chargement des wagons		Plus de 28 tonnes
Vitesse commerciale	12 km/h	Train régulier : 50-60km/h	29 km/h	31 à 37 km/h
Ponctualité	Problème de congestion sporadique uniquement	Prédominance du trafic de nuit	Train régulier	Livraison à temps garantie
Fiabilité	Problèmes dus essentiellement au climat : niveau d'eau bas, haut, glace	Problèmes météorologiques, conflits, grèves		Congestion, accidents, neige et gel, conflits, grèves
Sécurité	Haute	Moyenne		Problème majeur
Consommation d'énergie, émissions	Basse	Moyenne, l'émission dépend du type de traction		Haute
Coûts	Les plus bas	Moyens, niveau de subside important		Elevés

Tableau 2.3. Caractéristiques du transport de marchandises pour les différents modes.

Signalons que la vitesse commerciale des trains peut changer de manière significative, selon des coupures dans la chaîne de transport. Un train complet (trains bloc) peut atteindre une

vitesse commerciale de 50-60 km/h alors que les wagons chargés ont habituellement une vitesse comprise entre 20-30 km/h. Tandis que les transports routiers de longue distance avec un conducteur réalisent une vitesse entre 30 et 40 km/h.

Pour effectuer la comparaison de différents modes de transport, il est donc nécessaire de considérer, en plus des coûts de transport, les autres coûts de la chaîne logistique totale tels que le coût administratif de l'organisation du transport, l'assurance, les frais éventuels de douane, ... mais aussi le coût financier des marchandises pendant le transport, le coût du stockage, la perte de valeur de la marchandise pendant le transport, le coût du stock de sécurité qui dépend de la variation de la demande et de la régularité des transports. Des facteurs qualitatifs, étudiés par exemple par Beuthe (2005), doivent aussi être pris en compte tels que la fiabilité du service, la fréquence offerte, la flexibilité, les rapports clients-transporteurs, ... Certains de ces éléments ne peuvent être facilement exprimés en termes de coûts logistiques.

En 1970, Baumol et Vinod ont montré que des modes de transport plus rapides et plus fiables, dont les coûts de transport sont élevés peuvent réduire les coûts totaux logistiques (CTL). Ils ont formulé les coûts totaux logistiques de la manière suivante:

$$CTL = r.T + u.t.T + \frac{a}{s} + \frac{wsT}{2} + w.K\sqrt{(s+t).T} \quad (2.1)$$

Où CTL = coûts totaux logistiques pour un mode de transport (sur base annuelle)

r = coût de transport par unité (incluant chargement, déchargement, assurance, ...)

T = montant total transporté par an (par unité)

u = coût d'inventaire de transit par unité et par an

t = temps moyen nécessaire pour accomplir un trajet (en années). Ce paramètre se réfère au concept de temps d'exécution, c'est-à-dire le temps entre l'identification de la nécessité de commander et le reçu des marchandises. Les différents composants du temps d'exécution peuvent inclure le temps de préparation de la commande, le délai d'attente, la durée de distribution, de mouvement ou de transport, et temps de réception et d'inspection. Par conséquent, le délai d'exécution implique beaucoup plus que le temps pur de transport entre l'origine et la destination.

a = coût de commande et de traitement par envoi

s = temps moyen entre les envois (en années)

w = coût d'inventaire d'entrepôt par unité et par an (peut différer de u)

K = une constante dépendant de la probabilité de ne pas avoir de coût de rupture de stock pendant le temps d'exécution.

Le premier terme de l'équation (2.1) se rapporte aux coûts annuels de transport encourus par l'expéditeur. Le deuxième terme ajoute les coûts d'inventaire de transit annuels. Le terme suivant correspond aux coûts de commande annuels. Le quatrième se rapporte aux coûts annuels de stockage cyclique et le dernier terme est relatif aux coûts annuels du stock de sécurité. Cette approche tient donc compte des coûts de transport et des coûts d'inventaire. Vernimmen et Witlox (2003) présentent les différents composants des coûts totaux logistiques en insistant sur la relation qui existe entre ces coûts et la décision de choix modal.

- *Coûts de transport* : ne varient pas avec le volume par envoi ou avec la distance alors que l'existence d'économie d'échelle entraîne une diminution des coûts de transport avec l'augmentation de la taille de l'envoi.
- *Coûts de commande* : puisque s est le temps moyen entre les envois (en années), $1/s$ commandes sont passées par an, avec un coût de commande et de traitement par envoi de a . Ces coûts annuels peuvent être réduits en expédiant les marchandises en grandes quantités et en passant moins de commandes. Cependant, depuis l'automatisation et l'informatisation dans la logistique, ces coûts représentent généralement une partie mineure de l'ensemble des coûts logistiques.
- *Coût d'inventaire de transit* : le calcul de ces coûts est également rapide puisque le coût d'inventaire de transit par unité et par an, u , est multiplié par le temps moyen nécessaire pour accomplir un trajet, t , et par le montant total transporté par an, T . Evidemment, les coûts d'inventaire de transit encouragent l'utilisation des modes rapides de transport.
- *Coût de stockage cyclique* : comme l'équation (2.1) le montre, le stockage cyclique moyen à la destination est égal à la moitié de la taille d'expédition : $s.T$ multipliée par w , le coût d'inventaire d'entrepôt par unité et par an. Dans le cas où il y a également des stockages cycliques à l'origine (des marchandises étant réunies et en attentes d'être transportées à la destination), le quatrième terme de l'équation (2.1) doublerait et serait de $w.s.T$. Les coûts de stockage cyclique encouragent l'utilisation des modes de transport de petite capacité, puisque l'utilisation de tels modes diminue le temps moyen entre les expéditions s .
- *Coût du stock de sécurité* : le dernier terme des coûts d'inventaire sont les coûts encourus en tenant un stock de sécurité à la destination. Les stocks de sécurité sont

nécessaires car la demande peut être irrégulière, de même que les délais de livraison. Baumol et Vinod (1970) ont émis l'hypothèse que les éléments stochastiques de leur problème suivent une distribution de Poisson. Les paramètres importants pour la détermination du coût du stock de sécurité sont le temps moyen d'exécution t et le temps moyen entre les envois s .

A la suite des travaux de Baumol et Vinod (1970), beaucoup d'autres auteurs ont étudié les différents coûts logistiques. Une revue de la littérature peut être trouvée notamment dans Vernimmen et Witlox (2003).

L'élaboration d'un tel modèle nécessite une grande quantité de données puisque les coûts de transport doivent s'exprimer en fonction de toutes les variables et paramètres de l'équation (2.1). Cette approche est toutefois très intéressante et peut s'adapter aux méthodes de réseau car les différents éléments de coût de l'équation (2.1) peuvent être assignés à des arcs ou à des nœuds d'un réseau.

2.6. Fonctions de coûts généralisés

Le coût généralisé d'un transport est parfois réduit à la somme des coûts des valeurs de temps de voyage, de coûts de véhicule, de prix de péage, d'impôts de carburant, de prix de passage, et de prix de stationnement. Cette approche permet d'affecter un coût aux facteurs qui influencent le trafic sur un réseau. Les paramètres de ce coût généralisé sont habituellement déterminés empiriquement. Une formulation de base de ce coût généralisé est due à Kresge et Roberts (1971). D'autres formulations plus générales, comme celle de Bouffioux *et al.* (2006), font intervenir d'autres paramètres tels que la fréquence de service, le temps de transport, la fiabilité des livraisons, la flexibilité d'ajustement du transporteur et la sécurité du transport.

L'étude Recordit (« REal COst Reduction of Door-to-door Intermodal Transport » ou « coût réel du transport intermodal porte-à-porte ») a été réalisée en 2000-2001 et financée par l'Union Européenne. Cette étude a analysé, entre autres, les coûts réels et les bénéfices des services de transport intermodal porte à porte au niveau européen. Les modes de transport étudiés sont le cabotage maritime, le ferroviaire, le fluvial et le routier. Une comparaison de ces coûts avec un transport routier unimodal peut également y être retrouvée.

La méthodologie employée pour la collecte des données et pour les calculs des coûts y est détaillée : le processus de transport intermodal a été divisé en neuf étapes : expéditeur/

destinataire, pré- et post-acheminement, point de transbordement, terminal, gare de triage, acheminement principal par camion, acheminement principal par train, acheminement principal par barge et acheminement principal par navire.

Ces étapes sont clairement séparées afin de ne pas effectuer de double comptage. L'unité de mesure utilisée par cette étude est l'EURO/loading unit (€/LU), c'est-à-dire l'Euro par unité de chargement. Enfin, les unités de chargement envisagées sont les conteneurs, les caisses mobiles et les semi-remorques (ces dernières représentaient 9% du transport intermodal en 1999).

Les éléments de coûts considérés par l'étude Recordit sont les suivants :

- **Coûts d'amortissement** : inclus tous les coûts nécessaires pour fournir et maintenir à disposition les moyens de transport, les unités de chargement et les autres équipements techniques.
- **Coûts du personnel** : inclus tous les coûts soutenus par les opérateurs pour assurer le paiement des salaires, la sécurité sociale et les primes diverses.
- **Coûts de consommation** : inclus tous les coûts relatifs à la fourniture de diesel, d'huile, de pneus et d'électricité pour tous les modes de transport.
- **Coûts de maintenance** : inclus tous les coûts de réparation et d'entretien courant des moyens de transport et d'unités de chargement. La maintenance de l'infrastructure se réfère à cette catégorie uniquement lorsqu'il a été possible de les déterminer, sinon, ils sont inclus dans la catégorie « autres coûts ».
- **Coûts d'assurance** : inclus tous les coûts soutenus pour assurer les moyens de transport et les unités de chargement.
- **Péage et charge** : cette catégorie inclus toutes les charges comme des coûts internes par des opérateurs. Comme par exemple, le péage routier, le droit de port, les redevances d'infrastructures, les droits de douane et les taxes de circulation.
- **Services tiers** : inclus les prix imputés pour acheter des services intermodaux tels que le cabotage maritime, le ferroutage, la navigation intérieure, les transbordements ou les emplacements pour conteneurs.
- **Les autres coûts** : inclus tous les autres coûts administratifs, organisationnels et les coûts qui ne peuvent être directement identifiés.

Ainsi, vus la qualité et l'ampleur de cette étude, la détermination des différents coûts de transport est basée essentiellement sur Recordit. Cependant, en ce qui concerne

l'acheminement fluvial, l'étude n'effectue le calcul de coût que sur la section entre Bâle et Rotterdam. Le marché de navigation intérieure de conteneurs y est en effet concentré puisqu'il consiste essentiellement à relier les ports d'Anvers et de Rotterdam avec leur hinterland au Pays Bas, en Belgique et le long du Rhin en Allemagne. Les statistiques d'Eurostat montrent que les tonnes transportées entre ces trois pays et, dans une moindre mesure, la France, représentent 97 % des transports internationaux par voies d'eau. Toutefois, les données du rapport PINE « Prospects of Inland Navigation within the enlarged Europe » ont également été utilisées, pour valider ces coûts de transport en navigation intérieure ; ensuite, pour estimer les coûts du transport routier sur longue distance, nous pouvons également bénéficier des données gratuites disponibles sur le site du Comité National Routier français (CNR). Finalement, en ce qui concerne l'acheminement ferroviaire, les coûts ont été validés sur base du rapport final du Ministère de la Mobilité des Pays-Bas (2005).

Le Tableau 2.4. résume les coûts des opérations tels que nous les avons retenus. Ces coûts sont exprimés en €/t.km pour les différentes opérations de transport liées à un déplacement et en €/t pour les opérations de triage et de formation de train, pour les transbordements ainsi que pour les opérations de chargement et de déchargement. Les caisses mobiles de classe A ou semi-remorque ont une longueur supérieure à 13,60 m. Recordit émet les hypothèses que leurs caractéristiques, comme le poids des unités de chargement, sont identiques aux conteneurs de 40 pieds (12 m de long) et que les caractéristiques des caisses mobiles de classe C (7,45 m de long) sont identiques aux conteneurs de 20 pieds (6 m de long). Le lecteur intéressé trouvera le détail des calculs effectués au paragraphe 1 de l'annexe 1.

De plus, les fonctions de coûts utilisées tiennent compte d'un facteur vitesse : les coûts de déplacement sont multipliés par un facteur : $\frac{\text{vitesse moyenne}}{\text{vitesse}}$ où la vitesse moyenne est la vitesse moyenne sur les liens pour le mode de transport considéré. Ces vitesses moyennes sont de 10 km/h pour la voie d'eau, 30 km/h pour les chemins de fer et 39 km/h pour la route. 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.

Coûts	Caisses mobiles de classe A ou conteneur 40 pieds			Caisses mobiles de classe C ou conteneur 20 pieds		
	Min	Max	Moyenne	Min	Max	Moyenne
	en €/t.km					
Routier sur longue distance	0,072	0,099	0,08	0,051	0,075	0,060
Pré et post acheminement	0,084	0,152	0,116	0,063	0,114	0,089
Acheminement ferroviaire	0,042	0,053	0,047	0,031	0,04	0,035
Acheminement fluvial			0,014			
Unité de chargement	0,003	0,004	0,003			
	en €t					
Triage et de formation de train	0,119	0,759	0,284	0,058	0,489	0,197
Transbordement Rail-Route	1,667	3,337	2,512	2,500	4,054	3,290
Transbordement Rail-Rail	0,766	1,990	1,422	1,148	2,985	2,132
Transbordement Rail-Voie d'eau			2,500			3,750
Chargement-déchargement	1,230	1,268	1,244	1,288	1,507	1,376

Tableau 2.4. Coûts des opérations.

Finalement, l'étude Recordit propose une internalisation des coûts externes en estimant les coûts dus :

1. aux émissions des différentes opérations des véhicules, celles dues à la production de ces véhicules et celles dues à la production de fuel et d'électricité ;
2. aux accidents incluant les victimes et leur famille ;
3. à la perte de temps subie par les utilisateurs routiers dans des situations de congestions ;
4. à la pollution sonore ;
5. au réchauffement global dû aux émissions de CO₂.

Pour les conteneurs 20 pieds, le coût du routier sur longue distance est estimé à 0,081 €/t.km, les pré- et post acheminement à 0,192 €/t.km, l'acheminement ferroviaire à 0,055 €/t.km et le fluvial à 0,017 €/t.km. Une augmentation de 0,40 % sur les coûts de transbordement rail-route est également considérée.

2.7. Coûts d'investissement des terminaux rail-route

2.7.1. Estimation par Recordit des coûts d'investissement des terminaux

Dans les terminaux rail-route étudiés par Recordit, le volume annuel est inférieur à 200.000 UTI/an. Recordit estime que l'investissement pour un « reach stacker » est de 500.000 € avec un amortissement annuel sur 15 ans, c'est-à-dire : 47.573 € par an et par grue.

Le coût de la maintenance par an est estimé à 7 % des coûts d'investissement, c'est-à-dire $7\% \times 500.000 \text{ €} = 35.000 \text{ €}$ par an et par grue. Quant aux grues portiques, les auteurs de l'étude estiment que l'investissement est de 700.000 € avec un amortissement annuel sur 15 ans, c'est-à-dire : 66.602 € par an et par grue. Le coût de la maintenance par an est estimé à 7% des coûts d'investissement c'est-à-dire $7\% \times 700.000 \text{ €} = 49.000 \text{ €}$ par an et par grue. Le nombre d'ouvriers nécessaire pour manœuvrer ces grues, dans ce type de terminaux, que ce soit les « reach stacker » ou les grues portiques, est de 1,5 par grues. De plus, par grue, le terminal emploie 2,5 personnes supplémentaires pour les tâches administratives, la maintenance et la gestion. Le coût salarial de ces ouvriers est estimé à 56.000 €/an.

Par an, on obtient donc :

- pour un reach stacker : $47.573 \text{ €} + 35.000 \text{ €} + 4 \times 56.000 \text{ €} = 306.573 \text{ €}$
- pour une grue portique: $66.602 \text{ €} + 49.000 \text{ €} + 4 \times 56.000 \text{ €} = 339.602 \text{ €}$

Ces valeurs sont sous-estimées car elles ne tiennent pas compte de la catégorie « autres coûts » considérés uniquement pour quelques terminaux par Recordit. Ces autres coûts dépendent fortement de l'opérateur de transport combiné.

2.7.2. Identification par Ballis des paramètres de conception des terminaux

Des paramètres comme la localisation du terminal et 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 unités de transport intermodal (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, etc. Selon Ballis (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/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/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 sur freins sont effectués. Un terminal typique rail-route est un système complexe où de nombreux paramètres sont fortement corrélés.

Prenant en compte la situation existante en Europe, Ballis (2002) distingue 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 (les longs trains européens ont une longueur de 600 à 750 m), la disponibilité des terrains et les contraintes de coûts.
- L'utilisation des voies de transbordement. Le terme « voies de transbordement » caractérise les voies qui peuvent être desservies par les équipements de manutention.
- Les fréquences et la façon dont les trains et les camions partent. La grande majorité du réseau européen supporte à la fois le transport de passager et de marchandises. En raison notamment de la vitesse relativement basse des trains de marchandises par rapport aux trains de voyageurs, les trains de marchandises voyagent habituellement durant la nuit et la manutention (chargement, déchargement, transbordement) des marchandises qu'ils transportent s'effectue pendant le jour. Cette politique implique que la majorité de trains arrivent dans les terminaux le matin et partent en soirée. 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. Les « reach stackers » et les « gantry cranes », ou grues portiques, semblent dominer l'ensemble du matériel classique. Les « reach stackers » sont principalement utilisés dans de petits terminaux car ils ont un coût bas et une grande flexibilité. Ils sont utilisés par la grande majorité (32 sur les 34) des terminaux italiens. Les grues portiques sont actuellement l'équipement dominant des terminaux combinés dont le volume transbordé est important.
 - Appareils de manutention avancés. 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. Elles incorporent une ou plusieurs des idées/techniques suivantes :
 - La séparation des opérations du côté rail et des opérations du côté route ;
 - La technique du train mobile où une locomotive spéciale déplace les wagons devant les appareils de manutention. Cette technique réduit le temps de voyage des appareils de manutention et permet la manipulation automatique et rapide des opérations de rail-côté ;
 - L'utilisation de portique complexe qui permet la manipulation parallèle de beaucoup d'unités de chargement mais qui exige un degré élevé d'automatisation et d'étalonnage.
- 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 conteneurs sont empilables mais pas les semi-remorques ni les caisses mobiles construites aux normes européennes courantes. Actuellement, la hauteur moyenne d'empilement dans la majorité des terminaux rail-route est légèrement au-dessus d'une unité. Des conteneurs sont habituellement empilés sur une ou deux hauteurs et exceptionnellement un conteneur vide peut être placé au-dessus. Cette situation peut certainement être améliorée.

- 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 entrant des deux directions. Cependant, beaucoup de terminaux existants ont des voies avec une seule direction d'accès. Habituellement, l'accès n'est pas électrifié, l'utilisation d'une locomotive diesel est donc obligatoire.

2.7.3. Le modèle de Ballis (2002)

L'approche utilisée pour l'évaluation comparative des technologies conventionnelles et de pointe est basée sur un système expert, un générateur d'arrivée de train/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. Le taux d'intérêt a été estimé à 7 % pour toute la période d'amortissement ;
- maintenance et énergie ;
- le personnel pour les opérations aux terminaux. Le personnel requis 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. Il a été calculé en tenant compte du temps d'attente moyen dans le terminal multiplié par 37,5 €/h.

Dix-sept technologies de manutention ont été étudiées par Ballis. Les différentes configurations d'équipements sont reprises dans le Tableau 2.5.

a/a	Module size	Equipment configuration
1	Half module	Two reach stackers operating at 15 ITUs/h
2	Full module	Two reach stackers operating at 15 ITUs/h
3	Half module	One gantry crane operating at 22 ITUs/h
4	Full module	One gantry crane operating at 22 ITUs/h
5	Full module	Moving train technique–One crane–Single area variant
6	Full module	Two gantry cranes operating at 24 ITUs/h
7	Full module	Moving train technique–One crane–Basic variant
8	Full module	Three gantry cranes operating at 24 ITUs/h
9	Full module	Three gantry cranes operating at 28 ITUs/h
10	Full module	Moving train technique–Two cranes–Single area variant
11	Two full modules	Two reach stackers operating at 15 ITUs/h
12	Two full modules	Two gantry stackers operating at 24 ITUs/h
13	Half module	Two gantry stackers operating at 24 ITUs/h
14	Full module	Moving train technique–Two cranes–Basic variant
15	Two full modules	Three gantry cranes operating at 24 ITUs/h
16	Full module	Unidirectional bridges
17	Full module	Bi-directional rolling gantry crane

Tableau 2.5. Technologies de manutention étudiées par Ballis.

Source : Ballis (2004)

Trois types de grues portiques conventionnels de taux de manutention différents (22, 24 et 28 unités de transport intermodal par heure) et de coûts d'achat différents ont été utilisés. Les « module size » correspondent aux configurations de voie ; les « half module » sont les configurations qui dirigent les trains sur des voies courtes. Ces configurations ont des frais d'infrastructures plus bas mais des coûts d'opération plus importants puisque les longs trains doivent être répartis en deux pour pouvoir être manutentionnés dans les voies courtes de transbordement.

La Figure 2.7. montre les résultats globaux obtenus par le modèle et la procédure de calcul des coûts. La courbe en pointillé représente les coûts minimaux. Au dessus de l'axe des abscisses, sont représentés les intervalles efficaces pour les différentes technologies alternatives ; quant à l'astérisque, elle indique que la configuration d'équipement exige un système où un rendez-vous est fixé pour l'arrivée du camion.

Chaque courbe de la Figure 2.7. est associée à une solution technique et inclut les coûts d'infrastructure, d'équipement, de maintenance, d'énergie, du personnel, et du temps d'attente des camions. Ces courbes couvrent un volume de trafic allant de 150 à 1.200 unités de

transport intermodal par jour. L'extrémité droite des courbes correspond à la limite de capacité du terminal qui est atteinte à cause soit de l'insuffisance des équipements soit des limitations des voies. Pour dépasser la limitation de capacité du terminal due à l'insuffisance des équipements, le nombre d'équipements de manutention peut être augmenté ou des dispositifs d'appont peuvent être utilisés. Cependant, chaque équipement additionnel crée des conflits opérationnels : certains équipements ne peuvent accepter des dispositifs d'appont sans modification importante. La limite actuelle pour un système basé sur une grue portique est de 750 unités de transport intermodal par jour. D'un autre côté, les limites du terminal imposées par les limitations des voies ne peuvent être facilement dépassées.

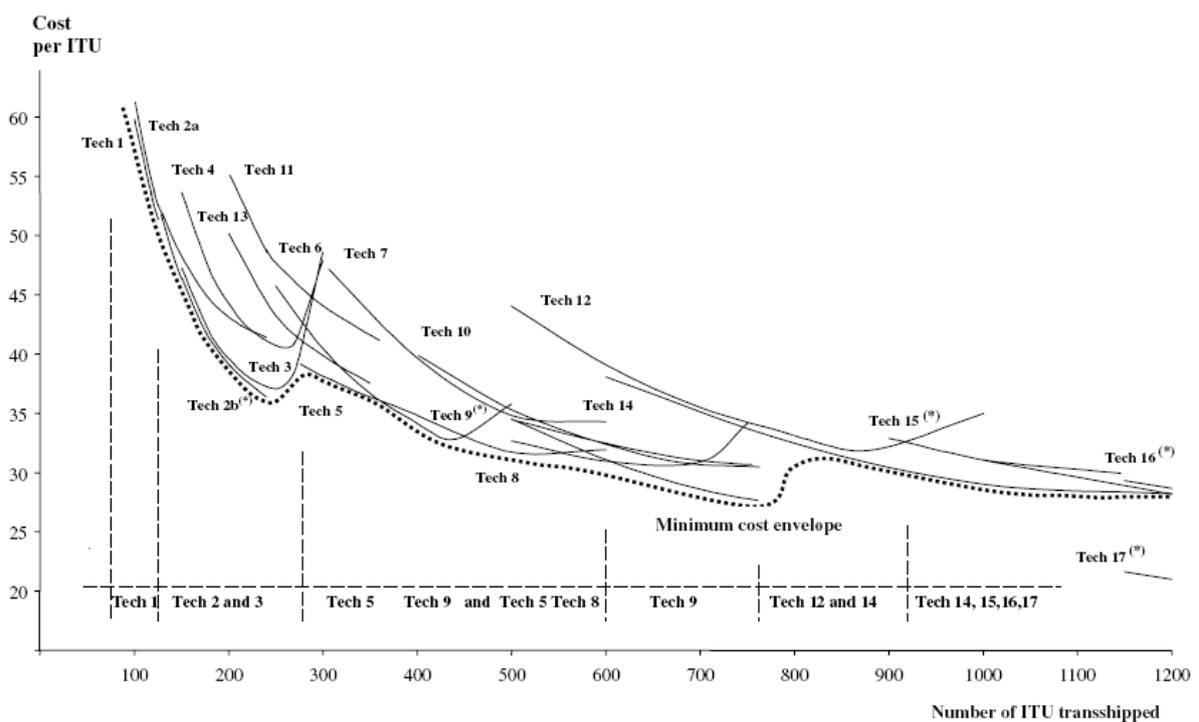


Figure 2.7. Analyse comparative du coût pour des différentes conceptions de terminaux.

Source : Ballis 2004

De plus, une enveloppe de coût minimum est représentée par des pointillés. Cette dernière est fondée sur l'hypothèse que la configuration technologique la plus rentable dans l'intervalle de volume considéré est choisie. Notons que cette recherche a été limitée aux technologies pour lesquelles les coûts étaient disponibles.

La Figure 2.7. montre également que les coûts diminuent lorsque les volumes augmentent mais une tendance asymptotique est observée au niveau de 30 €/unité de transport intermodal. Toutefois, les coûts calculés sont plus élevés que les prix du marché. Selon Ballis (2002), 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.

Cette analyse révèle également qu'il existe plus d'alternatives pour les terminaux de taille moyenne (plus de 350 UTI/jour) à grande.

2.8. Economies d'échelle

Les transports ferroviaires et fluviaux de fret permettent d'effectuer des économies d'échelle. Des économies de gestion de réseau et l'augmentation de la demande peut conduire à une plus grande fréquence de service.

Les centres de transbordement peuvent, dans certaines circonstances, réduire leurs coûts moyens. Ceci se produit lorsque les équipements (grues, chargeurs) fonctionnent en dessous de leur capacité. A mesure que la demande augmente, les coûts d'investissement sont partagés entre plus d'unités de chargement réduisant ainsi les coûts moyens. Toutefois cet argument n'est plus valable à partir du moment où un équipement supplémentaire est exigé lorsque la demande atteint un certain seuil.

2.8.1. Pour les acheminements par train

Recordit donne des informations sur le taux de chargement des différentes connexions étudiées. Le Tableau A1.3.1. repris au paragraphe 3 de l'annexe 1, a pu être réalisé à partir des données de cette étude. Ce taux de chargement représente le pourcentage d'occupation du véhicule par rapport à la capacité totale du véhicule. Le taux de chargement varie de 50 % à 100 % selon les connexions.

Notons toutefois que le taux de 100 % n'est rencontré que sur un tronçon de 20 km entre Hamburg et Maschen, tandis que le taux de 90 % est atteint sur 165 km entre Barcelone et Port Bou. Les taux de chargement arrivent à 85 %, 80 % et à 75 % sur des distances respectives de 2.235 km, 842 km et de 331 km. Une économie d'échelle peut être réalisée en modifiant le taux de chargement. Les connexions dont le taux de chargement est de 50 % (observé sur 564 km) sont susceptibles de pouvoir atteindre la plus grande économie d'échelle si le taux de chargement grimpe jusqu'à 100 %. Le Tableau A1.3.2. repris au paragraphe 3 de l'annexe 1 détermine la réduction de coût qui peut être réalisée sur les deux connexions où le taux de chargement est de 50 %. La réduction de coût varie donc entre 14 % et 21 %.

De plus, le projet Recordit souligne qu'une longueur de train plus importante et homogène (la longueur maximum des trains varie à l'intérieur de l'Europe, elle est, par exemple, de 750 m en France et de 550 m en Italie) entraînerait une diminution du nombre de triages additionnels et conduirait à un double avantage : une réduction des coûts et une meilleure qualité de service. Ce projet estime que dans les conditions actuelles, une perspective de réduction des coûts de 20 %, à court ou à moyen terme, peut être considérée.

2.8.2. Pour les acheminements fluviaux

Les coûts obtenus étaient de 0,014 €/t.km pour un conteneur de 40 pieds et de 0,01 €/t.km pour un conteneur de 20 pieds avec un taux de chargement de 75 %. Si un taux de chargement de 100 % peut être atteint, il conduirait à une réduction des coûts de 25 %. Le projet Recordit estime qu'une réduction de 20 % peut être obtenue.

2.8.3. Pour les transbordements rail-route

Les coûts de transbordement varient fortement en fonction du volume annuel manutentionnés sur les terminaux et des équipements de ces terminaux. L'étude de Ballis (2002) permet d'estimer ces coûts en fonction du nombre d'UTI transbordée par an. Une régression logarithmique est également présentée sur la Figure 2.8. 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 ainsi qu'aux coûts repris dans Termet (1996 et 1997) et dans le rapport de la CEMT (1998).

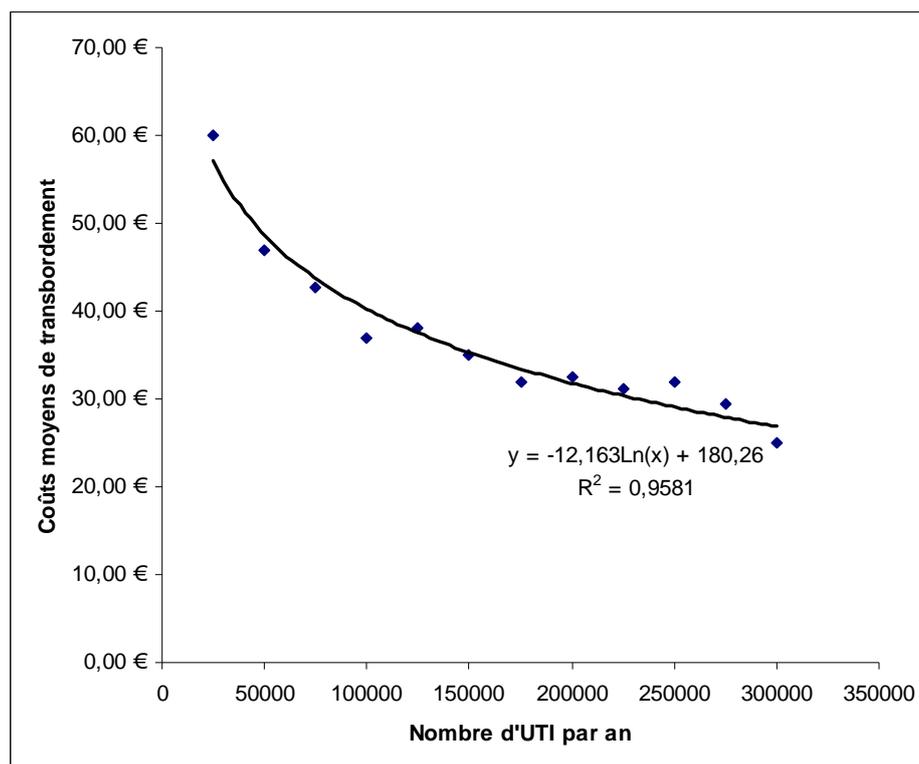


Figure 2.8. Evolution du coût moyen de transbordement en fonction du flux.

2.9. Subventions possibles

Il faut toutefois savoir que, pour promouvoir son développement, le transport combiné bénéficie d'aides publiques, diverses dans leur nature et leurs montants, pour favoriser son développement. Ces aides varient d'un pays à l'autre, le cas de la Belgique et de la France sont donnés en exemple.

En Belgique³, une subvention est accordée lorsque la partie ferroviaire du transport combiné est égale ou supérieure à une distance de 51 km. La subvention est accordée pour chaque UTI transportée et est calculée selon la formule suivante :

$$Y(Km F + 50)$$

- $Km F$ est le nombre de km effectués par le chemin de fer ;
- Y est une valeur exprimée en euros.

La valeur Y est fixée chaque année par le Ministre, cette valeur ne peut dépasser 0,40 €. De plus, la subvention d'une opération de transport ne peut excéder 30 % de son coût. Celui-ci comprend des frais de traction ferroviaire, les frais de transbordement, ainsi que les frais éventuels du transport entre le lieu d'origine et le centre de transbordement, et entre le lieu de

³ Moniteur belge – 07.10.2005

transbordement et de destination. L'opérateur est tenu de répercuter à son client la subvention accordée pour les transports commandés par ce dernier.

Le Gouvernement wallon a également adopté, le 25 août 2005, diverses mesures d'aide au transport combiné, valables pour le transport ferroviaire et pour le transport fluvial. Dans le cas du transport fluvial, un premier « Plan wallon », pour les années 2000-2003, avait notamment déjà permis de soutenir la modernisation de la flotte de navigation intérieure wallonne et d'aider les entreprises désirant s'équiper en matériel de transbordement de marchandises transportées par voie d'eau, moyennant leur engagement de confier de nouveaux tonnages au transport fluvial.

En France, des subventions à la SNCF puis aux opérateurs pour le transport combiné ont été accordées. La nature de ces subventions a été modifiée en 2003 (transposition en droit français des directives européennes en matière de libéralisation du transport ferroviaire de fret) pour être versées aux opérateurs de transport combiné et non plus directement à la SNCF. En outre, les autres aides comprennent l'aide à l'investissement dans les terminaux et une réduction de la taxe à l'essieu pour les poids-lourds dédiés au transport combiné. Le transport combiné a aussi bénéficié jusqu'en 2002 d'une réduction de la tarification de l'accès à l'infrastructure. Une partie de la redevance (droit de réservation des sillons) était fixée à un niveau inférieur à celui des péages pour les trains de voyageurs. L'autorisation d'un poids total en charge de 44 tonnes⁴ pour les parcours terminaux est aussi un avantage économique au secteur du combiné ferroviaire par rapport au reste du transport puisque la mesure aboutit à 3 tonnes de charge utile supplémentaire, ce qui représente plus de 10 %. Le transport fluvial a également bénéficié de différentes aides. Le lecteur intéressé par l'analyse économique des politiques publiques des transports français peut se référer au document : les comptes des transports en 2004 du Ministère français des Transports, de l'Équipement, du Tourisme et de la Mer.

En ce qui concerne l'Union Européenne, deux programmes ont vu le jour : le PACT puis Marco Polo. Le PACT (de 1997 à 2001) visait à accroître l'utilisation du transport combiné en appuyant financièrement des initiatives commerciales originales (actions pilotes) dans le secteur des services de transport combiné. Le programme Marco Polo (de 2003 à 2006) est un instrument financier visant à réduire la saturation du réseau routier, à améliorer les performances environnementales du système de transport et à renforcer le transport

⁴ Notons qu'en Belgique, le poids maximum autorisé est de 44 tonnes, pour tous les camions.

intermodal, contribuant ainsi à un système de transport efficace et durable. Le programme soutient les mesures commerciales qui, sur le marché des services de fret, ont pour effet de transférer du fret routier vers des modes de transport plus respectueux pour l'environnement. En 2004, La commission européenne a proposé de poursuivre ce programme par Marco Polo II (2007-2013).

2.10. Conclusions

La détermination des principales caractéristiques des terminaux à localiser et l'estimation des coûts des différentes opérations de transport pour les différents modes et particulièrement celle des coûts de transbordement aux terminaux en fonction des flux sont à présent effectuées. Le modèle de localisation que nous devons développer doit non seulement tenir compte des économies d'échelle possibles mais également tenir compte de la différence des coûts de transport entre le réseau routier et ferroviaire (voire fluvial), des coûts de transbordement et des coûts d'implantation des terminaux.

Afin d'établir une formulation du problème en tenant compte des différents éléments qui viennent d'être signalés, le chapitre 3 sera consacré à la description des principaux modèles de localisations pouvant être utile dans le cadre de cette étude.

3. Modèles de localisation

Dans ce chapitre les modèles classiques de localisation sont brièvement décrits. Ensuite, les réseaux de type « hub-and-spoke » sont définis et classifiés. 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. Différentes formulations de ce problème sont données. Le problème du p -hub médian est formulé pour décrire le problème dans le cas d'un réseau rail-route où les liaisons inter-hub sont ferroviaires et les autres routières. Une procédure itérative est proposée pour tenir compte de l'évolution des coûts de transbordement en fonction du nombre d'unités de transport intermodal transbordées aux terminaux. Puis, au terme de ce chapitre les éléments à prendre en considération dans la modélisation du problème sont recensés.

Introduction

Au chapitre 2, la consolidation « *hub-and-spoke* » a été présentée. Le hub, ou point nodal, y 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 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* ».

Puisque le transport rail-route utilise les réseaux routiers et ferroviaires et nécessite les infrastructures de transbordement présentes aux terminaux, sa compétitivité dépend non seulement des coûts mais aussi de la localisation de ces terminaux.

La localisation consiste à déterminer l'emplacement d'une ou plusieurs installation(s) de façon à optimiser une fonction économique dépendant des distances entre ces installations et un ensemble d'utilisateurs (ou clients) potentiels. Le terme installation doit être interprété comme le bâtiment ou l'équipement qui doit être localisé ; dans cette étude, il s'agit des terminaux.

Après une courte introduction sur les modèles de localisation, ce chapitre débute par une présentation des modèles classiques de localisation. Trois problèmes de localisation sont décrits, il s'agit du problème de couverture, du problème du p -centre et du problème de la p -médiane. Dans de nombreux cas (installation de services ambulanciers, de casernes de pompiers, ...), l'objectif est de desservir le plus possible de clients dans un temps ou une distance donnée. Ceci conduit à la notion d'installations capables de couvrir les demandes. Le problème de couverture cherche la localisation d'un nombre minimum d'installations afin d'assurer un certain niveau de service. Le problème du p -centre cherche la localisation d'un nombre p d'installations afin que tous les clients soient desservis dans un temps (ou distance) donné. Les problèmes de couverture et du p -centre, se focalisent sur la situation de service dans le pire des cas. Cependant, les coûts des opérations de certains systèmes, comme les systèmes de transport ou de livraison, sont fortement influencés par la distance moyenne entre l'installation et les clients. Le problème de la p -médiane consiste à trouver la localisation d'un nombre p d'installations pour minimiser la distance moyenne entre les clients et l'installation la plus proche. Tous ces problèmes sont formulés sous la forme de programme linéaire en nombres entiers.

Ces modèles classiques sont basés sur la demande. D'autres méthodes d'affectation de clients à une installation sont basées sur la capture des flux. Ces dernières méthodes supposent que les clients utilisent une installation car celle-ci se trouve sur leur chemin, ou proche de celui-ci. Elles peuvent être appropriées pour localiser, par exemple, des stations d'essence.

De plus, dans ces modèles classiques, le service recherché peut être effectué à l'installation que l'on cherche à localiser. Cependant, les services à fournir peuvent être de différents types. C'est notamment le cas lorsque les services impliquent le mouvement de marchandises entre une origine et une destination.

Nous cherchons ici à consolider avantageusement les flux à certains nœuds appelés « hubs ». Ces problèmes se manifestent dans certaines applications sur le transport, mais aussi sur les réseaux de livraison postale ou sur les réseaux de télécommunication.

Avec des ressources de transport fixées, plus de villes, ou demandes, peuvent être desservies dans des réseaux particuliers appelés réseaux « *hub-and-spoke* ». Dans, notamment Daskin (1995), les « *hubs* » représentent les installations à localiser en tenant compte des différents flux sur le réseau tandis que les « *spokes* » sont les clients ou demandes qui doivent être affectés aux différents « *hubs* ». Ces réseaux sont décrits et classifiés. La recherche d'une configuration optimale conduit à un problème de localisation-allocation. En effet, nous devons déterminer à la fois la localisation des « *hubs* » et d'allocation des demandes, ou « *spokes* » aux différents « *hubs* ». Nous terminons par une formulation du problème du p -hub médian qui est une extension du problème de la p -médiane classique.

3.1. Modèles de localisation

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 comme ceux de Palander (1935), Hoover (1937), Lösh (1940), Ponsard (1955), Devletoglou (1965), et plus récemment, l'étude du problème de Weber avec des distances rectangulaires par Huriot *et al.* (1973) et les travaux de Smith (1981)

Depuis, beaucoup de modèles de localisation ont été développés : ils permettent de situer des équipements dans un espace donné et nécessitent quatre entrées (ReVelle *et al.* (2005)) :

- les clients dont la position est connue ;
- les équipements à localiser ;

- l'espace où les clients et les équipements sont situés ;
- une métrique qui indique les distances (ou les temps, les coûts de transport, ...) entre les clients et les équipements.

Des modèles mathématiques ont été développés et utilisés pour résoudre ces problèmes. Ces modèles peuvent être classifiés de plusieurs manières. La classification peut être basée sur la distinction du type d'espace dans lequel les équipements doivent être localisés, 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 (élastique ou inélastique), selon que la capacité des installations est prise en compte ou non, 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 est 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. En d'autres mots, il y a un continuum de localisations potentielles. Par contre, la formulation de la localisation dans un espace discret considère qu'il n'y a qu'un nombre fini de sites potentiels.

Les formulations continues permettent des procédures de calcul pour résoudre les problèmes de localisation d'une installation mais compliquent le développement d'algorithmes opérationnels dans le cas de la localisation de plusieurs installations.

La plupart des problèmes réels conduisent à la formulation de problèmes de localisation dans un espace discret. Ceux-ci sont plus faciles à résoudre en pratique et ils sont conceptuellement plus réalistes. Dans de nombreux cas, la localisation d'une installation ne s'effectue pas au mètre près mais seulement sur quelques sites potentiels. Notre problème de localisation est défini sur un réseau de transport. Dans beaucoup de situations, même si tous les points du réseau sont des localisations possibles, 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 situés dans des régions difficiles d'accès ou à l'intérieur de ville, ... Notre étude s'apparente donc à un problème de localisation discret.

D'autres distinctions encore peuvent être effectuées en fonction de l'objectif de la localisation (ReVelle *et al.* 2005): les objectifs d'attraction (« pull »), de répulsion (« push »), d'attraction-répulsion (« pull-push ») ; d'équité ou d'efficacité. 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 centrale nucléaire, 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 (une école 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.

Des modèles de localisation récents prennent également en considération des aspects temporels ou aléatoires (Owen *et al.* (1998)). 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 nouvelle 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 de voyage, coûts de construction, la demande, ...) ne sont pas des valeurs connues exactement et ils peuvent ne pas évoluer de façon déterministe. L'objectif est de déterminer des localisations robustes à la variation des paramètres.

3.2. Problème de localisation dans un espace discret

Habituellement, voir par exemple Owen *et al.* (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.

3.2.1. Problème de couverture

Dans beaucoup de problème de localisation, le service au client (à partir de l'installation qui est localisée) dépend de la distance entre le client et l'installation à laquelle le client 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. Ceci conduit à la notion de couverture.

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 ou le temps entre ce nœud et l'installation la plus proche n'est pas plus grande qu'une valeur spécifiée.

Entrées:

m = le nombre de clients indexés par $i, i \in I = \{1, \dots, m\}$

n = le nombre de sites potentiels indexés par $j, j \in J = \{1, \dots, n\}$

p = le nombre d'installations à localiser, $1 \leq p \leq n$.

a_{ij} = 1 si le site potentiel j couvre la demande du nœud i
0 sinon

c_j = le coût pour une installation au site potentiel j

Variables de décision:

x_j = 1 si on localise une installation au site potentiel j (Variable de localisation)
0 sinon

Minimiser:

$$\sum_{j \in J} c_j x_j \quad (3.1)$$

Sous contraintes:

$$\sum_{j \in J} a_{ij} x_j \geq 1 \quad \forall i \in I \quad (3.1.1)$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (3.1.2)$$

La fonction objectif (3.1) minimise le coût total des installations qui sont sélectionnées. Les contraintes (3.1.1) stipulent que chaque nœud de demande i doit être servi par au moins une installation ; le membre de gauche de l'inégalité donne le nombre d'installations localisées qui peuvent servir le nœud i . Les contraintes (3.1.2) sont les contraintes d'intégrité.

Ce problème exige une condition très restrictive : chaque client doit être servi. Dans un problème contenant beaucoup de nœuds dispersés, la condition de couverture complète peut conduire à des solutions avec un nombre d'installations trop important d'un point de vue budgétaire. Church et ReVelle (1974) introduisent alors le problème de couverture maximale (Maximum Covering Location Problem (MCLP)). Le MCLP renonce à la couverture totale pour maximiser la demande couverte avec un nombre limité de sites à ouvrir. Pour formuler ce problème, les notations suivantes doivent être ajoutées :

Entrées:

m = le nombre de clients indexés par i , $i \in I = \{1, \dots, m\}$

n = le nombre de sites potentiels indexés par j , $j \in J = \{1, \dots, n\}$

p = le nombre d'installations à localiser, $1 \leq p \leq n$.

h_i = la demande au nœud i

Variables de décision:

Z_i = 1 si le nœud i est couvert

0 sinon

Avec ces notations supplémentaires, le problème de couverture maximale peut alors être formulé comme suit :

Maximiser:

$$\sum_{i \in I} h_i Z_i \quad (3.2)$$

Sous contraintes:

$$\sum_{j \in J} a_{ij} x_j \geq Z_i \quad \forall i \in I \quad (3.2.1)$$

$$\sum_{j \in J} x_j \leq p \quad (3.2.2)$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (3.2.3)$$

$$Z_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in J \quad (3.2.4)$$

La fonction objectif (3.2) maximise le nombre de demandes couvertes. Les contraintes (3.2.1) indiquent que la demande au nœud i ne peut être couverte tant qu'au moins un site qui couvre le nœud i ne soit sélectionné. La contrainte (3.2.2) stipule que p installations au maximum peuvent être localisées. Tant que p est supérieur au nombre d'installations nécessaires pour couvrir tous les nœuds de demande, la contrainte (3.2.2) n'affectera pas l'obtention de la

solution optimale de couvrir l'ensemble des nœuds de demande. Les contraintes (3.2.3) et (3.2.4) sont des contraintes d'intégrité sur les variables de décision.

3.2.2. Problème du p -centre

Dans le problème de couverture, la distance de couverture entre la demande et l'installation la plus proche a été spécifiée exogènement. Dans le problème du p -centre, tous les nœuds de demande doivent être couverts. Cependant, plutôt que d'utiliser une distance de couverture spécifiée exogènement et de chercher à minimiser le nombre d'installations nécessaires pour couvrir les nœuds de demande, le problème du p -centre minimise la distance de couverture de façon à ce que chaque nœud de demande soit servi par une des installations située à une distance inférieure ou égale à une distance déterminée endogènement.

Le problème du p -centre consiste donc à ouvrir p installations et à affecter chaque client à l'une d'entre elles de façon à minimiser la distance maximum entre chaque demande et l'installation la plus proche. Le problème du p -centre peut être formulé comme suit :

W = la distance maximum entre un nœud de demande et l'installation la plus proche à laquelle il est affecté.

Entrées:

p = le nombre d'installations à localiser

h_i = la demande au nœud i

d_{ij} = la distance d'un nœud de demande i à une localisation potentielle j

Variables de décision:

x_j = 1 si on localise une installation au site potentiel j
0 sinon

y_{ij} = la fraction de la demande du nœud i qui est affectée à l'installation située au nœud j ;

Minimiser:

$$W \tag{3.3}$$

Sous contraintes:

$$\sum_{j \in J} x_j = p \tag{3.3.1}$$

$$\sum_{j \in J} y_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \tag{3.3.2}$$

$$y_{ij} - x_j \leq 0 \quad \forall i \in I, j \in J \tag{3.3.3}$$

$$W - \sum_{j \in J} d_{ij} y_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in I \tag{3.3.4}$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (3.3.5)$$

$$y_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.3.6)$$

La fonction objectif (3.3) minimise la distance maximum entre un nœud de demande et l'installation la plus proche de ce nœud. La contrainte (3.3.1) stipule que p installations doivent être localisées. Les contraintes (3.3.2) exigent que chaque nœud de demande soit affecté à une installation située au nœud j . Les contraintes (3.3.3) limitent l'affectation des nœuds de demande aux installations ouvertes. Les contraintes (3.3.4) indiquent que la distance maximum séparant les points de demande et l'installation la plus proche doit être plus grande ou égale à la distance entre chaque nœud de demande et l'installation à laquelle il est affecté. L'ensemble des contraintes (3.3.5) et (3.3.6) sont les contraintes d'intégrité standard.

Dans certains cas, la distance doit être pondérée par la demande, dès lors les contraintes (3.3.4) doivent être remplacées par :

$$W - h_i \sum_{j \in J} d_{ij} y_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in I$$

3.2.3. Problème de la p -médiane

Dans beaucoup de cas, le coût pour desservir une demande à partir de l'installation la plus proche augmente en fonction 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.

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 trois hypothèses importantes. Il suppose que :

- le nombre d'installations à localiser est connu a priori ;
- le coût d'implantation d'une installation est identique quel que soit le site potentiel ;
- les installations n'ont pas de contrainte de capacité.

La formulation de ce problème est la suivante :

Entrées:

m = le nombre de clients indexés par $i, i \in I = \{1, \dots, m\}$

n = le nombre de sites potentiels indexés par $j, j \in J = \{1, \dots, n\}$

p = le nombre d'installations à localiser, $1 \leq p \leq n$.

h_i = la demande au nœud i

c_{ij} = le coût unitaire de déplacement pour satisfaire la demande du nœud i par l'installation du nœud $j, \forall i, j$

Variables de décision:

Variables de localisation

x_j = 1 si on localise une installation au site potentiel j
0 sinon

Variable d'affectation

y_{ij} = 1 si la demande du nœud i est affectée à l'installation du nœud j
0 sinon

Minimiser:

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} h_i c_{ij} y_{ij} \quad (3.4)$$

Sous contraintes:

$$\sum_{j \in J} x_j = p \quad (3.4.1)$$

$$\sum_{j \in J} y_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (3.4.2)$$

$$y_{ij} - x_j \leq 0 \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.4.3)$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (3.4.4)$$

$$y_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.4.5)$$

La fonction objectif (3.4) minimise le coût total nécessaire pour desservir chaque nœud de demande à partir de l'installation la plus proche. La contrainte (3.4.1) stipule que p installations doivent être localisées. Les contraintes (3.4.2) exigent que chaque nœud de demande i soit affecté à exactement une installation j . Les contraintes (3.4.3) limitent l'affectation des nœuds de demande aux installations ouvertes. L'ensemble des contraintes (3.4.4) et (3.4.5) sont les contraintes d'intégrité standard.

Cette formulation de la p -médiane suppose que les installations sont localisées aux nœuds du réseau. Cette hypothèse pourrait conduire à une solution suboptimale, cependant Hakimi (1964) a montré que même si les installations pouvaient être localisées sur les liens du réseau le coût total ne serait pas réduit. En conséquence, cette formulation permet d'obtenir une solution optimale, même si les installations pouvaient être situées n'importe où sur un lien.

Le problème de localisation d'installation sans contrainte de capacité (Uncapacitated Facility Location Problem (UFL)) est similaire au problème de la p -médiane excepté que le nombre d'installations à localiser est déterminé endogènement. Un coût fixe non négatif est associé à chaque site potentiel et ce coût est encouru seulement si le service est réellement implanté sur ce site. On modifie la formulation du problème de la p -médiane en supprimant la contrainte (3.4.1) et en ajoutant le terme $\sum_{j \in J} f_j x_j$ à la fonction objectif (3.4) où f_j est le coût pour implanter une installation au nœud j . L'objectif est donc de minimiser les coûts totaux de transport et d'implantation d'installation.

Le « Capacitated Facility Location Problem » (CFLP) ajoute les contraintes de capacité des installations au problème UFL et relaxe donc les trois hypothèses de la p -médiane. Si I_j est la capacité de l'installation j , ces contraintes s'écrivent :

$$\sum_{j \in J} (h_i y_{ij} - \Gamma_j x_j) \leq 0, \quad \forall i \in I \quad (3.4.6)$$

De plus, la demande du nœud i peut alors être affectée à plusieurs installations, si l'installation la plus proche voit sa limite de capacité atteinte.

3.3. Problèmes de localisation de hubs

Le problème de localisation de hubs est une des extensions du problème de la p -médiane. Il survient lorsque la demande de transport est liée à un grand nombre de paires d'origines-destinations. 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.

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, 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 deux 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.

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. L'étude effectuée ici tente d'augmenter l'efficacité des transports. C'est la raison pour laquelle nous nous sommes intéressés uniquement au problème du p -hub médian.

Le lecteur intéressé par le problème du p -hub centre trouvera sa définition dans O'Kelly *et al.* (1991). Campbell (1994) en donne une formulation quadratique puis donne une linéarisation qui a le désavantage d'avoir une augmentation importante du nombre de variables de décision. Plusieurs linéarisations sont également proposées et comparées par Kara *et al.* (2000). Plusieurs variantes à ce problème existent, en particulier, le problème peut tenir compte d'affectation nœud/hub simple ou multiple. A notre connaissance, la prise en compte de l'affectation multiple, n'a pas été étudié dans la littérature à l'exception d'un travail non publié par Ernst *et al.*

Le problème de couverture par des hubs est de minimiser le nombre de hubs tout en s'assurant que tous les coûts de transports entre toutes les paires d'O-D sont inférieurs à une limite. Ce problème a été présenté par Campbell (1994) qui en a donné une formulation quadratique et une linéarisation. Une amélioration très importante à la linéarisation de ce problème a été donnée par Kara *et al.* (2003).

3.3.1. Réseau Hub-and-Spoke

Cette partie est essentiellement inspirée de Daskin (1995). Dans le problème étudié, chaque paire origine-destination (O-D) a besoin d'un service différent. Des marchandises allant d'Anvers à Marseille, sont différentes des marchandises allant de Bruxelles à Paris. Si N nœuds peuvent être considérés comme une origine ou une destination, il y a alors $N(N-1)$ paires O-D dans un réseau où chaque nœud est directement connecté à tous les autres nœuds. La Figure 3.1. illustre un tel réseau dans le cas de 6 nœuds. Pour un tel réseau, si le service de

transport peut desservir 5 paires O-D par jour et par véhicule, 18 véhicules⁵ peuvent alors desservir exactement 10 nœuds quotidiennement.

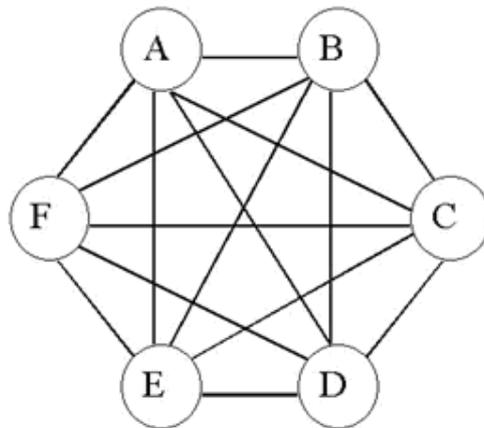


Figure 3.1. Un réseau de 6 nœuds et 30 paires origine-destination entièrement connecté.

D'un autre côté, si un nœud sert de hub et est connecté à tous les autres nœuds du réseau, alors $2(N-1)$ liens sont suffisants pour assurer le service entre toutes les paires O-D. La Figure 3.2. illustre un tel réseau dans le cas où $N=6$. Si chaque véhicule peut desservir 5 paires O-D par jour, 46 villes⁶ peuvent être desservies avec 18 véhicules. Avec des ressources de transport fixées, beaucoup plus de villes peuvent être desservies dans un réseau de type « *hub-and-spoke* » que dans un réseau entièrement connecté. Ou, dans un réseau de type « *hub-and-spoke* », le même nombre de villes peuvent être desservies mais avec une fréquence plus grande. Par conséquent, et pour bénéficier des économies d'échelle, les demandes faibles sont d'abord acheminées vers un «hub». A ce hub, le trafic est consolidé et des flux plus volumineux sont acheminés vers d'autres hubs par des services à grande fréquence et à grande capacité. Les services à plus faible fréquence et plus petite capacité sont utilisés entre les hubs et les nœuds de demande. Une telle organisation permet d'offrir un service de fréquence et de qualité supérieures entre hubs et d'assurer une utilisation plus efficace des ressources. En effet, la structure « *hub-and-spoke* » engendre moins de liaisons, et permet d'obtenir des coûts inférieurs de transport.

C'est ce type de raison qui a conduit beaucoup de compagnies aériennes à adopter un réseau de type « *hub-and-spoke* ». Dans le cas du transport aérien, par exemple, la diminution des coûts provient d'économies de densité dues à l'afflux de passagers, au remplissage des avions,

⁵ En effet, avec 10 nœuds, il existe $10 \times 9 = 90$ O-D. Puisqu'un véhicule dessert 5 paires OD, il faut $90/5 = 18$ véhicules pour desservir les 90 paires.

⁶ Les 18 véhicules peuvent desservir $5 \times 18 = 90$ paires O-D, c'est à dire 46 villes ($90 = 2(N-1)$)

et donc, à la baisse du coût moyen. La hausse du trafic implique une hausse de la taille des avions, une baisse des coûts moyens par passager et des coûts des ressources humaines.

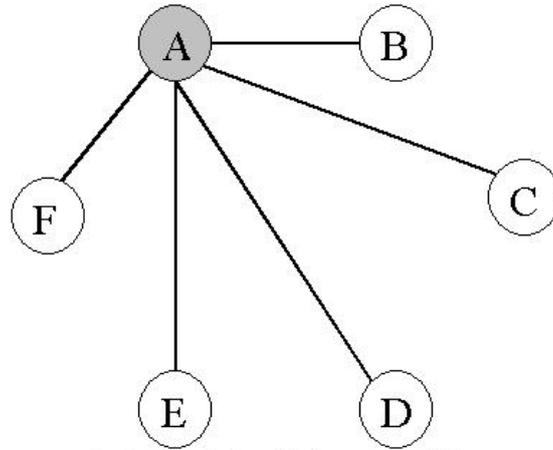


Figure 3.2. Un réseau « hub-and-spoke » de 6 nœuds et 30 paires origine-destination.

Les réseaux « *hub-and-spoke* » ont également certains désavantages. En effet, plusieurs moyens de transport et des itinéraires plus longs doivent être utilisés entre toutes les paires origines-destinations excepté celles pour qui l'origine et la destination sont des hubs. Si l'on reprend le cas du transport aérien, ces réseaux créent une concentration des vols lors des heures de pointe, une congestion des aéroports, et une forte pression sur le personnel au sol, qui doit être décuplé. De plus, le coût d'une liaison « *hub-and-spoke* » augmente compte tenu des coûts de décollage et d'atterrissage.

Dans un réseau avec plusieurs hubs, on suppose que tous les hubs sont directement connectés entre eux, que les villes sont connectées à un hub unique et que les villes qui ne sont pas des hubs ne sont pas directement connectées. La Figure 3.3. illustre un tel réseau comprenant 15 villes dont 3 sont des hubs. Il est clair que le nombre de tonnes allant d'un hub à un autre est plus grand que le nombre de tonnes allant d'un hub à un spoke ou d'un spoke à un hub. Dans la Figure 3.3., si le flux entre chaque paire O-D de 10 tonnes, alors, il y a 140 tonnes (14 villes x 10 tonnes) transportées entre chaque ville et le hub auquel elle est connectée. Il y aura donc 250 tonnes⁷ transportées dans chaque sens entre chaque hub. Dans un réseau de 15 nœuds entièrement connectés, si le flux entre chaque paire O-D est également de 10 tonnes, il n'y aurait que 10 tonnes transportées dans chaque sens sur chaque lien.

⁷ A chaque hub, quatre villes sont reliées ; chaque liaison inter-hub relie donc 5 villes à 5 villes, c'est à dire $5 \times 5 \times 10$ tonnes = 250 tonnes

S'il y a des économies d'échelle associées au système de transport utilisé, les coûts de transport par t.km peuvent être significativement moindres en utilisant le réseau « *hub-and-spoke* » plutôt qu'un réseau entièrement connecté. La raison est que les liens inter-hub consolident tous les flux partant du hub d'origine ou de n'importe quel nœud connecté à ce hub d'origine vers le hub de destination ou vers n'importe quel nœud connecté à ce hub de destination.

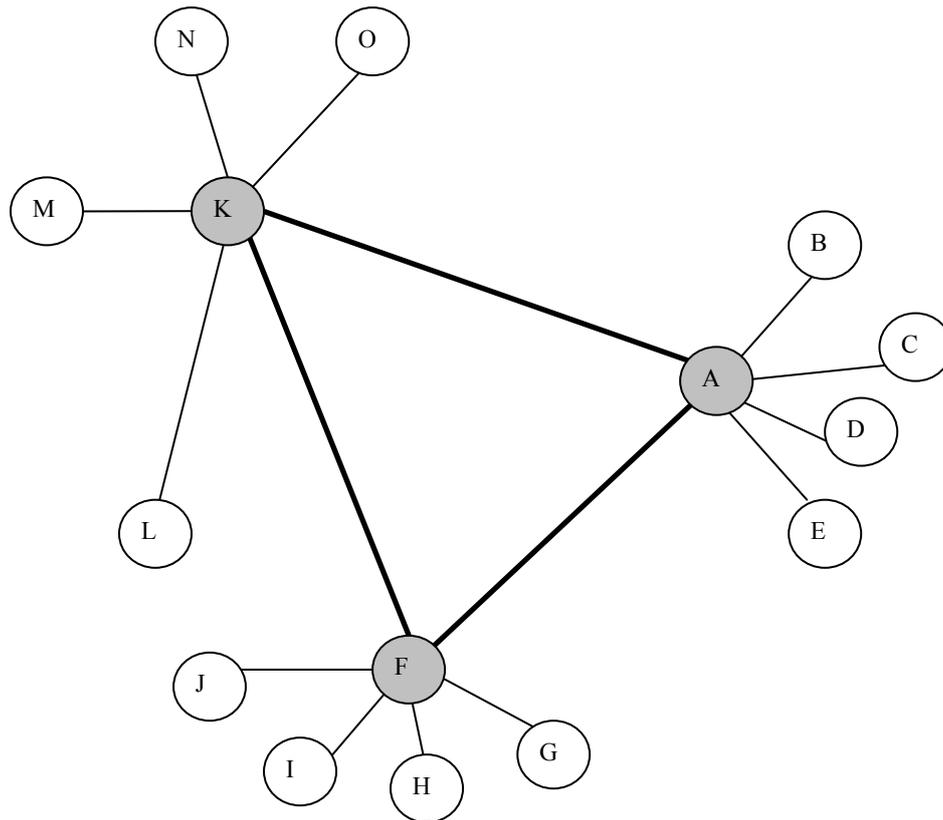


Figure 3.3. Un réseau « *hub-and-spoke* » de 3 hubs
Les hubs sont localisés aux nœuds A, F et K.

3.3.2. Typologie des réseaux de hubs

Un réseau de hub standard, comme il vient d'être présenté qualitativement, est le produit de trois restrictions simplificatrices :

- tous les nœuds sont connectés directement à un seul hub ;
- 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 ;
- tous les hubs sont entièrement interconnectés.

O'Kelly et Miller (1994) transforment ces trois restrictions simplificatrices en trois variables de décision :

1. Affectation nœud/hub : simple ou multiple ;
2. Connexions inter-nodales : autorisées ou non ;
3. Connexions inter-hubs : complètes ou partielles.

Ces variables de décisions permettent de définir le type de réseau de hubs et conduisent à $2^3=8$ classes de réseau de hubs définies aux Tableau 3.1.

Classe	Affectation Nœud/hub	Connexions inter-nodales	Connexions inter-hubs
A	A un seul hub	Pas autorisé	Complète
B	A un seul hub	Pas autorisé	Partielle
C	A un seul hub	Autorisé	Complète
D	A un seul hub	Autorisé	Partielle
E	A plusieurs hubs	Pas autorisé	Complète
F	A plusieurs hubs	Pas autorisé	Partielle
G	A plusieurs hubs	Autorisé	Complète
H	A plusieurs hubs	Autorisé	Partielle

Tableau 3.1. Classification du réseau de hubs (adapté de O'Kelly et Miller (1994)).

Dans la suite de ce chapitre, différentes formulations et variantes de problème du p -hub médian standard, c'est-à-dire de classe A, sont exposées. La méthodologie suivie nous permet ensuite de lever les restrictions simplificatrices en utilisant un modèle de réseau. Dans ce modèle de réseau, les hubs sont entièrement connectés et les itinéraires entre chaque paire origine-destination pourront utiliser un hub ou être directement connectés.

3.3.3. Formulations du problème du p -hub médian

Le problème de conception de réseau de hubs, implique, dans sa forme la plus générale de :

- trouver les localisations optimales pour les hubs ;
- affecter les origines et destinations (qui ne sont pas des hubs) aux hubs ;
- déterminer les liens entre les hubs ;
- affecter les flux sur le réseau.

Le nombre de variables de décision est très important et, de plus, les solutions de ces quatre étapes sont hautement interdépendantes. En pratique, une approche partielle peut être adoptée où certaines contraintes ou certaines fonctions sur les variables de décision sont simplifiées pour faciliter la résolution mathématique. Une simplification couramment rencontrée est que les coûts de transport sont indépendants du volume des flux, en dépit de l'importance des économies d'échelle effectuées. On peut aussi reconnaître la difficulté mathématique inhérente au problème et rechercher un optimum local plutôt qu'un optimum global à l'aide d'heuristiques plus ou moins sophistiquées.

Outre les avantages et les inconvénients des réseaux « *hub-and-spoke* », il est clair que la performance du réseau dépend de façon critique de la localisation du ou des hub(s). Différents problèmes de localisations qui peuvent arriver dans le contexte de tels réseaux vont à présent être discutés.

O'Kelly (1987) a présenté une première formulation quadratique du problème du p -hub médian (p -HMP). Campbell (1994) a introduit le premier mécanisme de linéarisation. Ce processus produit une formulation linéaire en nombres entiers mixtes. La formulation suivante, dont les coûts sont représentés à la Figure 3.4., est utilisée dans la majorité des études sur les problèmes de localisation :

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

N = ensemble des nœuds de demande

Variables de décisions

$Z_{ij}^{km} = 1$ si le flux entre l'origine i et la destination j passe par les hubs situés aux localisations potentielles k et m
 0 sinon

$Y_k = 1$ si on localise un hub en k
 0 sinon

Minimiser:

$$\sum_i \sum_j \sum_k \sum_m C_{ij}^{km} h_{ij} Z_{ij}^{km} \tag{3.5}$$

Sous contraintes:

$$\sum_x Y_k = p \tag{3.5.1}$$

$$\sum_k \sum_m Z_{ij}^{km} = 1 \quad \forall i, j \in N \quad (3.5.2)$$

$$Z_{ij}^{km} \leq Y_k \quad \forall i, j, k, m \in N \quad (3.5.3)$$

$$Z_{ij}^{km} \leq Y_m \quad \forall i, j, k, m \in N \quad (3.5.4)$$

$$Y_k = 0, 1 \quad \forall k \in N \quad (3.5.5)$$

$$Z_{ij}^{km} = 0, 1 \quad \forall i, j, k, m \in N \quad (3.5.6)$$

La fonction objectif (3.5) minimise le coût total de transport sur le réseau avec p hubs. La contrainte (3.5.1) stipule qu'exactly p hubs doivent être localisés. Les contraintes (3.5.2) signifient que chaque paire origine-destination (i, j) doit être affectée à exactement une paire de hubs. Puisque k peut être égal à m dans les contraintes (3.5.2), le flux entre une origine i et une destination j peut passer que par un seul hub. Dans ce cas, $\alpha c_{km} = \alpha c_{kk} = 0$. Les contraintes (3.5.3) et (3.5.4) stipulent que le flux d'une origine i à une destination j ne peut être affecté au hub localisé en k (3.5.3) ou en m (3.5.4) à moins que le hub soit localisé sur ces sites potentiels. Finalement, les contraintes (3.5.5) et (3.5.6) sont les contraintes standards d'intégrité. En l'absence de contraintes de capacité, on aura une solution optimale pour laquelle chaque Z_{ij}^{km} sera égal à 0 ou 1 puisque le flux total pour chaque paire (i, j) passera par la paire de hubs la moins chère.

Une des difficultés associée aux modèles de localisation des hubs est que le nombre de variables d'affectation (Z_{ij}^{km}) peut être extrêmement important. Pour un problème relativement petit avec 32 origines et destinations, il y aurait plus d'un million de ces variables de décision. En effet, si chaque nœud de demande est une localisation potentielle, alors il y aura N^4 variables d'affectation. La taille du problème croît donc rapidement avec le nombre de nœuds si rien ne permet, a priori, d'éliminer des nœuds de l'ensemble des localisations potentielles.

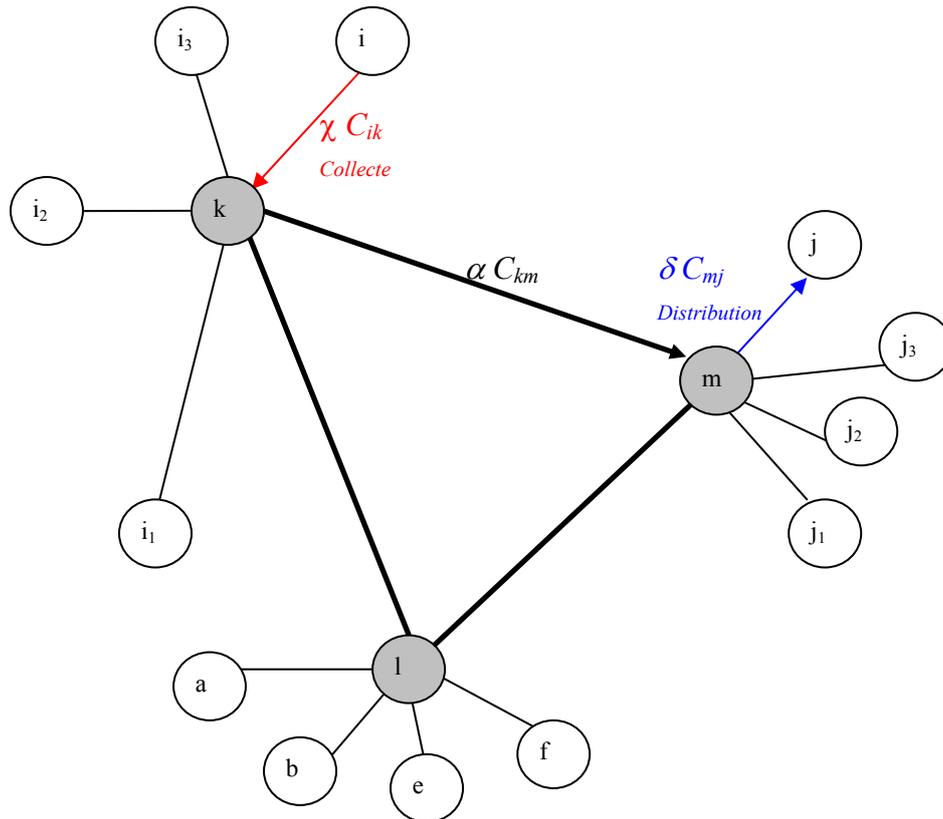


Figure 3.4. Exemple d'un trajet dans un réseau « hub-and-spoke ».

La localisation n'est pas nécessairement sur un des nœuds et pourrait se trouver sur un lien, cependant, Goldman (1969) a montré que, le p -HMP appartient à une classe des problèmes tels que même si la localisation des hubs n'était pas limitée à l'ensemble discret de nœuds, une solution optimale existe dans cet ensemble. La recherche de la solution optimale d'une localisation de hubs sur un réseau peut donc s'effectuer uniquement sur l'ensemble des nœuds de ce réseau.

La similarité entre ce modèle et le modèle de la p -médiane est évidente. Chaque paire (i,j) dans un p -HMP est analogue à un point de demande dans un problème de la p -médiane (p -MP) et la formulation du p -HMP est analogue à celle utilisée pour la p -MP. L'affectation des nœuds aux installations dans le cadre du problème de la p -médiane est triviale puisque chaque nœud est affecté à l'installation ouverte la plus proche. Par contre, cette affectation n'est plus triviale dans le cadre du p -HMP car il n'est pas toujours optimal d'affecter un nœud à son hub le plus proche. Pour voir qualitativement pourquoi, considérons de nouveau la Figure 3.3. Dans cette figure, le nœud L est affecté au nœud K en dépit du fait que L est plus proche du nœud localisé en F . Ceci peut être une affectation optimale si le nœud L interagit plus fortement avec les nœuds K, M, N et O qu'il ne le fait avec les nœuds F à J . Le terme de

réduction α entre les nœuds est supposé ne pas être trop petit pour que les coûts de transport entre les nœuds et les hubs ne soient pas trop élevés par rapport aux coûts de transport des liaisons inter-hub.

Dans le cas où le nombre de hubs à localiser est relativement petit, moins d'une dizaine, O'Kelly (1987) propose deux heuristiques différentes. Les deux heuristiques impliquent une énumération complète de toutes les localisations possibles des p hubs à partir des sites potentiels pour la localisation d'un hub. La première heuristique affecte chaque nœud au hub le plus proche. Si $\alpha=0$, le problème se réduit au problème de la p -médiane. Dans ce cas, l'heuristique est optimale. Dans la seconde heuristique, pour chaque configuration possible des hubs, toutes les façons possibles d'affecter les nœuds à leur hub le plus proche ou le deuxième hub le plus proche sont évaluées. Il y a :

$$\binom{N}{P} = \frac{N!}{P!(N-P)!}$$

façons de sélectionner P hubs à partir de N nœuds. Pour chacun d'eux, la seconde heuristique évalue les 2^{N-P} façons possibles d'affecter les nœuds au hub le plus proche ou au deuxième hub le plus proche. Le temps d'exécution de la seconde heuristique augmente rapidement avec le nombre de nœuds. O'Kelly a pu identifier des cas où la deuxième affectation donne une réduction du coût total. Cependant, dans les cas où il y a une réduction significative des coûts inter-hub ($\alpha < 0.5$), O'Kelly montre que la première heuristique donne de bons résultats. En effet, si les coûts de transport entre les nœuds et les hubs sont élevés par rapport aux coûts de transport des liaisons inter-hub ; alors il est intéressant de diminuer les coûts de transport entre les nœuds et les hubs en affectant le nœud à l'hub le plus proche.

Beaucoup d'extensions du problème de localisation du p -hub médian peuvent être formulées. Par exemple, le coût d'implantation d'un hub au site candidat k (f_k) peut être pris en compte dans la fonction objectif et permet d'éliminer la contrainte (3.5.1) sur le nombre de hubs à être localisés. Ce problème : le « Uncapacitated Hub Location Problem » (UHLP) est analogue au UFLP discuté précédemment. La fonction objectif devient alors :

$$\sum_i \sum_j \sum_k \sum_m c_{ij}^{km} h_{ij} Z_{ij}^{km} + \sum_k f_k Y_k \quad (3.6)$$

La capacité des hubs peut également être intégrée dans le modèle (Capacitated Hub Location Problem (CHLP)). Si Γ_k est la capacité du hub qui serait localisé en k , les contraintes suivantes doivent être ajoutées au UHLP :

$$\sum_i \sum_j h_{ij} (\sum_k (Z_{ij}^{km} + Z_{ij}^{mk}) - Z_{ij}^{kk}) \leq \Gamma_k Y_k \quad \forall k \in N \quad (3.7)$$

Le premier terme du membre de droite de l'inégalité (3.7) représente le nombre total d'unités de flux qui utilisent le hub k comme premier hub. Le second terme de cette inégalité représente le nombre total d'unités de flux qui utilisent le hub k comme second hub. Le troisième terme, compense le double comptage des flux de i vers j qui pourrait utiliser uniquement le hub k .

Rappelons que la principale difficulté pour résoudre le p-HMP est que le nombre de variables d'affectation (Z_{ij}^{km}) peut être très grand. En effet, le p-HMP implique $(N^4 + N)$ variables où N est le nombre de hubs candidats et exige $(1 + N^2 + N^4)$ contraintes linéaires. Ernst *et al* (1996) ont trouvé une nouvelle formulation pour résoudre de plus grands problèmes. Ils retirent les variables Z_{ij}^{km} et 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 est la suivante :

Variables de décision:

$X_{ij} = 1$ si le nœud i est affecté au hub localisé au nœud $j \quad \forall i, j \in N$

0 sinon

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

Minimiser:

$$\sum_{i \in N} \sum_{k \in N} C_{ik} X_{ik} (\chi O_i + \delta D_i) + \sum_{i \in N} \sum_{k \in N} \sum_{m \in N} \alpha C_{km} Y_{km}^i \quad (3.8)$$

Sous contraintes:

$$\sum_{x \in N} X_{kk} = p \quad (3.8.1)$$

$$\sum_{k \in N} X_{ik} = 1 \quad \forall i \in N \quad (3.8.2)$$

$$X_{ik} \leq X_{kk} \quad \forall i, k \in N \quad (3.8.3)$$

$$\sum_{m \in N} Y_{km}^i - \sum_{m \in N} Y_{mk}^i = O_i X_{ik} - \sum_{j \in N} h_{ij} X_{jk} \quad \forall i, k \in N \quad (3.8.4)$$

$$X_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in N \quad (3.8.5)$$

$$Y_{km}^i \geq 0 \quad \forall i, k, m \in N \quad (3.8.6)$$

La formulation ci-dessus 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 .

Dans la situation particulière d'un transport combiné rail-route les pré- et post-acheminements s'effectuent par la route et les liaisons inter-hub sont des liaisons ferroviaires. L'étude présentée suppose une économie d'échelle de 10 %. Les paramètres du problème peuvent être calculés en reprenant les coûts des opérations pour les conteneurs de 20 pieds et synthétisés au Tableau 2.4.

χ (δ) = rapport entre le coût unitaire de pré- (post-) acheminement routier et le coût unitaire de transport routier sur longue distance = $\chi = \frac{0,089}{0,06} = 1,483 = \delta$

α = rapport entre le coût unitaire de transport ferroviaire, en tenant compte d'une réduction de 10 % due aux économies d'échelle, et le coût unitaire de transport routier sur longue distance : $\alpha = \frac{0,90 * 0,035}{0,06} = 0,525$

Le coût de transbordement à la tonne, T , aux hubs k et m doit également être pris en compte : $T = 3,290$ €/t. Notons que pour pouvoir obtenir ce coût, la fonction que nous avons obtenue, paragraphe 2.8.3. du chapitre 2, à partir des données de l'étude de Ballis *et al.* (2002) montre que le nombre minimum d'UTI transbordées par an doit être d'environ 45.000. Pour rappel, si $T(n)$ correspond au coût moyen de transbordement et n au nombre d'UTI transbordées par an, alors :

$$T(n) = -12,163 \ln(n) + 180,26 \quad (3.9)$$

avec une limite inférieure à 2 €/t, discutée au § 2.8.3.

La fonction objectif à minimiser s'écrit donc :

$$1,483 \sum_{i \in N} \sum_{k \in N} (C_{ik} + 2 * 3,29) X_{ik} (O_i + D_i) + \sum_{i \in N} \sum_{k \in N} \sum_{m \in N} 0,525 C_{km} Y_{km}^i \quad (3.10)$$

La configuration obtenue, pour un coût de transbordement fixe et identique aux différents hubs, permet de déterminer les flux transbordés aux terminaux et d'estimer les nouveaux coûts de transbordement, T_k , en fonction des flux propres à chaque hub k : F_k . La fonction objectif (6.3) peut alors être enrichie de ces nouveaux coûts de transbordement :

$$1,483 \sum_{i \in N} \sum_{k \in N} (C_{ik} + T_k) X_{ik} (O_i + D_i) + \sum_{i \in N} \sum_{k \in N} \sum_{m \in N} 0,525 C_{km} Y_{km}^i \quad (3.11)$$

sous les contraintes (6.1.1) à (6.1.6)

L'algorithme suivant est alors mis en application :

1. Initialisation

- 1.1. Mettre $n=0$;
- 1.2. Minimiser la fonction objectif (3.10) ;
- 1.3. Création du réseau hub-and-spoke correspondant aux hubs obtenus ;
- 1.4. Affectation sur le réseau ;
- 1.5. Déterminer les flux, F_k^0 , transbordés aux terminaux k ;
- 1.6. Calculer les coûts de transbordement en fonction des flux obtenus, $T_k^0(F_k^0)$.

2. Régime

- 2.1. Incrémenter n : $n=n+1$;
- 2.2. Minimiser la fonction objectif (3.11) sur base des coûts de transbordement T_k^{n-1} pour les hubs sélectionnés, le coût de transbordement des autres hubs reste fixé à 3,29 €/t ;
- 2.3. Si les localisations obtenues restent identiques alors :
 - Affecter les flux sur le réseau ;
 - Déterminer les nouveaux flux, F_k^n , transbordés aux terminaux k ;
 - Calculer les coûts de transbordement en fonction des flux obtenus $T_k^n(F_k^n)$;
- 2.4. Sinon
 - Retour à l'étape *Initialisation* 1.3.

3. Test d'arrêt

Si $T_k^n - T_k^{n-1} \leq 0,01$ stop.

Les fonctions objectif (3.10) et (3.11) doivent minimiser le coût total de transport en supposant qu'aucun hub ne soit déjà implanté. Si l'existence de p hubs est prise en compte, une formulation permettant de minimiser le coût total de transport en localisant p hubs (p est le nombre de nouveaux hubs à implanter) et en tenant compte du fait que p hubs sont déjà implantés est proposée en annexe 2.

3.4. Conclusions

Les problèmes de localisation de hubs décrits dans ce chapitre peuvent nécessiter en entrée :

1. le réseau ;
2. la demande aux différents nœuds ;
3. les flux entre les origines et les destinations ;
4. les coûts unitaires d'un trajet entre les nœuds i et j ;
5. le coût pour chaque mode de transport ;
6. les coûts unitaires d'un trajet entre les nœuds i et j , si i et j sont des hubs ;
7. le coût relatif de collecte ;
8. le coût relatif de distribution ;
9. le facteur de réduction pour la liaison entre deux hubs ;
10. le coût d'implantation des hubs (ou définir le nombre de hubs à localiser)
11. la capacité des hubs ;
12. les localisations potentielles pour des implantations de hubs.

Dans le chapitre précédent, le coût de toutes les opérations de transport pour chaque mode ont été estimés. Les coûts de transbordement pour différentes conceptions de terminaux sont analysés et une évaluation des économies d'échelle est effectuée. Les entrées des points 4 à 11 sont donc estimées.

Dans le chapitre suivant, la demande, l'offre et la répartition des flux sur le territoire européen (L'EU25, la Suisse et la Norvège) sont étudiées. La demande de transport est constituée de l'ensemble des quantités à transporter entre les différentes origines-destinations. Le système de transport, est modélisé par un réseau qui tient compte des infrastructures ponctuelles telles que les gares, les ports, les aéroports, les terminaux, les échangeurs autoroutiers, les carrefours,... et d'infrastructures linéaires (voies ferrées, voies d'eau, routes, etc.). Le but principal de ce chapitre est de modéliser la répartition des flux sur l'ensemble d'un réseau multimodal.

Les entrées nécessaires pour le problème du p -hub médian sont le nombre de hubs à localiser parmi un ensemble de localisations potentielles, ainsi que les matrices des flux et des coûts entre ces localisations.

L'objectif premier du chapitre 5 est de décrire une méthode qui aide à recenser les meilleures localisations potentielles. L'idée fondamentale est d'employer les flux de conteneurs et leur dispersion géographique comme entrées pour déterminer un ensemble de localisations

potentielles. Ensuite, les matrices des flux et des coûts entre les localisations potentielles sont également déterminées.

4. Modélisation des flux de transport

Différents modèles spécifiques au transport de marchandises sont décrits dans ce chapitre et l'utilisation des « réseaux virtuels » dans le cadre de ce travail est justifiée. Le but principal de ce chapitre est d'étudier et d'optimiser la répartition des flux sur l'ensemble d'un réseau multimodal considérant que cette répartition du trafic sur le réseau est le résultat d'une interaction entre l'offre et la demande de transport. Les résultats obtenus montrent qu'il est possible d'obtenir un modèle calibré à la fois sur les tonnes transportées et sur les flux. Une situation de référence dans laquelle le transport de conteneurs, pour des distances supérieures à 300 km, peut s'effectuer par route, chemin de fer ou voie d'eau, mais où le transport intermodal n'est pas autorisé, est élaborée.

Introduction

Après description du modèle classique de la planification des transports, les modèles spécifiques au transport de marchandises sont présentés. Nous motivons ensuite le choix d'un modèle de réseau particulier : le réseau virtuel. La construction de ce réseau virtuel est expliquée à partir d'un réseau de transport.

L'obtention des flux de transport passe par une procédure d'affectation. Celle-ci sélectionne les routes entre les différentes paires d'origine-destination et y affecte les quantités à transporter. Classiquement, pour le transport de personnes, le choix entre différentes routes est expliqué par deux facteurs. Le premier est que certains usagers utilisent une route différente de celle qu'ils auraient utilisée en l'absence de congestion. Le second est que les usagers peuvent avoir différentes perceptions des coûts, dans ce cas, les différences dans les choix sont dus à des effets stochastiques.

Pour être complète, une procédure d'affectation devrait considérer à la fois les effets stochastiques et les effets dus aux contraintes de capacité. Cependant, la complexité ne rend pas leur solution envisageable sur des cas réels. En pratique, Van Vliet (1976) propose que le choix d'une procédure d'affectation dépende du niveau de congestion. Lorsque le réseau est relativement peu congestionné, ce qui est notamment le cas lors d'études inter-urbaines, les méthodes stochastiques doivent être préférées. Par contre, un haut niveau de congestion est un argument en faveur des méthodes tenant compte des contraintes de capacité.

Néanmoins, le niveau d'agrégation des matrices d'origines-destinations qui peuvent être produites pour des grandes zones géographiques est tel qu'on ne peut supposer que toutes les marchandises devraient être transportées par le même mode de transport sur le même itinéraire. En effet, la demande au niveau européen, par exemple, est souvent seulement disponible qu'au niveau 1 ou 2 des régions de la Nomenclature des Unités Territoriales Statistiques (NUTS⁸). L'origine et/ou la destination des marchandises est alors souvent matérialisée par le centroïde de chaque région. Ainsi, tout ce qui est envoyé entre ces régions l'est par le même et unique mode de transport. Or, une usine localisée tout près d'une gare

⁸ La nomenclature des unités territoriales statistiques (NUTS) a été établie par Eurostat il y a plus de vingt-cinq ans dans le but de disposer d'un schéma unique et cohérent de répartition territoriale pour l'établissement des statistiques régionales de l'Union européenne. En 2002, Eurostat a également publié un document qui explique tous les changements, dus notamment aux inévitables mutations que connaissent les structures administratives, apportés à la NUTS au cours des 20 dernières.

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, rendent parfois utile l'emploi de modes de transport alternatifs. Une méthode d'affectation, l'affectation multi-flux, est proposée pour résoudre ce problème de niveau d'agrégation des données disponibles sur la demande. Cette méthode est ensuite étudiée, appliquée évaluée et analysée sur un cas réel.

Finalement, une situation de référence dans laquelle le transport de conteneurs, pour des distances supérieures à 300 km, peut s'effectuer par route, chemin de fer ou voie d'eau, mais où le transport intermodal n'est pas autorisé, est élaborée.

4.1. Modèle classique de planification des transports

Les systèmes de transport sont complexes et leurs performances dépendent des décisions prises à différents niveaux de la société. Les processus d'évaluation, de conception et de gestion de ce système peuvent être effectués grâce à des modèles. La modélisation doit permettre d'élaborer et d'évaluer des stratégies qui améliorent le système de transport.

Le point de départ de la réalisation d'un modèle de trafic consiste à examiner la zone d'étude afin de mieux cerner sa configuration et les principales caractéristiques qui lui sont associées. Le territoire considéré va être découpé en un certain nombre de zones. Une zone est représentée par un centroïde (centre de gravité de la zone) qui en quelque sorte la synthétise. Lorsqu'il s'agit de modéliser de grandes zones géographiques, telles que le territoire européen, les données qu'il est possible d'obtenir sont, pour autant qu'elles existent, de nature assez agrégées. Les informations sur la demande de marchandises, par exemple, sont, dans le meilleur des cas, disponibles au niveau régional NUTS 2. Les modèles doivent alors être capables de tenir compte de la nature agrégée des informations.

La demande de transport est constituée de l'ensemble des quantités à transporter entre ces différentes zones. Elle est numériquement exprimée par les quantités de biens à transporter entre les points origines O et les points destinations D.

L'offre correspond à ce que les transporteurs sont disposés à offrir comme service en fonction de l'infrastructure disponible. C'est la partie du système de transport qui regroupe l'infrastructure de transport, les règles imposées par l'autorité de régulation ainsi que les moyens de transport permettant les mouvements de marchandises sur les différents modes. Le

mode représente le support physique sur lequel se déroule l'opération de transport (eau, fer, route). Dans ces différents modes, on distingue les moyens qui mettent en évidence les différents types de véhicules (exemple : camion de 15 t et camion de 40 t) qui sont utilisés par le mode concerné. Les coûts des différentes opérations de transport sur les différents modes et moyens doivent être estimés et associés aux différentes opérations : chargement, déchargement, mouvement ou transit.

Domencich & Mc Fadden (1975) énoncent une liste de critères qu'un modèle de planification doit satisfaire dans le but d'être un bon outil d'analyse politique des transports :

- *La sensibilité* : le modèle doit être sensible à la politique de transport de manière à ce que les effets des alternatives politiques puissent être prévisibles.
- *La causalité* : le modèle établit clairement le lien comportemental entre les attributs du système de transport et les décisions des usagers.
- *La flexibilité* : le modèle doit pouvoir être appliqué à une grande variété de problèmes de planification sans entraîner de collecte de données ou de calibrage majeurs.
- *La transférabilité* : le modèle doit pouvoir être transférable d'un réseau à un autre avec un faible coût.
- *L'efficacité* : le modèle doit fournir un maximum d'adéquation lors de la collection des données.

L'approche classique de la planification des transports essaie d'identifier un certain nombre de sous ensembles du système global. Ces derniers sont analysés séparément et en général de manière séquentielle. L'approche, proposée par Wilson (1974) et représentée à la Figure 4.1 pour une période annuelle, commence par considérer une zone d'étude et un système de réseau ; par la calibration et la validation des données annuelles et par une prévision des données. Ces données sont alors utilisées pour estimer la génération.

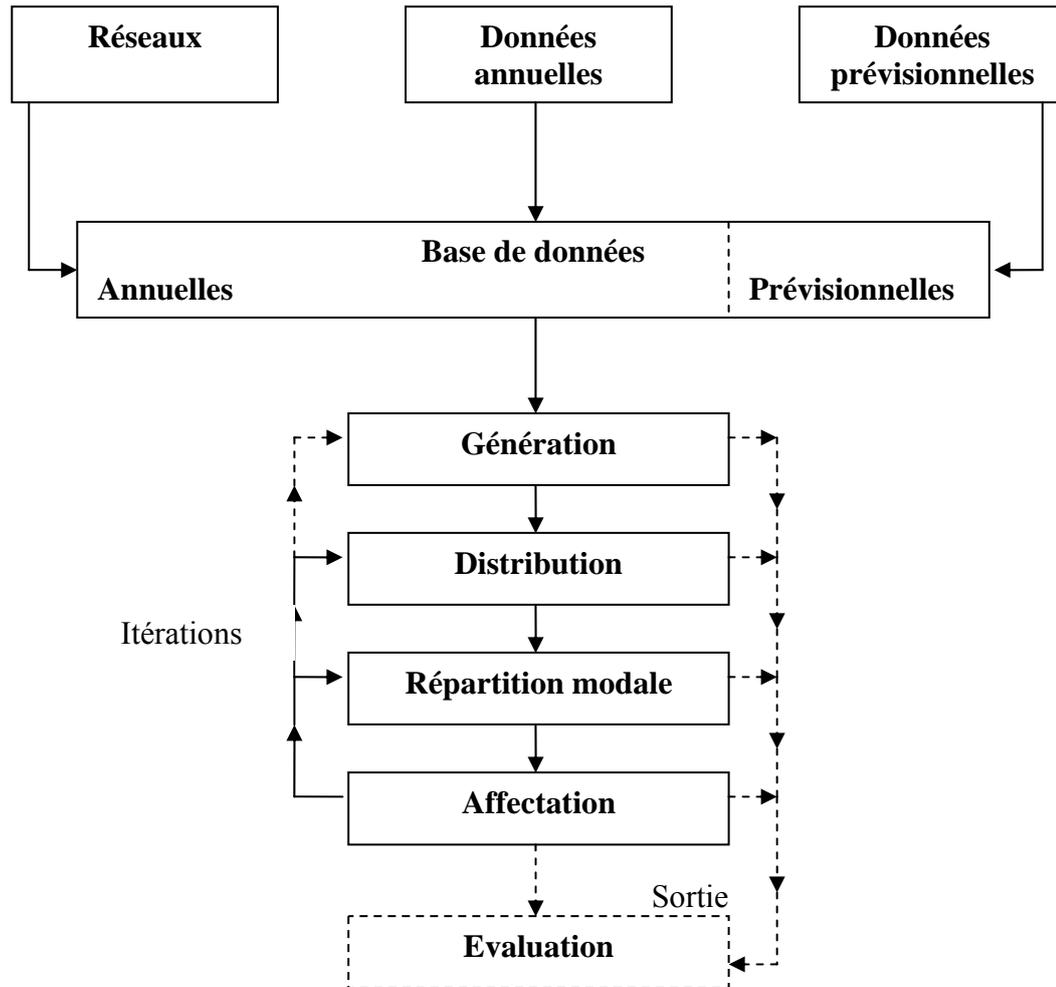


Figure 4.1. Modèles à quatre étapes (adapté de Ortúzar and Willumsen, 1990).

Les quatre étapes du modèle sont :

- *La génération* : elle consiste à déterminer la demande de transports émise et reçue pour chaque zone étudiée.
- *La distribution* : c'est la deuxième étape. Elle consiste à estimer la part de la demande de transport de chaque zone émettrice qui sera à destination d'une zone réceptrice donnée ; c'est-à-dire, estimer les quantités de marchandises à transporter d'une origine vers une destination.

Après ces deux étapes, la demande de transport est connue et une matrice d'origines-destinations, c'est-à-dire la matrice contenant les informations relatives aux déplacements entre les différentes paires d'origine-destination est construite.

- *La répartition (ou le choix) modale* : cette étape répartit la demande de transport sur les différents modes (routier, fluvial, ferroviaire,...) en fonction de leur compétitivité relative. La compétitivité des modes est déterminée à partir de trois ensembles de facteurs :
 - les caractéristiques du voyage : longueur et le coût du trajet, période pendant laquelle s'effectue le transport, ...
 - les caractéristiques des marchandises transportées ;
 - les caractéristiques du système de transport.
- *L'affectation* : la dernière étape des modèles à quatre étapes, consiste à déterminer la répartition des flux sur les différents itinéraires lorsque le volume de déplacement est connu pour chaque mode entre chaque origine et chaque destination.

Lorsque le modèle a été validé, il doit être appliqué à un ou plusieurs horizons de planification. Il est alors nécessaire de développer des scénarios décrivant les caractéristiques appropriées du système de transport et projetant les variables dans le futur. La construction d'une nouvelle infrastructure de transport peut, par exemple, avoir une influence sur l'affectation des flux, mais également sur la quantité de marchandises sur le réseau. Le diagramme présenté à la Figure 4.1. n'est donc plus à interpréter comme une séquence linéaire, car une série de rétroactions, qui peuvent s'effectuer à différents niveaux, sont possibles.

4.2. Modèles spécifiques au transport de fret

La modélisation du transport de fret n'a pas été aussi développée que la modélisation du transport de passagers (Vickerman, 2003). Ortúzar (1990) met en évidence les raisons pour lesquelles les modèles de transport se sont principalement focalisés sur l'étude du transport de passagers. Les points suivants reprennent quelques raisons de ce manque d'intérêt pour la modélisation du transport de marchandises.

- *Une modélisation plus complexe.*

En effet, il y a plusieurs aspects concernant la demande de fret qui la rendent plus difficile à modéliser, comme par exemple les différents types de produits à transporter, les caractéristiques de ces produits (matières liquides ou dangereuses, denrées périssables, ...) qui influencent la façon dont ils vont être transportés ; les variations saisonnières, ...

- *Un intérêt moins important pendant une certaine période.*

Dans la plupart des pays industrialisés, un intérêt particulier a été porté à la congestion urbaine ce qui a contribué au développement de modèles de gestion de transport de passagers ;

- *Une implication de plus d'acteurs que pour le transport de passagers.*

Parmi ces acteurs, il y a les entreprises qui exportent ou importent des marchandises, les expéditeurs, les chargeurs qui s'occupent des mouvements, des chargements, des transbordements, ...

Notons aussi que d'un point de vue politique, le transport de passagers est plus sensible que le transport de marchandises.

Selon Quinet et Vickerman (2004), la plupart des modèles se basent sur un volume potentiel de fret à expédier, qui est alors distribué entre les divers modes, selon les performances de ces différents modes en termes de coût, temps et fiabilité. Le choix d'un itinéraire est précédé par la conversion des tonnages en nombre de véhicules. Ce type de modèle est employé en particulier dans des études inter-régionales.

D'autres modèles plus sophistiqués peuvent par exemple prendre en compte le fait que le transport de marchandises est juste une partie de la politique logistique globale de l'entreprise, incluant la gestion des inventaires, la taille et la fréquence des expéditions. Même s'ils sont plus réalistes, ils nécessitent beaucoup de données d'entrée au niveau de l'entreprise, et ces données ne sont pas souvent disponibles. Le lecteur intéressé pourra trouver une revue des modèles de transport de fret dans Review of Freight Modelling (2002).

4.3. Classification, discussion, choix

D'Este (2001) considère qu'il y a trois approches majeures pour modéliser les transports de marchandises : les modèles d'optimisation, de simulation et les modèles de réseau.

- *Les modèles d'optimisation.*

Les modèles d'optimisation impliquent de formuler le problème en une fonction objectif et un ensemble de contraintes. Dans la plupart des cas, la fonction objectif cherche à minimiser le coût total de transport ou le temps de parcours ou encore une combinaison de ces deux facteurs. Les contraintes représentent les limites des ressources disponibles en termes de personnel, matériel, infrastructure, capacité,... L'optimisation convient pour de

grandes études complexes de planification stratégique de transport, comme la localisation d'équipement.

- *Les modèles de simulation.*

Les modèles de simulation commencent par une description du système : les composants et la manière dont ils interagissent. Ensuite, l'état du système est progressivement mis à jour selon des règles bien définies. La simulation convient pour :

- des modélisations tactiques et pour tester la robustesse du système aux variations des entrants ;
- l'interaction des différents composants du système ;
- pour identifier les goulots d'étranglement potentiels et les faiblesses dans les systèmes de transport.

- *Les modèles de réseau.*

Cette troisième approche de modélisation est basée sur la représentation du système de transport par un réseau d'activités liées. La plupart de ces modèles peuvent être convertis en un ensemble équivalent d'équations. Ainsi l'approche de réseau pourrait être considérée comme un problème d'optimisation. Cependant, l'approche de réseau est particulièrement bien adaptée pour la modélisation des systèmes complexes de transport de fret et comporte suffisamment de spécificités pour pouvoir être considérée comme une catégorie à part entière. Le modèle de réseau comprend des nœuds qui correspondent à une localisation particulière ou à un centre d'activités et des liens qui représentent le mouvement des marchandises. Une des caractéristiques de cette approche est donc une visualisation facilitée. Après avoir cartographié le réseau de transport, le processus d'optimisation implique la recherche du meilleur chemin ou une combinaison de chemins sur le réseau. Cette approche peut décrire plusieurs modes, les transbordements, les différents types de marchandises, elle peut être utilisée pour étudier notamment les problèmes de congestion. Basés sur la théorie des graphes, ces modèles disposent d'un grand nombre d'algorithmes spécifiques et efficaces pour résoudre des problèmes sur de grands réseaux complexes de transport.

Ce travail étant orienté vers la planification stratégique des systèmes de transport de marchandises au niveau trans-Européens, son objectif final consiste à trouver les localisations optimales de hubs, les modèles d'optimisation et les modèles de réseau sont alors les plus appropriés pour notre étude.

4.4. Modèles de réseau

Le système de transport est constitué d'infrastructures ponctuelles telles que les gares, les ports, les aéroports, les échangeurs autoroutiers, les carrefours,... et d'infrastructures linéaires telles que les voies ferrées, les voies d'eau, les routes, La théorie des graphes convient particulièrement bien pour modéliser et optimiser de grands réseaux. En particulier, le réseau de transport peut être modélisé par un graphe où les infrastructures ponctuelles sont représentées par des nœuds tandis que les infrastructures linéaires sont représentées par des arcs (ou liens). En outre, le modèle de réseau est facile à comprendre et à visualiser puisqu'il y a une correspondance directe entre le modèle et les dispositifs réels.

Dans ce chapitre, la modélisation va principalement permettre d'étudier et d'optimiser la répartition des flux sur l'ensemble du réseau. Elle vise à évaluer les déficiences du système de transport dans son état actuel et l'impact sur le trafic qu'aurait l'ajout ou la modification de certains éléments du réseau ou d'un changement de politique. A ce stade, il est important de différencier les modèles statiques et les modèles dynamiques. Ces modèles diffèrent dans leur manière de considérer l'évolution du trafic par rapport au temps. Les modèles statiques décrivent le trafic sur une période suffisamment longue pour que les déplacements soient entièrement effectués pendant cette période. A contrario, les modèles dynamiques prennent en compte l'évolution du trafic durant les déplacements. Ces modèles sont indispensables à la description de phénomènes transitoires comme la congestion aux abords de grandes villes aux heures de pointes ou lors d'accidents. Ils nécessitent un ensemble de données et de paramètres beaucoup plus importants que pour les modèles statiques puisqu'il faut les répartir sur chaque période de temps considérée.

4.5. Les réseaux virtuels

Un réseau de transport ne peut pas se résumer en une simple représentation géographique, mais doit être considéré comme un graphe dans lequel toutes les opérations de transport (déplacement, chargement, déchargement, transbordement, simple transit,...) doivent être identifiées. Pour analyser ces opérations, des coûts (ou des poids) doivent être attachés aux liens sur lesquelles les marchandises sont transportées ainsi qu'aux nœuds où elles sont manipulées. Cependant, la plupart de ces opérations peuvent être effectuées de différentes manières et à des coûts différents. Ainsi par exemple, des bateaux de différentes tailles, qui ont des frais d'exploitation différents, peuvent utiliser la même voie d'eau. Dans un terminal, la cargaison d'un camion peut être transbordée sur un train, consolidée avec d'autres chargements sur un bateau ou simplement être déchargée si elle a atteint sa destination finale.

La même infrastructure, lien ou nœud, peut donc être employée de différentes manières. Les coûts associés varient évidemment en fonction de ces différentes opérations. De plus, une modélisation des fonctions assurées par les nœuds, c'est-à-dire les terminaux et plate-formes de transbordement, est nécessaire car les coûts des opérations effectuées à ces nœuds représentent une partie importante du coût total de transport.

Harker (1987) et Crainic *et al* (1990) ont proposé une solution à ce problème. L'idée est 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 (1995) et Jourquin et Beuthe (1996)) propose 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 du réseau géographique. Cette approche est basée sur une codification spécifique du nœud virtuel, ce qui est probablement son plus grand avantage par rapport aux autres logiciels tels que STAN (Crainic *et al* (1990)). Dans ce logiciel, les opérations possibles à un nœud donné doivent, en effet, être introduites manuellement. La méthode de génération automatique d'un réseau virtuel a été présentée dans Jourquin (1995) et dans Jourquin *et al.* (1996). Chaque type d'opération est modélisé par un lien spécifique d'un « réseau virtuel », pour lequel un coût approprié et unique peut alors être calculé. Le lecteur intéressé trouvera dans Tavasszy (1996) et dans Bhouri (2002) les présentations des différentes approches qui viennent d'être citées et une discussion sur les différents logiciels qui les mettent en application.

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, comme le réseau représenté sur la Figure 4.2., va être utilisé pour expliquer la méthodologie de façon intuitive.

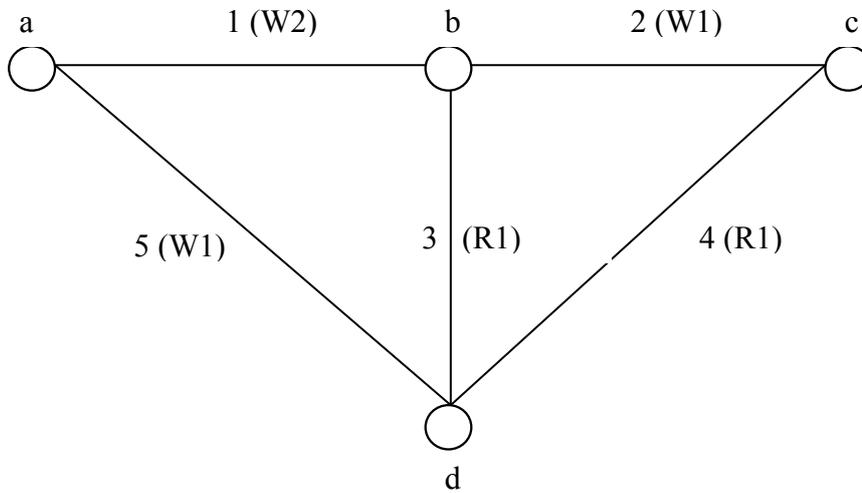


Figure 4.2. Réseau multimodal

Ce réseau se compose de 4 nœuds (a, b, c, d) et de 5 liens (1, 2, 3, 4, 5). Les liens caractérisés par la lettre « W » représentent des voies d'eau et les liens caractérisés par la lettre « R », les voies ferroviaires. Les chiffres qui suivent ces lettres correspondent aux moyens de transport qui peuvent être utilisés sur les liens. Ainsi, « W1 » représente une voie d'eau qui peut seulement être utilisée par des petites péniches et « W2 » une voie d'eau qui peut être employée par des petites et des grandes péniches. Le Tableau 4.1. énumère les éléments de ce réseau réel.

Lien	Nœud d'origine	Nœud de destination	Type de lien
1	a	b	W2
2	b	c	W1
3	b	d	R1
4	d	c	R1
5	a	d	W1

Tableau 4.1. Réseau réel

Pour aller du nœud « a » au nœud « d », l'itinéraire passant par les liens 1 et 3 à l'aide de grandes péniches et de trains pourrait être moins cher que l'itinéraire 5 qui utiliserait exclusivement des petites péniches. Le calcul des coûts et des itinéraires sur ce genre de réseau n'est pas immédiat :

- différents coûts peuvent être affectés à un lien selon le moyen de transport employé ; dans cet exemple, l'utilisation d'une petite péniche sur le lien 1 a un coût différent de celui d'une grande péniche sur ce même lien.

- de même, un problème similaire se pose aux nœuds : dans l'exemple donné, le simple passage d'une petite péniche du lien 1 au lien 2 peut être fait sans engendrer de coût supplémentaire, alors que le transbordement d'une grande péniche sur un train qui emprunterait le lien 3 représente un coût important.

Le réseau virtuel correspondant à ce réseau, illustré à la Figure 4.3, permet de résoudre ce problème en spécifiant les coûts appropriés à chacun des liens virtuels. Le principe de cette méthode est le suivant : à partir du réseau réel, chaque nœud est éclaté en différents nœuds virtuels, de manière à faire apparaître, par le biais de la création d'arcs virtuels, toutes les opérations de transport réalisables à ce nœud (chargement, déchargement, transbordement). De même, chaque arc réel, qui représente le réseau géographique, est scindé en autant de liens virtuels qu'il y a d'utilisations possibles ; leurs extrémités sont reliées par de liens virtuels correspondants aux opérations de simple transit ou de transbordement aux nœuds réels.

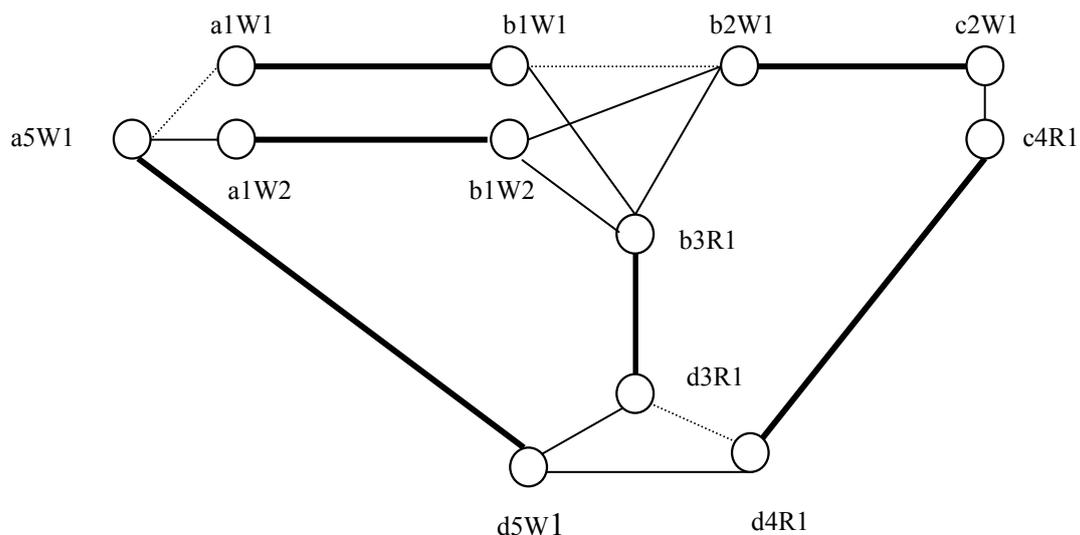


Figure 4.3. Réseau virtuel partiel

De cette façon, ce réseau multimodal est représenté par un réseau plus complexe dans lequel chaque lien correspond à une opération unique avec un coût spécifique. Puis, des chemins peuvent être calculés au moyen d'un algorithme tel que l'algorithme proposé par Dijkstra (1959). Les solutions résultantes tiennent compte de tous les choix modaux possibles.

Afin de les rendre opérationnels, les réseaux virtuels sont construits sur la base d'une notation structurée qui permet de lier facilement les fonctions de coûts aux liens virtuels.

Premièrement, les liens virtuels correspondant aux liens réels, c'est-à-dire aux voies ferroviaires, routes, voies d'eau, doivent être générés. Ceux-ci sont définis, par leurs extrémités, dans le Tableau 4.2. La notation qui identifie chaque nœud virtuel indique successivement le nœud réel, le lien réel, le mode et le moyen de transport auxquels il se réfère.

Liens réels	Nœuds d'extrémités des liens virtuels	
1	a1W1	b1W1
	a1W2	b1W2
2	b2W1	c2W1
3	b3R1	d3R1
4	d4R1	c4R1
5	a5W1	d5W1

Tableau 4.2. Liens virtuels correspondant aux liens réels

Deuxièmement, ces liens virtuels doivent être connectés par des liens virtuels de transit ou de transbordement. Dans le Tableau 4.3, nous énumérons juste les liens virtuels liés au nœud "b". Ceux-ci sont schématisés à la Figure 4.4. où les lignes en gras représentent les liens du réseau réel; fractionnés en plusieurs liens virtuels, les lignes en pointillés représentent les liens virtuels de simple transit, alors que les liens de transbordement sont représentés par une mince ligne continue.

Nœuds réels	Nœuds d'extrémités des liens virtuels	
B	b1W1	b2W1
	b1W2	b2W1
	b1W1	b3R1
	b1W2	b3R1
	b2W1	b3R1
	b2W1	b3R1

Tableau 4.3. Liens virtuels de connections aux nœuds b.

En général, le poids indiqué sur un lien peut varier en fonction de la direction : le chargement et le déchargement des marchandises, par exemple, n'ont pas nécessairement le même coût. Pour résoudre le problème d'asymétrie des fonctions de coût, tous les nœuds virtuels sont affectés d'un signe + ou -. Dès lors, tous les liens sont scindés en deux arcs orientés reliant ces nouveaux nœuds, comme illustré à la Figure 4.4.

La méthodologie du réseau virtuel a été implémentée dans le logiciel Nodus. Ce dernier sauve dans une base de données l'ensemble du réseau virtuel généré, ainsi que les flux associés à chaque arc, et pour chaque catégorie de marchandises. Il permet également de sauver le détail de chaque itinéraire calculé. Ces caractéristiques permettent de garantir une transparence des résultats obtenus.

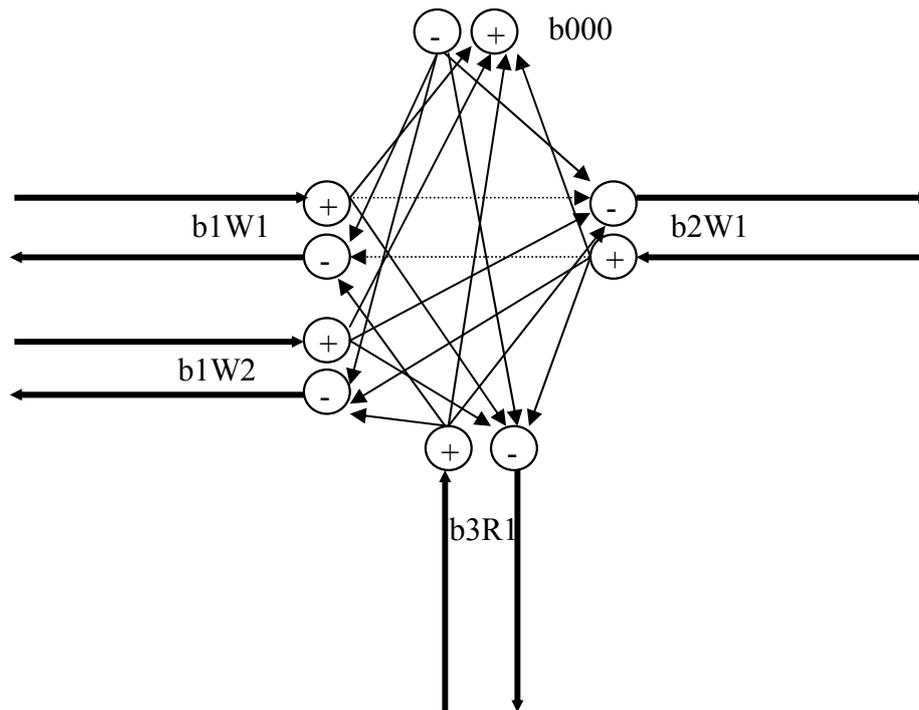


Figure 4.4. Réseau virtuel détaillé au nœud b.

Un tel réseau peut être complété en ajoutant des nœuds d'entrée et de sortie. Ceci peut être fait par la création de nœuds virtuels additionnels associés aux opérations de chargement et de déchargement aux nœuds où ces opérations sont possibles. Ces points d'entrée ou de sortie dans le réseau virtuel sont référencés en couplant "000" au numéro du nœud réel. Ces nœuds doivent également être reliés à d'autres nœuds par des liens virtuels appropriés. Ces nœuds et liens virtuels additionnels apparaissent dans la partie supérieure de la Figure 4.4.

Pour mettre en application la convention de code ci-dessus, les nœuds virtuels sont codés de la façon suivante : un signe positif ou négatif, 5 chiffres pour le numéro réel du nœud, 5 chiffres pour le numéro réel du lien, 2 chiffres pour le mode de transport et 2 chiffres pour les moyens de transport. Chaque nœud est ainsi codé par un nombre signé de 14 chiffres. Un lien virtuel est donc entièrement caractérisé par ses nœuds virtuels d'origine et de destination.

Après cette présentation de la méthodologie de base, il est nécessaire d'expliquer les caractéristiques des fonctions de coûts et comment elles sont intégrées au réseau virtuel. Les fonctions de coûts utilisées sur les réseaux virtuels s'inspirent du concept de coût généralisé. Dans les modèles de transport (voir, par exemple, Kresge et Roberts (1971)), ou Wilson et Bennet (1985)), le concept du coût généralisé est, en effet, souvent utilisé. Cette approche permet d'affecter un coût à tous les facteurs qui influencent le trafic sur un réseau (§2.5 et §2.6)

Les réseaux virtuels sont composés de quatre types de liens virtuels (déplacement, chargement, déchargement, transbordement, simple transit) qui exigent des fonctions de coûts spécifiques, incluant les éléments suivants :

- tous les coûts liés au mouvement d'un véhicule, tel que le travail, le carburant, les assurances, les coûts d'entretien ;
- les coûts de stockage des marchandises pendant le transport et autres coûts liés au temps ;
- la manutention, l'emballage, le chargement et le déchargement et les services directement liés au transport ;
- tous les coûts indirects résiduels comme les services administratifs généraux.

4.6. Techniques d'affectation sur réseaux virtuels

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. Comme entrées, l'affectation du trafic requiert donc une description complète du système de transport et une matrice décrivant les quantités à transporter entre les différentes zones. Les méthodes d'affectation cherchent à modéliser la répartition du trafic sur un réseau en respectant un ensemble de contraintes notamment liées à la capacité, au temps de parcours et au coût de transport. Ce type de problème peut être résolu en utilisant des méthodes d'optimisation. Les résultats de l'affectation du trafic, qui dépendent de la sophistication de la procédure d'affectation utilisée, incluent une estimation des flux transportés et des temps de trajet et/ou coûts correspondants, pour chaque arc du réseau. Le but de cette étape est double : elle permet, d'une part, de voir comment est utilisée l'infrastructure de transport, et d'autre part, connaissant les capacités physiques du réseau, de déterminer les sections susceptibles de poser des problèmes de congestion.

Nous nous intéressons ici aux méthodes destinées à modéliser les flux de transport de marchandises sur un réseau multimodal. La modélisation est effectuée en utilisant la technique dite du réseau virtuel qui permet de prendre en compte la multimodalité, et même l'intermodalité, lors de la phase d'affectation du trafic.

Cette technique a notamment été utilisée (Beuthe *et al.* (2002)) pour estimer les coûts dus à la pollution, la congestion, les nuisances sonores et les accidents ainsi que les dommages routiers occasionnés par les camions.

Dans ce chapitre, les modèles statiques⁹ utilisés pour la planification des infrastructures de transport à moyen terme sont présentés et discutés. L'affectation dynamique n'est pas abordée, car elle nécessite un nombre beaucoup plus élevé de données et elle est plutôt utilisée lorsque les effets sur le trafic de problèmes ponctuels, tels qu'un accident, doivent être abordés.

4.6.1. Les modèles d'affectation

La première hypothèse dans la modélisation de l'affectation du trafic est que les itinéraires sont choisis rationnellement. La plupart des modèles d'affectation sont basés sur l'attraction de chacun des itinéraires disponibles. L'attraction d'un itinéraire est exprimée comme une somme pondérée de différents attributs. Elle inclut généralement des variables du système de transport, telles que le temps et les coûts de transport, mais peuvent également inclure d'autres caractéristiques comme la longueur, le nombre de feux de signalisation, le nombre de ronds-points, la sinuosité, l'heure de départ, la congestion, le nombre de manœuvres à effectuer, le type de route, ... L'estimation d'un coût généralisé incorporant tous ces éléments est une tâche difficile et des approximations sont inévitables. La mesure de l'attraction d'un itinéraire est désignée sous le nom d'« utilité ». Les fondements théoriques des modèles d'affectation sont basés sur le principe que le transporteur choisit l'alternative qui maximise son utilité, il cherche à minimiser le coût généralisé de son déplacement pour une origine-destination.

Les méthodes d'affectation 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)) et conduisent au Tableau 4.4.

Dans les modèles qui ne prennent pas en compte la contrainte de capacité du lien, le coût du lien ne dépend pas du flux. Le risque est alors d'avoir un flux qui dépasse largement la capacité du lien. Dans un tel cas, en effet, le coût réel du lien est 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.

⁹ Rappelons que les modèles statiques décrivent le trafic sur un période suffisamment longue pour que le déplacement soit entièrement effectué pendant cette période et que les modèles dynamiques introduisent explicitement l'écoulement du temps.

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 coûts généralisée : la qualité, le climat... Par ailleurs, l'estimation des grandeurs entrant dans le coût généralisé est elle-même entachée d'incertitude.

Contrainte de Capacité	Perception variable des coûts	
	Non	Oui
Non	Tout-ou-rien	Stochastique
Oui	Equilibre	Equilibre stochastique

Tableau 4.4. Classification des modèles d'affectation (adapté de Ortúzar and Willumsen, 1990)

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 ; aucun transporteur n'est affecté à un itinéraire moins attractif.

Son principe est de calculer le chemin le moins coûteux, pour chaque paire origine-destination puis d'allouer la totalité de la quantité à transporter entre cette origine et cette destination sur ce chemin unique les connectant. L'algorithme du ToR présente de ce fait des limites car on observe souvent dans la réalité que les flux du transport entre deux nœuds donnés sont répartis sur plusieurs itinéraires alternatifs. De plus, le principe du ToR peut poser un problème d'instabilité. En effet, si deux itinéraires entre une paire origine-destination sont très proches en termes de coût, une faible perturbation entraînera un changement d'itinéraire. Ceci est illustré par l'exemple de la Figure 4.5. avec deux itinéraires. Le coût associé à l'arc 1 vaut 100 et celui de l'arc 2 vaut 99 unités monétaires.

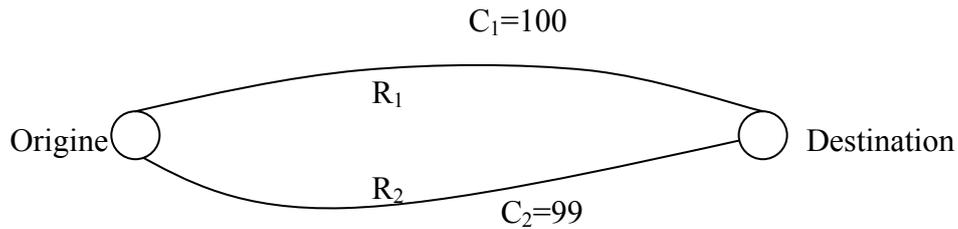


Figure 4.5. Réseau théorique comprenant deux liens.

Nous pourrions penser que les quantités à transporter seront réparties équitablement sur chacun des deux itinéraires. Cependant, si on se limite à une affectation ToR, toute la quantité à transporter le sera sur la route 2 puisque celle-ci a un coût inférieur. Or, si une petite erreur dans les données induit que le coût du lien 1 reste bien à 100 mais que celui du lien 2 passe à 101, alors c'est le lien 1 qui devient le moins cher et qui se verra affecter tout le flux.

Les hypothèses de l'affectation ToR et le niveau d'agrégation des données permettent de simplifier ce qui se passe en réalité :

- tous les transporteurs n'utilisent pas le même mode de transport pour se rendre d'un point à un autre et deux transporteurs utilisant le même mode de transport n'opteront pas nécessairement pour le même itinéraire ;
- certains axes du réseau souffrent de congestion et ces problèmes de congestion conduisent également à la recherche de chemins alternatifs, qui mène à équilibrer le trafic sur le réseau.
- l'affectation est effectuée à partir de nœuds qui correspondent à la demande d'une zone. Ces nœuds sont le plus souvent des centroïdes représentant les centres de gravité des régions considérées. A l'intérieur de cette zone, plusieurs expéditeurs, qui ne sont pas localisés au même endroit, peuvent s'y trouver. Certains expéditeurs peuvent être plus proches d'un mode de transport et le privilégier.

Parmi les alternatives possibles, les algorithmes d'équilibre tiennent compte de la variation des coûts de transport en fonction des flux affectés, considérant que la distribution du trafic sur le réseau est le résultat d'une interaction entre l'offre et la demande de transport. Les modèles d'équilibre tentent de prendre en compte le phénomène de congestion dans les systèmes de transport.

La prise en compte de la perception variable des coûts conduit à des modèles stochastiques, qui sont toutefois beaucoup plus souvent utilisés pour le transport de personnes que pour le transport de fret.

Le flux de transport entre deux nœuds donnés est alors réparti entre les différents chemins alternatifs. Les algorithmes stochastiques, s'ils permettent de calculer un certain nombre de chemins entre deux nœuds donnés, n'introduisent cependant aucune notion de contrainte de capacité.

La prise en compte, dans un même modèle, de la perception variable des coûts et des contraintes de capacité conduit à des modèles d'équilibre stochastique. Ces modèles complexes ne peuvent aujourd'hui être appliqués aux réseaux utilisés dans le cadre de cette thèse. En effet, actuellement, les heuristiques mises en œuvre pour résoudre les problèmes d'équilibre stochastique ne s'appliquent qu'à de petits réseaux de quelques dizaines de nœuds (Ceylan et Bell (2005) ou Prashker et Bekhor (2000)).

En pratique, Van Vliet (1976) avait déjà proposé que le choix d'une procédure d'affectation dépende du niveau de congestion. Lorsque le réseau est relativement peu congestionné, ce qui est souvent le cas pour des trafics inter-régionaux, les méthodes stochastiques doivent être préférées. Par contre, un haut niveau de congestion est un argument en faveur des méthodes tenant compte des contraintes de capacité.

Plusieurs techniques d'affectation et algorithmes ont été mis en œuvre sur des réseaux virtuels pour modéliser les réseaux multimodaux de transport de marchandises. L'approche du réseau virtuel est différente du modèle classique à quatre étapes car elle combine la répartition modale et l'affectation en une seule étape. L'inconvénient majeur de cette méthodologie est qu'elle génère des réseaux très importants, ce qui conduit à des temps de calculs beaucoup plus grands que ceux observés sur les réseaux géographiques classiques.

Dans Jourquin et Limbourg (2006), nous avons montré que les méthodes d'équilibre, appliquées aux réseaux virtuels et utilisées sur les réseaux interurbains, interrégionaux ou internationaux de fret ne reflètent pas suffisamment le choix modal et le comportement des transporteurs. Dans ce type d'applications, les restrictions de capacité seules ne sont donc pas un facteur explicatif assez important pour s'assurer que les flux entre des origines et destinations particulières soient répartis entre différents chemins et modes alternatifs. En

d'autres termes, il apparaît clairement que d'autres approches doivent être explorées. C'est la raison pour laquelle une affectation multi-flux est proposée.

4.6.2. Affectations multi-flux

Les fonctions de coûts utilisées pour les différentes opérations de transport peuvent être relativement détaillées et complexes. Elles peuvent, par exemple, tenir compte de la nature des marchandises transportées. Ceci peut mener à l'utilisation de différents modes de transport pour différents produits. Néanmoins, le niveau d'agrégation des matrices d'origines-destinations qui peuvent être produites pour des grandes zones géographiques est tel qu'on ne peut supposer que, pour une catégorie donnée de marchandises, toutes les marchandises devraient être transportées par le même mode de transport et sur itinéraire identique.

En effet, la demande au niveau européen, par exemple, est souvent seulement disponible qu'au niveau des régions de la nomenclature des unités territoriales statistiques (NUTS) au niveau 1 (NUTS 1) ou 2 (NUTS 2). L'origine et/ou la destination des marchandises est alors souvent matérialisée par le centroïde de chaque région. Ainsi, même lorsque des techniques plus sophistiquées sont employées pour obtenir les flux de région à région, cela reste un non-sens de considérer que tout ce qui est envoyé entre ces régions l'est par le même et unique mode de transport. Une usine localisée tout 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, rendent parfois utile l'emploi de modes de transport alternatifs.

Le Tableau 4.5. propose une classification des méthodes d'affectation plus adaptée à la classe de problème qui nous occupe, dans la mesure où le choix d'une méthode d'affectation multi-flux n'est plus conditionné par la perception des coûts qu'ont les transporteurs, mais bien par le niveau d'agrégation des données disponibles sur la demande.

Contrainte de capacité	Niveau d'agrégation des matrices OD	
	faible	élevée
Non	Tout-ou-Rien	Multi-flux
Oui	Equilibre	Equilibre multi-flux

Tableau 4.5. Classification alternative des techniques d'affectation.

L'identification d'itinéraires alternatifs crédibles a été discutée dans Jourquin et Limbourg (2006). Comme nous l'avons souligné, les chemins obtenus par les algorithmes des k -chemins les plus courts produisent, dans le cas des réseaux étudiés, un ensemble de chemins très

semblables qui ne sont pas très utiles dans la classe des problèmes étudiés dans le cadre de cette thèse.

Pour évacuer ce problème, la stratégie adoptée 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 liens sur ce chemin sont artificiellement augmentés avant qu'un autre chemin soit calculé. Cette solution pragmatique (multi-chemin « simple ») peut être décrite par l'algorithme suivant:

0. $n = 0$
1. Calcul du chemin le moins coûteux ; $n = n+1$;
2. Augmenter le coût sur chaque lien qui appartient aux chemins calculés précédemment ;
3. Itérer. Retour au point 1 tant que $n < k$.

Une telle approche s'apparente à la création d'une congestion artificielle importante qui force la recherche d'un nouveau chemin. Elle est très 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. Une alternative à l'augmentation des coûts est la suppression des arcs, ce qui aurait l'avantage de simplifier le graphe. Toutefois, deux chemins alternatifs peuvent avoir des parties communes. De plus, un arc donné peut très bien être utilisé vers une autre destination, partant de la même origine. Ce dernier point a toute son importance si on utilise un algorithme de recherche de chemin qui calcule tous les chemins les moins coûteux à partir d'un sommet source vers tous les autres sommets d'un graphe. Il a en effet été montré (Jourquin et Limbourg, 2006) que l'algorithme le plus efficace pour calculer les chemins les moins coûteux dans un réseau virtuel est l'algorithme de Dijkstra (1959). Or, cet algorithme ne calcule pas uniquement le chemin le moins coûteux entre une origine et une destination, mais un arbre qui représente les chemins les moins coûteux d'une origine donnée vers toutes destinations possibles. Cette caractéristique peut toutefois poser un problème, illustré par l'exemple suivant, dans l'approche que nous proposons pour calculer un ensemble de chemins alternatifs.

Les valeurs numériques qui se trouvent sur la Figure 4.6. représentent les coûts associés aux liens. Comme l'algorithme de Dijkstra calcule tous les chemins d'une origine donnée à toutes destinations possibles, le résultat de son application à partir du nœud *A* donnera comme résultat les itinéraires qui empruntent les liens représentés en rouge. Si l'algorithme décrit

précédemment pour calculer les k chemins les plus courts est employé pour calculer les deuxièmes meilleurs itinéraires, les coûts sur les liens déjà utilisés doivent être augmentés, par exemple en augmentant de 50 % le coût de ces liens.

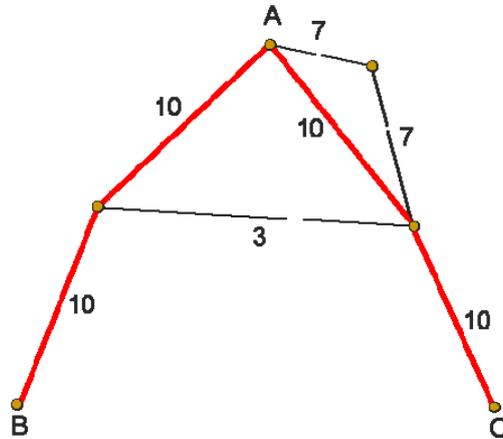


Figure 4.6. Un arbre de Dijkstra calculé à partir de A.

La Figure 4.7., qui se concentre sur l'itinéraire de A à C, illustre le résultat de cet algorithme. Elle montre également que, si le deuxième itinéraire le moins coûteux entre A et C est maintenant calculé, il emploiera les deux liens qui ont un vrai coût (initial) de 7. Cependant, le deuxième meilleur itinéraire entre A et C calculé sur le réseau original représenté par la Figure 4.6. est celui qui commence à partir d'A dans la direction de B, allant à C au premier carrefour.

Ce véritable second chemin n'a pas été identifié par notre algorithme parce que la première section a maintenant un coût augmenté (15 au lieu de 10), non parce qu'elle était déjà utilisée sur le chemin de A vers C, mais bien parce qu'elle a été employée sur le chemin le moins coûteux entre A et B. En d'autres termes, en employant Dijkstra, le choix du deuxième meilleur itinéraire entre une origine et une destination peut être influencé par d'autres itinéraires déjà identifiés vers d'autres destinations.

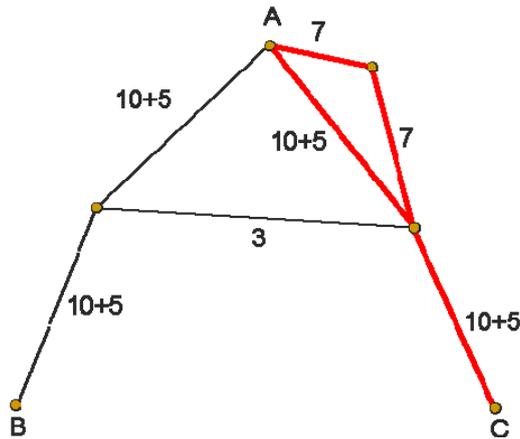


Figure 4.7. Ensemble inexact de chemins entre A et C.

Une manière d'éviter ce problème est d'employer un algorithme « point à point » pour calculer le chemin le moins coûteux. Le plus efficace est l'algorithme d'A* (Hart *et al.* 1968 et 1972). Cependant, l'étape d'affectation en employant cet algorithme est beaucoup plus coûteuse en temps car il doit être appliqué pour chaque cellule de la matrice O-D prise séparément, alors que l'algorithme de Dijkstra couvre en une fois la recherche d'un chemin le plus court d'une origine vers l'ensemble de toutes les destinations, c'est-à-dire toute une ligne de cette même matrice. Le Tableau 4.6. illustre ce phénomène pour une matrice qui contient environ 240.000 cellules sur un réseau virtuel produit à partir du réseau de transport digitalisé. Pour chaque paire O-D, trois chemins alternatifs ont été calculés. Les temps de calcul ont été obtenus sur un ordinateur équipé d'un processeur Pentium 4 HT, cadencé à 3.4 Ghz, avec un système d'exploitation Linux Fedora Core 4 (noyau 2.6.14 SMP). Ces algorithmes ont été codés dans notre logiciel Nodustm, écrit en Java 1.5.

Méthode d'affectation	Temps de calcul
Tout-ou-rien	5 min
Multi-flux rapide ¹⁰ (Dijkstra)	15 min
Multi-flow exact (A*)	12 heures

Tableau 4.6. Temps de calcul pour les affectations.

L'algorithme exact nécessite beaucoup plus de temps. Aussi, la question de la pertinence de son utilisation peut être soulevée. Une réponse définitive à cette question ne peut toutefois être donnée. Elle est influencée par la nature du problème à résoudre, et, dans la pratique, ce sera au modélisateur de faire son choix. A titre d'illustration, et en comparant les résultats obtenus par une affectation basée sur l'algorithme de Dijkstra et une autre avec A*, sur base de la matrice d'origines-destinations et du réseau qui seront décrits plus en détails dans la section suivante, les quantités transportées par le mode dominant (route) restent identiques,

¹⁰ L'algorithme multi-flux a été mis en œuvre pour calculer trois chemins alternatifs.

alors que la variation du flux (t.km) est de 2 %. La même variation (2 %) est observée lors de la comparaison des coûts totaux sur le système de transport obtenus avec les deux méthodes. A ce stade, retenons que, quel que soit l'algorithme de chemin le plus court choisi, un ensemble de chemins alternatifs crédibles peut être obtenu.

Sur les réseaux virtuels, le deuxième meilleur itinéraire emploie souvent le même mode de transport que le meilleur. En effet, la différence en coûts pour deux modes différents de transport entre une paire donnée d'origine-destination est souvent plus grande que la différence entre le chemin le moins coûteux et le deuxième. La répartition des flux sur différents modes de transport nécessite donc une amélioration de l'algorithme :

0. $n = 0$
1. Calcul du chemin le moins coûteux ; $n = n + 1$;
2. Augmenter le coût sur chaque lien qui appartient aux chemins calculés précédemment ;
3. Augmenter le coût pour chaque opération de chargement au nœud d'origine (c'est-à-dire dans chaque direction possible à partir du nœud) pour le mode de transport utilisé sur le premier lien du chemin.
4. Itérer. Retour au point 1 tant que $n < k$.

Maintenant, les coûts sur l'itinéraire utilisé sont augmentés mais également les coûts du chargement initial sur le mode de transport choisi dans toutes directions à partir du nœud d'origine. Ainsi, lors de la prochaine itération, l'utilisation du même mode de transport pour un itinéraire alternatif sera découragée.

Il est donc désormais possible de produire un ensemble de chemins alternatifs plausibles qui inclut également différents modes de transport lorsque c'est possible. En d'autres termes, un partage modal peut être effectué pour toutes les relations représentées par les matrices de demande et sans devoir mettre en œuvre un module de choix modal séparé. Ceci peut être considéré comme une réponse satisfaisante au problème présenté précédemment, parce qu'il y a maintenant une possibilité, entre chaque paire O-D, de répartir les flux sur plusieurs itinéraires et modes, ce qui n'était pas le cas lorsque les algorithmes d'équilibre avaient été mis en application.

Sur cette base, il reste maintenant à répartir la demande entre les différents chemins identifiés. Le modèle de choix d'itinéraire est un module important des modèles de désagrégation

spatiale et peut être déterministe ou stochastique. Un problème qui est souvent soulevé dans la littérature, par exemple dans Ortúzar (1990), est que le choix déterministe d'itinéraire ne reflète pas correctement le comportement des transporteurs quand ceux-ci sont confrontés à des solutions alternatives quasiment identiques. Les probabilités de choisir l'un ou l'autre des deux itinéraires devraient être quasiment identiques.

La détermination de notre ensemble d'itinéraires alternatifs peut donner une réponse intéressante aux problèmes liés à l'hypothèse d'indépendance du Logit Multinomial. Le modèle Logit imbriqué surmonte en partie les limitations du modèle Logit Multinomial. Il ne peut toutefois pas être appliqué aux chemins dans des réseaux virtuels, parce que les « catégories » (ici, les modes de transport) des chemins devraient être identifiables. Or, dans un réseau virtuel, un chemin est une suite finie d'opérations de transport, y compris l'utilisation d'un ou plusieurs modes de transport. En d'autres termes, la simple notion du « mode », et donc de « catégorie », disparaît d'une certaine façon. Ainsi, le modèle Logit Multinomial semble convenir à notre problème. Pour rappel, la probabilité de choisir le chemin i parmi K alternatives est donnée par :

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

Où :

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

Il reste également la difficulté qu'il n'y a pas de valeur communément admise pour le paramètre θ . Celui-ci doit être estimé en utilisant des données collectées ou en réalisant des études de préférence.

Si ces données ou études ne sont pas disponibles, l'hypothèse simplificatrice que le flux pourrait être réparti sur les différents chemins alternatifs selon leur poids relatif peut être émise. Si $Q(\mu_n)$ est la quantité totale à transporter, la quantité à affecter sur le chemin μ_n est :

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

Cette approche, très simple et pragmatique, peut cependant être justifiée dans les modèles stratégiques lorsque les fonctions de coûts généralisés, qui incluent le temps et des aspects liés à la qualité, sont employées pour les différentes opérations de transport décomposées dans le réseau virtuel. Le niveau d'agrégation des matrices de demande utilisées plaide également en faveur d'une telle approche par les coûts relatifs, car l'information sur la demande est limitée de centroïde à centroïde et non pas de firme à firme : ainsi, il est possible de garder une approche de minimisation des coûts tout en tenant compte du manque de détails sur les origines et destinations exactes des marchandises. L'affectation multi-flux devient ainsi purement déterministe.

Quelle que soit la méthode de répartition employée, l'affectation sur un réseau virtuel produira, en une seule étape, un résultat qui combine l'utilisation de différents modes de transport sur une même paire origine-destination.

4.6.3. Résultats d'une affectation multi-flux sur un réseau réel

A présent, le procédé d'affectation proposé est testé sur un réseau réel, afin d'estimer l'impact sur les flux de transport et sur la répartition modale. Par conséquent, un scénario de référence vraisemblable doit être mis au point. Ce scénario s'oriente vers la description des transports de conteneurs pour des distances supérieures à 300 km. Cette distance est justifiée au chapitre suivant.

Le premier problème est de déterminer l'offre et la demande sur le territoire européen. En d'autres termes, une matrice O-D détaillée est nécessaire, mais malheureusement pas disponible publiquement. Dans le cadre de cette recherche, nous avons eu l'autorisation d'utiliser les matrices O-D pour les marchandises produites par le bureau de consultance : « *NEA Transport Research and Training* » pour l'année 2000. Ces matrices sont disponibles pour le transport routier, ferroviaire, fluvial, maritime, aérien et par oléoducs. Cependant, notre modèle de réseau se base sur les transports routiers, ferroviaires et fluviaux. Les matrices reprennent les informations sur le type de marchandises transportées, en se référant aux 10 chapitres NST-R, repris dans l'annexe 3. La base de données contient des relations de région à région au niveau NUTS 2 pour l'Europe élargie : EU25, Norvège et Suisse. Bien

qu'il soit envisageable de transporter en conteneur plusieurs catégories de marchandises, seules les marchandises appartenant au chapitre NST-R 9 sont affectées car ce chapitre contient la demande de transport de conteneurs parmi d'autres produits manufacturés. Cette hypothèse surestime donc la demande.

La détermination de l'offre sur le territoire européen nécessite, entre autres, une cartographie suffisamment précise des réseaux de transport pour la route, les chemins de fer et les voies navigables. En ce qui concerne les voies ferrées et les routes en Europe, les données de la « Digital Chart of the World » (DCW), mise à disposition gratuitement par l'Environmental Systems Research Institute (ESRI), ont été utilisées. Le réseau de voies d'eau navigables a été digitalisé au sein du Groupe de Transport et Mobilité, car le réseau hydrographique proposé dans la DCW ne permet pas d'identifier les voies d'eau navigables de celles qui ne le sont pas. Ces réseaux modaux ont été enrichis en introduisant les lignes de ferry et le Tunnel sous la Manche. Les réseaux routiers incluant les lignes de ferry, ferroviaires et fluvial sont représentés respectivement sur les Figure 4.8., 4.9. et 4.10.

Finalement, les données sur les frontières des régions NUTS 2 ont été fournies gracieusement par la « Geophysical Instrument Supply Co », GISCO. 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). Lorsqu'une région NUTS 2 comprend plusieurs zones urbanisées importantes et de tailles équivalentes, le centroïde a été situé dans la zone la plus habitée, selon les données fournies par l'Atlas (éd. De Boeck). Les régions NUTS 2 et les centroïdes sont représentés à la Figure 4.11. 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 ce 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-type respectifs de 9,95 ; 6,34 et de 38,85. Ceci permet l'obtention d'un « graphe géographique », de plus ou moins 110.000 arcs et de 90.000 nœuds, à partir duquel un réseau virtuel de plus d'un million de nœuds virtuels et de plus de 1.500.000 arcs virtuels est généré, sur lequel les différents algorithmes d'affectation élaborés peuvent être appliqués. L'étude des coûts des différentes opérations de transport effectuée au chapitre 2 complète la détermination de l'offre.

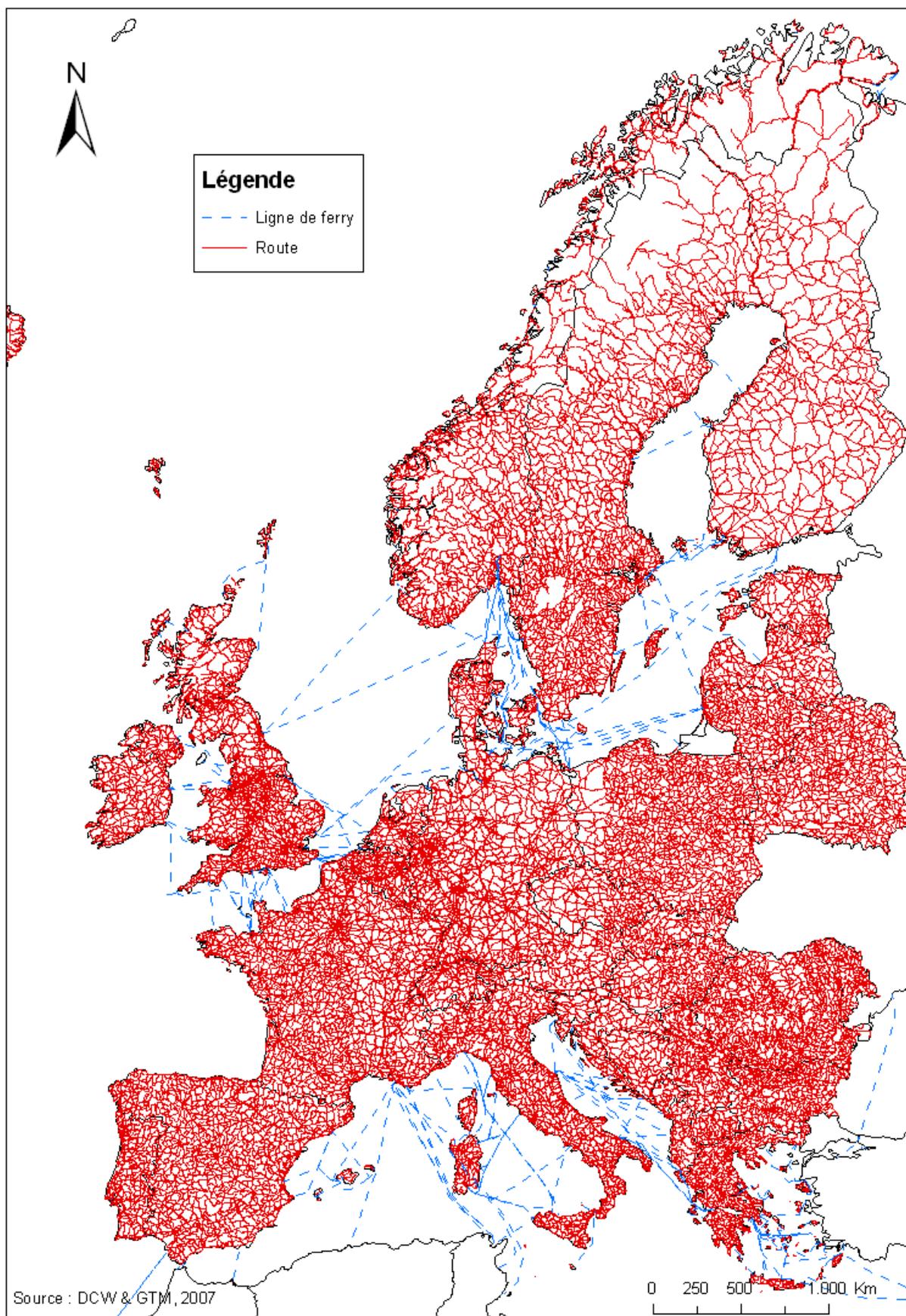


Figure 4.8. Réseau routier et lignes de ferry.



Figure 4.9. Réseau ferroviaire.



Figure 4.10. Réseau fluvial.

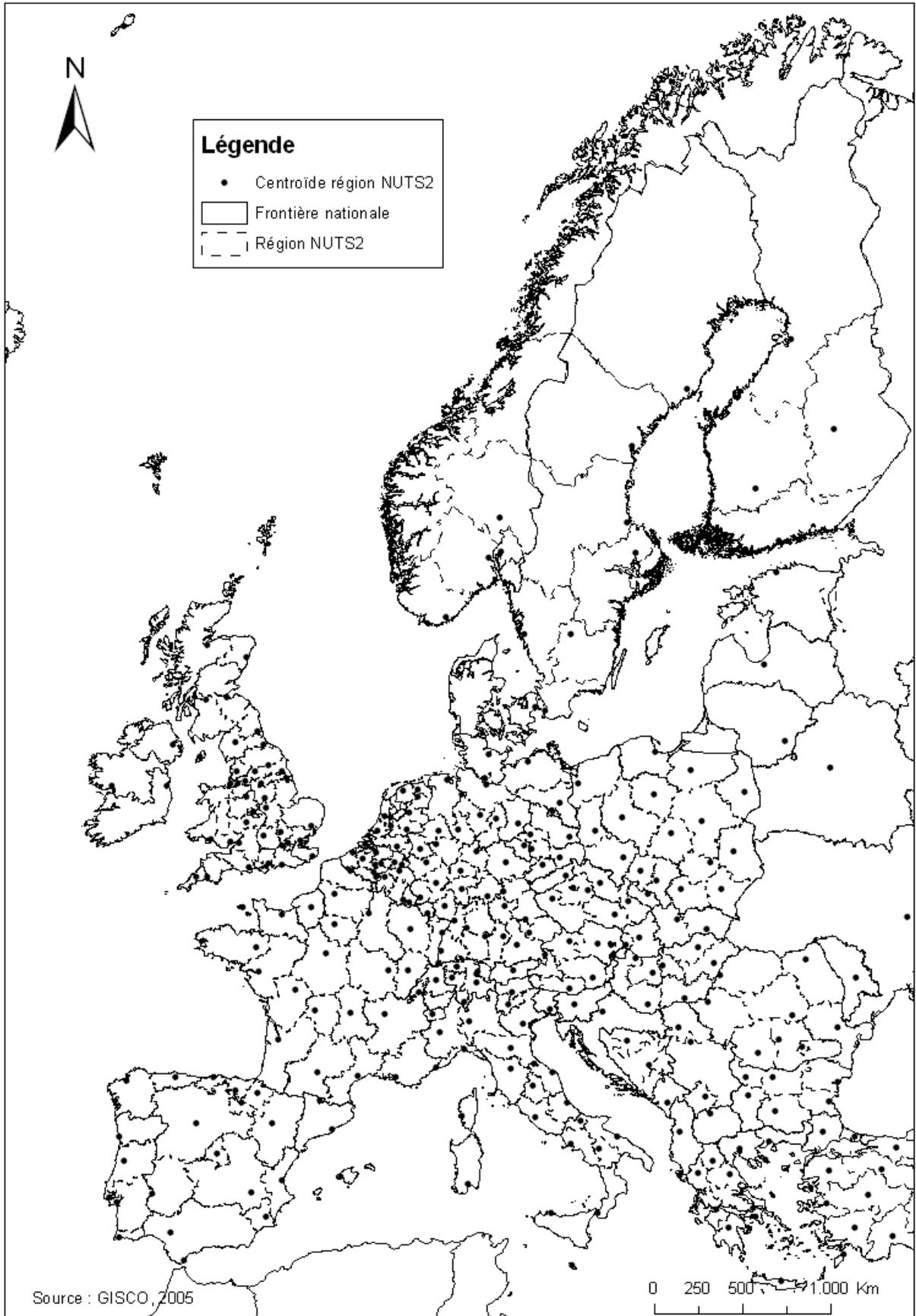


Figure 4.11. Région NUTS2 et leur centroïde.

Utilisées telles quelles, nos fonctions de coût détaillées ne donnent pas une répartition modale correcte. La prise en compte d'éléments tels que la qualité du service, comme par exemple la fréquence, étudiée notamment par Beuthe *et al.* (2005) et par Bouffioux *et al.* (2006), améliorerait cette répartition. Ceci devra faire l'objet de recherches ultérieures. Ces éléments n'étant pas incorporés dans le modèle actuel, un calibrage est donc nécessaire. Les résultats obtenus, c'est-à-dire la répartition modale en tonnes et la répartition modale en t.km, sont illustrés dans le Tableau 4.7. La procédure d'affectation qui a été employée est une affectation multi-flux. Avec une répartition sur quatre itinéraires possibles, cette affectation permet de calculer quatre chemins différents en essayant d'en trouver au moins un pour chaque mode (routier, ferroviaire, fluvial et, par la suite, intermodal). Les coûts utilisés sont repris au Tableau 2.4.

	En tonnes.km		En tonnes	
	Modèle	Données	Modèle	Données
Eau	1,41 %	1,96 %	1,28 %	1,73 %
Fer	13,66 %	15,10 %	12,83 %	13,54 %
Route	84,88 %	82,94 %	85,89 %	84,72 %

Tableau 4.7. Performance des affectations après calibration.

Les données fournies par NEA permettent d'avoir la répartition modale en tonnes. Pour estimer la répartition modale en t.km, une série d'affectations ToR des matrices pour chaque mode sur leur réseau modal et pour le chapitre 9 de la Nomenclature uniforme des marchandises pour les Statistiques de Transport Révisée (NST-R), reprise en annexe 3, a été effectuée.

Rappelons que le but de ce travail n'est pas de proposer un modèle de flux de transport finement calibré pour l'ensemble de l'Europe. Les flux routiers dans la région du Benelux sont représentés à la Figure 4.12., alors que les Figures 4.13, 4.14. et 4.15. donne une idée de la répartition des flux sur les pays considérés et sur les modes de transport routiers, ferroviaires et fluviaux.

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 pour différentes raisons particulières, telles que le dépassement de la vitesse autorisée.

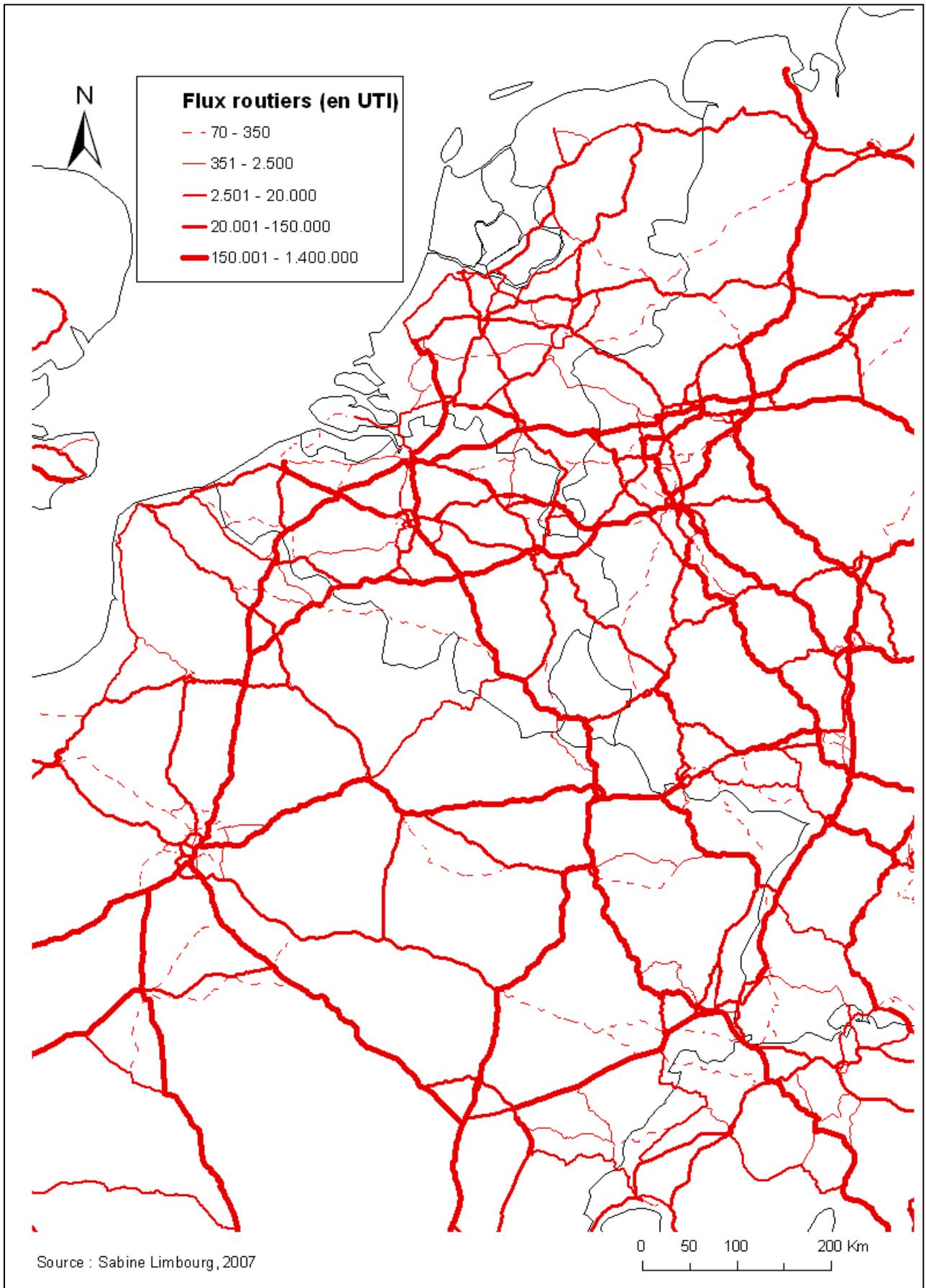


Figure 4.12. Affectation multi-flux pour le chapitre 9 et pour des déplacements de plus de 300 km sur le réseau routier du Benelux.

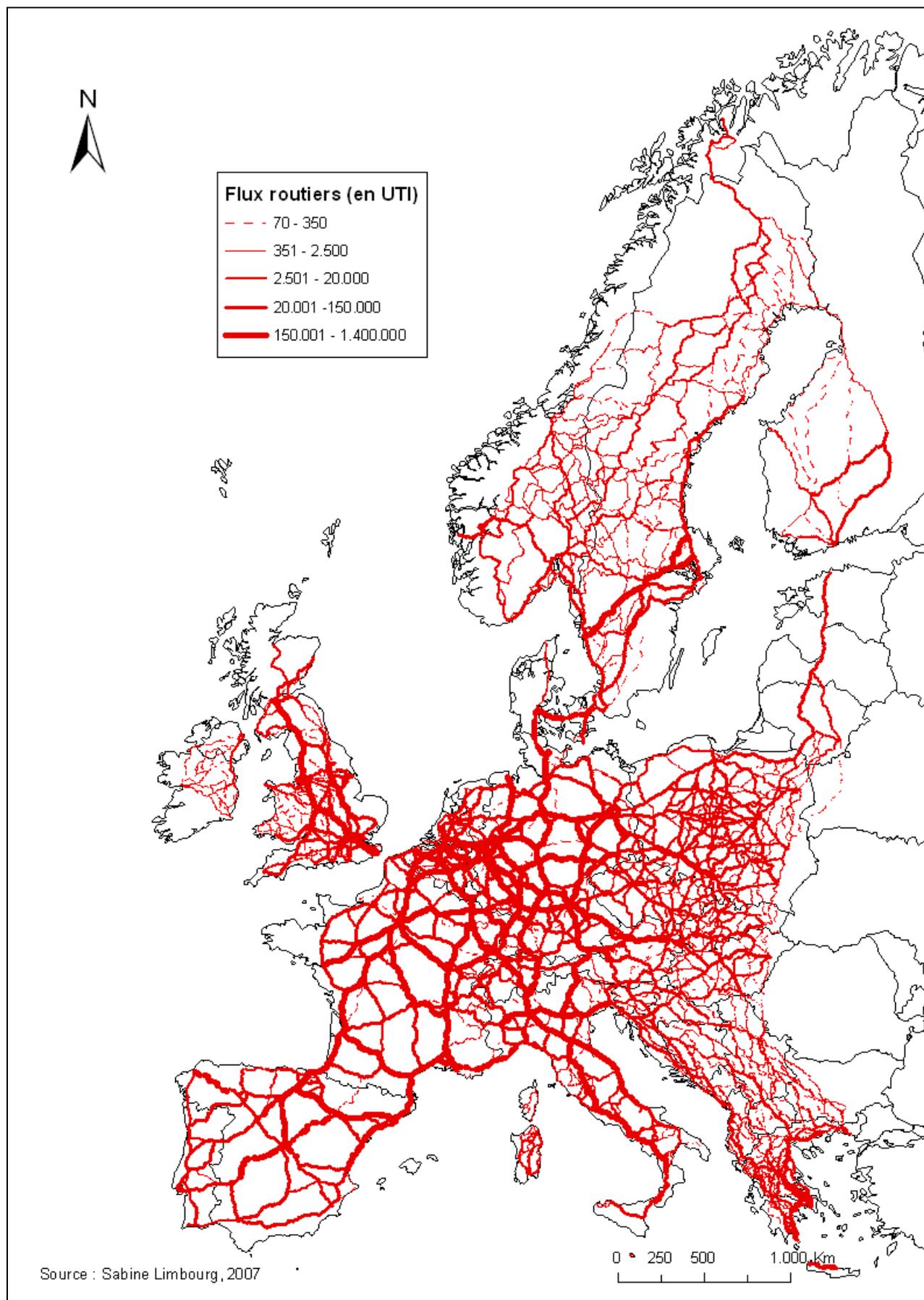


Figure 4.13. Affectation multi-flux pour le chapitre 9 et pour des déplacements de plus de 300 km sur le réseau routier.

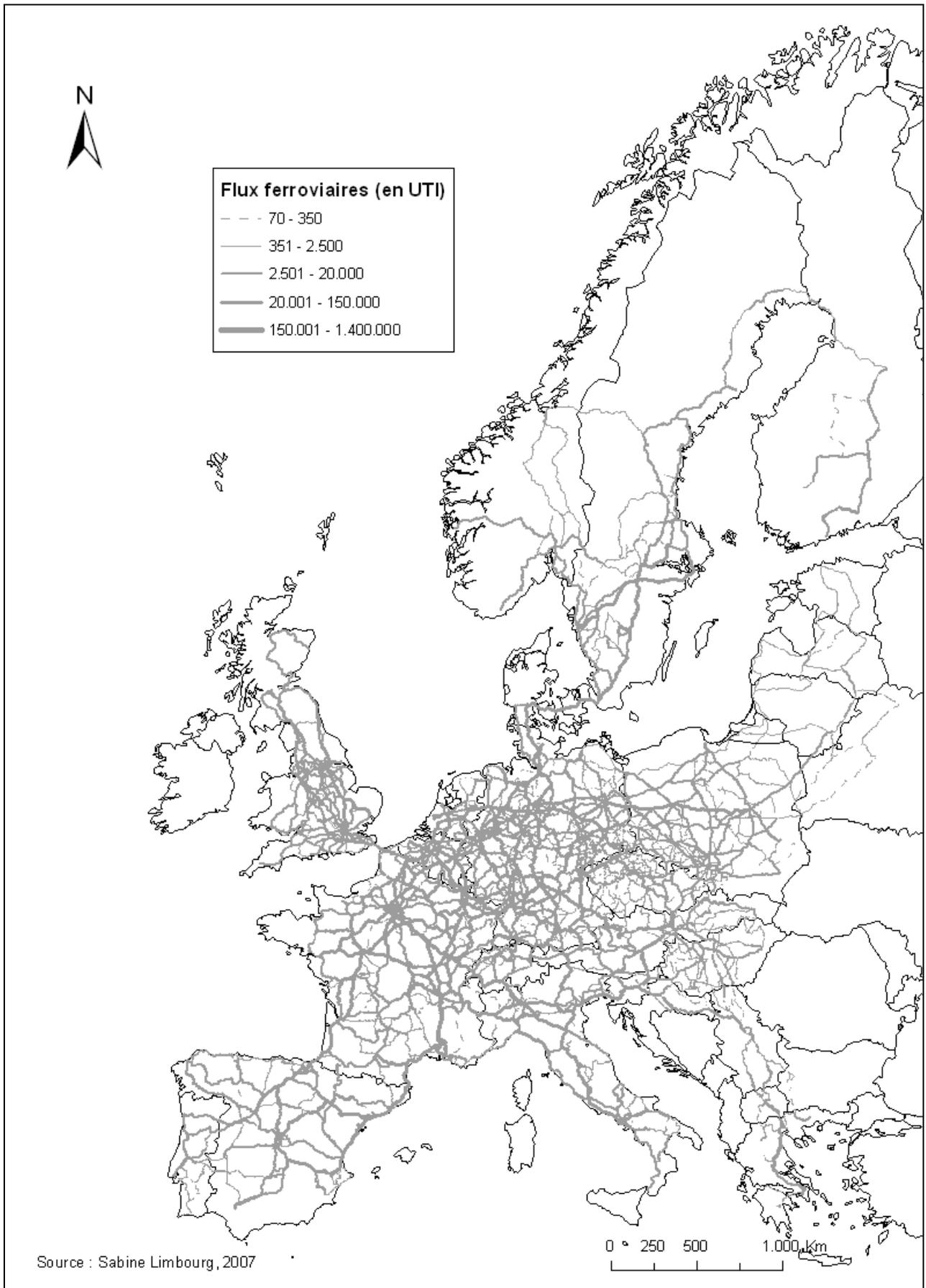


Figure 4.14. Affectation multi-flux pour le chapitre 9 et pour des déplacements de plus de 300 km sur le réseau ferroviaire.

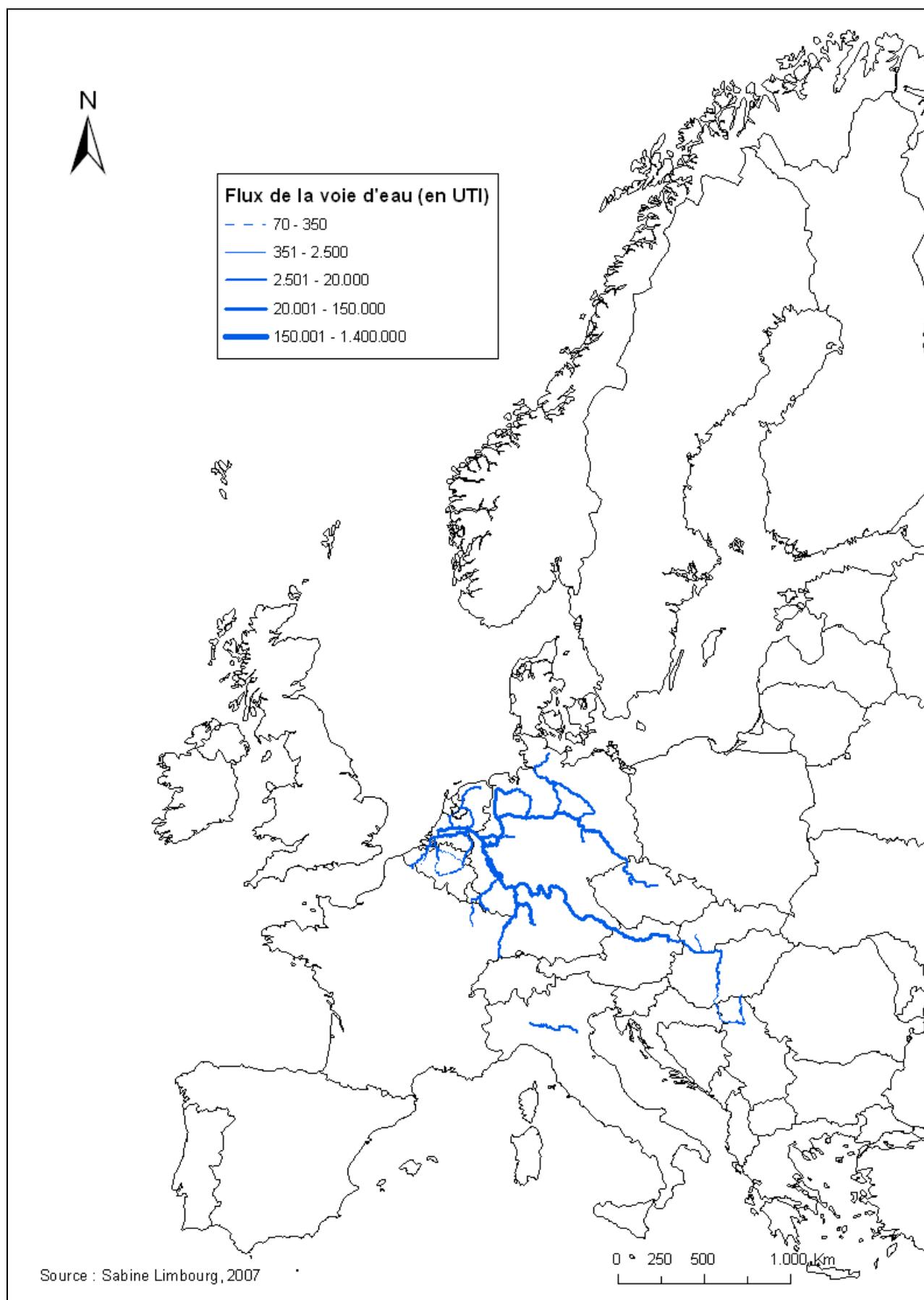


Figure 4.15. Affectation multi-flux pour le chapitre 9 et pour des déplacements de plus de 300 km sur le réseau fluvial.

Notre modèle ne tient également pas en compte de certaines particularités du relief et de la sinuosité du réseau. Ainsi, certains flux dans des zones plus montagneuses, comme le Massif Central sont probablement surestimés. Toutefois, les grands couloirs de flux sont bien représentés par notre affectation. Cette dernière permet, dans les limites qui viennent d’être énoncées, une identification des localisations potentielles de hubs.

4.7. Erreurs

En plus de ces dernières considérations, d’autres facteurs affectent les résultats. En effet, plusieurs villes de tailles importantes peuvent se trouver à l’intérieur d’une région NUTS 2. Dès lors, le centre gravitaire de cette région est difficilement utilisable en tant que valeur représentative. C’est la raison pour laquelle, afin de limiter les erreurs, le centroïde a été placé au centre de la zone la plus urbanisée de la région sur base des informations fournies par la DCW (2006). Lorsqu’une région NUTS 2 comprend plusieurs zones urbanisées importantes et de tailles équivalentes, le centroïde a été situé dans la zone la plus habitée, selon les données fournies par l’Atlas (éd. De Boeck).

Afin d’évaluer l’erreur commise due à l’agrégation des données, c’est-à-dire en utilisant les centroïdes des régions NUTS 2 comme origine – destination, la demande de certaines régions NUTS 2 a été répartie sur les principales villes de ses régions NUTS 3. La généralisation de cette approche pour toutes les régions est un travail laborieux car certaines données sont difficiles à obtenir ou ne sont pas mises à jour.

La méthode de Ward a permis de classer les régions NUTS 2 en fonction de leur étendue et des quantités de conteneurs qui y trouvent leur origine ou destination. Dans chaque classe, une région a été analysée, il s’agit de la région de l’Ile de France, de la Lombardie, d’Anvers, de l’Émilie-Romagne, de Freiburg. Le Tableau 4.8. reprend les différentes erreurs obtenues.

	Coûts	Flux ferroviaires (t.km)	Flux routiers (t.km)
Ile-de-France	0,445%	0,886%	-0,006%
Lombardie	0,011%	-0,048%	0,014%
Anvers	0,046%	0,099%	0,032%
Emilie-Romane	-0,003%	-0,003%	-0,003%
Freiburg	-0,056%	0,038%	0,046%

Tableau 4.8. Ecart sur les coûts et les flux en utilisant une agrégation des données au niveau NUTS2 plutôt qu’au niveau NUTS3.

Que ce soit sur les coûts ou sur les flux, l’écart reste toujours en dessous du pourcent. Les variations les plus importantes sont observées en Ile-de-France, la demande y étant la plus importante.

Cette démarche permet d'estimer la précision gagnée en utilisant une répartition de la demande au niveau NUTS 3 plutôt qu'au niveau NUTS 2. Pour éliminer complètement ces erreurs dues à l'agrégation des données, il faudrait connaître les quantités de marchandises à transporter d'entreprise à entreprise.

4.8. Conclusions

Les modèles de transport sont souvent basés sur l'approche classique en quatre étapes, dans laquelle la génération, la distribution, la répartition modale et l'affectation sont des modules séparés. Une autre approche est de créer un réseau alternatif, qui représente non seulement ses composantes géographiques mais également les différentes opérations qui sont possibles pendant la chaîne de transport, ce qui est un avantage important dans le cas d'étude de chaîne de transport, comme le transport combiné par exemple. Ces « super-réseaux » ou « réseaux virtuels » ouvrent des perspectives intéressantes, car la répartition modale et l'affectation peuvent être effectuées en une seule et même étape.

Malheureusement, ces réseaux virtuels, lorsqu'ils sont utilisés pour la mise au point de modèles de transport sans utiliser de module de choix-modal classique, sont difficiles à calibrer à la fois sur les quantités transportées et sur les flux (exprimés en t.km). Ce problème est essentiellement lié à la nature agrégée des données de demande qui sont disponibles pour le transport interrégional et international. Il peut être résolu si la méthode d'affectation utilisée répartit la demande entre plusieurs itinéraires et modes de transport.

Il s'avère que, Jourquin et Limbourg (2006), l'utilisation des procédures d'affectation d'équilibre ne donne pas une réponse adéquate à ce problème pour les grands réseaux tels que les réseaux transeuropéens de transport de fret. Ceci est essentiellement dû au fait que les modèles d'équilibre cherchent à disperser les flux uniquement là où la densité de trafic est importante, ce qui n'est pas le cas sur une grande partie des grands axes de transport. De plus, les matrices d'origines-destinations pour le transport sur longues distances sont souvent construites sur une base annuelle. Il est ainsi difficile d'estimer ce qui se produit spécifiquement pendant les heures de pointe. Un autre problème est que le transport sur longues distances peut prendre plusieurs heures, voire des jours, et il n'est donc pas possible, avec les modèles statiques, de connaître la situation précise d'un véhicule à un moment donné.

L'obtention d'un ensemble d'itinéraires alternatifs réalistes, c'est-à-dire des itinéraires n'ayant pas une partie commune trop importante, est possible si des algorithmes adéquats sont employés. Il apparaît en effet rapidement que les algorithmes permettant de déterminer les k chemins les plus courts n'offrent pas une solution satisfaisante, parce que les itinéraires obtenus sont trop semblables entre eux. Un algorithme simple et pragmatique est proposé. Il permet de calculer un ensemble d'itinéraires contenant à la fois des chemins différents et l'utilisation de modes de transport différents.

Les méthodes à employer pour répartir les flux entre ces différents itinéraires sont également discutées. Si une approche stochastique, basée sur l'emploi d'un modèle Logit Multinomial semble être une alternative intéressante, une solution plus pragmatique utilisant les poids relatifs des différents itinéraires a également été présentée et justifiée.

Ce chapitre se termine par la présentation d'un modèle de référence pour le réseau de transport européen qui sera utilisé pour notre exercice de localisation optimale de terminaux.

5. Analyse des localisations potentielles

Ce cinquième chapitre est consacré à la description de la méthodologie développée pour déterminer les localisations potentielles pour les terminaux de transfert dans un réseau de consolidation de type « hub-and-spoke ». Une approche systématique basée sur la répartition des flux sur le réseau permet la réduction du nombre de localisations potentielles qui s'effectue par des critères de sélection plutôt que par agrégation. Ensuite, les flux de conteneurs et les coûts de transport entre chaque paire de localisations potentielles sont évalués.

Introduction

Les problèmes de localisation des hubs, comme tous les problèmes de localisation-affectation, nécessitent un ensemble de localisations potentielles, ainsi que les matrices des flux et des coûts entre ces localisations. Dans le cas d'un grand réseau, comme le réseau transeuropéen, le nombre de localisations potentielles devient rapidement trop important pour que ce problème de localisation puisse être résolu par une méthode exacte.

A l'exception des travaux d'Arnold et Thomas (2002, 2004) ou 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. La méthodologie utilisée pour déterminer les localisations potentielles nécessitent de rassembler beaucoup de données. Cette approche est beaucoup plus 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 Arnold (2002) où trois approches différentes 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* basée sur une approche de « grille » : 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.

Proposer une méthodologie qui permet de déterminer les localisations potentielles a donc tout son sens. En plus de ce premier aspect, 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 estimons que la détermination de l'ensemble des localisations potentielles doit partir des flux de marchandises entre les différents nœuds du réseau.

Les localisations potentielles ne sont pas les seules entrées au problème de localisation qui nécessite également de fixer le nombre de hubs à implanter ainsi que d'évaluer les flux de conteneurs et les coûts de transport entre chaque paire de localisations potentielles. Les flux de conteneurs sont évalués en tenant compte des demandes liées aux aires de marché de chaque localisation potentielle. En ce qui concerne les coûts de transport, la détermination de la longueur du chemin le moins coûteux entre chaque paire de localisations potentielles et l'évaluation des différents coûts de transport, effectuée au deuxième chapitre, permet d'estimer les coûts de transport entre chaque paire de localisations potentielles.

5.1. Agrégation des nœuds de demande pour des problèmes de localisation de hub

La taille du problème du p -hub médian augmente très rapidement avec le nombre de localisations potentielles. 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 pour rendre leur solution envisageable mais induit des solutions entachées d'erreurs. L'agrégation des nœuds de demande s'effectue fréquemment par une technique de classification.

La classification permet de regrouper des données (dans le problème qui nous concerne : les nœuds de demande) en plusieurs classes de telle sorte que les données d'une même classe soient aussi semblables que possibles et que les classes soient aussi distinctes que possibles. Ensuite chaque classe est représentée par un seul nœud de demande, généralement le centroïde de la classe.

Les différentes erreurs d'agrégation des nœuds peuvent être trouvées dans Current et Schilling (1987) qui présentent également des méthodes pour réduire ces erreurs. De nombreuses recherches ont été effectuées sur le développement de procédures d'agrégation pour des problèmes de localisation et sur l'analyse des erreurs résultant de l'agrégation. Une grande partie de ces recherches se concentrent sur les problèmes de p -médian et de couverture : Bach (1981) ; Casillas (1987); Current *et al.* (1987) et (1990); Francis *et al.* (1996); Goodchild (1979). De même, des discussions générales sur ces erreurs d'agrégation peuvent être trouvées dans Francis *et al.* (1999), Zhao et Batta (1999, 2000) et Plastria (2001) mais ces articles concernent également le problème de la p -médiane.

5.1.2. Définition du problème de classification

Mulvey et Crowder (1979) ainsi que Rao (1971) ont donné une formulation mathématique au problème de classification. Le problème peut être décrit comme suit :

Entrées:

n = nombre de nœuds

d_{ij} = mesure la dissimilitude ou distance entre le nœud i et le nœud j

k = nombre de classes

J = ensemble des classes

N = ensemble des nœuds

Variables de décision:

x_{ij} = 1 si le nœud i est affecté à la classe j

0 sinon

y_j = 1 si j est sélectionné

0 sinon

Minimiser

$$Z = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} d_{ij} x_{ij} \quad (5.1)$$

Sous contraintes

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in N \quad (5.1.1)$$

$$\sum_{j \in J} y_j = k \quad (5.1.2)$$

$$x_{ij} \leq y_j \quad \forall i, j \in N \quad (5.1.3)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in N \quad (5.1.4)$$

$$y_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in N \quad (5.1.5)$$

Les contraintes (5.1.1) signifient que chaque nœud doit être rattaché à une et une seule classe. La contrainte (5.1.2) indique que k classes doivent être formées et les contraintes (5.1.3) qu'un nœud ne peut être affecté à une classe non sélectionnées. Les contraintes (5.1.4) et (5.1.5) sont les contraintes d'intégrité.

5.1.3. Les méthodes de classification

Les méthodes de classification peuvent être hiérarchiques ou non. Les méthodes non-hiérarchiques comprennent les méthodes des k -moyennes, des centres mobiles, les nuées dynamiques, la classification topographique (Self-Organizing Maps), ... Contrairement à ces

méthodes qui dépendent de choix initiaux, les méthodes de classification hiérarchique sont déterministes.

La classification hiérarchique produit une hiérarchie de partitions emboîtées. Elle peut être descendante (algorithmes divisifs) ou ascendante (algorithmes agglomératifs). Les algorithmes divisifs, par exemple Boley (1998), procèdent par séparations successives à partir d'une classe unique contenant initialement tous les nœuds. Les algorithmes agglomératifs partent de classes initialement réduites à une seule donnée. Ils effectuent des regroupements successifs en fusionnant à chaque étape les deux classes les plus « proches » au sens d'un certain critère de proximité inter-classes. Ces algorithmes, qui sont les plus employés, peuvent être écrits comme suit :

- Etape 0 : chaque nœud est sa propre classe ;
- Etape 1 : trouver la paire de classes la plus « similaire » ;
- Etape 2 : les fusionner en une classe « parente » ;
- Répéter 1-2 jusqu'à ce que tous les nœuds soient dans une classe.

A moins que les classes soient bien distinctes, le résultat dépend fortement du critère de fusion (également appelé similitude ou distance) utilisé. Plusieurs variantes existent selon le choix d'un tel critère. Les plus connues sont reprises ci-dessous.

La méthode du « single linkage » ou du saut minimum a pour critère de fusion (ou distance entre deux classes) la distance minimum entre n'importe quelle paire de nœuds (un dans chaque classe).

$$D(C_a, C_b) = \min\{d(x, y), x \in C_a, y \in C_b\} \quad (5.2)$$

Cette méthode souffre toutefois du phénomène de chaînage illustré à la Figure 5.1. En fusionnant les classes par rapport à la distance minimale, les deux groupes de nœuds, G_1 et G_2 , liés par une série d'intermédiaires sont fusionnés en une seule classe C .

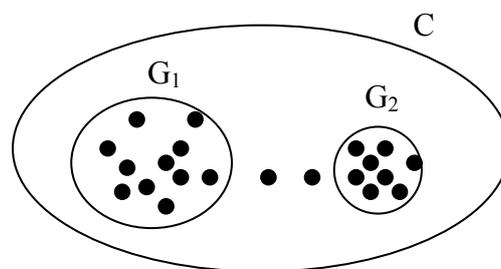


Figure 5.1. Illustration du phénomène de chaînage

La méthode du « complete linkage » ou du lien complet a pour critère de fusion la distance maximum entre n'importe quelle paire de nœuds.

$$D(C_a, C_b) = \max\{d(x, y), x \in C_a, y \in C_b\} \quad (5.3)$$

Cette méthode peut souffrir de l'effet de dissection. L'effet de dissection est présent lorsque des nœuds très similaires sont affectés à des classes différentes (Hansen et Delattre (1978)).

Entre ces deux méthodes extrêmes, il y a les méthodes du « average linkage » ou du lien moyen et aussi la méthode basée sur les centroïdes des classes. La méthode du lien moyen a pour critère de fusion la distance moyenne entre toutes les paires de nœuds des classes.

$$d(C_a, C_b) = \frac{\sum_{i=1}^{n_a} \sum_{j=1}^{n_b} d(x_i, y_j)}{n_a n_b} \quad x_i \in C_a, y_j \in C_b \quad (5.4)$$

où n_a et n_b sont les nombres de nœuds C_a et C_b respectivement.

Le critère de fusion de la méthode basée sur les centroïdes est la distance entre les centroïdes des classes.

$$d(C_a, C_b) = \|\bar{x}_a - \bar{x}_b\|^2 \quad (5.5)$$

$$\text{où } \bar{x}_i = \sum_{i \in C_i} \frac{x_i}{n_i}$$

Toutes ces méthodes tendent à favoriser les classes qui ont une forme sphérique (circulaire dans notre cas) et elles peuvent ne pas retrouver des classes de différentes formes, densités ou tailles.

Certains de ces problèmes peuvent être résolus, au moins partiellement, par la méthode de Ward. La méthode de la variance minimum de Ward utilise une analyse de la variance pour évaluer la distance entre deux classes. Lorsque deux classes C_a et C_b sont fusionnées, la diminution de l'inertie interclasse (et donc l'augmentation de l'inertie intra-classe) est égale à:

$$d(C_a, C_b) = \frac{\|\bar{x}_a - \bar{x}_b\|^2}{\frac{1}{n_a} + \frac{1}{n_b}} \quad (5.6)$$

L'algorithme de Ward consiste à choisir, à chaque itération, le regroupement de classes tel que l'augmentation de l'inertie intra-classe, utilisée comme critère de fusion, soit minimum.

La méthode de Ward a tendance à produire des classes contenant approximativement le même nombre de nœuds. Les résultats de calcul conduisent généralement à un résultat sous-optimal puisque les classes fusionnées aux étapes précédant l'étape en cours ne sont jamais scindées.

Le lecteur intéressé par les détails des critères de fusion et par l'influence sur les classifications obtenues pourra se reporter à Duda *et al* (2001). Lorsque la classification est effectuée, un représentant de classe auquel toute la demande de la classe sera affectée, doit encore être déterminé.

5.1.4. Agrégation et erreurs

A présent, les erreurs résultant de l'agrégation par des techniques de classification hiérarchique dans le cadre du problème du p -hub médian est estimée.

En reprenant la formulation du coût total pour le problème du p -hub médian, on peut écrire :

Soient $P = \{P_1, \dots, P_n\}$ l'ensemble des nœuds de demande ;
 $W = \{W_{11}, W_{12}, \dots, W_{ij}, \dots, W_{nn}\}$ l'ensemble des flux ,
 W_{ij} = flux de l'origine i vers la destination j ;
 $X = \{X_1, \dots, X_p\}$ l'ensemble des localisations des hubs.

Le coût total $f(X)$ est :

$$f(X) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^p \chi C(P_i, X_k) W_{ik} + \sum_{k=1}^p \sum_{m=1}^p \alpha C(X_k, X_m) W_{km} + \sum_{m=1}^p \sum_{j=1}^n \delta C(X_m, P_j) W_{mj} \quad (5.7)$$

où: $C(P_i, X_k)$ est le coût unitaire entre le nœud de demande P_i et le hub X_k ;
 $C(X_k, X_m)$ est le coût unitaire entre le hub X_k et le hub X_m ;
 $C(X_m, P_j)$ est le coût unitaire entre le hub X_m et le nœud de demande P_j .

Le problème du p -hub médian est alors de choisir un ensemble de sites $X = \{X_1, \dots, X_p\}$ tels que $f(X)$ soit minimisée.

Les méthodes de classification divisent l'ensemble des nœuds de demande en k classes : C_1, C_2, \dots, C_k . Dans chaque classe, un nœud est sélectionné de façon à ce que chaque nœud de demande de la classe soit agrégé en $A_g, g=1, \dots, k$. Le centroïde, A'_g , de la classe g est calculé de la façon suivante :

$$A'_g = \frac{\sum_{i \in C_g} (\sum_{j=1}^n W_{ij} + \sum_{j=1}^n W_{ji} - W_{ii}) \cdot P_i}{\sum_{i \in C_g} (\sum_{j=1}^n W_{ij} + \sum_{j=1}^n W_{ji} - W_{ii})} \quad (5.8)$$

Ce centroïde peut ne pas être un nœud de la classe, c'est pourquoi le nœud agrégé choisi est le nœud, appartenant à la classe g , le plus proche de A'_g :

$$A_g = \min C(P_i, A'_g) \quad \forall P_i \in C_g \quad (5.9)$$

Les flux agrégés qui seront associé à A_g sont ensuite calculés :

$$W'_{C_l, C_k} = \sum_{i \in C_l} \sum_{j \in C_k} W_{ij} \quad (5.10)$$

Avec cet ensemble de nœuds agrégés, la fonction de coût total est donnée par :

$$g(X) = \sum_{i=1}^q \sum_{k=1}^p \chi C(A_i, X_k) W'_{ik} + \sum_{k=1}^p \sum_{m=1}^p \alpha C(X_k, X_m) W'_{km} + \sum_{m=1}^p \sum_{j=1}^q \delta C(X_m, A_j) W'_{mj} \quad (5.11)$$

Si X_0 est la solution optimale pour le problème du p -hub médian (non agrégé) et X'_0 la solution optimale pour le problème du p -hub médian agrégé, deux types d'erreurs peuvent être définis :

- L'erreur d'optimalité :

$$\frac{[f(X'_0) - f(X_0)]}{f(X_0)} \quad (5.12)$$

- L'erreur sur le coût :

$$\frac{[f(X'_0) - g(X'_0)]}{f(X'_0)} \quad (5.13)$$

Cette dernière erreur ne peut être calculée que si le problème de localisation non agrégé peut être résolu de façon optimale. Il est important d'évaluer cette erreur car notre problème est un problème de minimisation de coûts.

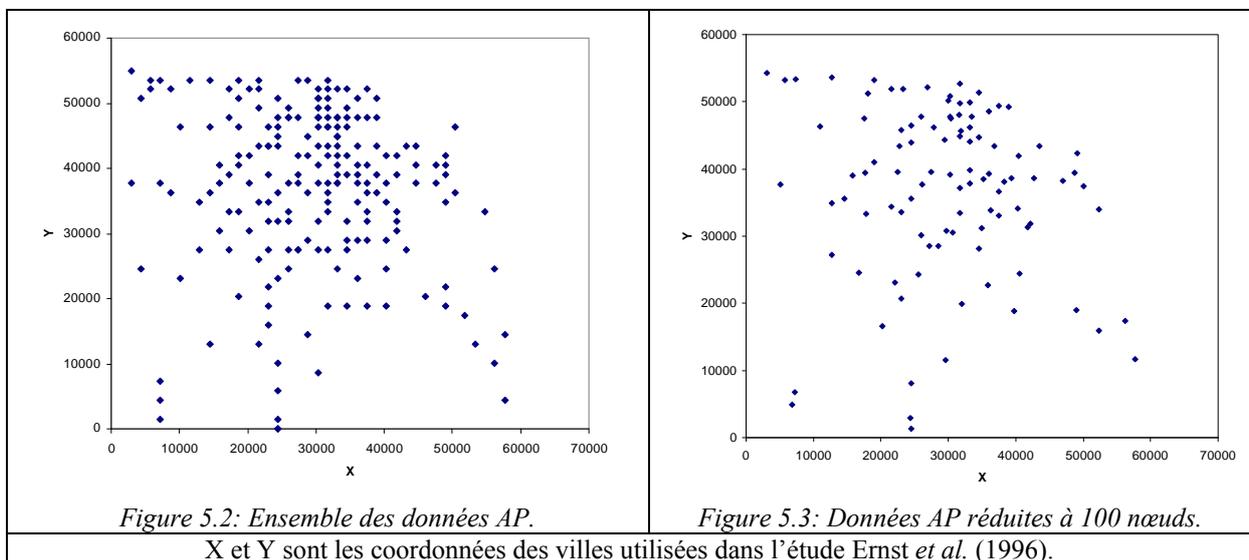
D'autres erreurs, comme par exemple les erreurs de localisation ou d'affectation, peuvent être évaluées. Une analyse de ces erreurs peut être trouvée dans Francis *et al.* (2005). Dans le paragraphe qui suit, l'erreur d'optimalité et l'erreur sur le coût sont estimées pour un problème du p -hub médian réel.

5.1.5. Test sur des données publiques

L'ensemble des données utilisées (AP data set) est un ensemble de référence pour les problèmes du p -hub médian. Cet ensemble peut être obtenu notamment sur le site de recherche opérationnelle de Beasley qui a été décrit en 1990 dans le « Journal of the

Operational Research Society ». L'ensemble des données d'AP se compose de 200 nœuds, qui représentent des zones de codes postaux, avec leurs coordonnées et les volumes de flux (distribution du courrier). Les valeurs des frais de transport par unité de volume et de distance utilisées dans ce problème de référence sont les constantes suivantes : $\chi = 3$; $\alpha = 0,75$ and $\delta = 2$.

Afin de générer un problème de 100 nœuds, qui peut être résolu avec CPLEX 10.0, le secteur est quadrillé, puis tous les nœuds d'une même cellule sont réduits en un seul nœud. Les détails sur ce processus peuvent être trouvés dans Ernst *et al.* (1996). La Figure 5.2 représente le problème original (200 nœuds) tandis que la Figure 5.3 représente le problème de 100 nœuds.



Le problème du p -hub médian a été résolu pour p variant de 2 à 10, pour trois niveaux d'agrégation (problèmes constitués de 20, 30 et 40 nœuds agrégés) et pour trois méthodes de classifications hiérarchiques : l'« average linkage » (A), le « centroid linkage » (C) et « Ward » (W). Le Tableau 5.1. reprend les variations de l'erreur d'optimalité en fonction du nombre p de hub à localiser pour ces trois niveaux d'agrégation et pour ces trois méthodes de classification hiérarchique.

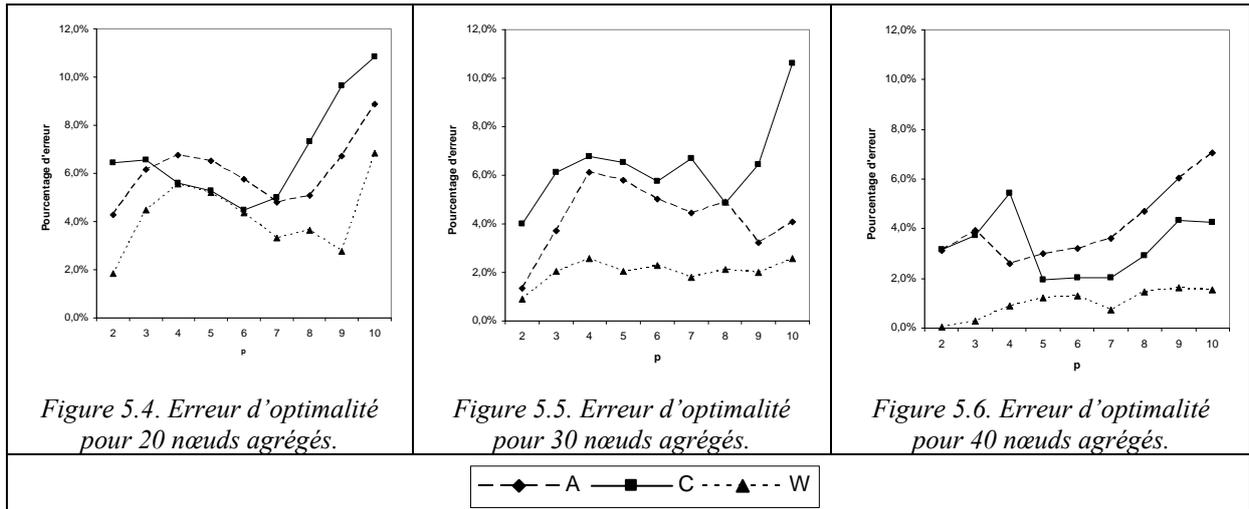


Tableau 5.1. Variation de l'erreur d'optimalité en fonction du nombre p de hubs à localiser.

Les Figures 5.4. à 5.6. montrent que l'erreur d'optimalité due à l'agrégation des données est la plus petite lorsque la méthode de classification de Ward est choisie et cela pour tous les niveaux d'agrégation étudiés et pour toutes les valeurs de p étudiées. Remarquons que bien que la méthode de Ward fournisse les meilleurs résultats, l'erreur commise peut atteindre 7 % pour un niveau d'agrégation relativement bas puisqu'il réduit par cinq seulement le nombre de nœuds.

Les résultats de la variation de l'erreur sur les coûts en fonction du nombre p de hubs à localiser pour les trois niveaux d'agrégation et pour les trois méthodes de classification hiérarchique étudiées sont résumées au Tableau 5.2.

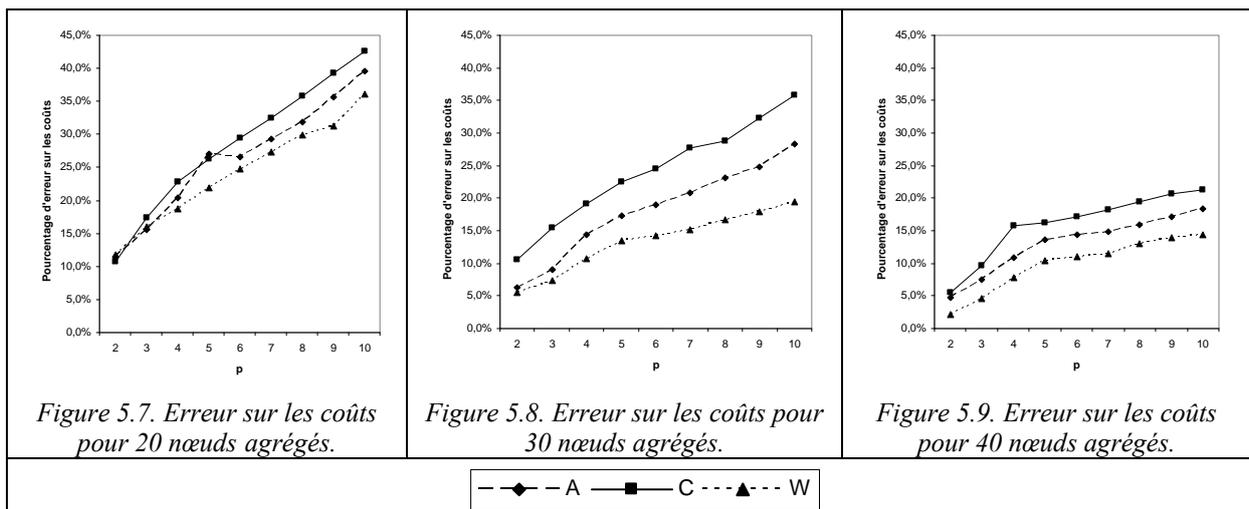


Tableau 5.2. Variation de l'erreur sur les coûts en fonction du nombre p de hub à localiser.

Les Figures 5.7. à 5.9. montrent que l'erreur sur les coûts due à l'agrégation des données est la plus petite lorsque la méthode de classification de Ward est choisie et cela pour tous les niveaux d'agrégation étudiés et pour toutes les valeurs de p étudiées. Elles montrent

également que cette erreur augmente avec le niveau d'agrégation et avec le nombre de hubs à localiser. Remarquons que, bien que la méthode de Ward fournisse les meilleurs résultats, l'erreur commise atteint 36 % lorsque $p=10$ pour un niveau d'agrégation relativement bas puisqu'il réduit par cinq le nombre de nœuds.

5.1.6. Conclusions sur l'agrégation des nœuds de demande

L'exemple qui vient d'être étudié montre que les techniques d'agrégation doivent être employées avec beaucoup de précautions car elles peuvent entraîner des erreurs importantes même pour un niveau d'agrégation relativement bas.

Dans les paragraphes qui suivent, une méthodologie est développée pour réduire le nombre de localisations potentielles par des critères de sélection plutôt que par agrégation. Ces critères permettent de mettre en évidence des sites propices à l'installation d'un terminal rail-route de conteneurs dans un réseau de type « *hub-and-spoke* ».

5.2. Détermination des localisations potentielles

L'objectif est de décrire une méthode qui aide à déterminer les meilleures localisations potentielles. L'idée de base est d'employer les flux de marchandises et leur dispersion géographique comme entrée pour déterminer un ensemble de localisations potentielles pour les terminaux rail-route de conteneurs dans un réseau de type « *hub-and-spoke* » sur le territoire transeuropéen.

Lorsque ces localisations potentielles sont déterminées, la matrice de demande et la matrice des coûts entre chaque paire de terminaux sont estimées pour servir d'entrées au problème du p -hub médian.

Les principales étapes, résumées à la Figure 5.10., sont :

- La détermination de la distance minimale entre terminaux sur laquelle l'offre du transport combiné est concurrentielle. Cette étape permet de garder uniquement les paires origine-destination de la matrice O-D qui peuvent être concernées par le transport combiné.
- La ventilation par catégorie de marchandises permet de trouver la matrice O-D pouvant être concernée par le transport combiné.
- L'étape précédente donne une bonne idée du potentiel de chaque nœud. Cependant, la consolidation des flux d'un même couloir sur une route unique est nécessaire car la

demande pour un terminal ne s'évalue pas uniquement sur base des flux qui passent exactement à l'endroit où il est localisé, mais également sur base des flux proches.

- L'étape de sélection des localisations potentielles permet de trier tous les nœuds du réseau suivant différents critères à spécifier en fonction du type de terminal que l'on souhaite localiser.
- L'étude de l'aire de marché des terminaux permet l'estimation de la demande qui pourrait être captée par ces terminaux.
- Les flux de marchandises possibles entre les localisations potentielles sont évalués en prenant en compte les demandes liées aux aires de marché.
- Les coûts de transport entre les terminaux sont ensuite évalués.

Dans les paragraphes qui suivent, ces différentes étapes vont être développées, pour permettre la détermination des localisations optimales des terminaux rail-route de conteneurs dans un réseau de type « *hub-and-spoke* » sur le territoire transeuropéen.

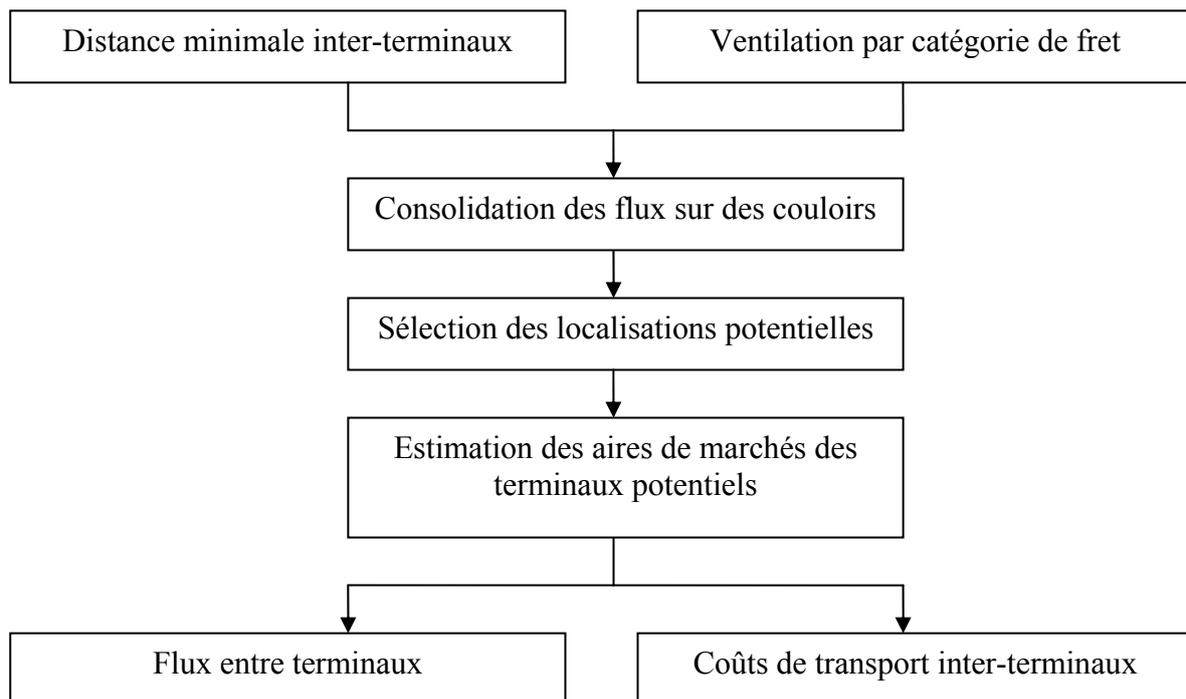


Figure 5.10. Détermination des localisations potentielles.

5.2.1. Distance minimale inter-terminaux

Le transport combiné a la réputation de n'être rentable que pour de grandes distances, et la distance communément admise pour le transport intermodal rail-route 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 est concurrentielle pourrait être de 300 km.

Pour l'année 2000, les statistiques de l'UIRR donnent une distance moyenne de 734 km. Afin d'estimer la distance minimale sur laquelle l'offre du transport combiné rail-route peut être concurrentielle, ces statistiques ont été utilisées pour tracer l'histogramme de la Figure. 5.11.

L'unité de mesure utilisée pour l'ordonnée du graphique de la Figure 5.11. est l'Equivalent Vingt Pieds (EVP). Elle correspond à un conteneur ISO de 20 pieds de long (6,10 m), employée pour exprimer des capacités ou des flux de transport. La Figure 5.11. représente le nombre d'EVP transportés entre deux terminaux qui sont classés en fonction de la distance séparant ces 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. La grosse majorité des EVP (92 %) du transport combiné circule 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.

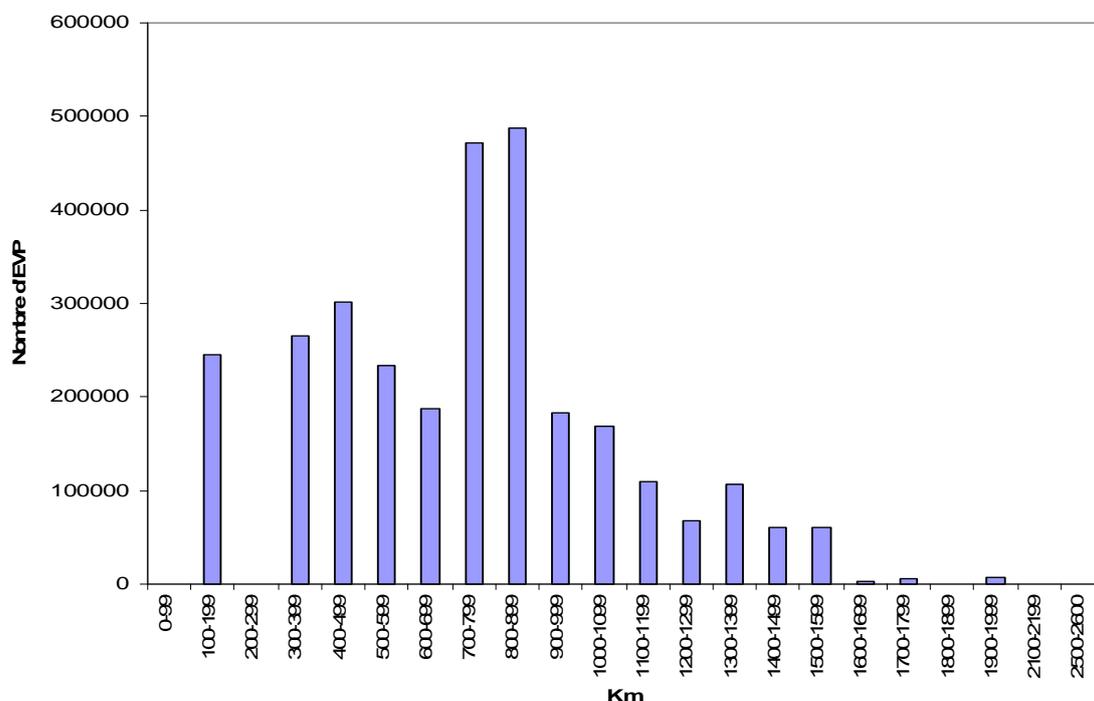


Figure 5.11. Distribution des EVP en fonction de l'éloignement des terminaux.

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 recherche du chemin le plus court. La longueur du chemin le plus court entre chaque paire O-D représente la distance. 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.

5.2.2. Ventilation par groupe de marchandises

Pour l'année 2000, Eurostat ne dispose pas de statistiques sur les marchandises transportées par voies ferroviaires et par groupe de marchandises, seule la Suède a transmis ses données. En 2003, vingt pays de l'EU25 ont transmis leurs données¹¹. Celles-ci comportent une ventilation par type de marchandises selon les 24 groupes de la NST-R. La répartition par groupe de marchandises de la NST-R en 2003 est reprise sur la Figure 5.12. en milliers de tonnes et sur la Figure 5.13. en millions de t.km. Ces figures montrent que la part du groupe 24 de la NST-R « Articles divers » est très élevée par rapport aux autres groupes. Cette situation peut s'expliquer par l'utilisation de ce groupe pour comptabiliser les marchandises transportées en conteneur qui, souvent, ne sont pas identifiées de façon spécifique au sein des déclarations statistiques.

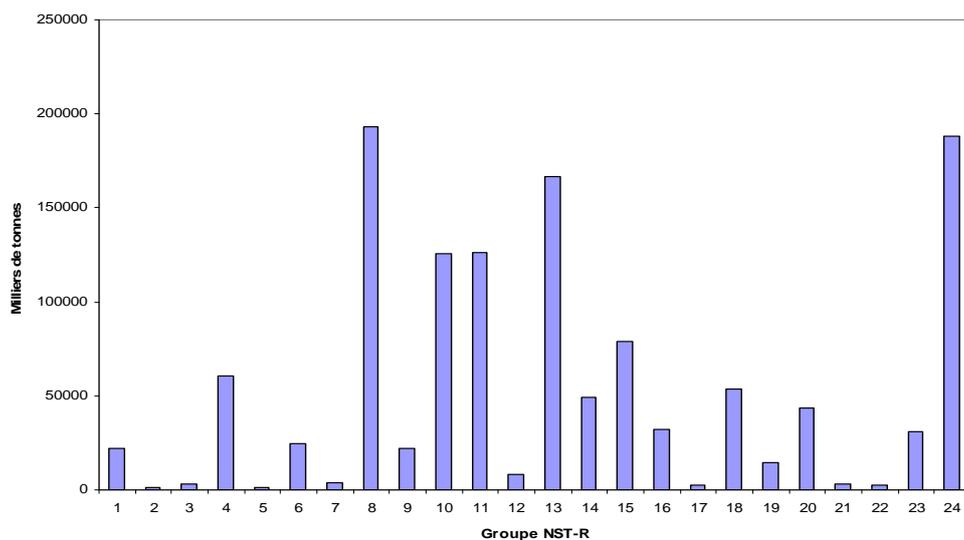


Figure 5.12. Répartition en milliers de tonnes par groupe de marchandises de la NST-R en 2003.

¹¹ Les données ne sont pas disponibles pour la Pologne, Malte, Le Grand-Duché du Luxembourg, Chypre et la Grèce.

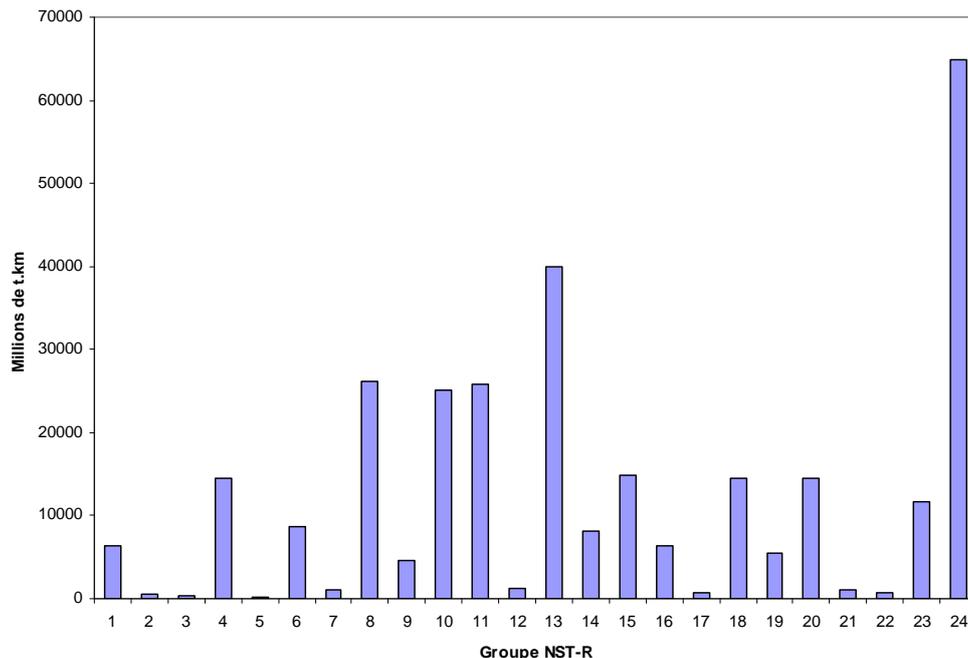


Figure 5.13. Répartition en millions de t.km par groupes de marchandises de la NST-R en 2003.

Or, les matrices fournies par une étude du bureau de consultance « *NEA Transport research and training* » sont scindées par chapitre NST-R et non pas par groupe NST-R. Le tableau de l'annexe 3 indique les groupes NST-R appartenant à chaque chapitre ainsi qu'une description du type de marchandises.

Les statistiques d'Eurostat montrent également que le groupe 24 de la NST-R représente en tonnes et en t.km, environ 70% du chapitre 9. Vu la répartition du groupe 24 au sein du chapitre 9 de la NST-R et la non-identification spécifique des marchandises transportées en conteneurs, l'approximation de ne considérer que la demande des matrices du chapitre 9 est faite.

5.2.3. Consolidation des flux sur des couloirs

Il s'agit maintenant d'étudier les flux de marchandises pour lesquels le transport combiné peut être compétitif. Comme il a été montré au point 5.2.1., la distance de 300 km peut être considérée comme distance minimale pour laquelle le transport combiné peut être compétitif par rapport à la route. De plus, seules les marchandises appartenant au chapitre NST-R 9 sont affectées car ce chapitre sert pour comptabiliser les marchandises transportées en conteneur qui, souvent, ne sont pas identifiées de façon spécifique au sein des déclarations statistiques.

Nous ne revenons pas ici sur la discussion sur les techniques d'affectation utilisées et sur les résultats obtenus qui ont fait l'objet du chapitre 4. L'affectation multi-flux sur un réseau

multimodal : routier, ferroviaire et fluvial donne les résultats représentés aux Figures 4.13. à 4.15.

Cependant, les flux sont répartis sur des itinéraires qui peuvent être très proches. Or, une information sur les flux de marchandises en chaque nœud du réseau ainsi que sur les flux qui seraient susceptibles de passer par les nœuds proches serait utile.

Dans le transport de marchandises, la route prédomine les autres modes de transport et elle est accessible à partir de chaque nœuds du réseau. Dès lors, une affectation de type Tout-ou-Rien uniquement sur le mode routier permet de consolider les flux qui pourraient se trouver sur d'autres itinéraires d'un même couloir sur une route unique. En effet, la demande pour un terminal ne s'évalue pas uniquement sur base des flux qui passent exactement à l'endroit où il est localisé, mais également sur base des flux proches. L'affectation ToR sur le mode routier uniquement permet ainsi de regrouper tout le flux sur des corridors importants sur lesquels les localisations potentielles pourront être choisies. Ce type d'affectation permet également de réduire certaines erreurs d'affectation dues à des spécifications locales du réseau, § 4.7. La Figure 5.14. représente les flux obtenus par cette affectation. Certains couloirs sont à présents bien visibles. Cette information est utile pour déterminer un ensemble localisations potentielles puisque les flux donnent une bonne idée du potentiel de chaque nœud.

A titre d'exemple, les Figures 5.15. et 5.16. sont des agrandissements de la Wallonie pour l'affectation multi-flux et Tout-ou-Rien respectivement. Les flux entre le centroïde du Hainaut et celui de la région de Liège sont répartis sur trois itinéraires : ferroviaire, routier et fluvial sont consolidés sur le même itinéraire routier. Cette procédure permet d'évaluer le flux qui passe en un nœud mais également les flux qui sont dans une région proche, en termes de coûts, de celui-ci.

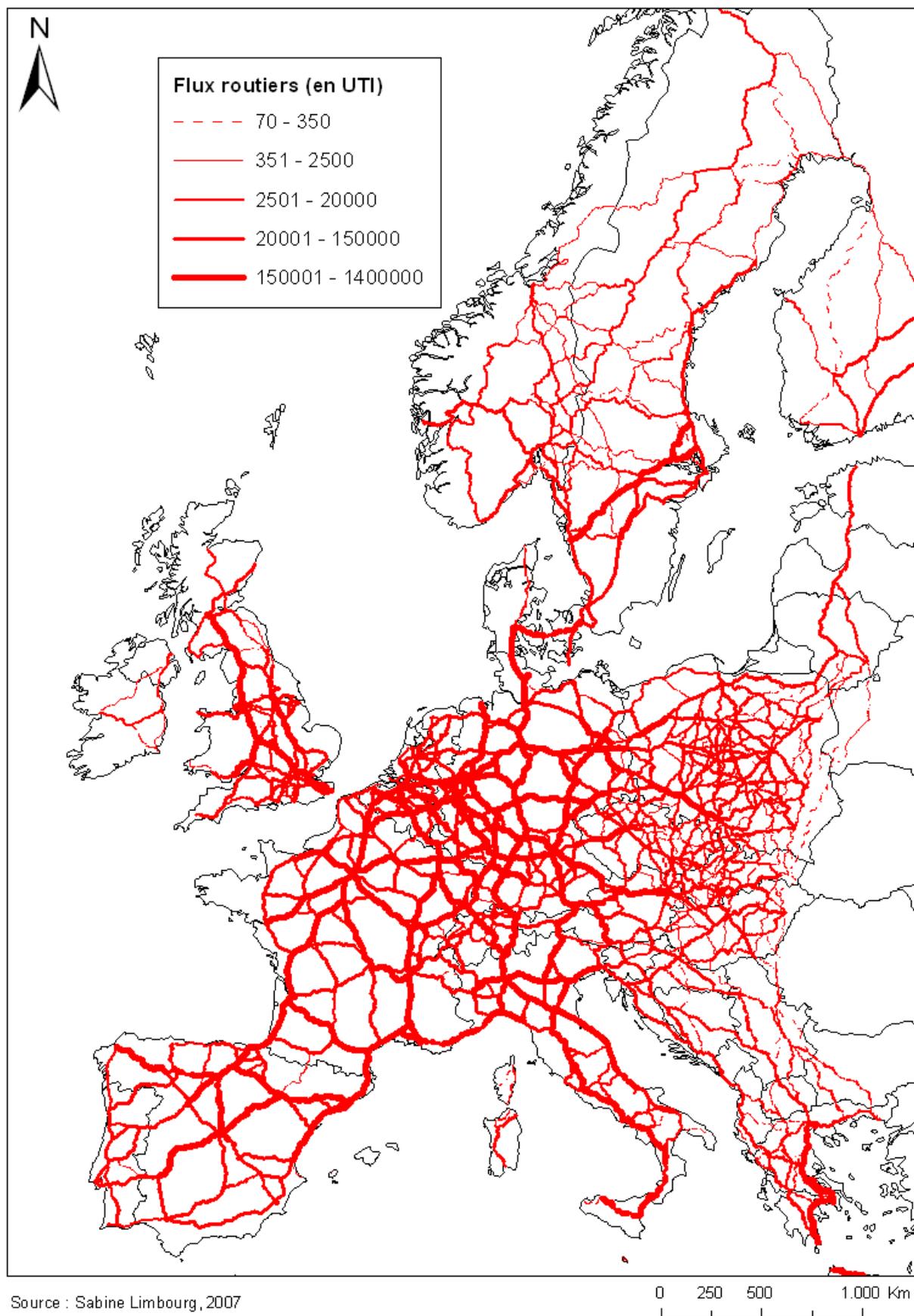


Figure 5.14. Affectation Tout-ou-Rien pour le chapitre 9 et pour des déplacements de plus de 300 km.

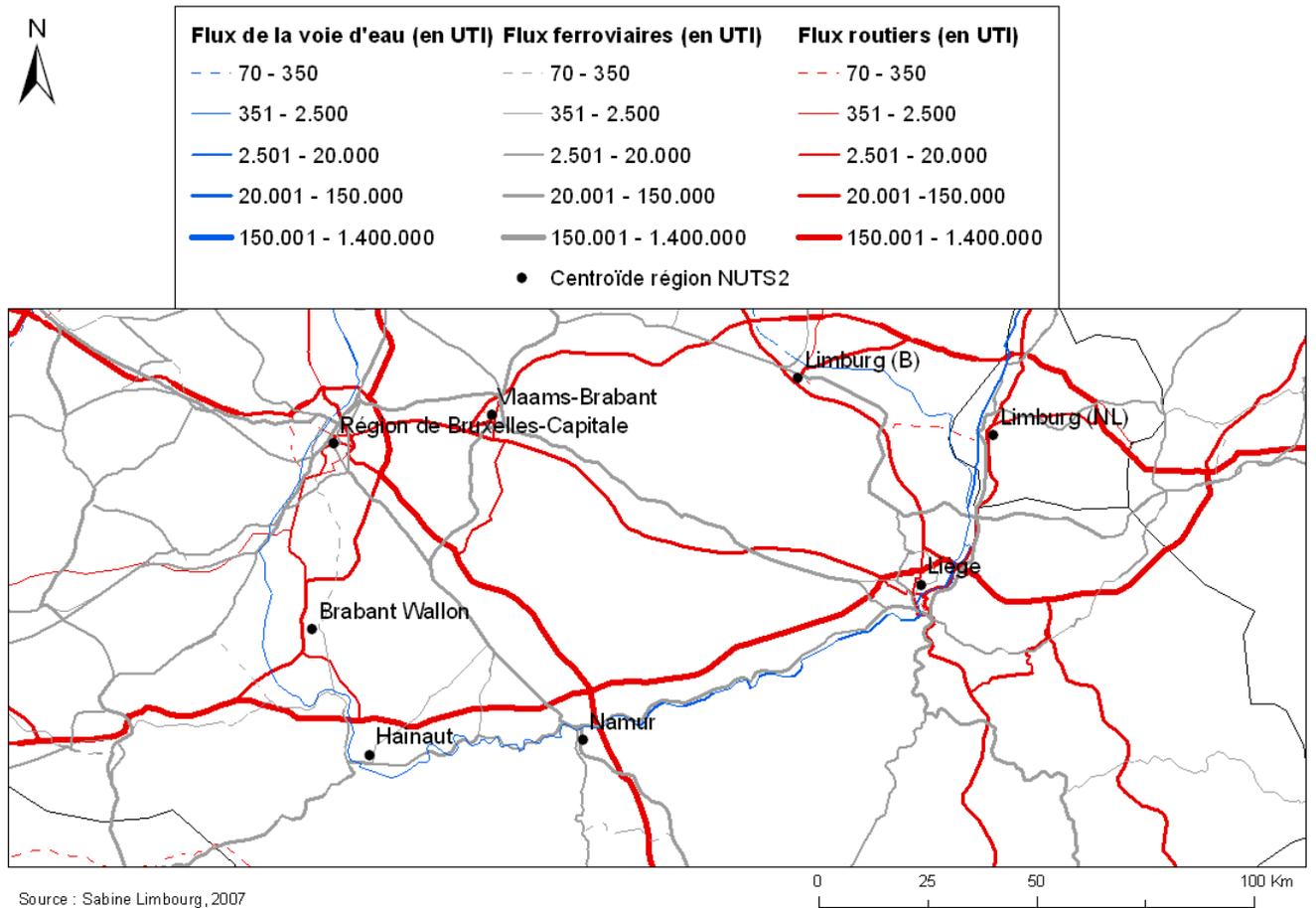


Figure 5.15. Affectation multi-flux et multimodale - Wallonie.

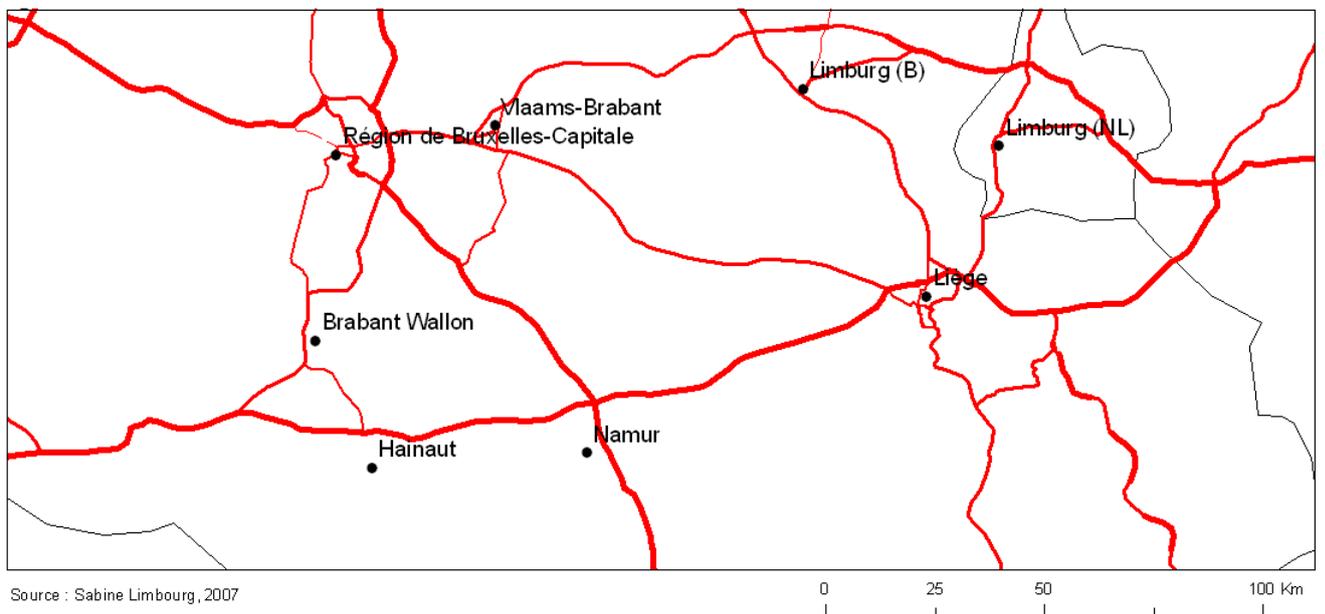


Figure 5.16. Affectation Tout-ou-Rien sur le réseau routier uniquement - Wallonie

5.2.4. Sélection des localisations potentielles

Tous les nœuds du réseau, et pas seulement ceux qui représentent une origine et/ou une destination, sont triés de façon à ne retenir que les nœuds qui remplissent un certain nombre

de critères pouvant être spécifiés à cette étape. Une première sélection peut être effectuée en ne gardant que les nœuds dont le poids est supérieur à un seuil donné.

L'objectif est de localiser des terminaux rail-route de conteneurs dans un réseau de type « *hub-and-spoke* » sur le territoire transeuropéen. Wiegman (2003) estime que le volume annuel pour ce genre de terminaux doit être au moins de 150.000 E.V.P. De plus, le poids moyen en tonnes par E.V.P. est de 15 à 16 tonnes selon les statistiques de l'U.I.R.R.

KombiConsult (2002) reprend les flux (en tonnes) manutentionnés par les principaux terminaux pour l'année 2000. Ces flux permettent d'estimer qu'en moyenne le rapport entre les flux obtenus aux nœuds où se trouvent les principaux terminaux par l'affectation ToR qui vient d'être discutée au paragraphe précédent et des flux manutentionnés par ces principaux terminaux est de 17 %. Ceci implique donc que le seuil de flux minimum à considérer est d'environ 880.000 UTI.

Les critères suivants peuvent également être pris en compte :

- la distance minimale du terminal à un terminal existant ;
- la distance minimale du terminal à un port ;
- la distance maximale du terminal à un nœud fluvial ;
- la distance maximale du terminal à un nœud ferroviaire ;
- etc.

Pour ces critères de recherche de distance, un algorithme de recherche du nœud ferroviaire le plus proche, d'un nœud fluvial le plus proche, ... est nécessaire. Le problème de la recherche des plus proches voisins (ou des k plus proches voisins) est très courant en algorithmique et de nombreux auteurs se sont déjà attachés à construire des algorithmes efficaces pour le résoudre rapidement (voir par exemple Lai *et al* (2007)). L'algorithme naïf de recherche du plus proche voisin consiste à passer sur l'ensemble des points et à regarder si ce point est plus proche du plus proche voisin déjà sélectionné, et si oui, le sélectionner. Le temps de calcul est alors linéaire par rapport au nombre de points : $O(N)$ où N est le nombre de points. Les optimisations de cet algorithme se basent souvent sur les particularités du problème.

En ce qui concerne le problème étudié, si le nœud n'est pas connecté au réseau ferroviaire, le plus proche voisin ferroviaire doit être recherché, s'il existe, dans un rayon égal à la distance maximale choisie. La procédure suivante a été élaborée. Une matrice de 360 sur 360 cellules a été construite. Chaque cellule a donc un degré de latitude et un degré de longitude, tout en

sachant que ces cellules n'ont pas toutes la même superficie. En effet, la Figure 5.17. montre que lorsque le globe est découpé en fonction de la latitude et la longitude, les zones obtenues ont des superficies qui décroissent de l'équateur aux pôles.

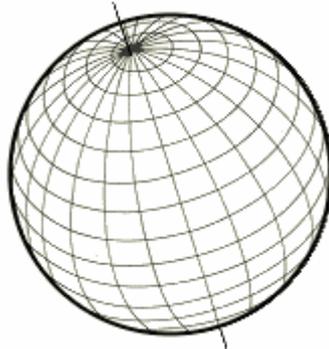


Figure 5.17. Globe scindé en zone de même intervalle de latitude et de longitude.

Chaque nœud appartient à une cellule déterminée par les coordonnées géographiques du nœud en question. Pour déterminer, son voisin « ferroviaire » le plus proche dans un rayon donné, la grandeur de cette cellule est calculée en utilisant la distance grand cercle, ou distance orthodromique, qui est la plus petite distance entre deux points sur une sphère. Les dimensions de la cellule sont utilisées pour déterminer le nombre de cellules autour de la cellule de départ sur lesquelles la recherche doit être effectuée. Cette sélection de cellules permet de diminuer le temps de calcul, puisque la recherche ne s'effectue plus sur l'ensemble des nœuds du réseau mais sur une partie de celui-ci.

Après l'application des deux filtres suivants : le seuil de flux minimum a été fixé à 880.000 tonnes et la distance maximale d'un nœud ferroviaire à 5 km, l'ensemble des localisations potentielles reste important. Ceci est dû principalement au fait que plusieurs de ces nœuds, qui sont proches l'un de l'autre, ont des caractéristiques à peu près identiques (effet de chaîne). S'il est vrai que, au niveau régional, ces nœuds peuvent avoir des caractéristiques très différentes (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. Les 37 localisations potentielles ainsi retenues sont reprises sur la Figure 5.18.

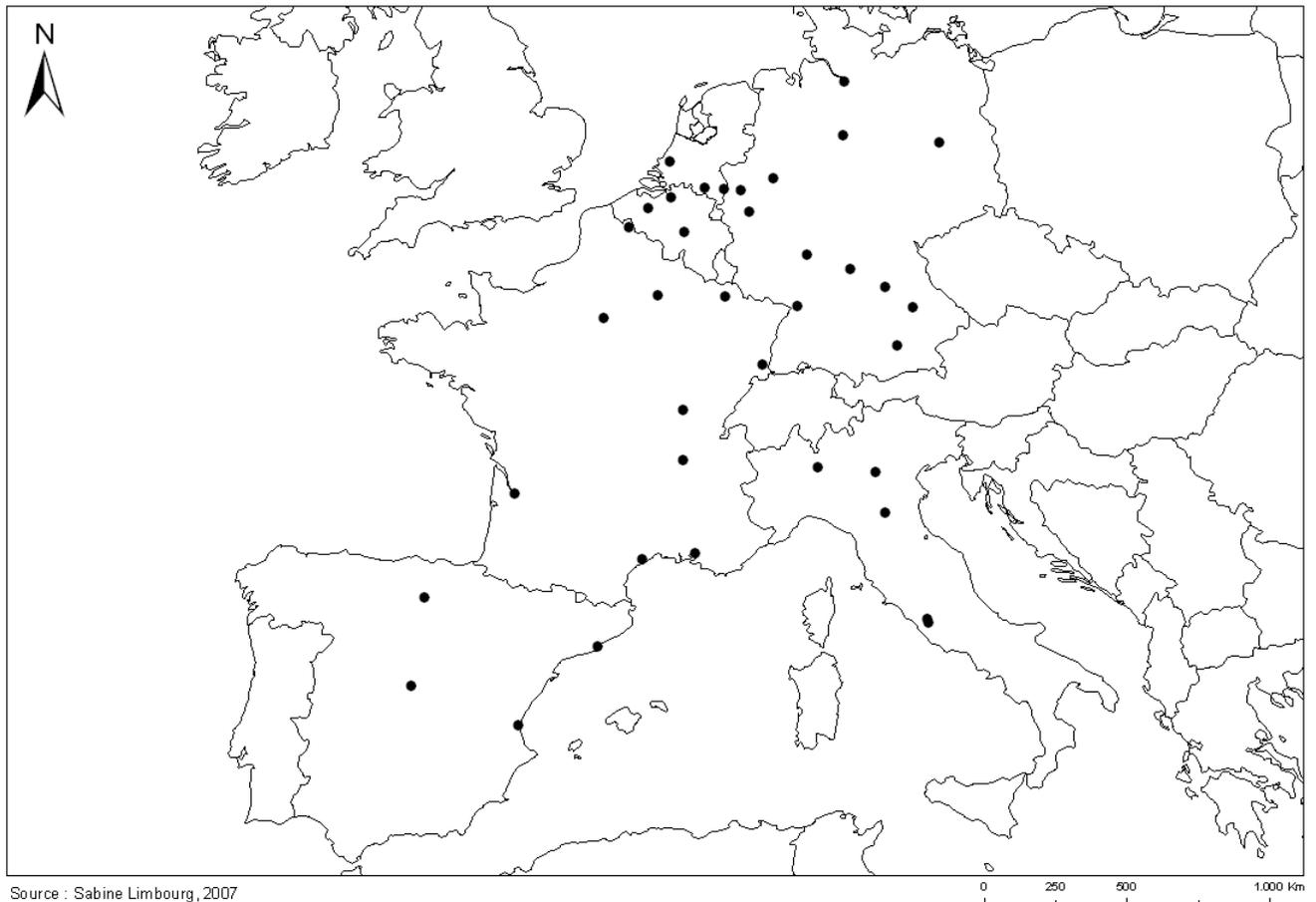


Figure 5.18. Ensemble des localisations potentielles.

Notre méthode permet donc de réduire le nombre de localisations potentielles à 37, sans utiliser de méthode de classification. Ce nombre est suffisamment petit pour que le problème du p -hub médian puisse être résolu de façon exacte. A présent, les flux de conteneurs et les coûts de transport entre ces localisations vont être évalués.

5.3. Détermination des flux de conteneurs

Pour évaluer les flux de conteneurs entre les localisations potentielles obtenues, la demande qui peut être captée par chacune de ces localisations potentielles doit être estimée.

Dans Recordit, les distances de pré- et post-acheminements des différents couloirs étudiés sont, à l'exception d'un cas particulier, de 50 km. Cette distance est souvent considérée comme distance maximum de pré- et post-acheminement (Daubresse (1997), Terminet (1997), la CEMT (1998) et Wiegmans (2003)).

L'étude présentée au paragraphe suivant permet d'estimer ces distances de pré- et post-acheminement à partir de la détermination de l'aire de marché des terminaux.

5.3.1. Aire de marché du terminal

Le problème des aires de marché a été traité par de nombreux auteurs comme par exemple Hotelling H. (1929) ou Berry B.J.L. (1967), Niérat (1997) a étudié l'aire de marché d'un terminal rail-route en adoptant le point de vue d'un transporteur et en comparant le coût des solutions de transport. Les choix possibles sont représentés à la Figure 5.19. L'aire de marché est déterminée par l'ensemble des points M pour lesquels le transport intermodal est moins cher que le transport routier.

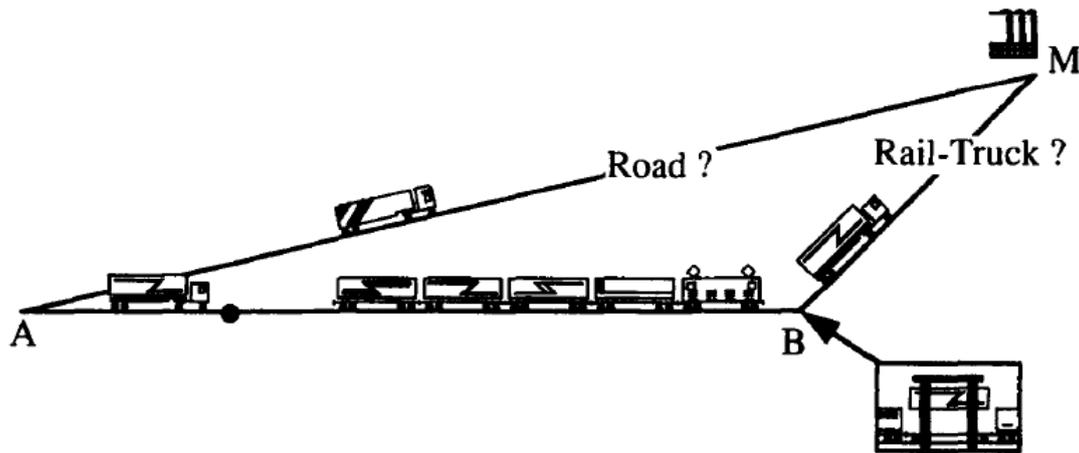


Figure 5.19. Choix possibles : transport combiné ou transport routier.

Source : Niérat (1997)

5.3.1.1. Aire de marché elliptique

Afin de simplifier le raisonnement, l'hypothèse qu'à l'origine, le transport combiné commence directement par la partie ferroviaire, sans pré-acheminement est émise.

Mathématiquement, le problème est présenté de la façon suivante : un espace à trois dimensions est utilisé, le plan oxy de la Figure 5.20. représente l'espace physique où s'écoule le trafic et l'axe oz est la dimension des coûts. Afin d'évaluer l'aire de marché du terminal au point B, les différents coûts de transport sont repris sur le graphique de la Figure 5.20. (a) et la représentation du domaine (aire de marché) routier et intermodal est schématisée sur Figure 5.20. (b).

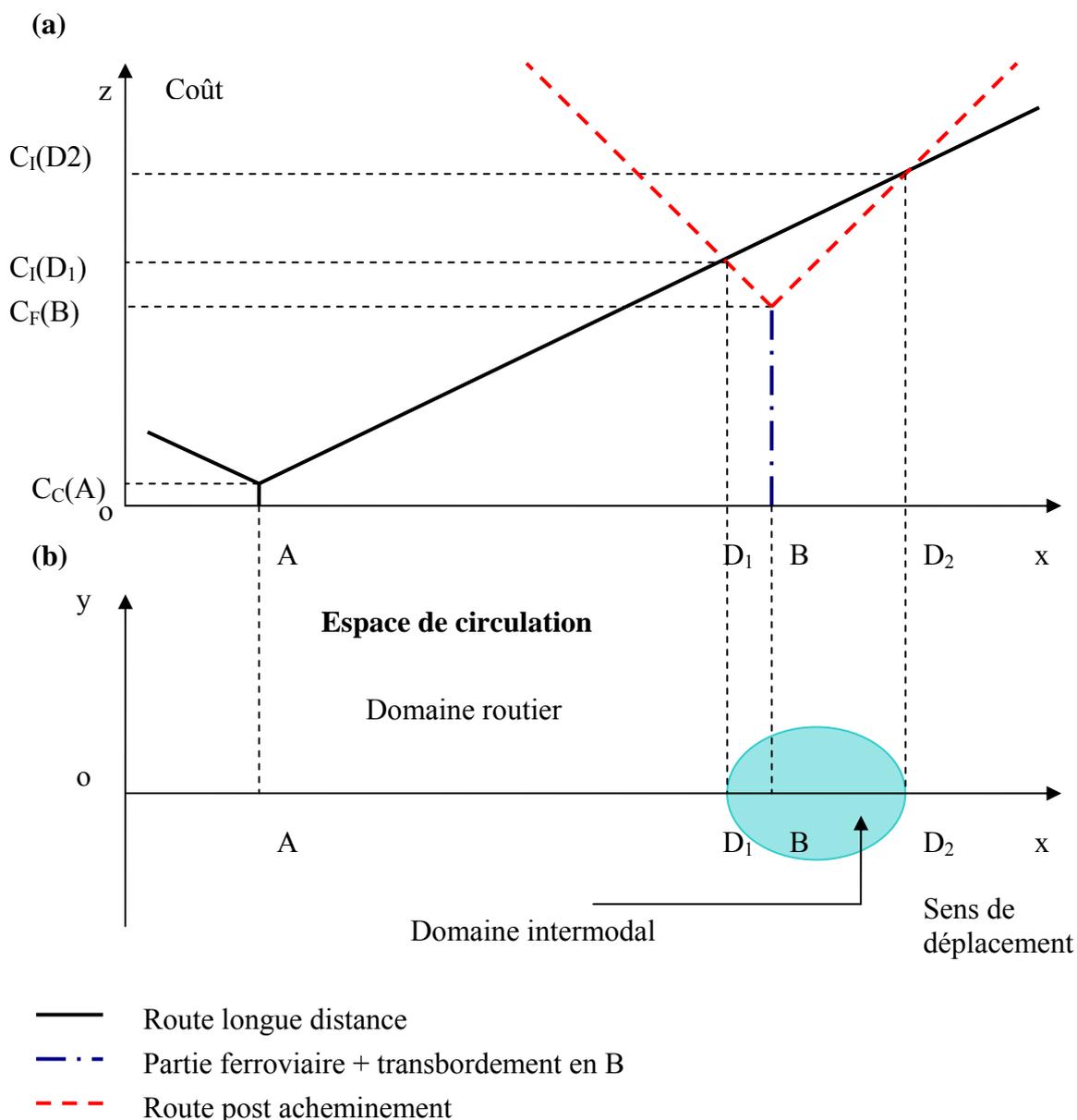


Figure 5.20. Aire de marché d'un terminal : cas elliptique.

où

- $C_C(A)$ est le coût de chargement et de déchargement du camion.
- $C_F(B)$ est la somme du coût de transbordement route-rail, de l'acheminement ferroviaire de l'origine A à la destination B et du coût du transbordement rail-route au terminal B .
- $C_I(D_1)$ est le coût du transport intermodal de l'origine A à la destination D_1 .
- $C_I(D_2)$ est le coût du transport intermodal de l'origine A à la destination D_2 .

Les coûts des différentes solutions de transport sont alors calculés. Pour des expéditions faites entièrement par la route, l'hypothèse émise est que ces coûts peuvent être exprimés comme la

somme d'une partie fixe et d'une partie variable, proportionnel à la distance euclidienne (l'espace physique est supposé homogène). En trois dimensions, cette hypothèse prend la forme d'un cône dont le minimum est atteint au point $(A, 0, C_C(A))$. Pour le transport intermodal le problème est analysé au-dessus du point B . Pour aller du point A au point B le coût de transport représente la somme du coût de transbordement route-rail, de l'acheminement ferroviaire de l'origine A à la destination B et du coût du transbordement rail-route au terminal B . Du point B , les marchandises doivent être envoyées par la route à la destination finale M de la Figure 5.19. Pour le coût de cette livraison par camion l'hypothèse qu'ils peuvent être exprimés en une partie fixe (ajoutée aux coûts encourus pour aller de A à B) et une partie variable, proportionnelle à la distance entre B et M est également émise. En trois dimensions, cette hypothèse prend également la forme d'un cône dont le minimum est atteint au point $(B, 0, C_F(B))$. L'intersection de ces deux cônes indique où la route et le transport intermodal ont exactement les mêmes coûts ; ces points sont sur une courbe qui, projetée sur le plan oxy a la forme d'une ellipse dont B est l'un des foyers.

À l'intérieur de la surface coloriée, le transport intermodal est la solution la moins chère, tandis qu'en dehors c'est le transport routier qui est le moins coûteux. La surface coloriée représente donc l'aire de marché du terminal B . L'aire de marché a dans ce cas une forme elliptique. En effet, au plus un point de destination D se rapproche de A au moins il sera probable que l'itinéraire suivit passe par B pour ensuite revenir sur ses pas.

Afin d'estimer si l'aire de marché est proche d'un cercle, l'évaluation de l'excentricité, ε , de l'ellipse est calculée.

Soient :

$$r_1 = \overline{D_1B}$$

$$r_2 = \overline{D_2B}$$

$$d = \overline{AD}$$

c_p = coût de post acheminement par km

c_r = coût routier par km pour un acheminement de longue distance

Le coût du transport intermodal sera égal au coût du transport routier aux points D_1 et D_2

Donc

$$C_F(B) + c_p.r_1 = C_C(A) + c_r.(d - r_1) \quad (5.14)$$

$$C_F(B) + c_p.r_2 = C_C(A) + c_r.(d + r_2) \quad (5.15)$$

Ce qui permet de déduire :

$$\varepsilon = \frac{c_r}{c_p} \quad (5.16)$$

En reprenant les valeurs moyennes du Tableau 2.4., l'excentricité vaut 0,69 pour les conteneurs 40 pieds et 0,674 pour les conteneurs 20 pieds.

5.3.1.2. Estimation de grandeur de l'aire de marché

Au paragraphe 5.2.5.1., l'hypothèse de départ était qu'à l'origine, le transport combiné commençait directement par la partie ferroviaire sans pré-acheminement. Cependant, le chemin de fer ne dessert que certains points du territoire et l'offre ferroviaire n'est pas homogène. Le transport combiné nécessite dans la majorité des cas un pré- et un post-acheminement routiers. Pour estimer l'aire de marché du terminal B , l'hypothèse que la distance du pré-acheminement ou post-acheminement effectué en A est quasiment nulle est émise, l'aire de marché du terminal B est schématisée à la Figure 5.21., celle-ci est orientée selon la droite reliant le terminal d'origine et le terminal de destination du trajet ferroviaire.

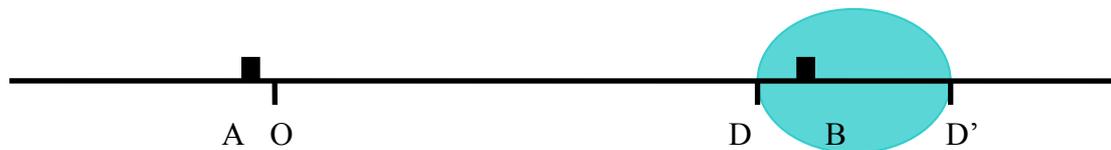


Figure 5.21. Estimation des paramètres de l'aire de marché d'un terminal.

En supposant que la distance de O à A est négligeable, considérons le transport de l'origine O à la destination D de la Figure 5.21. Le coût du transport intermodal est équivalent au coût de transport routier, ce qui peut s'écrire :

$$r_1 c_p + c_f d + 2T = c_r (d - r_1) \quad (5.17)$$

Où

r_1 est la distance de D à B

d est la distance de A à B

c_p est le coût unitaire de pré ou post acheminement

c_f est le coût unitaire d'un acheminement ferroviaire

c_r est le coût unitaire d'un acheminement routier de longue distance

T le coût d'un transbordement

L'égalité (5.17) permet d'estimer r_1 :

$$r_1 = \frac{c_r d - c_f d - 2T}{c_p + c_r} \quad (5.18)$$

Cette distance est la limite inférieure des distances à partir du terminal B pour lesquelles le coût du transport combiné est égal au coût du transport routier.

Si maintenant, le transport entre l'origine O à la destination D' est considéré, que r_2 désigne la distance de B à D' , r_2 peut également être estimé en égalant le coût du transport intermodal au coût de transport :

$$r_2 = \frac{c_r d - c_f d - 2T}{c_p - c_r} \quad (5.19)$$

Cette distance est la limite supérieure des distances à partir du terminal B pour lesquelles le coût du transport combiné est égal au coût du transport routier.

L'évolution de ces distances en fonction de la distance entre les terminaux est représentée à la Figure 5.22. Cette évolution a été déterminée à partir des coûts moyens obtenus pour les conteneurs 20 pieds et les conteneurs 40 pieds au chapitre 2.

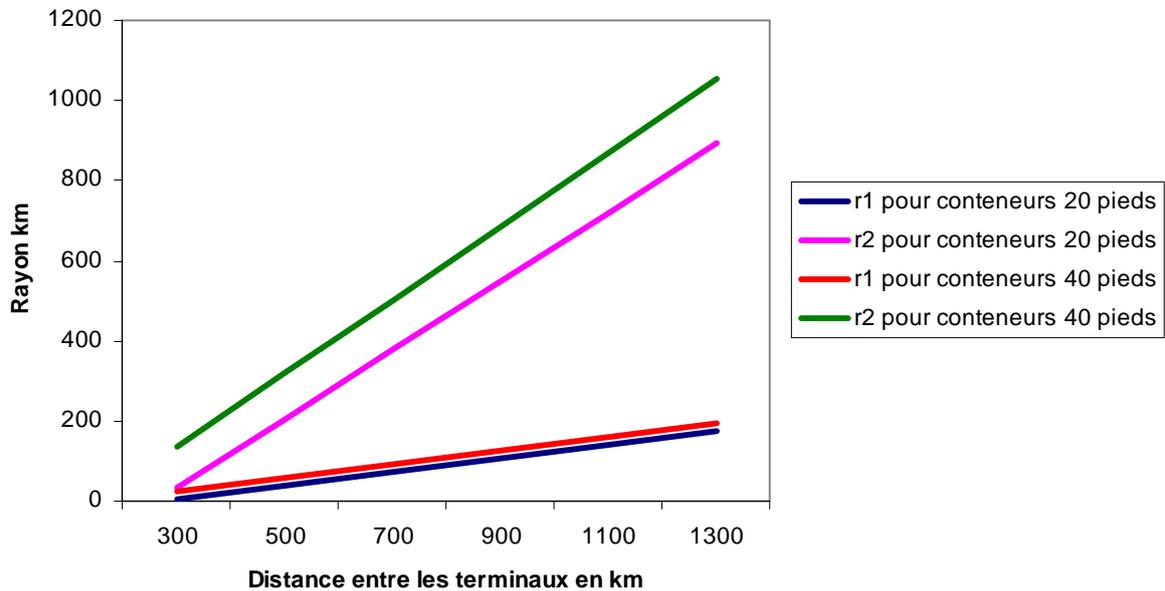


Figure 5.22. Evolution des rayons des aires de marché en fonction de la distance entre les terminaux.

Comme nous l'avons déjà signalé, les auteurs de différentes études, comme Recordit, Termet (1997), Daubresse (1997), CEMT (1998) ou Wiegmans (2003), considèrent une distance maximale de pré- et post-acheminement de 50 km. Cependant, l'étude de l'aire de marché de ces terminaux permet de montrer que cette distance dépend fortement de la

position de l'origine (et/ou de la destination) par rapport à la liaison entre les terminaux et de la distance séparant les terminaux. Remarquons également que pour des distances inter-terminaux inférieures à 300 km, l'aire de marché pour les conteneurs de 20 pieds est presque nulle. Cette distance minimale est donc tout à fait en accord avec l'hypothèse du paragraphe 5.2.1.

5.3.1.3. Aire de marché hyperbolique

En reprenant les mêmes notations qu'au point 5.2.5.1., la Figure 5.23. représente le cas où l'aire de marché aurait une forme hyperbolique. Cette situation théorique est cependant peu probable car une aire de marché de forme hyperbolique correspond au cas où les coûts des pré- et post-acheminements routiers seraient inférieurs aux coûts de l'acheminement routier sur grande distance. Dans le cas particulier où les coûts du post-acheminement routier seraient équivalents aux coûts de l'acheminement routier sur grande distance, l'aire de marché serait parabolique.

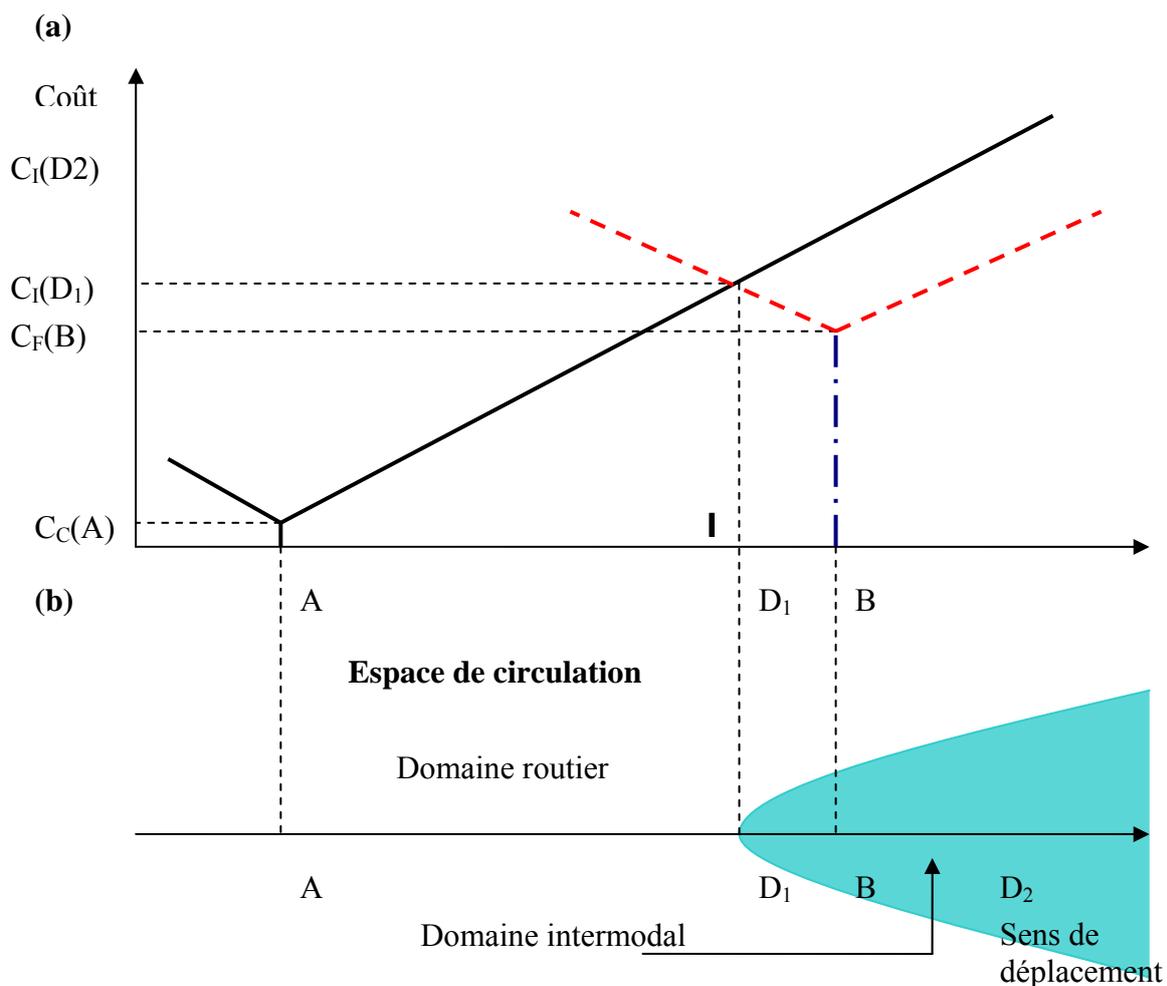


Figure 5.23. Aire de marché d'un terminal : cas hyperbolique.

5.3.1.4. Aire de marché générale

Les analyses précédentes s'intéressaient à l'aire de marché d'un terminal pour les transports dans une direction particulière. La Figure 5.24. donne l'aire de marché d'un terminal T dans un contexte où les destinations sont dans la direction 1. Le service proposé par le terminal est compétitif dans l'aire de marché A_1 .

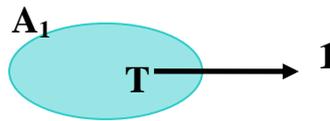


Figure 5.24. Aire de marché d'un terminal pour les destinations dans une direction particulière.

Dans le cas où le terminal assure des liaisons vers deux terminaux qui se situent dans deux directions différentes, le terminal peut obtenir un meilleur prix pour le parcours ferroviaire dans la direction desservie auparavant (1) et il peut utiliser la technique combinée dans une seconde direction pour laquelle une offre existe désormais, pour un prix compétitif. L'aire de marché dans la direction 1 s'est agrandie de A_1 à A'_1 . Ce n'est pas toujours le cas, une nouvelle offre peut aussi être plus chère qu'avant et entraîner alors une réduction de l'aire de marché. L'aire de marché du terminal peut être schématisée par la Figure 5.25. (Niérat, 1998).

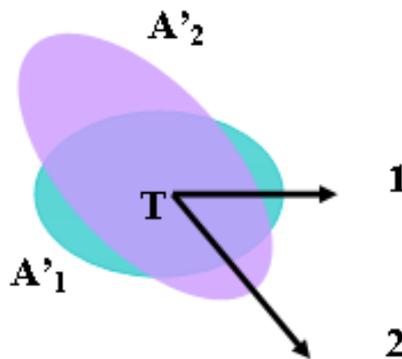


Figure 5.25. Aire de marché du terminal T .

L'aire de marché du terminal T n'est pas l'union des deux aires de marché mais elle se compose de plusieurs zones :

- une zone ($A'_1 \cap A'_2$) où le transport combiné y est plus compétitif que le transport routier pour les deux directions.
- une zone où le transport combiné est plus compétitif dans la direction (1) et le transport routier dans la direction 2 : $A'_1 - A'_2$

- une zone où le transport combiné est plus compétitif dans la direction (2) et le transport routier dans la direction 1 : $A'_2 - A'_1$
- en dehors de ces zones, le transport routier est plus compétitif que le transport combiné.

5.3.2. Détermination des flux potentiels

Etant donné la densité du réseau routier, et le fait que le terminal considéré est, a priori, en interaction avec des terminaux situés dans toutes les directions possibles, l'hypothèse que l'aire de marché du terminal est circulaire est émise. Cette hypothèse permet d'estimer, a priori, la demande à partir d'une distance. Il est à noter dès à présent que cette hypothèse sur la définition de l'aire de marché ne préjuge pas du marché qui sera effectivement capté par les terminaux. En effet, dans la suite du modèle, tout transport pourra ou non faire usage du transport intermodal.

La distance séparant les localisations potentielles obtenues varient entre 50 km et 1.770 km. Si la distance entre les terminaux est inférieure à environ 300 km, le transport combiné n'est pas rentable. L'aire de marché est donc nulle. Pour la distance la plus élevée entre les localisations potentielles obtenues, 1.770 km, le rayon r_l de la formule (5.18) est de 125 km.

Pour cette étude ce rayon, qui peut varier entre 0 et 125 km selon la distance entre les terminaux, est fixé à 100 km. Cette valeur correspond à la valeur arrondie de la moyenne des rayons des aires de marchés obtenus pour toutes les paires de localisations potentielles distantes de plus de 300 km.

L'identification de la demande s'effectue donc autour d'une localisation potentielle dans un rayon de 100 km. Cette étape permet de déterminer la matrice des flux de conteneurs (W_{ij}) entre chaque paire de localisations potentielles i et j .

5.4. Détermination des coûts de transport entre les localisations potentielles

Le calcul du chemin le plus court, sur le mode routier, entre chaque paire de localisations potentielles permet d'estimer des distances qui séparent chacune de ces paires. Ceci permet alors de construire une matrice de coûts entre les différentes localisations potentielles en multipliant les distances obtenues par le coût unitaire, décrit au chapitre 2, du mode routier ou ferroviaire selon le mode de transport envisagé. Une approximation est nécessaire. En effet, dans notre modélisation, les distances entre chaque paire de localisations potentielles sont

estimées sur le réseau routier. Toutes les liaisons sont routières sauf les liaisons inter-hubs qui sont des liaisons ferroviaires. Or, étant donné que les localisations potentielles qui seront choisies pour y implanter un hub ne sont pas connues a priori, la longueur du chemin ferroviaire le plus court entre les localisations potentielles est considérée comme étant identique à celle du chemin routier le plus court. Cette approximation n'intervient que dans l'étape de résolution du problème du p -hub médian et sera levée par la suite.

5.5. Conclusions

Le nombre de localisations potentielles sur un grand réseau réel, comme le réseau européen, devient rapidement trop important pour que ce problème puisse être résolu par des méthodes exactes. Bien que les techniques d'agrégation soient couramment utilisées pour les problèmes de localisation, elles doivent être employées avec beaucoup de précautions car elles peuvent entraîner des erreurs importantes même pour un niveau d'agrégation relativement bas.

Une méthodologie est développée pour réduire le nombre de localisations potentielles par des critères de sélection plutôt que par agrégation. Ces critères permettent notamment de mettre en évidence des sites propices à l'installation d'un terminal rail-route de conteneurs.

Lorsque ces localisations potentielles sont déterminées, les flux de conteneurs possibles entre elles sont évalués en prenant en compte les demandes liées aux aires de marché. Ensuite, les coûts de transport entre ces localisations potentielles sont évalués.

A présent, les matrices de flux et des coûts entre chaque paire de localisations potentielles sont estimées et peuvent servir d'entrées au problème du p -hub médian. Ce problème est étudié au chapitre suivant.

6. Configurations optimales

Ce sixième chapitre est consacré à la recherche d'une configuration optimale du réseau rail-route européen. Un réseau de transport autorisant le transport combiné est ensuite modélisé. La résolution du problème du p -hub médian permet de déterminer p localisations optimales. L'évolution du coût total en fonction du nombre de hubs implantés, variant de deux à dix, montre qu'il existe un minimum pour un nombre de hubs égal à huit. Les configurations obtenues pour différents nombres de hubs sont étudiées et analysées.

Introduction

Dans ce chapitre, le problème du p -hub médian est formulé dans le cas d'un réseau rail-route où les pré- et post-acheminements s'effectuent par la route et les liaisons inter-hub sont des liaisons ferroviaires.

Au deuxième chapitre, il a été établi que l'économie d'échelle calculée pour les acheminements par train varie entre 0 % et 20 %. Dans cette étude de configuration optimale, cette économie est fixée à 10 % ; une analyse de sensibilité faisant varier ce paramètre de 5 % à 20 % a également été effectuée. Dans une première application, les coûts des différentes opérations de transport utilisés sont les coûts obtenus, dans ce même chapitre 2, pour les conteneurs de 20 pieds qui est l'unité de référence. La seconde application prendra en compte les coûts externes.

La résolution du problème du p -hub médian formulé dans le cas d'un réseau rail-route permet de déterminer p localisations optimales. Les localisations optimales obtenues, ou hubs, sont introduites dans le réseau de référence et un réseau hub-and-spoke est créé où un transbordement rail-route est autorisé aux hubs.

Le transport intermodal y est également identifié : les pré- et post-acheminements routiers sont différenciés du transport routier sur longue distance et la partie ferroviaire d'un transport combiné est différenciée du transport ferroviaire traditionnel. Cette identification s'effectue en ajoutant de nouveaux moyens de transport spécifiques dans le réseau virtuel. Le transport combiné est considéré, dans notre modèle, comme un nouveau mode de transport, faisant intervenir d'autres moyens de transport que les moyens employés dans la situation de référence.

La technique d'affectation utilisée sur le réseau de transport autorisant le transport combiné, est une affectation déterministe multi-flux décrite au chapitre 4. Avec une répartition sur quatre itinéraires possibles, cette affectation permet de calculer quatre chemins différents s'ils existent en essayant d'en trouver au moins un pour chaque mode (routier, ferroviaire, fluvial et intermodal).

Cette modélisation tend à localiser des terminaux rail-route de conteneurs dans un réseau hub-and-spoke et ne tient pas compte des interactions possibles de ces terminaux, avec les ports et les autres terminaux tels que les terminaux de distributions. Dans la situation de référence, il

n'y a pas de transbordement possible et, dans les différentes configurations obtenues, les transbordements sont possibles uniquement aux terminaux rail-route de conteneurs.

Une méthodologie permettant de recenser les meilleures localisations potentielles a été présentée au chapitre 5. Celle-ci a permis de trouver 37 localisations potentiellement intéressantes, reprises sur la Figure 5.20., pour y établir des terminaux de transfert.

Le problème du p -hub médian nécessite également de fixer le nombre de hubs souhaités. Dans ce chapitre, le problème est résolu pour différentes valeurs de p . L'évolution du coût total en fonction du nombre de hubs implantés, variant de deux à dix, montre qu'il existe un minimum pour un nombre de hubs égal à huit. Ces différentes configurations sont ensuite étudiées et analysées. Les résultats de ces différentes configurations sont comparés à ceux de la situation de référence qui est décrite au chapitre 4.

6.1. Modélisation d'un réseau de transport autorisant le transport combiné

6.1.1. Création du réseau hub-and-spoke

La complexité du problème de recherche de localisations optimales a conduit à émettre différentes hypothèses qui doivent à présent être vérifiées. A cette fin, les localisations optimales obtenues, ou hubs, sont introduites dans le réseau et un réseau hub-and-spoke avec des liaisons ferroviaires inter-hub est créé.

Pour prendre en compte les hubs dans le réseau virtuel, les nœuds correspondants sont marqués comme étant des terminaux et les transbordements y sont autorisés.

Ensuite, vient la création du réseau ferroviaire inter-hub :

- Les hubs obtenus peuvent se situer sur n'importe quel nœud du réseau routier. Pour rappel, dans cette étude, les localisations potentielles sont des nœuds appartenant au réseau routier et qui ont été filtrées selon deux critères : le seuil de flux minimum total a été fixé à 880.000 UTI et la distance maximale d'un réseau ferroviaire est de 5 km. De sorte qu'il est possible que les hubs obtenus ne soient pas reliés au réseau ferroviaire. La première étape est alors de créer des connecteurs de type ferroviaire, dont la longueur est inférieure à 5 km, reliant les hubs au chemin de fer le plus proche.
- Ensuite, la détermination des chemins les moins coûteux sur le réseau ferroviaire entre chaque hub est effectuée. L'ensemble de ces chemins permet de connecter tous les

hubs entre eux. Le réseau inter-hub est alors construit, cette fois, sur base du réseau ferroviaire existant. Remarquons que, dans le cas d'un contournement d'un massif montagneux, par exemple, les liaisons inter-hub obtenues par la recherche du chemin le moins coûteux sont très différentes des liaisons inter-hub à « vol d'oiseau ».

6.1.2. Identification du transport combiné

Il est utile de différencier les pré- et post-acheminements routiers du transport routier sur longue distance. Ceci permet notamment de pouvoir leur attribuer un coût unitaire plus élevé. Pour ce faire, trois moyens de transport pour le mode routier sont considérés dans le réseau virtuel. Le premier moyen correspond à un transport routier sur longue distance, c'est-à-dire sur des distances de plus de 300 km. Le deuxième correspond au cas d'un pré-acheminement, un coût relatif de collecte peut alors être considéré. Le troisième et dernier moyen correspond au cas d'un post-acheminement, un coût relatif de distribution peut également être associé.

Le transport ferroviaire traditionnel doit également être différencié de la partie ferroviaire d'un transport combiné. La même démarche que dans le cas du transport routier est employée. Dans ce cas, deux moyens de transport sont considérés dans le réseau virtuel. Le premier correspond à un chemin empruntant uniquement le réseau ferroviaire ainsi que les connecteurs le reliant à ce réseau. Le second correspond à la partie ferroviaire d'un transport combiné.

Aucune possibilité de déchargement n'est associée au moyen correspondant au pré-acheminement ainsi qu'aucune possibilité de chargement n'est associée au moyen correspondant au post-acheminement ; ces moyens doivent donc être combinés avec la partie ferroviaire d'un transport combiné où un transbordement est possible.

6.1.3. Affectation sur un réseau de transport autorisant le transport combiné

Notre système de transport est constitué de six moyens de transport :

- un moyen pour le transport fluvial ;
- deux moyens pour le transport ferroviaire ;
 - transport ferroviaire traditionnel ;
 - partie ferroviaire d'un transport combiné ;
- trois moyens pour le transport routier ;
 - transport uniquement routier ;

- pré-acheminement ;
- post-acheminement.

La technique d'affectation utilisée dans la situation de référence est une affectation déterministe multi-flux avec quatre itérations. Le transport combiné est considéré comme un nouveau mode de transport. Notre modèle fait intervenir d'autres moyens de transport que ceux employés dans la situation de référence. La technique d'affectation utilisée laisse la possibilité de choisir entre les quatre modes de transport : routier, ferroviaire, fluvial et combiné lorsque ces différents modes sont disponibles entre une paire O-D donnée. Une affectation déterministe multi-flux et quatre itérations permettent donc, si l'on cherche la recherche de modes différents, de trouver quatre chemins alternatifs s'ils existent.

Au chapitre 4, la stratégie adoptée dans la méthode multi-flux pour calculer un ensemble de chemins alternatifs a été expliquée. Elle se résume de la manière suivante : lorsque le 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. De plus, pour assurer la répartition des flux sur différents modes de transport, le coût pour chaque opération de chargement au nœud d'origine (c'est-à-dire dans chaque direction possible à partir du nœud) pour le mode de transport utilisé sur le premier lien du chemin obtenu est également artificiellement augmenté.

Le même raisonnement doit être appliqué aux différents moyens de transport, car, dans la modélisation employée, le transport combiné est constitué de différents moyens de transport appartenant aux modes routier et ferroviaire. Pour forcer la répartition des flux sur différents moyens de transport, le coût pour chaque opération de chargement au nœud d'origine pour le moyen de transport utilisé sur le premier lien du chemin obtenu est également augmenté.

Cependant, un problème peut survenir : un chemin intermodal peut être trouvé entre chaque O-D, alors que cette solution peut être une alternative trop coûteuse. Ceci est illustré à la Figure 6.1. où les chemins : routier, ferroviaire et fluvial sont trois alternatives très proches les unes des autres. Un quatrième chemin, constitué de deux parties routières qui relient les nœuds d'origine et de destination à leur hub le plus proche et d'une partie ferroviaire inter-hub, représente l'alternative de transport combiné. Cette alternative, étant la possibilité la plus chère, n'est pas gardée parmi les choix possibles et le flux est donc réparti sur les trois autres chemins, représentés à la Figure 6.2. Ainsi, un chemin intermodal est retenu comme chemin alternatif uniquement s'il constitue la solution la moins chère.

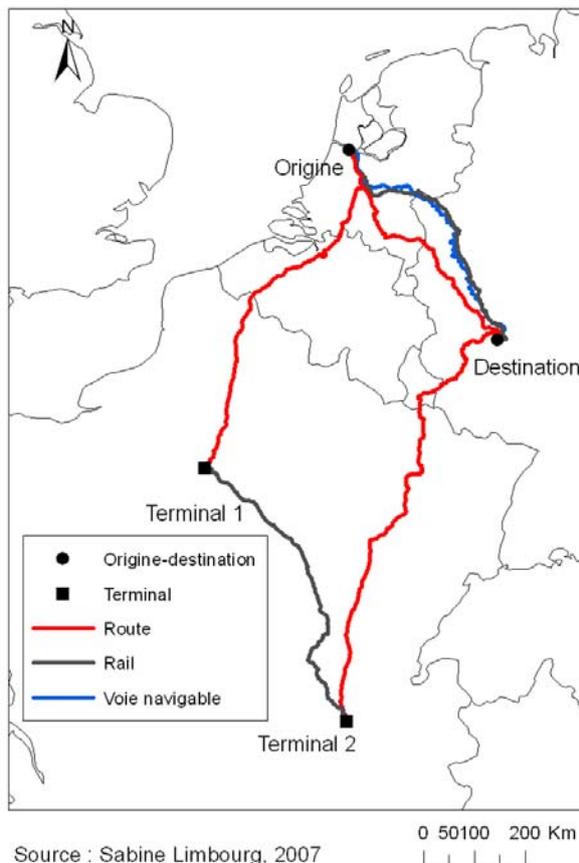


Figure 6.1. Quatre chemins entre une paire Origine-Destination

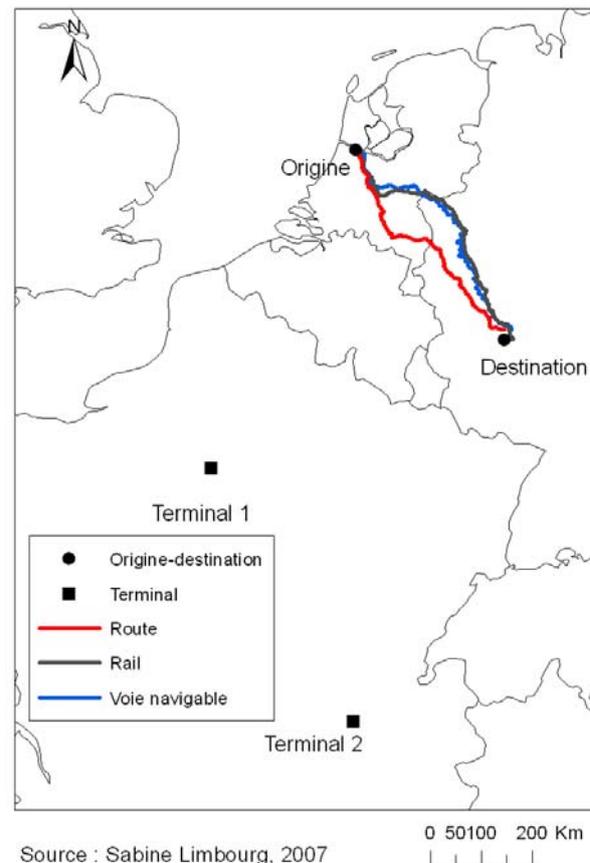


Figure 6.2. Chemins sélectionnés entre une paire Origine-Destination

6.2. Résultats obtenus en utilisant les coûts internes

Le p -hub médian nécessite de fixer le nombre de hubs souhaités. Les paragraphes suivants présentent les résultats obtenus pour un nombre de hubs variant de deux à dix. Il ne s'agit pas d'ajouter un hub à la configuration précédente, mais bien de rechercher l'implantation de p hubs simultanément. Ensuite, la situation décrite par Ballis (2002) est comparée à la configuration optimale obtenue. Puis, la recherche d'une localisation optimale pour l'ajout d'un hub supplémentaire à cette situation est effectuée et son impact sur les coûts de transport, sur la répartition modale et sur les aires de marché est évalué.

6.2.1. Configuration à deux hubs

Lorsque les localisations optimales de deux hubs parmi les 37 localisations potentielles sont recherchées, la fonction objectif (3.11) est minimisée dans le cas d'un hub situé à Barcelone et l'autre à Darmstadt.

En ce qui concerne la répartition modale en t.km, les pré- et post-acheminements routiers des transports intermodaux sont comptabilisés dans la catégorie « Route » tandis que la partie

ferroviaire est comptabilisée dans la catégorie « Fer ». Comparée à la situation de référence, la répartition modale en t.km indique une augmentation de 0,15 % de la part de marché du ferroviaire au détriment de celle de la route (-0,06 %), ce qui représente un transfert de 200 millions de t.km de la route vers le rail. L'utilisation du transport combiné permet de diminuer les coûts entre certaines paires O-D. Dans cette configuration à deux hubs, le coût total diminue de 1,27 %. Les flux captés par les hubs suite à une affectation multi-flux de la matrice O-D sont de 32.000 UTI et impliquent un coût de transbordement de 3,61 €/t.

Pour évaluer l'aire de marché de ces terminaux, une affectation ToR est effectuée. Si entre une paire O-D le transport combiné est choisi, alors cette origine et cette destination appartiennent à l'aire de marché du terminal le plus proche. Dans le cas de la Figure 6.3., le mode routier est le mode le moins cher. L'origine (la destination) n'appartient donc pas à l'aire de marché du terminal T_1 (T_2). La Figure 6.4. représente une situation où le transport intermodal est la solution la moins chère. Dans ce dernier cas, nous considérons que l'origine appartient à l'aire de marché du terminal T_1 , bien que toutes les marchandises à acheminer sur cette paire O-D n'utilisent pas toutes le transport combiné. L'ensemble origines et des destinations pour lesquelles le transport intermodal est la solution la moins chère, constitue l'aire de marché du transport combiné. Les aires de marché des terminaux T_1 et T_2 sont représentées sur la Figure 6.5.

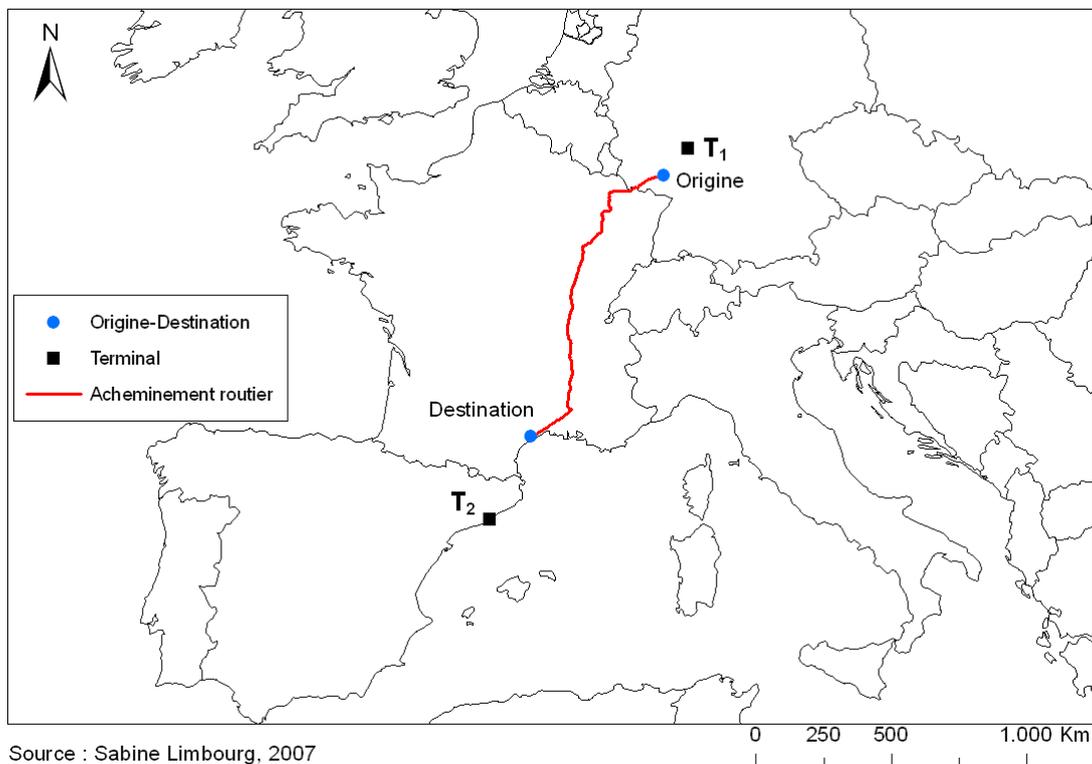


Figure 6.3. Le mode routier est la solution la moins chère.

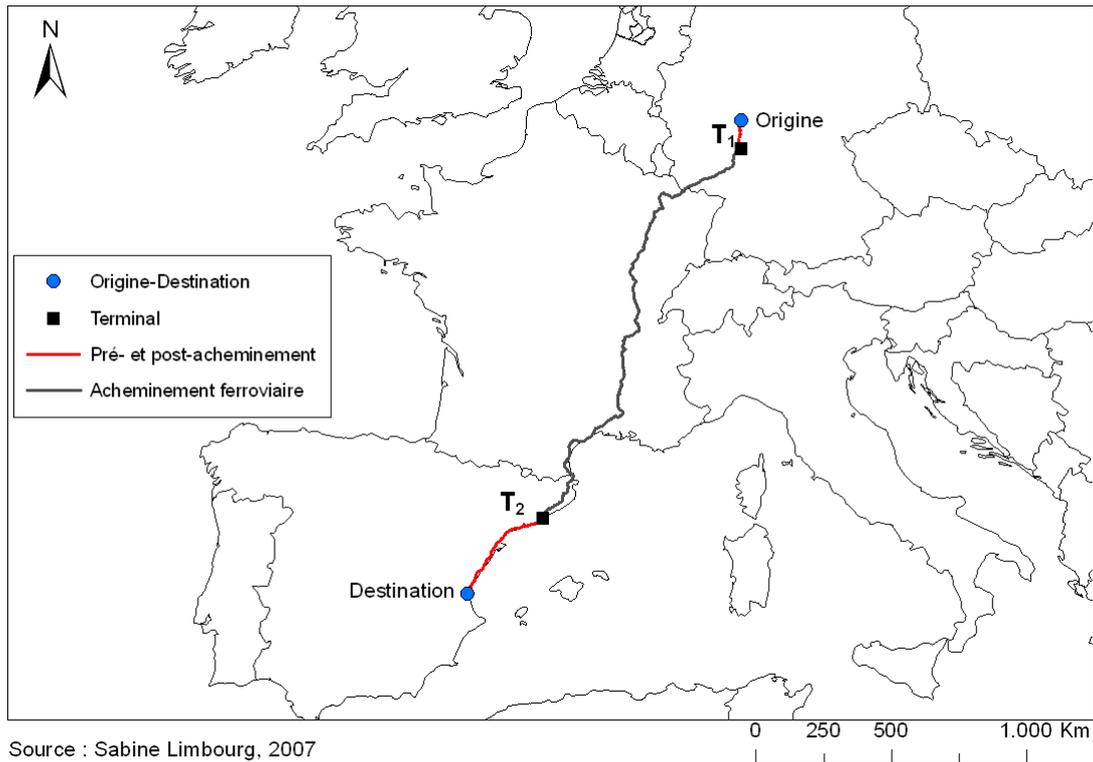


Figure 6.4. Le transport intermodal est la solution la moins chère.

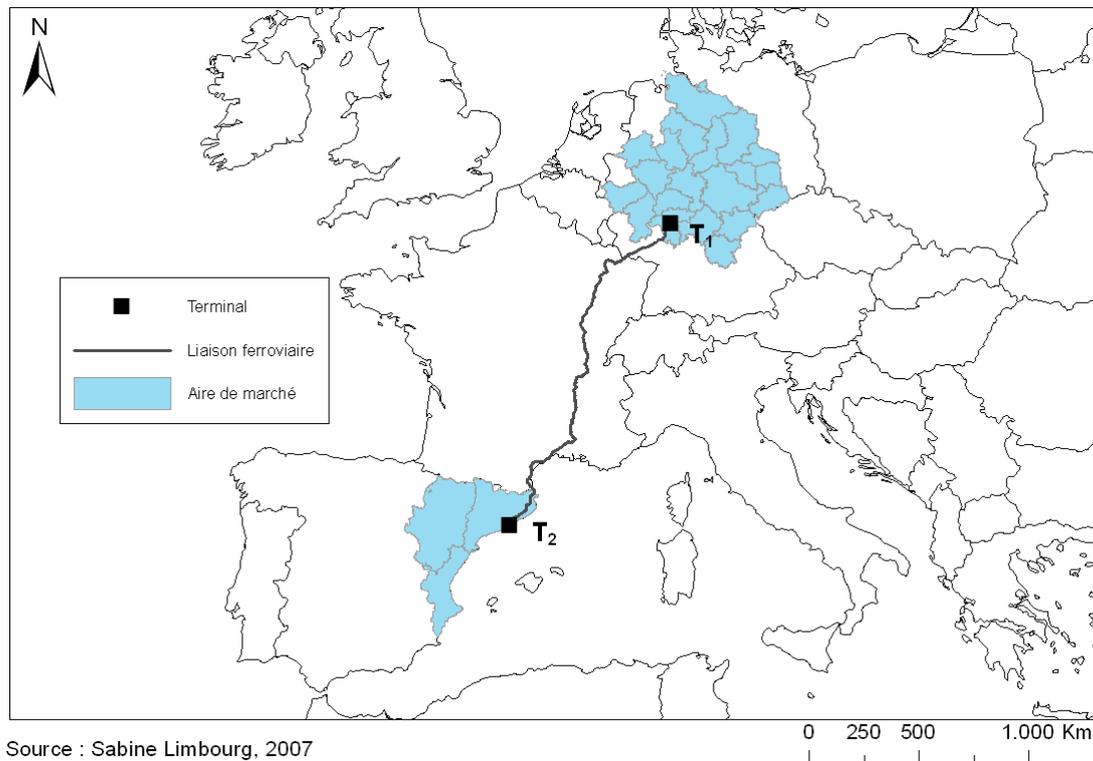


Figure 6.5. Aire de marché lorsque deux hubs sont localisés.

La distance séparant le terminal T_1 du terminal T_2 est de 1.100 km et la distance maximale d'un pré- ou post-acheminement est de 450 km. La Figure 6.5. montre également que le terminal n'est pas situé au centre de l'aire de marché. Ceci corrobore les estimations

théoriques, effectuées au chapitre 5, qui impliquent que le terminal est situé à l'un des foyers de l'ellipse représentant son aire de marché. Cette ellipse devrait avoir une distance maximale de pré- (ou post-) acheminement pour une origine (destination) située entre les deux terminaux de 140 km et une distance maximale de pré- ou post-acheminement de 721 km. Ceci ne correspond pas exactement aux résultats obtenus, au chapitre 5 car notre modèle se base sur des longueurs réseaux plutôt que sur des distances à vol d'oiseau.

6.2.2. Configuration à trois hubs

Lorsque trois hubs sont recherchés, la minimisation de la fonction objectif (3.11) est obtenue lorsqu'un hub est situé à Barcelone, le deuxième à Cologne et le dernier près de Lyon. Le coût total de transport dans ce réseau présente une diminution de 1,86 % par rapport à la situation de référence. Cette fois, la comparaison de la répartition modale en t.km à celle obtenue dans la situation de référence indique une augmentation de 0,49 % de la part de marché du ferroviaire alors que celle de la route diminue de 0,45 %. En clair, un transfert de 1,27 milliards de t.km de la route vers le rail.

Pour évaluer l'aire de marché de ces terminaux, la même procédure que celle expliquée au paragraphe précédent est effectuée. La Figure 6.6. illustre l'aire de marché pour cette configuration.

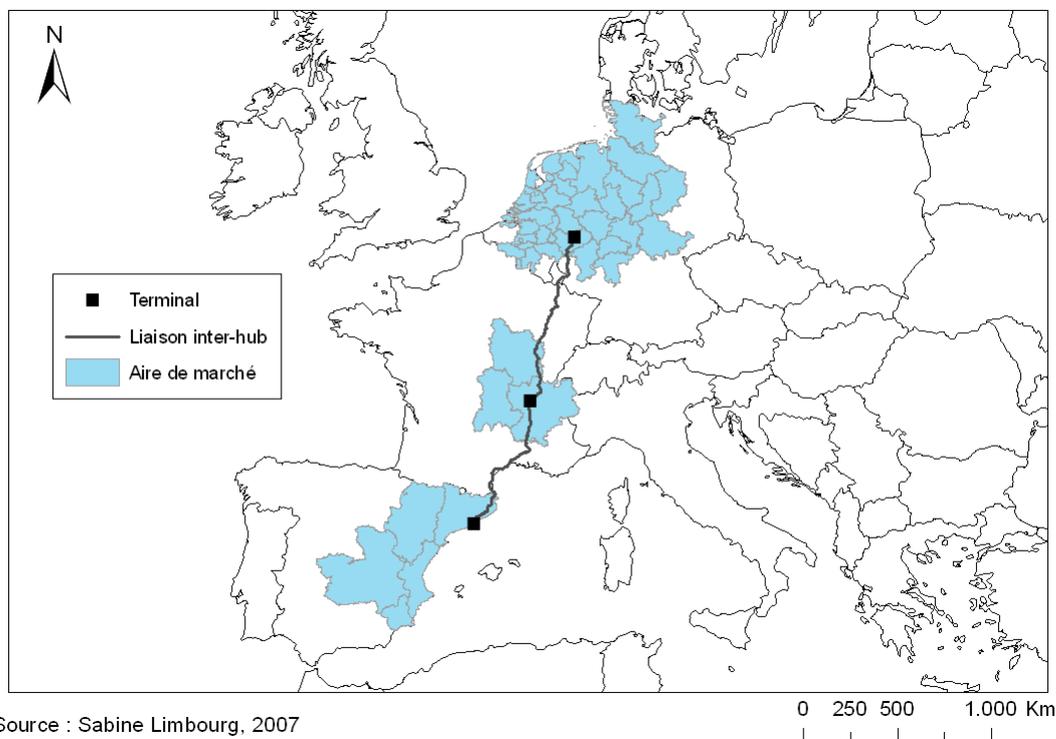


Figure 6.6. Aire de marché lorsque trois hubs sont localisés.

6.2.3. Configuration à quatre hubs

L'ensemble des hubs obtenus correspond à l'ensemble des hubs identifiés dans la configuration à trois hubs, auquel un hub situé près de Milan a été identifié par le modèle.

Dans ce réseau, le coût total de transport présente une diminution de 1,89 % par rapport à celui de la situation de référence. Si la répartition modale, en t.km, est comparée à celle de la situation de référence, l'augmentation (+0,75 %) de la part de marché du ferroviaire s'effectue au détriment de la route (-0,69 %) et signifie un transfert de 1,95 milliards de t.km de la route vers le rail. Les aires de marché entre les différents terminaux sont reprises sur les Figures 6.7. Entre Cologne et Milan, le transport combiné n'est pas avantageux par rapport au transport routier.

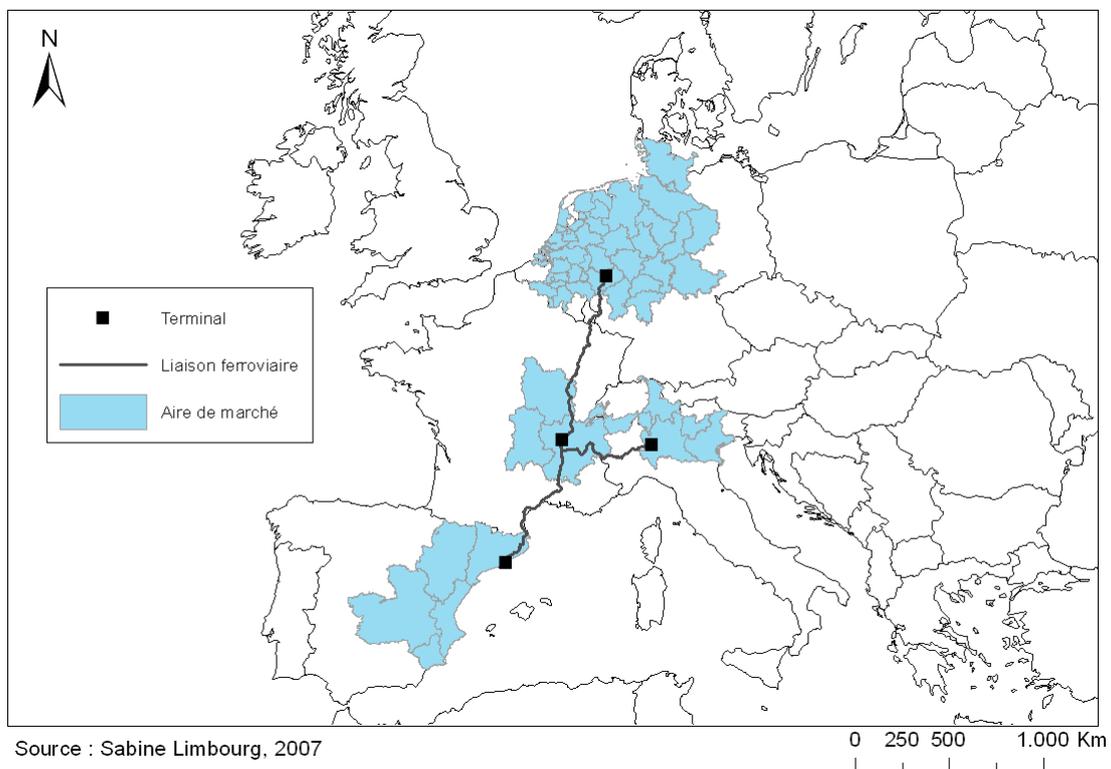


Figure 6.7. Aire de marché lorsque quatre hubs sont localisés.

6.2.4. Configuration à cinq hubs

La configuration à cinq hubs obtenue est la configuration à quatre hubs à laquelle un cinquième hub proche de Paris est ajouté par le modèle. Comparée à la situation de référence, la répartition modale en t.km montre une augmentation (+1,9 %) de la part de marché du ferroviaire alors que celle de la route présente une diminution (-1,96 %). Le transfert de la route vers le rail est de 5,7 milliards de t.km. La diminution du coût total de transport par rapport à celui la situation de référence est de 1,97 %.

La localisation des cinq hubs, les aires de marché ainsi que le réseau ferroviaire inter-hub sont représentés à la Figure 6.8. Entre Paris et Cologne, le transport routier est toujours plus avantageux que le transport combiné, le réseau routier y est performant, constitué en grande partie d'autoroute à trois bandes et sans obstacle majeur à contourner. De plus, la distance à vol d'oiseau entre ces terminaux est d'environ 420 km, c'est-à-dire légèrement supérieure à la distance minimale requise pour que le transport combiné soit compétitif. Cependant, bien que la distance entre Lyon et Milan soit de 345 km, le transport intermodal est moins cher que le transport routier pour trois régions NUTS 2 (la Lombardie, l'Auvergne et la région Rhône-Alpes). La chaîne de montagne séparant ces deux villes est certainement un élément qui contribue à la compétitivité du transport combiné. Entre les terminaux de Cologne et de Milan, contrairement à la configuration à quatre hubs, le transport combiné est observé. En effet, l'ajout d'un terminal supplémentaire augmente les flux captés par les différents terminaux, ce qui diminue les coûts de transbordement et donc le coût du transport combiné.

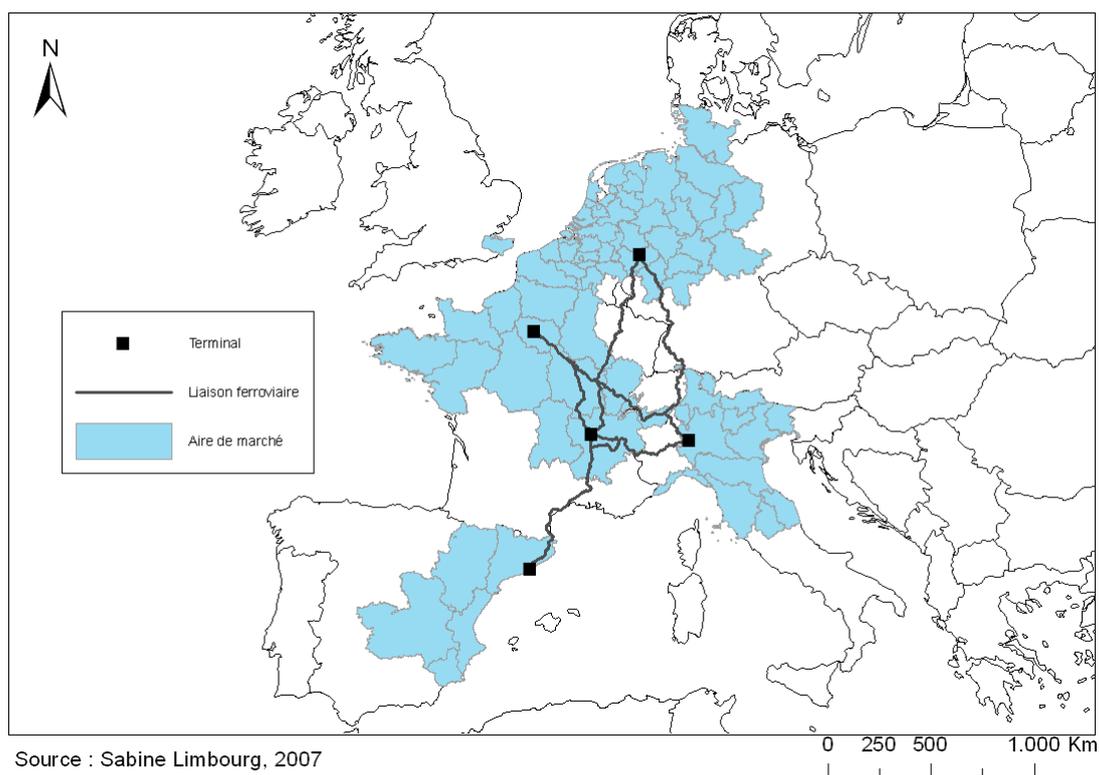


Figure 6.8. Aire de marché lorsque cinq hubs sont localisés.

6.2.5. Configuration à six hubs

Les hubs de la configuration à six hubs sont implantés à Paris, Milan, Lyon, Barcelone, Darmstadt et Namur. En t.km, la répartition modale montre qu'une augmentation (+2,51 %) de la part de marché du ferroviaire est observée tandis, que celle de la route quant à elle perd 2,50 %. Ceci représente un transfert de 7,3 milliards de t.km de la route vers le rail. Le coût

total de transport dans ce réseau présente une diminution de 2,10 % par rapport à celui de la situation de référence.

Le terminal de Namur a comme conséquence une réduction des flux captés par le terminal de Paris. La comparaison des flux captés par les terminaux entre la configuration à quatre hubs et celle à cinq indique une diminution des flux captés par le terminal de Paris. Les Figures 6.9. à 6.11. illustrent cette cannibalisation des aires de marché. La Figure 6.9. représente l'aire de marché du terminal de Paris dans une configuration à six hubs où le terminal de Namur est fermé. Tandis que la Figure 6.10. représente l'aire de marché du terminal de Namur dans une configuration à six hubs où le terminal de Paris est fermé.

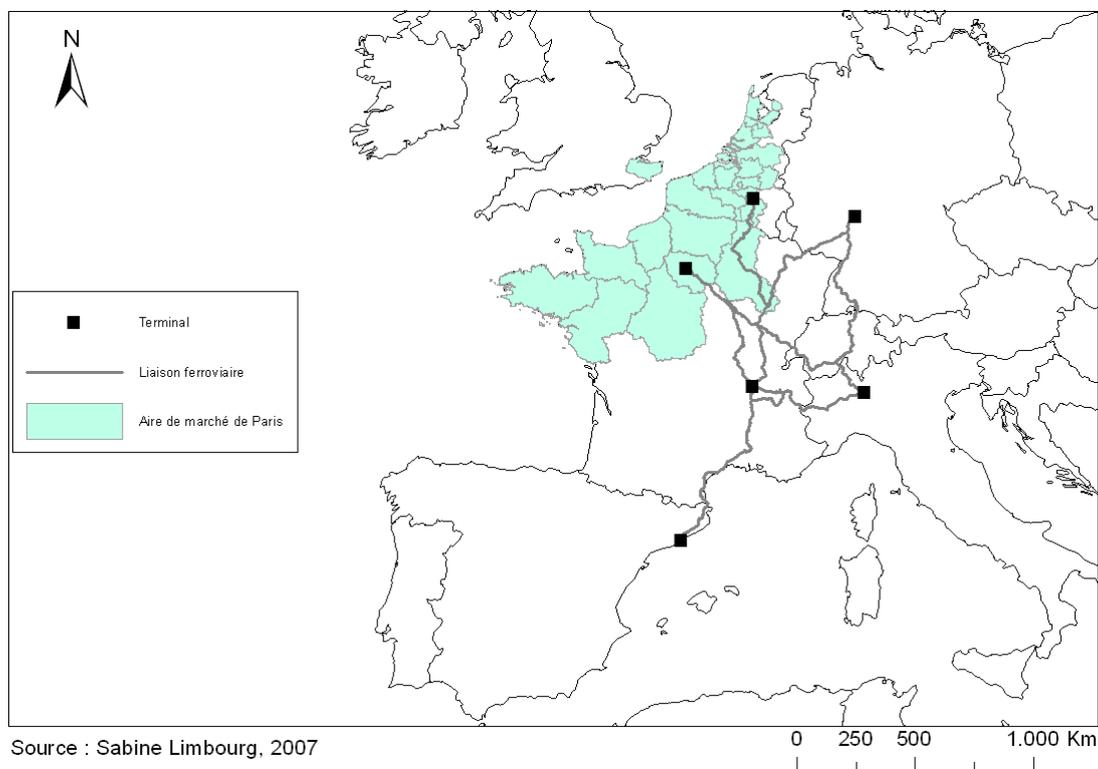


Figure 6.9. Aire de marché de Paris lorsque le terminal de Namur est fermé.

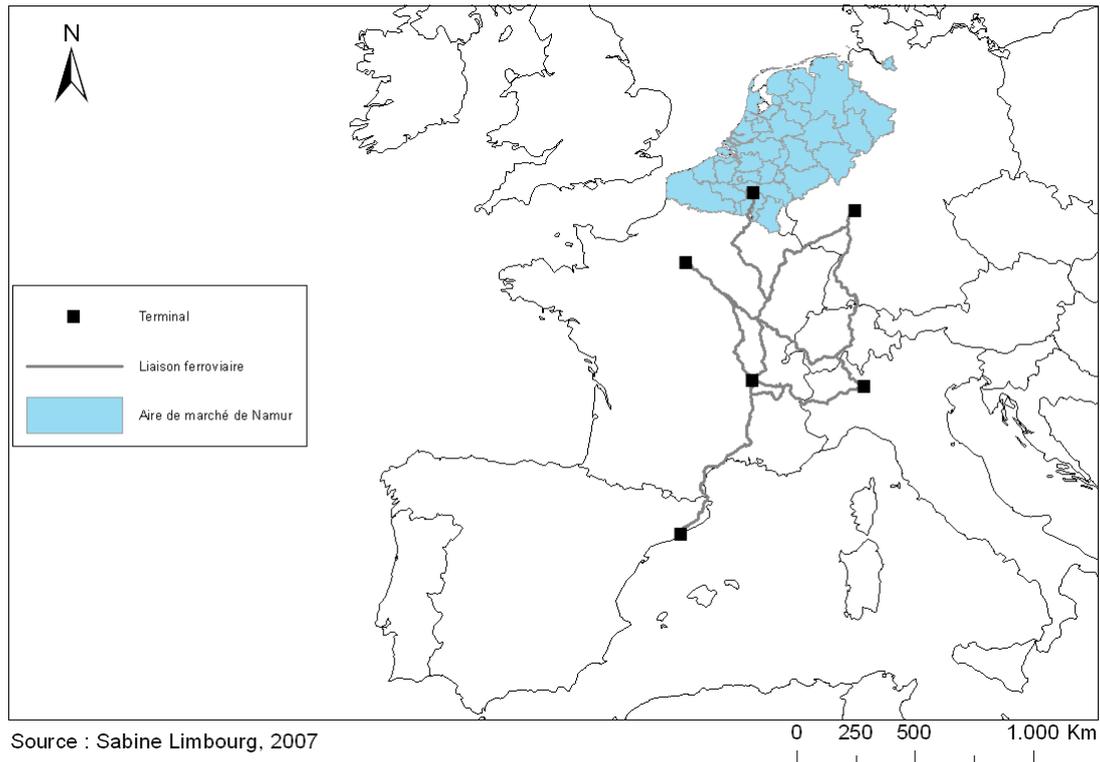


Figure 6.10. Aire de marché de Namur lorsque le terminal de Paris est fermé.

La Figure 6.11. représente les aires de marché des terminaux situés à Paris et à Namur. Comparées aux aires de marchés représentées aux deux figures précédentes, le terminal situé à Namur capte toutes les régions NUTS 2 communes sauf la Picardie qui est entièrement reliée au terminal de Paris et les Flandres orientales et occidentales, reliées à Paris dans le cas d'un transport combiné vers l'aire de marché du terminal de Barcelone et à Namur dans les autres cas. Une aire de marché commune existe également entre les terminaux de Namur et de Darmstadt. Cet exemple illustre que la demande d'une région n'est pas forcément attachée au hub le plus proche et qu'il peut avoir des affectations multiples, dans ce cas les régions de Flandres orientales et occidentales.

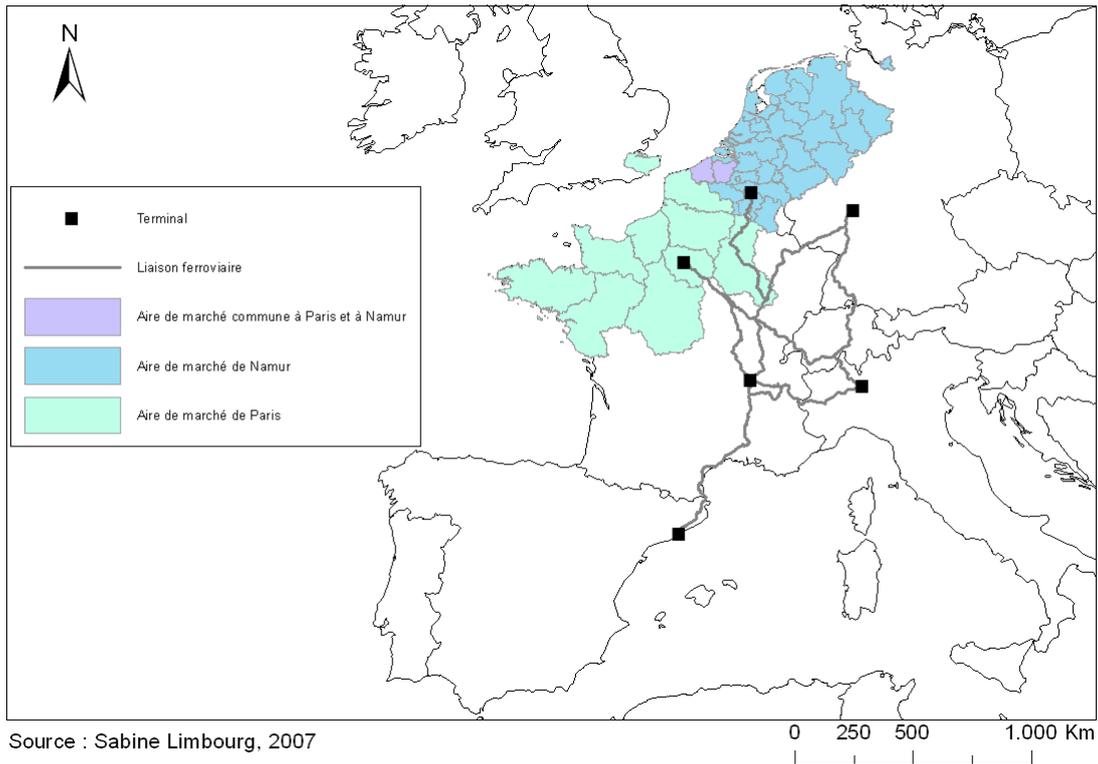


Figure 6.11. Aire de marché de Namur et de Paris.

La localisation de ces six hubs, les aires de marché ainsi que le réseau ferroviaire inter-hub sont illustrés à la Figure 6.12.

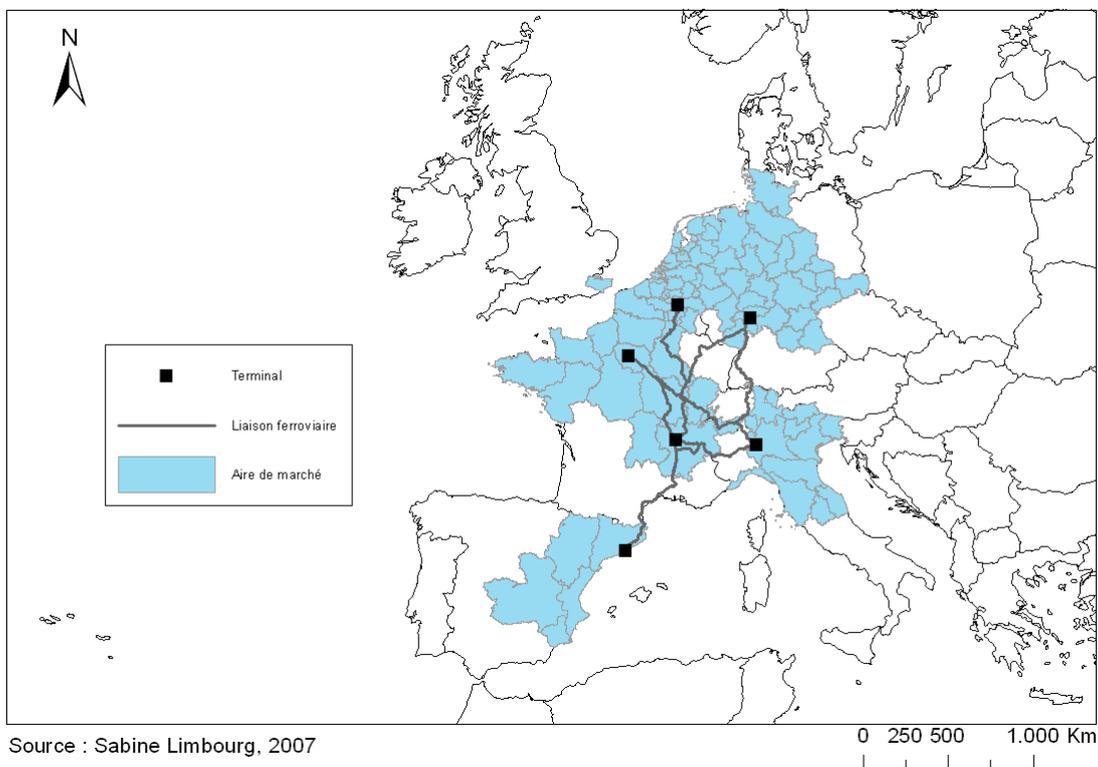


Figure 6.12. Réseau ferroviaire inter-hub et aire de marché pour une configuration à six hubs

6.2.6. Configuration à sept hubs

Pour obtenir la configuration à sept hubs, le modèle remplace le hub de Namur par un hub implanté à Anvers et ajouter un hub à Madrid à la configuration optimale à six hubs.

La diminution du coût total de transport par rapport à celui la situation de référence est de 2,32 %. La répartition modale en t.km a été comparée à celle de la situation de référence. Une augmentation de la part de marché du ferroviaire (+4,65%) est constatée. Celle-ci a lieu au détriment de la route (-4,58%). Cette configuration permet donc un transfert de 13,26 milliards de t.km de la route vers le rail. La Figure 6.13. représente la localisation de ces hubs, les aires de marché ainsi que le réseau ferroviaire inter-hub.

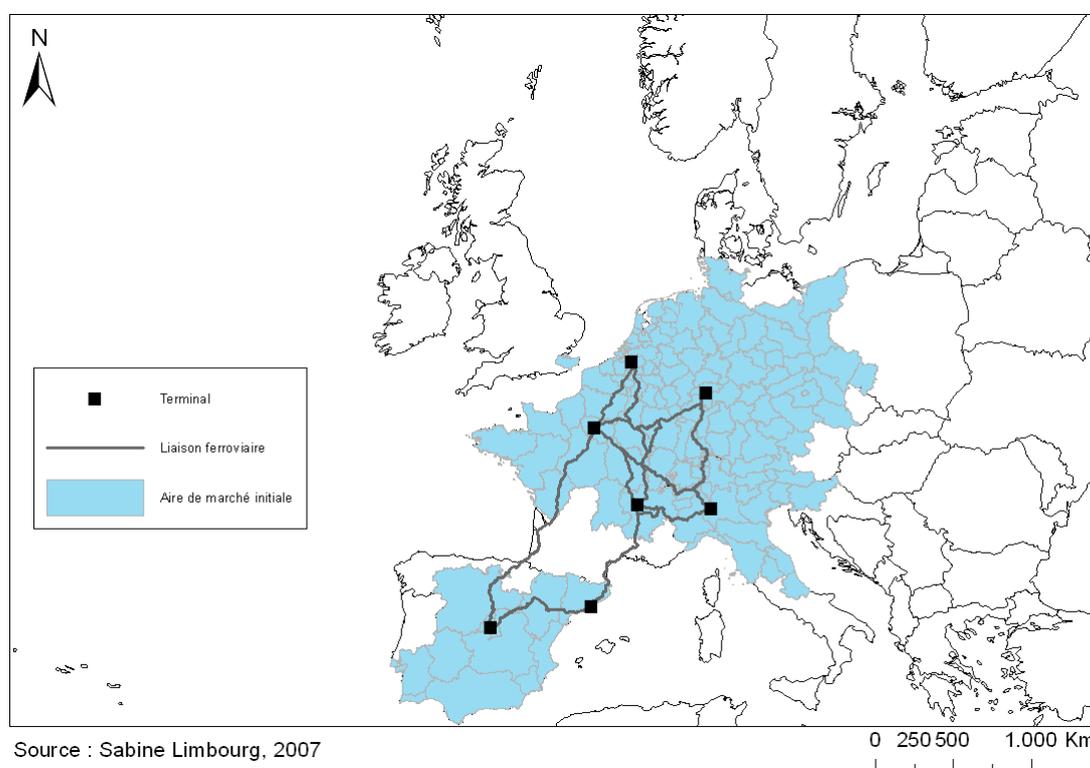


Figure 6.13. Réseau ferroviaire inter-hub et aire de marché pour une configuration à sept hubs.

6.2.7. Configuration à huit hubs

La configuration initiale à huit hubs obtenue est la configuration à sept hubs à laquelle un hub implanté aux environs de Metz est identifié par le modèle de localisation optimale. La Figure 6.14. illustre la localisation de ces hubs, les aires de marché ainsi que le réseau ferroviaire inter-hub. Aucune région NUTS 2 supplémentaire par rapport à la configuration à sept hubs ne vient s'ajouter à l'aire de marché du transport combiné.

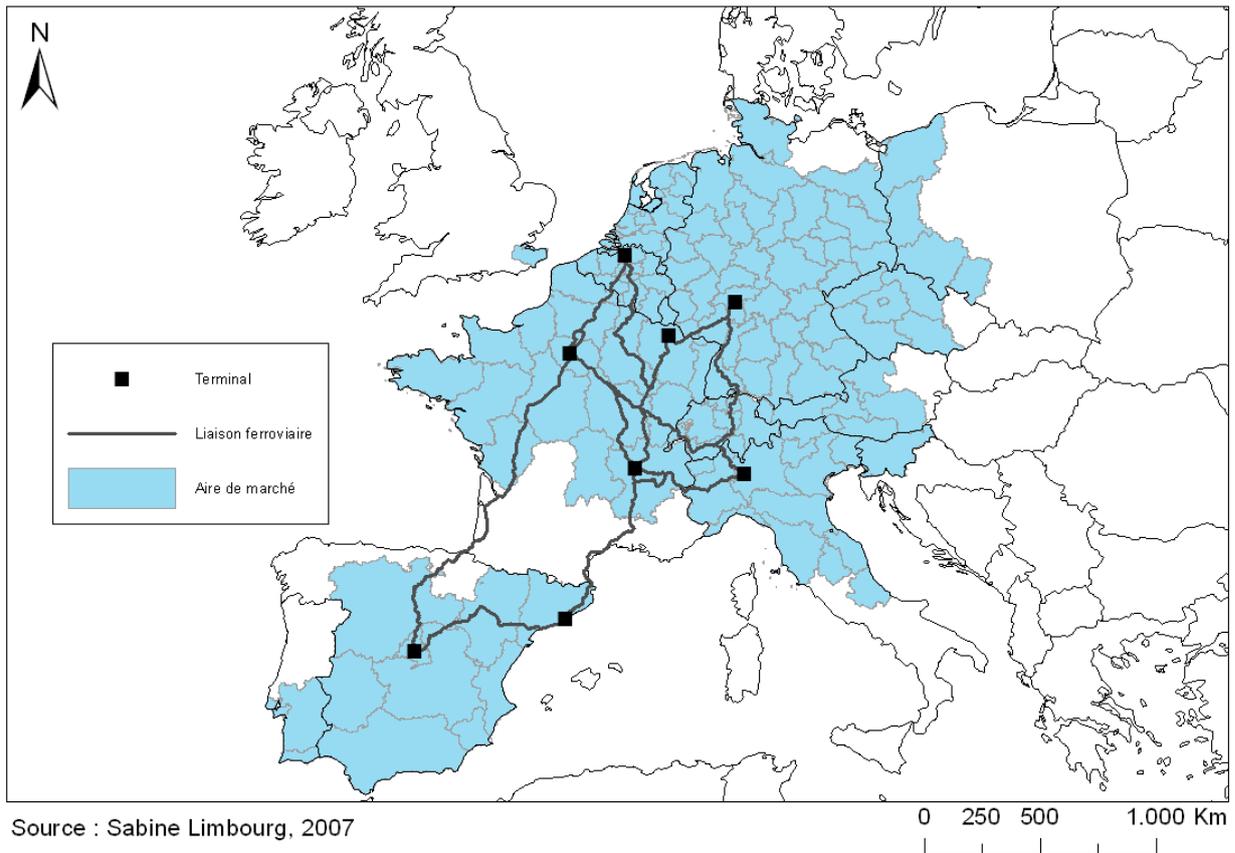


Figure 6.14. Réseau ferroviaire inter-hub et aire de marché pour une configuration à huit hubs.

Cette fois, la répartition modale en t.km croît de 4,78 % pour le fer tandis qu'elle décroît de 4,74 % pour la route par rapport à celle obtenue dans la situation de référence. Ce qui correspond à un transfert de la route vers le rail de 13,68 milliards de t.km. Le coût total diminue de 2,40 % par rapport à celui du scénario de référence.

6.2.8. Configuration à plus de huit hubs

Deux configurations supplémentaires, à neuf et à dix hubs, ont été étudiées. Les coûts totaux obtenus dans ces deux configurations sont supérieurs à la configuration à huit hubs. Le lecteur intéressé trouvera le détail de ces résultats en annexe 4.

6.2.9. Situation existante

D'après Ballis (2002), les hubs internationaux pour le rail-route sont : Metz, Villeneuve-Saint-Georges, Schaerbeek, Cologne, Hanover et Mannheim. Ils sont tous situés dans la partie nord de l'Europe. Ballis indique également qu'un hub situé aux alentours de Milan aurait tout son sens.

Le coût total dans ce réseau présente alors une diminution de 1,81 % par rapport à la situation de référence (rappelons que notre configuration optimale à sept hubs permettait une

diminution des coûts totaux de 2,32 %). La configuration est représentée à la Figure 6.15. ainsi que l'aire de marché du transport combiné.

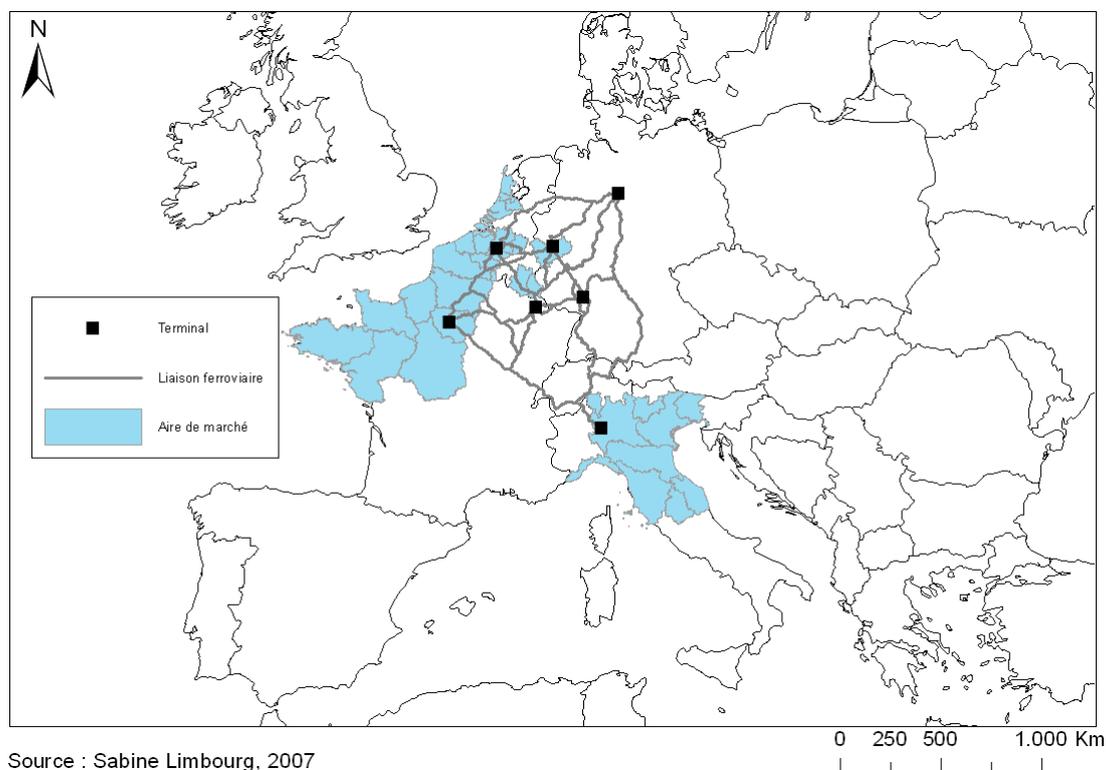


Figure 6.15. Réseau ferroviaire inter-hub et aire de marché de la configuration à sept hubs proposée par Ballis.

Le Tableau 6.1. compare la répartition modale de la configuration décrite par Ballis à la configuration à sept hubs obtenue. Comparée à notre situation de référence, la configuration proposée par Ballis permet seulement un transfert de la route vers le rail de 1,75 milliards de t.km si uniquement la demande pour des distances supérieures à 300 km est prise en compte ; tandis que notre configuration à sept hubs permet un transfert de 13,26 milliards de t.km, c'est-à-dire presque huit fois plus.

	En tonnes.km	
	Ballis	Solution optimale à 7 hubs
Fer	+0,65 %	4,65 %
Route	-0,60 %	-4,58 %

Tableau 6.1. Répartition modale pour le réseau à sept hubs proposé par Ballis

Le Tableau 6.2. reprend les flux, non nuls, captés par les terminaux dans le cas d'une affectation multi-flux et les flux captés par les hubs communs identifiés dans la solution optimale à sept hubs, c'est-à-dire les hubs de Milan et de Paris.

	Ballis	Solution optimale à 7 hubs
Milan	209.000 UTI	320.000 UTI
Paris	116.000 UTI	431.000 UTI
Schaerbeek	93.000 UTI	

Tableau 6.2. Flux non nuls captés par les hubs pour le réseau à sept hubs proposé par Ballis et pour le réseau optimal.

6.2.10. Ajout d'un hub à la situation existante

Le modèle, décrit en annexe 2, permet de déterminer la localisation optimale d'un hub supplémentaire. Celui-ci doit se situer à Barcelone, la configuration à huit hubs ainsi obtenue est représentée à la Figure 6.16. et permet une diminution des coûts totaux de 2,01 %, alors que notre configuration optimale à huit hubs permet une diminution des coûts totaux de 2,40 %.

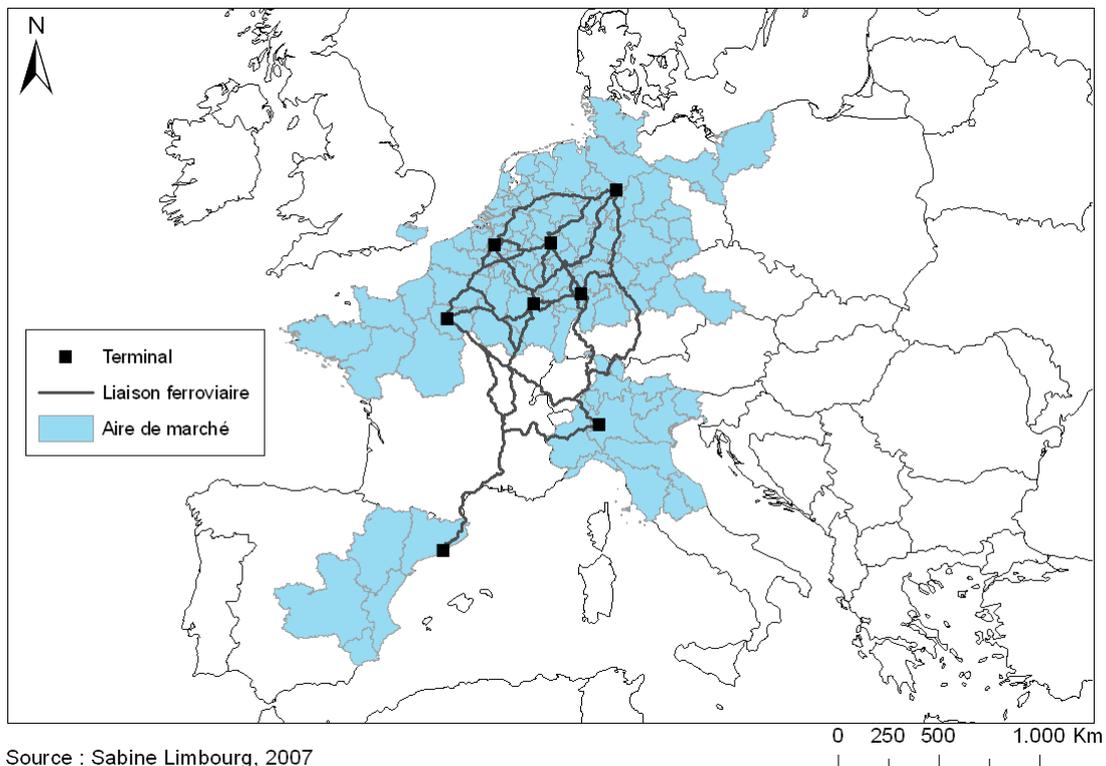


Figure 6.16. Réseau ferroviaire inter-hub et aire de marché de la configuration obtenue par l'ajout d'un hub à la configuration proposée par Ballis.

Comparée à notre situation de référence, l'ajout de cet hub à la configuration proposée par Ballis permet seulement un transfert de la route vers le rail quatre fois plus important (6,21 milliards de t.km) mais n'atteint pas la moitié de la configuration optimale à huit hubs qui permet un transfert de 13,68 milliards de t.km. Le Tableau 6.3. compare la répartition modale de cette configuration à huit hubs à la configuration optimale à huit hubs.

	En tonnes.km	
	Ajout d'un hub à la configuration décrite par Ballis	Solution optimale à 8 hubs
Fer	+2,23 %	4,78 %
Route	-2,17 %	-4,74 %

Tableau 6.3. Comparaison des répartitions modales de la configuration obtenue par l'ajout d'un hub à la configuration proposée par Ballis avec la configuration optimale à huit hubs.

6.2.11. Sensibilité par rapport à la réduction inter-hub

L'économie d'échelle pouvant être effectuée sur le réseau ferroviaire varie, selon Recordit, dans un intervalle allant de 0 % à 20 %. Afin d'étudier la sensibilité du problème par rapport à cette réduction, ce problème a été résolu pour des réductions de 5 %, 10 %, 15 % et 20 %. Les localisations optimales obtenues sont reprises dans le Tableau 6.4. pour des configurations dont le nombre de hubs varie entre deux et dix. Pour le même nombre de hubs, ces localisations restent identiques quelque soit la réduction sauf pour les configurations à six, sept et dix hubs où une seule localisation diffère. Celles-ci sont reprises en caractère gras dans le Tableau 6.4. Les localisations optimales sont donc peu sensibles à ce paramètre de réduction dans l'intervalle estimé. Dans les configurations à six et à sept hubs, la différence se porte sur une implantation de terminal soit à Namur ou soit à Anvers ; tandis que dans le cas de la configuration à dix hubs, l'implantation qui diffère se situe à Lille pour une réduction de 5 %, Mulhouse pour les réductions de 10 % et de 15 % et à Hambourg pour une réduction de 20 %.

	Réduction			
	5%	10%	15%	20%
p=2	1,2	1,2	1,2	1,2
p=3	1,3,4	1,3,4	1,3,4	1,3,4
p=4	1,3,4,5	1,3,4,5	1,3,4,5	1,3,4,5
p=5	1,3,4,5,6	1,3,4,5,6	1,3,4,5,6	1,3,4,5,6
p=6	1,2,4,5,6,7	1,2,4,5,6,7	1,2,4,5,6, 9	1,2,4,5,6, 9
p=7	1,2,4,5,6,7,8	1,2,4,5,6,8, 9	1,2,4,5,6,8, 9	1,2,4,5,6,8, 9
p=8	1,2,4,5,6,8,9,10	1,2,4,5,6,8,9,10	1,2,4,5,6,8,9,10	1,2,4,5,6,8,9,10
p=9	1,2,4,5,6,8,9,10,11	1,2,4,5,6,8,9,10,11	1,2,4,5,6,8,9,10,11	1,2,4,5,6,8,9,10,11
p=10	1,2,4,5,6,8,9,10,11, 13	1,2,4,5,6,8,9,10,11, 12	1,2,4,5,6,8,9,10,11, 12	1,2,4,5,6,8,9,10,11, 14

Tableau 6.4. Localisations optimales obtenues en fonction du pourcentage de réduction et du nombre de hubs à localisés.

1 Barcelone, 2 Darmstadt, 3 Cologne, 4 Lyon, 5 Milan, 6 Paris, 7 Namur, 8 Madrid, 9 Anvers, 10 Metz, 11 Bordeaux, 12 Mulhouse, 13 Lille, 14 Hambourg.

6.2.12. Conclusions

Comparée à notre situation de référence, la configuration optimale à sept hubs obtenue permet un transfert de la route vers le rail huit fois plus important en t.km que la configuration à sept hubs proposée par Ballis, les calculs étant basés sur les mêmes matrices de demande.

Plus le nombre de hubs à localiser augmente, plus le transfert du rail à la route est important. Cette tendance logique est représentée à la Figure 6.17. A partir de la configuration à sept hubs, qui permet un transfert de 13,26 milliards de t.km de la route vers le rail, l'objectif de Marco Polo¹² est atteint. Le coût total de transport dans ce réseau présente une diminution de 2,32 % par rapport à celui de la situation de référence.

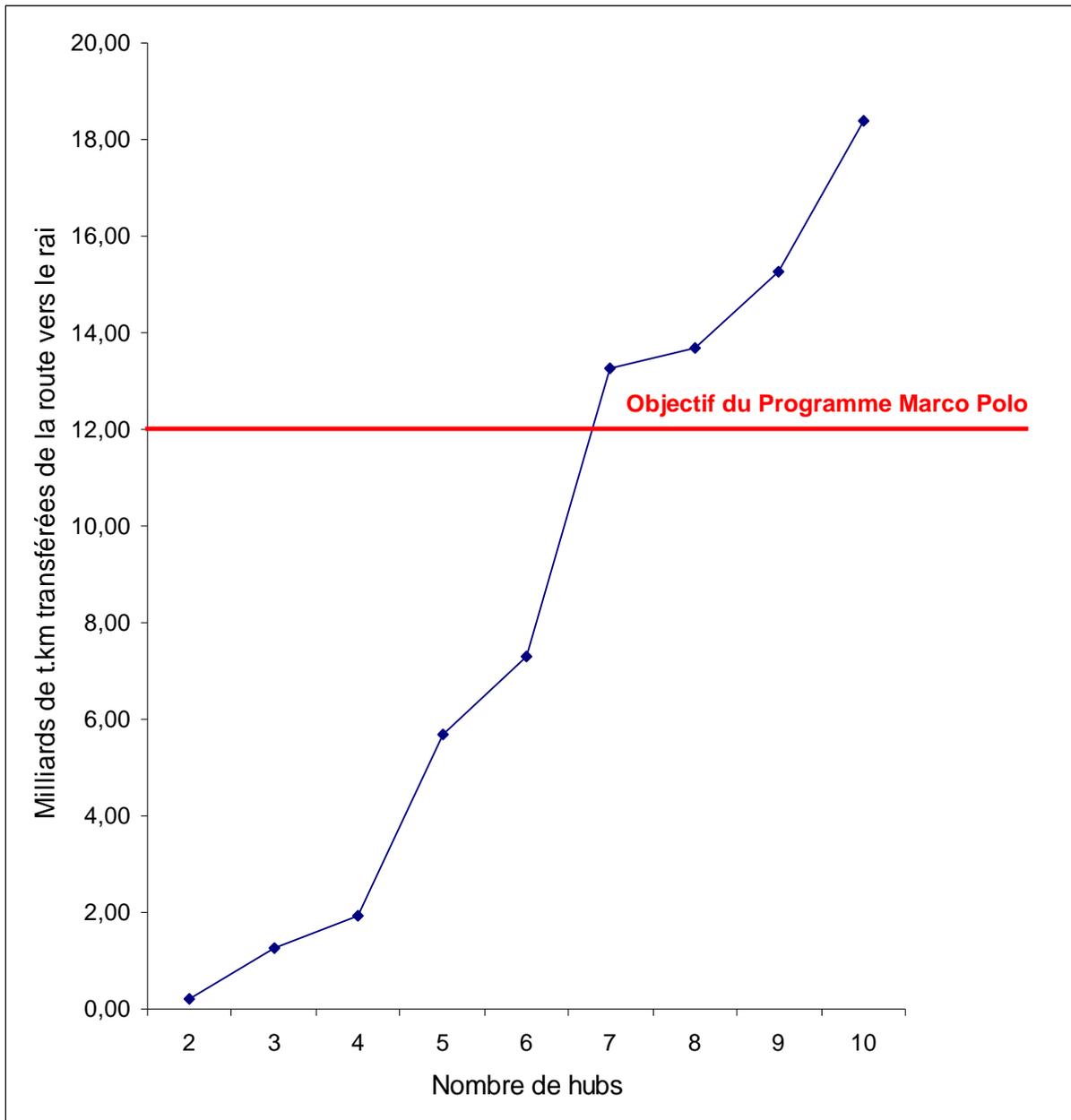


Figure 6.17. Evolution des flux transférés de la route vers le rail en fonction du nombre de hubs.

¹² Pour rappel, l'objectif de Marco Polo est d'atteindre un transfert de la route vers les autres modes de transport de 12 milliard de t.km par an.

La Figure 6.18. montre l'évolution du rapport entre les coûts totaux entre la configuration à p hubs obtenues et la situation de référence en fonction du nombre de hubs à localiser. Le rapport des coûts présente un minimum pour $p=8$, c'est-à-dire la configuration à huit hubs. Parmi les cas étudiés, la configuration à huit hubs est donc la configuration qui minimise les coûts totaux. Elle permet un transfert de la route vers le rail de 13,68 milliards de t.km, c'est-à-dire un transfert plus important que celui de l'objectif du programme Marco Polo.

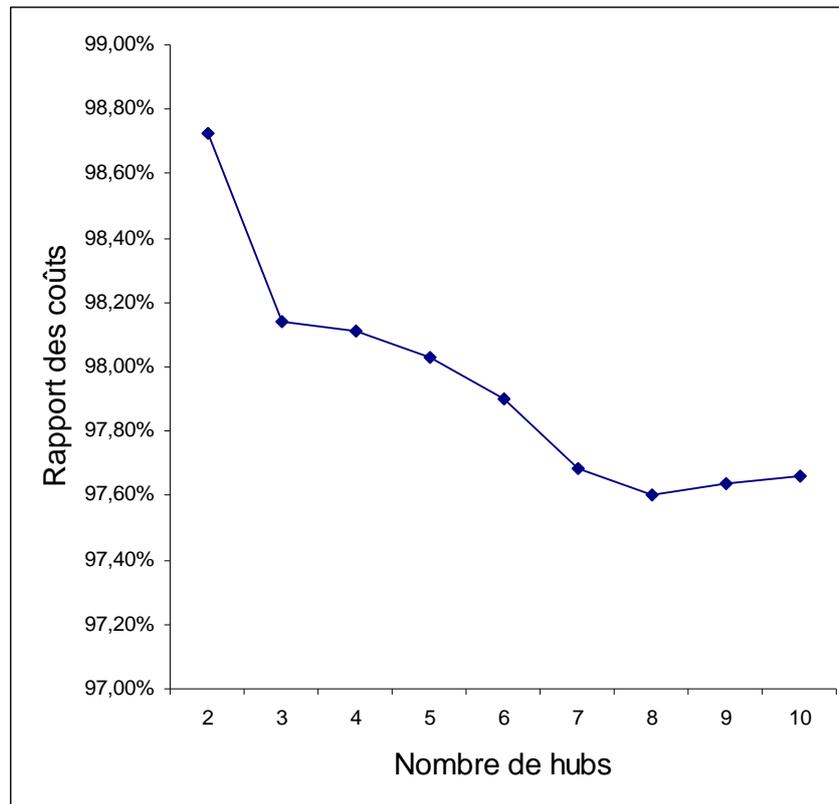


Figure 6.18. Evolution du coût total en fonction du nombre de hubs.

La Figure 6.19. illustre le nombre d'UTI transbordées par les différents hubs en fonction du nombre de hubs localisés. Les quatre hubs les plus importants, en termes d'UTI transbordées sont ceux de Paris, Lyon, Barcelone et Milan ; ceux-ci captent tous plus de 100.000 UTI par an dans les configurations pour lesquelles le nombre de hubs est supérieur à quatre. Hormis la configuration à cinq hubs, chaque configuration dont le nombre de hubs est inférieur à huit contient au moins un hub qui capte moins de 100.000 UTI. Ceci signifie que le coût de transbordement y est plus élevé que les coûts de transbordement obtenus pour les autres hubs. Pour les configurations à huit et à neuf hubs, deux hubs n'atteignent pas ce seuil de flux minimum et trois ne l'atteignent pas dans le cas de la configuration à dix hubs, ce qui a pour effet d'augmenter les coûts de transport.

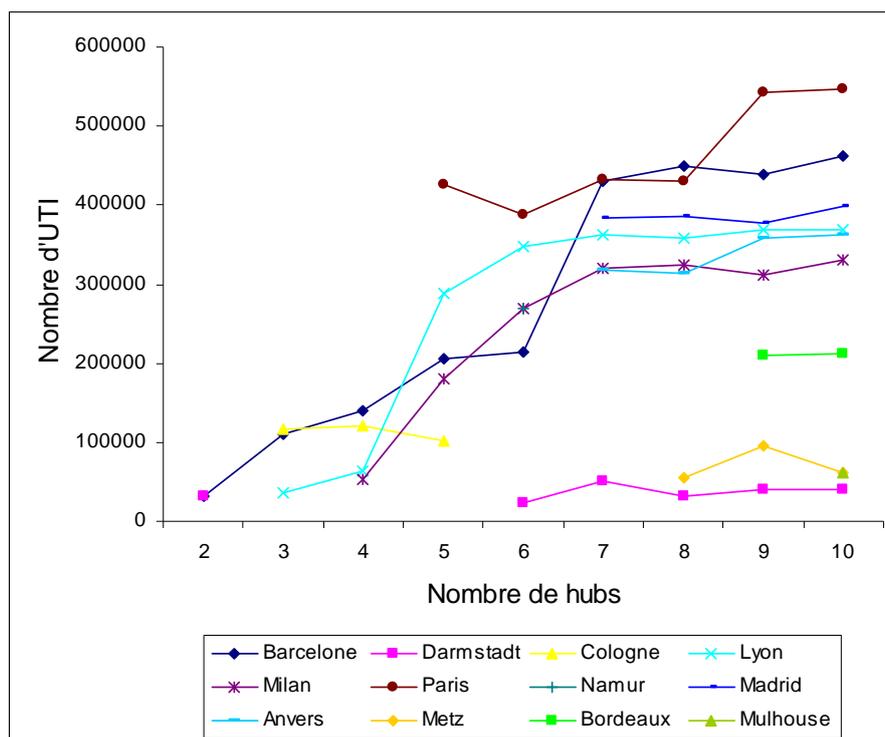


Figure 6.19. Evolution des flux transbordés aux hubs en fonction du nombre de hubs.

6.3. Résultats obtenus en internalisant les coûts externes

Les résultats du scénario de référence en internalisant les coûts externes, voir § 2.6., peuvent être comparés aux résultats du scénario de référence (prenant compte uniquement des coûts internes). Le Tableau 6.5. indique que les parts de marché du ferroviaire et du fluvial augmentent alors que celle de la route diminue. Cette évolution est attendue car le mode de transport routier a des coûts externes plus importants que les autres modes. Le transfert de la route vers le rail représente 6,48 milliards de t.km et atteint donc plus de la moitié de l'objectif du programme Marco Polo.

	En tonnes.km		En tonnes	
	Coûts internes	Coûts externes	Coûts internes	Coûts externes
Eau	1,96%	1,98%	1,73%	1,79%
Fer	15,10%	17,34%	13,54%	15,75%
Route	82,94%	80,74%	84,72%	82,47%

Tableau 6.5. Comparaison des répartitions modales entre les coûts internes et les coûts externes.

Afin de ne pas alourdir inutilement le texte, seules les configurations proches de la solution optimale obtenue avec les coûts internes ont été étudiées ; il s'agit des configurations à six, sept, huit et neuf hubs.

6.3.1. Configuration à six hubs

Comparée à la configuration obtenue pour les coûts internes pour le même nombre de hubs, la configuration à six hubs diffère peu : seul le hub de Namur est remplacé par un hub à Anvers. Toutefois, l'aire de marché représentée à la Figure 6.20. est plus étendue que celle obtenue sans internalisation des coûts externes (aire de marché initiale) et le transport combiné est cette fois plus avantageux que le transport routier entre Darmstadt et Paris.

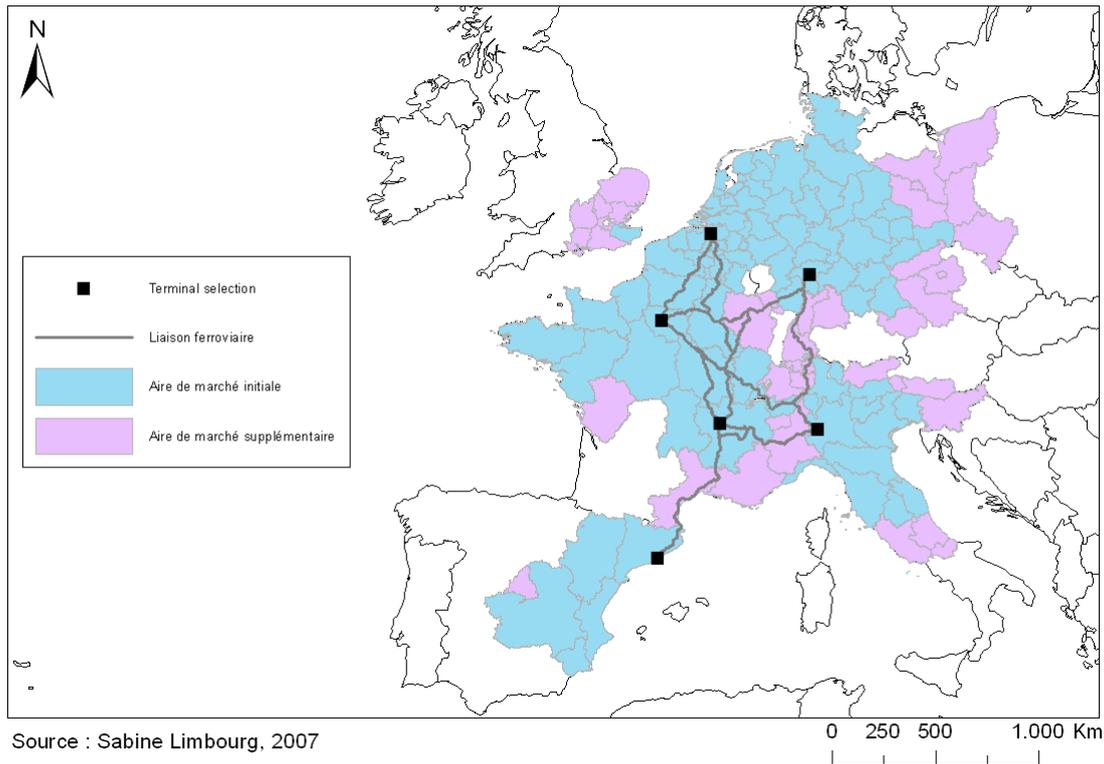


Figure 6.20. Réseau ferroviaire inter-hub et aire de marché pour une configuration à six hubs en tenant compte des coûts externes.

La répartition du flux sur les différents modes varie par rapport à la nouvelle situation de référence (qui tient compte des coûts externes). La part de marché du réseau ferré croît de 4,63 % alors que dans le même temps, celle du réseau routier recule de 4,50 %. Ceci représente un transfert de 12,98 milliards de t.km de la route vers le rail supplémentaire. La diminution des coûts totaux est de 2,39 %.

6.3.2. Configuration à sept hubs

La résolution du problème de localisation conduit à une configuration à sept hubs identique à la configuration obtenue précédemment. L'augmentation de l'étendue de l'aire de marché est représentée à la Figure 6.21. La nouvelle aire de marché, plus étendue que celle représentée à la Figure 6.13. est illustrée à la Figure 6.21.

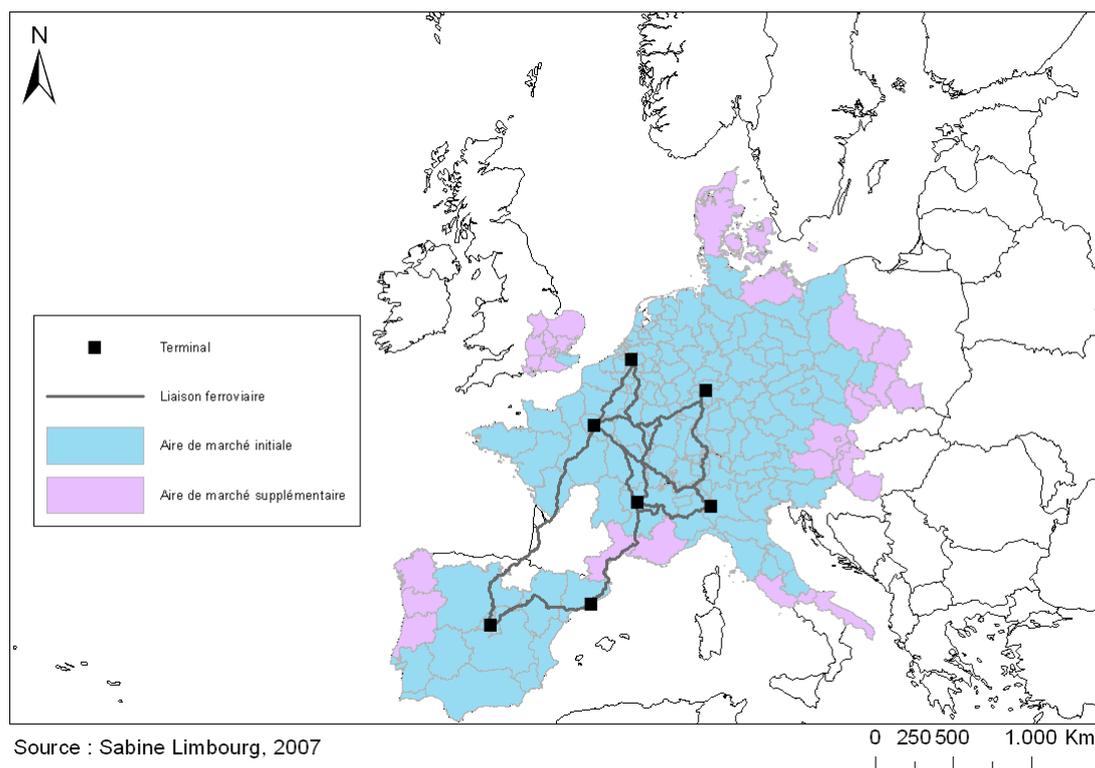


Figure 6.21. Réseau ferroviaire inter-hub et aire de marché pour une configuration à sept hubs en tenant compte des coûts externes.

Dans cette configuration, la part de marché du réseau ferré croît de 7,09 % alors que dans celle du réseau routier recule de 6,96 % par rapport à la situation de référence avec des coûts internalisés. Ceci représente un transfert supplémentaire de 20,06 milliards de t.km de la route vers le rail et une diminution des coûts totaux de 2,83 %.

Comparativement, la situation décrite par Ballis en internalisant les coûts externes présente une diminution de 1,92 % du coût total et un transfert supplémentaire 4,29 milliards de t.km de la route vers le rail. La configuration est représentée à la Figure 6.23. ainsi que l'aire de marché du transport combiné.

6.3.3. Configuration à huit hubs

Comparée à la configuration obtenue dans le cas des coûts internes, le hub de Metz est remplacé par un hub à Hambourg. L'aire de marché, représentée à la Figure 6.22., n'est toutefois pas plus étendue que celle de la configuration à sept hubs en tenant compte des coûts externes.

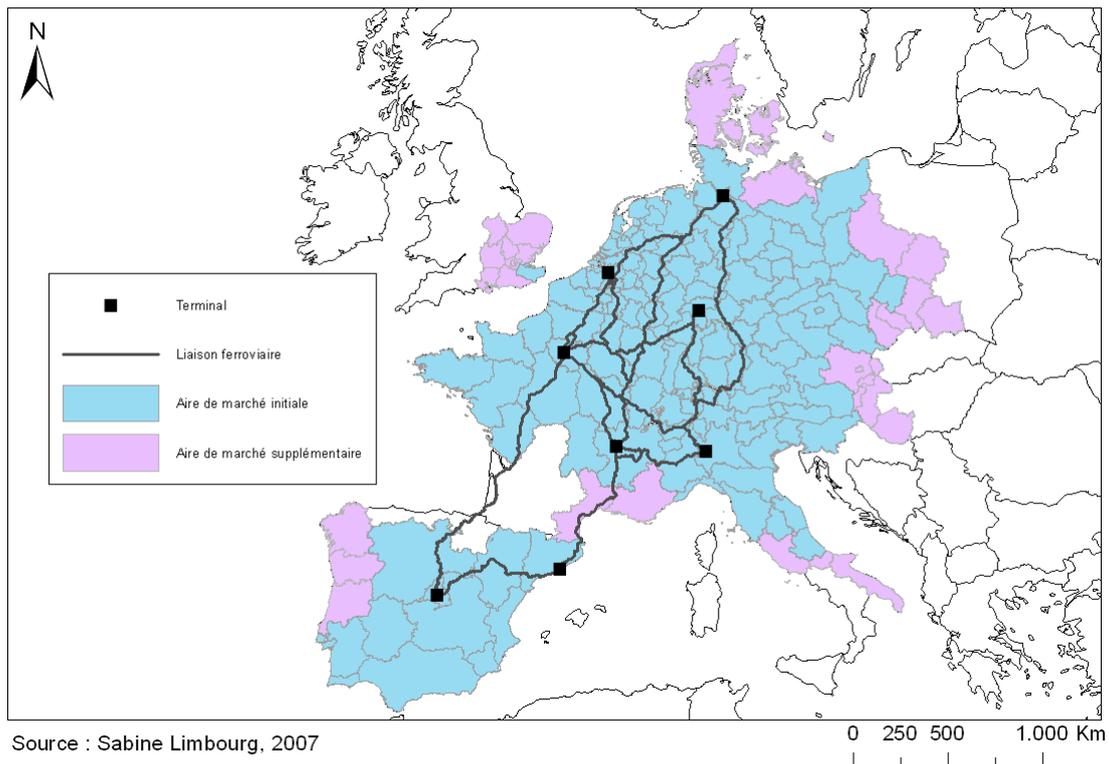


Figure 6.22. Réseau ferroviaire inter-hub et aire de marché pour une configuration à huit hubs en tenant compte des coûts externes.

Par rapport à la situation de référence tenant compte des coûts externes, la part de marché du réseau ferré augmente de 7,69 % tandis que celle du réseau routier recule de 7,56 %. Le transfert de la route vers le rail est de 21,86 milliards de t.km et la diminution des coûts totaux est de 2,91 %. Ces résultats sont tous supérieurs aux résultats obtenus dans les configurations précédentes. La configuration à neuf hubs, détaillée en annexe 5, présente un coût total supérieur à cette configuration.

6.3.5. Conclusions

L'internalisation des coûts externes, sans ajouter de terminaux, permet d'atteindre un peu plus de la moitié de l'objectif du programme de Marco Polo. Parmi les différentes structures hub-and-spoke étudiées dans le cas de l'internalisation des coûts externes, la configuration à huit hubs, très proche de la configuration obtenue dans le cas des coûts internes, est de nouveau la configuration optimale. Par rapport à la situation de référence tenant compte des coûts externes, elle permet une augmentation de la part de marché du ferroviaire de 7,69 % et une diminution de celle du routier de 7,56 %. Le transfert de la route vers le rail est de 21,86 milliards de t.km et la diminution des coûts totaux est de 2,91 %.

7. Interprétation des résultats

Ce travail s'est attaché à proposer une méthodologie pour déterminer les localisations optimales pour les terminaux de transfert intermodaux dans un réseau de consolidation de type « hub-and-spoke ». Une approche systématique basée sur la répartition des flux sur le réseau permet, dans un premier temps, de réduire le nombre de localisations potentielles par des critères de sélection plutôt que par agrégation. Notre objectif est de minimiser les coûts totaux afin d'augmenter l'efficacité du système de transport et non pas de maximiser les régions pouvant être couvertes par l'aire de marché des différents terminaux.

Parmi les différents types de transports intermodaux, notre application se concentre sur la localisation de terminaux de conteneurs dans une structure hub-and-spoke et dans le cadre de transport combiné rail-route pour des distances supérieures à 300 km.

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 Paris, Anvers, Madrid, Darmstadt, Barcelone, Lyon, Metz et Milan. Cette configuration permet un transfert de la route vers le rail de plus de 13,68 milliards de t.km, ce qui dépasse l'objectif annuel fixé par le programme Marco Polo.

D'après les données publiées dans l'étude Recordit, un camion européen utilisé pour des parcours sur longue distance effectue environ de 120.000 km par an, transporte un conteneur de 40 pieds avec une charge moyenne 18 tonnes ou deux conteneurs de 20 pieds avec une charge moyenne 12 tonnes. Selon Jean Dediste, administrateur délégué d'« Athus Container Terminal S.A. », la répartition des conteneurs manipulés est de 60 % pour les conteneurs 40 pieds et de 40 % pour les conteneurs 20 pieds. Enfin, sachant qu'un camion a un taux de chargement pour les acheminements sur longue distance de 85 %, le nombre de camions diminue d'environ 7.000 unités par an.

D'après nos hypothèses, la vitesse d'un transport routier sur longue distance est d'environ 40 km/h. Dès lors, le nombre d'heures de conduite par an et donc d'utilisation du camion et du réseau diminue de 20 millions. La configuration optimale permet également de diminuer les coûts totaux sur le système de transport de 2,40 %.

Le transfert modal ainsi obtenu est intéressant car, à l'heure actuelle et selon nos calculs, seuls 15 % de l'objectif annuel fixé par le programme Marco Polo sont atteints par le système de

transport européen, doté de sept grands terminaux. En effet, les terminaux internationaux pour le rail-route identifiés par Ballis (2002) sont situés à Metz, Villeneuve-Saint-Georges, Schaerbeek, Cologne, Hanover, Milan et Mannheim, c'est-à-dire principalement dans la partie Nord de l'Europe. Ce réseau présente, selon nos calculs, un transfert de la route vers le rail de 1,75 milliards de t.km et une diminution de 1,81 % par rapport à la situation de référence, alors que notre configuration optimale à sept terminaux dépasse l'objectif puisqu'elle permet déjà un transfert de 13,26 milliards de t.km (c'est-à-dire un transfert de la route vers le rail huit fois plus important que la configuration existante) et une diminution des coûts totaux de 2,32 %. Dans cette configuration les localisations optimales des terminaux sont identiques à celles obtenues dans la configuration à huit terminaux décrite au paragraphe précédent sans le terminal situé à Metz.

Une question de recherche supplémentaire est de déterminer la localisation optimale de terminaux additionnels par rapport à la situation actuelle. L'ajout d'un tel terminal, localisé par notre modèle à Barcelone, permet un transfert de la route vers le rail quatre fois plus important que la situation existante mais n'atteint pas la moitié de ce que nous avons obtenu avec notre configuration optimale à huit terminaux.

D'autre part, la seule internalisation des coûts externes¹³ (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) permet d'atteindre la moitié de l'objectif annuel du programme Marco Polo. Après internalisation des coûts, les parts de marché du ferroviaire et du fluvial augmentent alors que celle de la route diminue. Cette évolution est attendue car le mode transport routier a des coûts externes plus importants que les autres modes. Lorsque l'internalisation est utilisée comme mesure d'accompagnement de la mise en place d'un réseau de hubs, l'objectif annuel du programme Marco Polo est déjà atteint à partir d'une configuration optimale à cinq hubs. Notons que la situation existante atteint presque cet objectif avec un transfert de la route vers le rail de 10,76 milliard de t.km, c'est-à-dire une diminution de 5.500 camions et de 16 millions d'heures de conduite et d'utilisation du réseau routier et du camion.

Parmi les différentes configurations étudiées en internalisant les coûts externes, celle à huit terminaux est une fois de plus la configuration optimale. Il est intéressant de noter que cette

¹³ Internalisation effectuée sur base des valeurs des coûts externes publiées dans l'étude de Recordit

configuration ne diffère de la configuration obtenue sans internalisation que par la localisation d'un terminal : le terminal de Metz est en effet remplacé par un terminal à Hambourg. Cette nouvelle configuration permet un transfert de la route vers le rail est de 28,33 milliards de t.km (contre 26,98 milliards de t.km si le terminal reste localisé à Metz) et la diminution des coûts totaux sur le système est de 2,91 % (contre 2,86 % si le terminal reste localisé à Metz). Pour fixer les idées, cette dernière configuration donne lieu à une diminution de 14.500 camions sur les routes par an, c'est à dire une diminution d'environ 43 millions d'heures de transport routier sur base annuelle alors que la situation existante, sans internalisation des coûts externes, correspond à une diminution de seulement 900 camions, c'est-à-dire moins de 3 millions d'heures.

Les données reprises dans l'étude Recordit permettent également d'estimer la diminution du nombre d'accidents mortels. En effet, en moyenne, sur le transport routier européen, il y a environ 200 tués par an et par milliard de véhicule.km, le nombre de tués sur la route diminuerait donc de 343. Par contre, le transport ferroviaire compte environ 9 tués par an et par milliard de t.km, le transfert obtenu de la route vers le rail augmenterait donc le nombre de tués sur le réseau ferroviaire de 255. Au total, 60 personnes seraient épargnées par an.

En se référant à Beuthe *et al.* (2002), la diminution des émissions de polluants peut également être estimée. Celle-ci est reprise en tonnes dans le Tableau 7.1.

PM ¹⁴	NO _x	VOC ¹⁵	SO ₂	CO	CO ₂
940	14.500	2.000	680	4.000	970.000

Tableau 7.1. Diminution des émissions de polluant en tonnes par le transfert de la route vers le rail dans le cas de la configuration optimale.

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, soient effectuées 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. De plus, le taux de chargement et les distances annuelles effectuées par des camions pour les opérations de pré- et post-acheminements sont moindres que pour le transport routier sur longue distance. En effet, d'après Recordit, le taux

¹⁴ Les PM sont des particules solides très petites (souvent classifiées en PM 10 – diamètre inférieur à 10 µm – et PM 2.5 – diamètre inférieur à 2.5 µm).

¹⁵ Les VOC sont toutes les substances organiques (complexes contenant du carbone) ayant une haute volatilité, comme le benzène par exemple.

de chargement est de 65 % au lieu de 85 % et le kilométrage moyen de 80.000 km au lieu de 120.000 km. Pour la configuration optimale à huit hubs et en internalisant les coûts externes, les pré- et post-acheminements sont répartis sur 161 régions NUTS 2 et impliquent, sous ces hypothèses 1.500 camions par an. Insistons que malgré cela, au total et sur l'ensemble du territoire, il y a une diminution de 14.500 camions par an (+/- 3000 heures par camion) si la mise en place de la configuration optimale est accompagnée d'une internalisation des coûts.

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, ...). A titre d'illustration, une des localisations optimales obtenues se situe dans la région de Namur. La Figure 7.1. est une vue aérienne de cette région.

Notre modèle a localisé le terminal près de Daussoulx, au niveau de l'échangeur autoroutier entre la E42, reliant Mons et Liège, et la E411, reliant Bruxelles aux Luxembourg. Une ligne de chemin de fer d'environ 5 km, pourrait alors être tirée de la gare de Namur qui est un carrefour ferroviaire, vers l'implantation du terminal, ce qui éviterait les pré- et post acheminement dans la zone urbanisée. Notons, qu'à l'heure actuelle deux voies de la gare de Namur sont dédiées aux trains de marchandises et qu'une gare de marchandises où peuvent s'accomplir les formalités douanières existe à Ronet (Sud-Est de Belgrade). Il s'agirait donc d'effectuer une étude qui prendrait en considération des contraintes liées à l'aménagement du territoire pour déterminer la localisation exacte d'un terminal dans une région particulière.

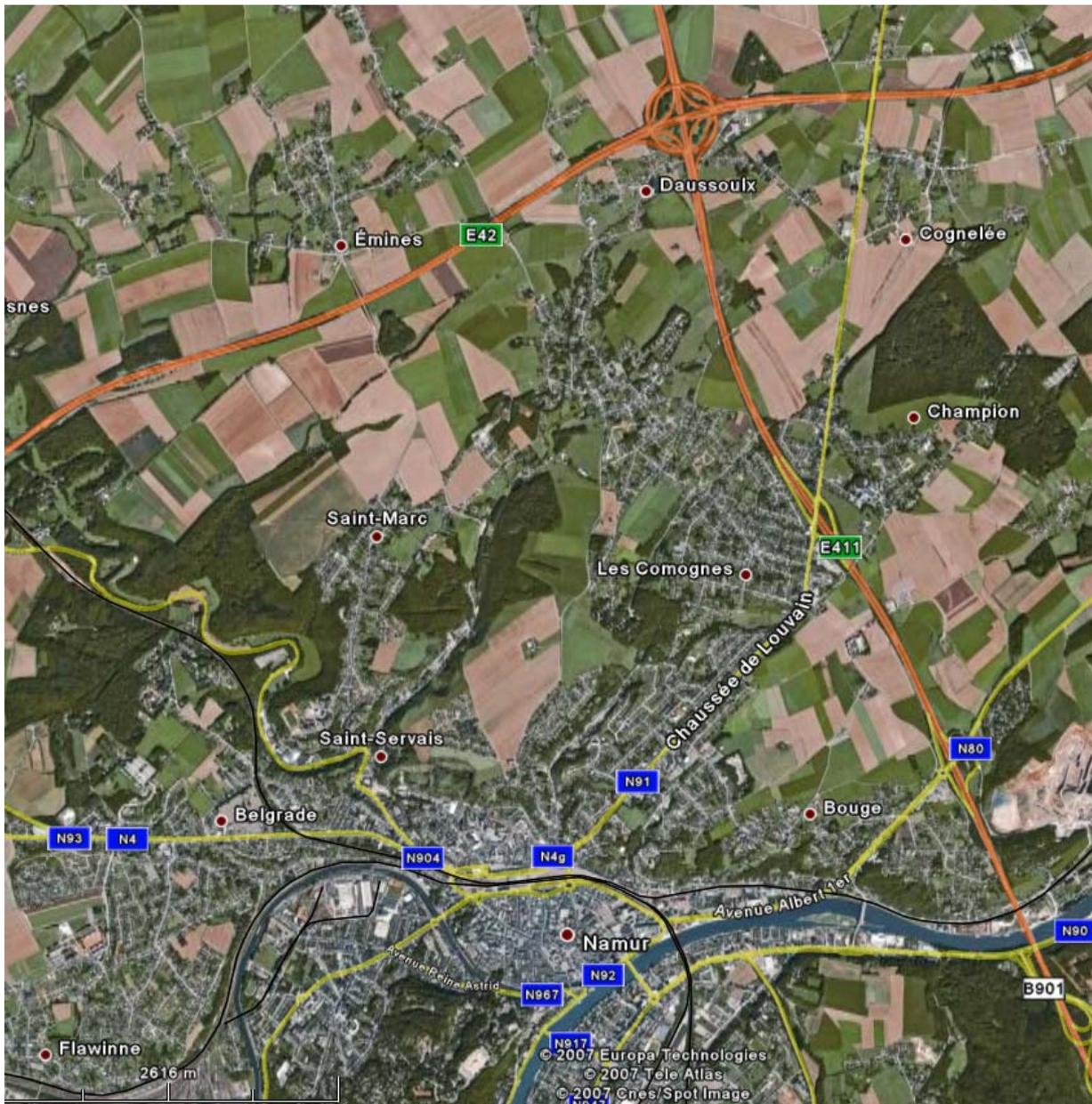


Figure 7.1. Vue aérienne de la région de Namur.

Source : Google Earth, 2007

La localisation d'un terminal à Anvers soulève le problème du rôle particulier des ports en tant que terminaux. L'activité portuaire n'a pas été prise en compte dans notre modèle, mais le trafic des conteneurs des ports de et vers l'intérieur de l'Europe et pour des distances supérieures à 300 km a été comptabilisé. Ceci pose la question de l'interdépendance entre les terminaux et les ports importants. Le fait que dans certaines configurations optimales, Anvers soit retenu comme hub, n'est donc pas, dans le cadre de la méthodologie employée, à imputer à la seule activité portuaire de la région, mais bien à la structure du flux qui y est identifié. S'il est exact que le flux de et vers Anvers jouent un rôle, l'ensemble des autres flux, et en particulier ceux sur l'axe Ouest-Est (en provenance ou à destination de Rotterdam par

exemple) jouent un rôle important. Notre modèle peut toutefois être facilement modifié pour introduire une contrainte supplémentaire telle qu'une distance minimale par rapport aux ports.

Rappelons 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. Cependant, des rapports tels que ceux de KombiConsult (2004) indiquent que certains tronçons ferroviaires n'ont pas une capacité suffisante pour absorber une augmentation de 15 % des t.km, ce qui est l'ordre de grandeur de nos résultats de calculs. Le rapport EPSON (2004) envisage plusieurs pistes pour faire face à cette augmentation des flux ferroviaires de fret, 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.

8. Conclusions et perspectives

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 pousse les différentes instances à s'attarder sur cette question.

Dans cette optique et 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) qui 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.

Notre étude s'inscrit dans ce cadre en essayant d'évaluer l'opportunité de développer des alternatives intermodales. Parmi les différents types de transports intermodaux, nous nous sommes penchés sur le transport rail-route dont la compétitivité dépend non seulement de ses coûts, mais également de la localisation des terminaux où sont effectués les transferts entre les deux modes.

De manière encore plus précise, le type de terminal, ou hub, que nous cherchons à localiser est dédié essentiellement au transbordement de fret continental, associé à une consolidation de type « *hub-and-spoke* » afin d'expédier les marchandises à des distances et avec des volumes suffisamment grands pour que le transport combiné soit compétitif par rapport au transport routier.

Les problèmes de localisation de hubs nécessitent l'identification d'un ensemble de localisations potentielles, ainsi que les matrices des flux et des coûts entre ces localisations. Pour ce faire, nous avons besoin de la répartition des flux de transport dans la zone étudiée.

Pour obtenir cette répartition, une technique d'affectation multi-flux, capable de répartir la demande entre plusieurs itinéraires et modes de transport, a été mis en œuvre sur des réseaux virtuels, qui est un réseau alternatif qui décrit les différentes opérations possibles le long de la chaîne de transport.

L'affectation du trafic requiert la connaissance de l'offre et de la demande sur le territoire. En ce qui concerne la demande et dans le cadre de cette recherche, nous avons eu l'autorisation

d'utiliser les matrices O-D pour les marchandises produites par le bureau de consultance : « *NEA Transport Research and Training* » pour l'année 2000. La base de données contient des relations de région à région au niveau NUTS 2 pour l'Europe élargie : EU25, Norvège et Suisse. Afin de limiter les erreurs liées au niveau d'agrégation, le centroïde utilisé ne correspond pas au centre gravitaire de la région considérée mais au centre de la zone la plus urbanisée de la région considérée. Lorsqu'une région NUTS 2 comprend plusieurs zones urbanisées importantes et de tailles équivalentes, le centroïde a été situé dans la zone la plus habitée. Ces centroïdes sont utilisés comme origine ou destination pour les marchandises.

En ce qui concerne la catégorie de marchandises à affecter, seules les marchandises appartenant au chapitre NST-R 9 sont retenues car ce chapitre contient la demande de transport de conteneurs parmi d'autres produits manufacturés.

En ce qui concerne l'offre, des coûts généralisés, calculés essentiellement à partir des données de l'étude Recordit, ont été associés aux différentes opérations de transport. La détermination de l'offre sur le territoire européen nécessite également une cartographie suffisamment précise des réseaux de transport pour la route et les chemins de fer (basée essentiellement sur les données de la « *Digital Chart of the World* ») ainsi que les voies navigables (digitalisé au sein du Groupe de Transport et Mobilité). Ces réseaux modaux ont été enrichis en introduisant les lignes de ferry et le Tunnel sous la Manche ainsi que de connecteurs reliant ces différents réseaux aux centroïdes.

Outre les limites liées à la précision des données, la non prise en compte de certaines particularités du relief, de la sinuosité du réseau ou des éléments tels que la qualité du service (fréquence des trains) sont également des limites à notre modèle.

Une situation de référence, dans laquelle le transport intermodal n'est pas autorisé, pour le réseau de transport européen et pour des distances supérieures à 300 km a ainsi été élaborée.

Dans le cas d'un réseau de transport de grande taille, comme le réseau transeuropéen, le nombre de localisations potentielles devient rapidement trop grand pour que le problème de localisation puisse être résolu par une méthode exacte. Basée essentiellement sur la répartition des flux sur le réseau, une méthodologie, qui permet de réduire le nombre de localisations potentielles par des critères de sélection plutôt que par agrégation, est présentée.

Une fois les localisations potentielles obtenues, l'étude de leur aire de marché permet de déterminer les flux de conteneurs entre elles. Ensuite, les coûts de transport entre ces localisations potentielles sont également évalués.

Le problème du p -hub médian est reformulé pour décrire le problème dans le cas d'un réseau rail-route où les liaisons inter-hub sont ferroviaires et les autres routières. Une procédure itérative est proposée pour tenir compte de l'évolution des coûts de transbordement en fonction du nombre d'unités de transport intermodal transbordées aux terminaux.

La résolution du problème du p -hub médian permet de déterminer p localisations optimales. Ces localisations obtenues, ou hubs, sont introduites dans le réseau de référence et un réseau « *hub-and-spoke* » est créé dans lequel un transbordement rail-route est autorisé aux hubs.

L'identification du transport intermodal s'effectue en différenciant les pré- et post-acheminements routiers du transport routier sur longue distance. Il en est de même pour la partie ferroviaire d'un transport combiné par rapport au transport ferroviaire traditionnel. Cette identification s'effectue en ajoutant de nouveaux moyens de transport virtuels dans le modèle.

Le problème du p -hub médian est résolu dans un premier temps pour un coût de transbordement fixé et pour un nombre de hubs variant de deux à dix. Les résultats de ces différentes configurations sont comparés à ceux de la situation de référence. Parmi les cas étudiés, la configuration à huit hubs (situés aux alentours de Paris, Anvers, Madrid, Darmstadt, Barcelone, Lyon, Metz et Milan) est la configuration qui minimise les coûts totaux de transport. Elle permet un transfert de la route vers le rail supérieur à l'objectif annuel fixé par le programme Marco Polo. Le transfert modal ainsi obtenu est intéressant car à l'heure actuelle et selon nos calculs, seuls 15 % de cet objectif sont atteints par le système de hubs européen actuels, doté de sept grands terminaux.

La diminution du nombre de camions sur les routes, et donc l'utilisation du réseau routier, des émissions polluantes et du nombre de tués suite à des accidents de transport a été estimée en fonction du flux transférés de la route vers le rail.

Dans un deuxième temps, nous avons estimé que la seule internalisation des coûts externes permet d'atteindre la moitié de l'objectif du programme Marco Polo. Lorsque l'internalisation est utilisée comme mesure d'accompagnement de la mise en place d'un réseau de hubs,

l'objectif annuel du programme Marco Polo est atteint à partir de la configuration à cinq hubs seulement et la situation existante atteint presque l'objectif.

Parmi les différentes structures étudiées en internalisant les coûts externes, une configuration à huit terminaux est de nouveau la configuration optimale. Cette configuration ne diffère de la configuration obtenue initialement que par la localisation d'un terminal : le terminal de Metz est en effet remplacé par un terminal à Hambourg.

Notons 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 t.km. Bien que nos résultats de calculs 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.

Nous devons également apporter une nuance supplémentaire à nos résultats car nous avons supposé que les localisations définies par notre modèle avaient toutes les mêmes caractéristiques et les mêmes coûts de maintenance, ce qui n'est pas observé dans la réalité. Des extensions, des développements et des améliorations au modèle peuvent dès lors encore être envisagés.

- Une variante du modèle pourrait déterminer automatiquement le nombre optimal de hubs. Même si la formulation mathématique de cette variante existe, elle n'est pas appliquée dans le cadre de ce travail pour deux raisons principales. La première est que le coût d'implantation des terminaux est calculé en fonction de l'estimation du nombre d'unités de transport intermodal transbordées, ce qui est une sous-estimation. La seconde est que le coût du transport intermodal est également sous-estimé car il ne tient pas compte explicitement de paramètres tels que les fréquences du train.
- Les économies d'échelle, variant avec l'intensité des flux sur les liaisons inter-hub, pourraient également être étudiées. Cependant, dans ce travail, nous ne disposons pas d'information suffisante pour estimer la variation des coûts de transport sur les liaisons inter-hubs en fonction de l'intensité du flux.

Notre cadre méthodologique pourrait également être appliqué à d'autres problèmes :

- Le problème de localisation de hubs est à l'origine lié au transport aérien des passagers. Les réseaux hub-and-spoke aériens diffèrent selon que l'on considère le transport des passagers ou des marchandises. En effet, dans le cas du transport de marchandises, la performance globale et les coûts sont primordiaux. Par contre, dans le cas du transport des personnes, les inconvénients imposés aux passagers dus notamment à l'accroissement du temps de parcours et aux transferts doivent également être pris en compte. Dans le but de garder les coûts de transport le plus bas possible tout en minimisant les inconvénients imposés aux passagers, les modèles autorisent l'affectation multiple, c'est-à-dire que les aéroports n'étant pas des hubs sont connectés avec plus d'un hub afin que les passagers partant de la même origine mais avec des destinations différentes puissent utiliser différents hubs.
- Dans le cas des compagnies de services de livraison, comme pour les livraisons postales, les colis de différentes origines sont collectés et triés aux hubs pour ensuite être distribués soit vers un autre hub soit vers leur destination finale. Souvent, les régions sont connectées à leur hub le plus proche et le problème du p -hub médian avec une affectation simple est souvent le meilleur modèle pour ce type d'application.
- Dans le domaine des télécommunications, il existe une grande variété d'applications pour le problème de localisation des hubs, incluant les réseaux de téléphone, les communications informatiques, les vidéoconférences. Dans un réseau de télécommunications, des hubs peuvent être identifiés comme des dispositifs électroniques, des concentrateurs, des satellites,... En général, des morceaux d'informations doivent être transportés sur des lignes de téléphones ou des câbles optiques par exemple.

En ce qui concerne le transfert de la route vers les autres modes de transport plus respectueux de l'environnement, notre étude pourrait également être complétée par la localisation des terminaux tri-modaux et par la prise en compte du cabotage maritime.

Annexe 1

1. Coûts des opérations de transport

L'étude Recordit (« REal COst Reduction of Door-to-door Intermodal Transport a analysé les coûts réels et les bénéfices des services de transport intermodal au niveau européen. Elle a comparé ces coûts avec un transport routier unimodal. Les étapes de transport sont clairement séparées afin de ne pas effectuer de double comptage.

Dans la mesure où la méthodologie de Recordit scinde les coûts des différentes opérations de transport, elle est proche de la méthodologie utilisée dans le réseau virtuel, utilisé dans le cadre de ce travail.

1.1. Construction du modèle

1.1.1. Les déplacements et mouvements

L'étude Recordit utilise les concepts suivants :

- un lien rejoint deux nœuds du réseau ferroviaire, fluvial, maritime ou routier ;
- une route est un service intermodal qui est un ensemble de liens connectés entre eux ;
- un couloir est un ensemble d'itinéraires proches les uns des autres ;
- un trajet débute de l'origine et se termine à la destination.

Les données de coûts collectées peuvent être basées sur un lien (infrastructure, pré- ou post-acheminement ; terminaux), sur une route, ou sur un trajet (coûts organisationnels).

1.1.2. Les unités de chargement

L'identification d'unités de chargement standard pour un transport intermodal est une tâche difficile. Une grande variété d'unités de chargement existe en Europe :

- Les conteneurs ISO 20 et 40 pieds qui peuvent être :
 - pleins ;
 - des conteneurs citernes ;
 - réfrigérés ;
 - remplis de produits dangereux ;
 - vides.

- Les caisses mobiles :
 - type A ;
 - type B ;
 - citerne.
- Semi-remorques :
 - chargées ;
 - vides.

Les dimensions des unités de chargement principales considérées dans Recordit sont reprises dans le Tableau A1.1.1.

Unités de chargement	Longueur
Caisse mobile de Classe A ou semi-remorque	Plus de 13,60m
Conteneur de 40 pieds	12,00 m
Caisse mobile de Classe C	7,45 m
Conteneur de 20 pieds	6,00 m

Tableau A1.1.1. Dimensions des unités de chargement.

Quant aux hypothèses sur les poids (en tonnes) des unités de chargement, elles sont récapitulées dans le Tableau A1.1.2.

	Maximum	Moyenne
Conteneur de 20 pieds / caisses mobiles de classe C		
Chargement	16	12
Tare		2,3
Conteneur de 40 pieds / caisses mobiles de classe A		
Chargement	24	18
Tare		4,2
Semi-remorque / tout routier		
Chargement	24	18
Tare		

Tableau A1.1.2 : Poids des unités de chargement

1.1.3. Les capacités des moyens de transport

La capacité est calculée en termes d'unités de chargement pour chaque type de moyens de transport analysé dans Recordit. Ces capacités sont reprises dans le Tableau A1.1.3.

Rail	Paramètres techniques des wagons	
	Longueur maximum	60 pieds
	Chargement maximum	50 tonnes
	Nombre maximum d'unités de chargement par wagons	
	Caisse mobile de classe C (6 m)	3
	Caisse mobile de classe C (plus de 7 m)	2
	Caisse mobile de classe A (12 m)	1.5
	Caisse mobile de classe A (plus de 12 m)	1
	Semi-remorque	1
	Nombre maximum de conteneurs par Wagons	
	Conteneur 20 pieds (1 EVP)	3
	Conteneur de 40 pieds (2 EVP)	1,5
Camion	Conteneur de 40 pieds	1
	Conteneur 20 pieds	2
	Caisse mobile de classe A	1
	Caisse mobile de classe C	2
Voie d'eau	200 EVP	

Tableau A1.1.3. Capacité (en d'unités de chargement) pour chaque type de moyens de transport analysé dans Recordit

Une différence apparaît entre les deux classes de caisses mobiles. En effet, deux fois plus de caisse mobile de classe C peuvent être transportées par moyen de transport. Le même rapport existe entre les conteneurs de 20 et 40 pieds.

Recordit étudie trois couloirs, les calculs de coûts y sont décrits pour les caisses mobiles de classes A et C dans deux des couloirs, et pour les conteneurs de 40 et 20 pieds dans le troisième.

1.1.4. Taux de chargement des moyens de transport et composition des trains de marchandises

Le taux de chargement représente le pourcentage d'occupation (par unité de chargement) du véhicule sur la capacité totale du véhicule.

Les taux de chargement dans le cadre des transports ferroviaires varient entre 50 % et 100 % suivant la connexion étudiée. Pour les camions, les de chargement sont de 60 % pour les pré- et post-acheminements et de 85 % pour l'acheminement tout à la route. En ce qui concerne le transport fluvial, un taux de chargement de 75 % a été utilisé entre Bâle et Rotterdam, représentant le pourcentage d'occupation des conteneurs par rapport à la capacité totale des barges.

1.1.5. Kilométrage et durée de vie

Le Tableau A1.1.4. reprend le kilométrage annuel des moyens de transport et la durée de vie moyenne, pour les moyens de transport et les équipements, une prise en compte en année pour les calculs d'amortissement par les opérateurs.

Moyens de transport – équipement	km	Durée de vie (an)
Locomotive effectuant de longues distances	<ul style="list-style-type: none"> • 120.000 km/an en Italie • 150.000 km/an pour les autres pays 	20
Locomotive pour les manipulations de triage		20
Camion	<ul style="list-style-type: none"> • 120.000 km/an pour les longues distances • 112.000 km/an en Angleterre • 80.000 km/an pour les pré/post acheminements • 69.998 km/an pour les pré/post acheminements en Angleterre 	5
Barges	72.000 €/an	35
Grues des terminaux intérieurs		15
Grues de quai des ports		25

Tableau A1.1.4. Kilométrage annuel des moyens de transport et la durée de vie moyenne, pour les moyens de transport et les équipements.

1.1.6. Consommation

Le Tableau A1.1.5. reprend la consommation des différents moyens de transport.

Moyens de transport	Litre/km	kWh/tkm
Rail		0,026
Locomotive pour les manipulations de triage	40/h	
Camion	0,43	
Barges en amont	20	
Barges en aval	8	

Le Tableau A1.1.5. Taux de consommation des différents moyens de transport.

1.1.7. Amortissement

L'amortissement a été calculé en termes d'annuités dont le pourcentage dépend des années d'amortissement considérées. Les taux d'annuité calculés sont repris dans le Tableau A1.1.6.

Amortissement	Annuité (%)
5	23,20
8	15,50
10	12,94
15	9,51
20	7,80
25	6,78
30	6,09

Le Tableau A1.1.6. Consommation des différents moyens de transport.

1.1.8. Autres coûts et bénéfices brut du rail

Certains problèmes dans l'évaluation de la structure des coûts jaillissent pour des coûts qui ne sont pas directement liés au transport par rail, mais qui se retrouvent dans les bilans annuels des compagnies de chemins de fer.

Ces dépenses incluent :

- les coûts de l'amortissement des infrastructures et des bâtiments qui ne sont pas directement inclus dans les coûts de maintenance des locomotives et des wagons ;
- les salaires du personnel administratif pour l'infrastructure ;
- le parc immobilier ;
- la technologie et toute autre division occasionnellement incluse dans une compagnie ferroviaire parente ;
- les coûts de gestion et d'autres dépenses qui ne sont pas définis avec précision dans les bilans.

De tels coûts diffèrent suivant les sociétés de chemins de fer. La différence entre le prix du rail et la somme des coûts calculés par Recordit conduit au bénéfice brut qui est dans la plupart des cas négatif. La principale raison est que le bénéfice brut a été obtenu sans tenir compte des subventions reçues par les compagnies de chemin de fer.

Remarques

L'examen de différentes routes de longueur similaire peut révéler des prix différents dus à des facteurs tels que :

- les différences causées par :
 - les différences dans les coûts de ressources unitaires (coûts salariaux, diesel, électricité, ...)
 - les différences dans l'efficacité à fournir une infrastructure, des tractions ;
 - les différences dans les taux de chargement ;
 - différents niveaux de flux (influençant le partage des coûts d'infrastructure) ;
 - la nature du réseau de transport.
- variation de l'intensité de la compétition sur le réseau ;
- différents objectifs des organisations et les contraintes politiques.

Pour la même unité de chargement et pour le même trajet, les prix peuvent également être différents à cause de :

- l'emploi de différents opérateurs sur certains liens ;
- le moment de la journée ou de l'année (pics) ;
- une différence dans le service offert (priorité) ;
- le type de marchandise ;
- la fréquence des envois ;
- la situation de l'expéditeur.

1.2. Description des couloirs étudiés

La description détaillée du couloir Patras-Gothenburg se trouve au Tableau A1.1.7., celle du couloir Gène-Manchester au Tableau A1.1.8. et celle du couloir Barcelone-Warsaw au Tableau A1.1.9.

Pays	km	Bloc de transport intermodal	Distance (km)
Grèce	652	Pré-acheminement de l'expéditeur au port de Patras	210
		Transbordement au port de Patras	
		Cabotage maritime de Patras vers Brindisi	442
Italie	1253	Transbordement au Port de Brindisi	
		Acheminement par camion du Port de Brindisi vers le terminal de CEMAT	8
		Transbordement au terminal de CEMAT	
		Acheminement de Brindisi-Milan par train	895
		Transbordement à Milan au terminal de CEMAT	
		Acheminement Milan-Munich par train (Brenner)	350
Autriche	110	Acheminement Milan-Munich par train	110
Allemagne	1167	Acheminement Milan-Munich par train	97
		Transbordement et triage au terminal de Muenchen Riem	
		Acheminement Muenchen-Hambourg par train	842
		Transbordement et triage au terminal de Hambourg Billwerder	
		Acheminement de Hambourg Gothenburg par train	20
		Triage à la gare de Maschen	
		Acheminement de Hambourg Gothenburg par train	208
Danemark	362	Acheminement de Hambourg Gothenburg par train	109
		Triage au terminal de de Hambourg Gothenburg	
		Acheminement de Hambourg Gothenburg par train	253
Suède	352	Acheminement de Hambourg Gothenburg par train	302
		Transbordement au terminal de Gothenburg	
		Post-acheminement du terminal de Gothenburg au destinataire	50
Total	3.896		3.896

Tableau A1.1.7. La description détaillée du couloir Patras-Gothenburg.

Pays	km	Bloc de transport intermodal	Distance (km)
Italie	210	Transbordement au terminal de conteneurs Voltri au port de Gène	
		Triage et formation de train à Voltri-Sampierdarena	10
		Acheminement Gène-Chiasso par train (double traction)	25
		Acheminement Gène-Chiasso par train (simple traction)	175
Suisse	369	Acheminement de Chiasso-Bâle par train	364
		Transbordement au terminal de Bâle	
		Acheminement par train de Bâle vers le terminal du port de Rhin de Kleinhüningen	5
		Transbordement au terminal du port de Rhin de Kleinhüningen	
Allemagne	693	Acheminement par barge de Bâle à Rotterdam	693
Pays-Bas	167	Acheminement par barge de Bâle à Rotterdam (avec du fuel allemand)	167
		Transbordement au terminal de conteneurs du port de Rotterdam	
	205	Cabotage maritime de Rotterdam à Felixstowe	205
UK	495	Transbordement au port de Felixstowe	
		Acheminement de Felixstowe-Manchester par train	446
		Transbordement au terminal de Manchester Trafford	
		Post-acheminement vers Preston	49
Total	2.139		2.139

Tableau A1.1.8. La description détaillée du couloir Gène-Manchester.

Pays	km	Bloc de transport intermodal	Distance (km)
Espagne	215	Pré-acheminement de l'expéditeur vers le terminal de Barcelone	50
		Transbordement au terminal de Barcelone	
		Acheminement par train de Barcelone à Port Bou	165
		Transbordement au terminal de Port Bou	
France	793	Acheminement par train du Port Bou-Lyon-Turin	550
		Transbordement au terminal de Lyon Venissieux	
		Acheminement par train Port Bou-Lyon-Turin	243
Italie	834	Acheminement par train Port Bou-Lyon-Turin	100
		Transbordement au terminal de Turin Orbassano	
		Acheminement par train Turin-Verone	330
		Transbordement au terminal de Bologne	
		Acheminement par train Turin-Verone	117
		Transbordement au terminal de Verone Quadrante Europa	
		Acheminement par train Verone-Budapest	287
Slovaquie	305	Acheminement par train Verone-Budapest	305
Croatie	60	Acheminement par train Verone-Budapest	60
Hongrie	520	Acheminement par train Verone-Budapest	273
		Transbordement au terminal de Budapest Jozsefvaros	
		Acheminement par train Budapest-Warsaw	247
Slovaquie	116	Acheminement par train Budapest-Warsaw	116
Pologne	445	Acheminement par train Budapest-Warsaw	395
		Transbordement au terminal de Warszawa Praga	
		Post-acheminement du terminal de Warsaw au destinataire	50
Total	3.388		3.288

Tableau A1.1.9. La description détaillée du couloir Barcelone-Warsaw.

Les unités de chargement analysées pour le couloir intermodal Patras-Gothenburg sont des caisses mobiles de Classe A et C. Le couloir « tout à la route » est de 3.157 km + 442 km par voie maritime, c'est-à-dire une longueur totale de 3.599 km.

Les unités de chargement analysées pour le couloir intermodal Gène-Manchester sont des conteneurs 40 et 20 pieds. Le couloir « tout à la route » est de 1.691 km + 205 km par voie maritime, c.à.d. une longueur totale de 1.896 km.

Les unités de chargement analysées pour le couloir intermodal Barcelone-Warsaw sont des caisses mobiles. Le couloir « tout à la route » est de 2.726 km.

Les principales caractéristiques des trois couloirs européens étudiés sont reprises dans le Tableau A1.3.7.

Couloirs	Intermodal (heures)	Routes (heures)	Intermodal (km)	Routes (km)
Patras-Gothenburg	144,0	85,1	3896	3599
Gène-Manchester	223,5	52,0	2139	1896
Barcelone-Warsaw	158,8	88,1	3388	2726

Tableau A1.1.10. Couloirs étudiés dans Recordit

1.3. Acheminement routier sur longue distance

Le Tableau A1.1.11. est un exemple de calcul de coût pour l'acheminement routier d'une caisse mobile de classe A sur le couloir Patras-Gothenburg.

Hypothèses			
Nationalité du camion	Italienne		
Distance couverte par an	120.000 km		
Nombre d'heures de travail par an	3442.5 h		
Taux de chargement	85%		
Durée de vie (Amortissement)	5 ans		
Longueur du corridor (pré et post acheminement et miles nautiques exclus)	2.892 km		
Segment Autrichien+ Italien	2.285 km		
Segment Danois	607 km		
Temps de conduite pour les conducteurs	63,09 h		
Élément de coût	Coût total	Coût unitaire	Coût sur le couloir €/LU
Salaire du conducteur	47.500	13,798 €/h	1024,14
Coût d'investissement	116.255		
Annuité d'amortissement	26.976	0,193 €/km	657,79
Coût du fuel en Autriche		0,639 €/l	738,65
Coût du fuel au Danemark		0,763 €/l	234,29
Pneus du tracteur		0,039 €/km	132,01
Pneus de la remorque		0,044 €/km	149,62
Maintenance pièces de rechange		0,051 €/km	172,50
Maintenance (huiles)		0,004 €/km	12,32
Assurance	5.340	0,038 €/km	129,51
Taxe de circulation	628	0,004 €/km	13,63
Péage routier Italie	214,458	214,458 €/véh	252,30
Péage routier Autriche		0,870 €/km	109,52
Péage routier Oresund	98	98 €/véh	115,29
Péage routier Great Belt	97	97 €/véh	114,12
Coûts indirect			230,94

Tableau A1.1.11. Exemple de calcul de coût d'un acheminement routier sur longue distance.

Le coût total est donc de 4086,63 € pour 2285 km et pour une caisse mobile de 18 tonnes de chargement, ce qui donne un coût à la t.km de : 0,0994 €/t.km.

Le Tableau A1.1.12. détermine les coûts moyens pour l'acheminement routier sur longue distance.

	Coûts totaux	Distance (km)	Coûts par tonnes.km
Couloir Patras-Gothenburg Caisse mobile Classe A ou C			
Classe A	4.086,63 €	2.285	0,099 €
Classe C	2.050,08 €	2.285	0,075 €
Couloir Gène-Manchester conteneurs			
Conteneur 40'	2.136,25 €	1.641	0,072 €
Conteneur 20'	1.062,01 €	1.641	0,054 €
Couloir Barcelone-Warsaw Caisse mobile Classe A ou C			
Classe A	3.253,69 €	2.635	0,069 €
Classe C	1.625,76 €	2.635	0,051 €
Moyenne			
Classe A ou conteneur 40'	9.476,57 €	6.561,00	0,08 €/t.km
Classe C ou conteneur 20'	4.737,85 €	6.561,00	0,06 €/t.km

Tableau A1.1.12. Coûts moyens d'un acheminement routier sur longue distance

Les coûts par t.km varient entre 0,072 €/t.km et 0,099 €/t.km avec une moyenne de 0,080 €/t.km pour les caisses mobiles de classe A ou conteneur 40 pieds. Tandis que ceux-ci varient de 0,051 €/t.km à 0,075 €/t.km avec une moyenne de 0,060 €/t.km pour les caisses mobiles de classe C ou conteneur 20 pieds. Pour estimer les coûts du transport routier sur longue distance, nous pouvons également bénéficier des données gratuites disponibles sur le site du Comité National Routier français (CNR). La situation au 31 octobre 2006 était la suivante :

- le terme kilométrique : 0,434 €/km ;
- le terme horaire (1 heure de temps de service) : 20,11 €/h ;
- le terme journalier (coût de véhicule + coût de structure) : 152,70 €/jour.

De plus, le temps de service annuel est de 2.115 h et le nombre de jours d'activité par an de 214,4 jours.

Les vitesses observées dans l'étude de Recordit variant de 31 à 37 km/h, les coûts sont estimés pour une vitesse de 34 km/h.

Le coût total par km est donc de :

$$0,434 \times 20,11/34 + [152,70/(2115/214,4)]/34 = 0,434 + 0,591 + 0,455 = 1,48 \text{ €/km.}$$

L'indice CNR pour octobre 2006 est de 115,82 (base 100 = décembre 2000), le coût pour l'année 2000 est donc de : 1,278 €/km. Les coûts sont donc de 0,071 €/t.km pour les caisses mobiles de classe A ou conteneur 40 pieds et de 0,053 €/t.km pour les caisses mobiles de classe C ou conteneur 20 pieds, ces coûts sont donc compris dans l'intervalle de coûts estimés par Recordit.

1.4. Pré- et post-acheminements

Le procédé de calcul est identique à celui pour l'acheminement routier. La principale différence est que le taux de chargement utilisé est de 60 % au lieu de 85 %. Un taux de chargement de 85 % a cependant été utilisé pour le pré-acheminement entre Patras et Athènes en raison de la distance importante (240 km). Les coûts de pré- et post-acheminements sont repris dans le Tableau A1.1.13.

Patras-Athènes : 240 km		
	Classe A	Classe C
Coût (€)	257,98	129,01
Coût (€/t.km)	0,060	0,045
Gotenburg : 50 km		
	Classe A	Classe C
Coût (€)	136,49	68,25
Coût (€/t.km)	0,15	0,11
Manchester : 50 km		
	Conteneur 40'	Conteneur 20'
Coût (€)	114,71	57,37
Coût (€/t.km)	0,13	0,10
Barcelone : 50 km		
	Classe A	Classe C
Coût (€)	75,84	37,91
Coût (€/t.km)	0,08	0,06
Warswa : 50 km		
	Classe A	Classe C
Coût (€)	91,96	49,43
Coût (€/t.km)	0,10	0,08

Tableau A1.1.13. Coûts de pré- et post-acheminements.

Ces exemples indiquent que les coûts pour les pré- et post-acheminement sont plus élevés (en ne prenant pas en compte le cas particulier Patras-Athènes) que pour le transport routier sur longue distance. La raison est due à une utilisation pauvre du fonctionnement de véhicules (qui peuvent effectuer jusqu'à 50% de retour à vide) et des temps d'attente souvent importants aux terminaux.

Les coûts par t.km varient entre 0,084 €/t.km et 0,152 €/t.km avec une moyenne de 0,116 €/t.km pour les caisses mobiles de classe A ou conteneur 40 pieds. Tandis que ceux-ci varient

de 0,063 €/t.km à 0,114 €/t.km avec une moyenne de 0,089 €/t.km pour les caisses mobiles de classe C ou conteneur 20 pieds.

1.5. Acheminement ferroviaire

Exemple de calcul pour l'acheminement de Brindisi-Milan par train

L'acheminement entre Brindisi-Milan autorise une longueur maximum de train de 500 mètres et un tonnage maximum de 900 tonnes. Ces contraintes déterminent une composition de 23 wagons maximum. Le taux de chargement y est de 85%.

Amortissement de la locomotive

Celle-ci est obtenue par la formule suivante :

(Amortissement annuel sur 20 ans)/(Nombre de km par an)/(nombre d'unités de chargement x le taux de chargement) x (distance de Brindisi-Milan)

- Coût d'investissement d'une locomotive: 6.500.000.000 Lires
- Traction électrique de 3.000 V
- Amortissement sur 20 ans
- Nombre de km par an : 120.000 km/an
- Nombre d'unités de chargement : 23 pour des caisses mobiles de classe A
- $266.288 \text{ €} / (120.000 \text{ km/an} \times 23 \text{ LU} \times 85\%) \times 895 \text{ km} = 101,57 \text{ €/LU classe A}$

Maintenance de la locomotive

La maintenance est de 720 Lires/km

D'où 17,3 €/LU pour la distance de Brindisi-Milan

Amortissement des wagons

Celle-ci est obtenue par la formule suivante :

(Amortissement annuel sur 20 ans)/(Nombre de km par an)/(nombre d'unités de chargement par wagon x le taux de chargement) x (distance de Brindisi-Milan)

Coût d'investissement d'un wagon: 100.000.000 Lires

Amortissement sur 20 ans

Nombre de km par an : 100.000 km/an

Pour les 895 km : 41,91 €/LU

Maintenance des wagons

La maintenance est 116 Lires/km

D'où 64,11 €/LU pour la distance de Brindisi-Milan

Consommation électrique

Ces coûts peuvent être obtenus par la formule suivante :

Consommation en KWh/t.km x poids du train x distance x coût par Kwh/(nombre d'unités de chargement x taux de chargement)

Dans le cas de figure :

$(0,026\text{KWh/t.km} \times 750 \text{ t} \times 895) \times 0,055 \text{ €}/(23\text{LU} \times 0,85)=35,47 \text{ €/LU}$

Salaire, sécurité sociale et bonus des conducteurs

Le Tableau A1.1.14. reprend les temps de conduite et temps supplémentaires pour l'acheminement ferroviaire entre Brindisi-Milan.

	Heures
Temps de conduite	14,15
Temps supplémentaire avant le départ du train	1
Temps supplémentaires après l'arrivée	0,75
30 minutes avant et après un changement d'équipe (1 équipe est composée de 2 conducteurs et il y a 5 équipes entre Brindisi et Milan)	4
Nombre d'heures total la journée	7,25
Nombre d'heures total la nuit	12,65

Le Tableau A1.1.14. Temps de conduite et temps supplémentaires pour l'acheminement ferroviaire entre Brindisi-Milan

Salaire moyen des conducteurs : 2.685 €/mois (5.200.000 Lires).

Salaire pour un conducteur de nuit : 81.300 Lires/h.

Salaire pour un conducteur de jour : 55.600 Lires/h.

Le coût salarial (nuit et jour) par unité de chargement est obtenu par la formule suivante :

[(salaire horaire x le nombre de conducteurs x le nombre d'heures de conduite)/(nombre d'unité chargée x le taux de chargement)] x distance Brindisi-Milan.

Dans ce cas,

Nuit : $(81300 \text{ Lires/h/conducteur} \times 2 \text{ conducteurs} \times 12,7\text{h})/(23 \times 0,85)=55,44 \text{ €/LU}$.

Jour : $(55600 \text{ Lires/h/conducteur} \times 2 \text{ conducteurs} \times 7,25\text{h})/(23 \times 0,85)=21,64 \text{ €/LU}$.

Surveillance

Chaque transport en train, que ce soit de passagers ou de marchandises, nécessite un service de surveillance au départ de la gare ainsi que pendant la durée du trajet. Ce service consiste à surveiller les voies, à s'occuper de la signalisation,... Pour un train de marchandises, un service supplémentaire consiste à vérifier les freins et le chargement au départ et à chaque gare intermédiaire. Les compagnies ferroviaires estiment habituellement que cet élément de coût est proportionnel à la distance couverte par le train. Pour Trenitalia, ce coût est estimé à 330 Lires/km.

Dans ce cas, le coût de la surveillance est donné par :

330 Lires/km x 895/23 x 0,85=7,93 €/LU pour des caisses mobiles de classe A.

Charge d'utilisateur de la voie ferroviaire

Le montant de la charge d'utilisateur de la voie ferroviaire est fixé en Italie, depuis 2000, par un décret du ministre des transports. Cette charge est de 721 Lires/km sur ce segment, ce qui revient à 17,44 €/LU pour des caisses mobiles de classe A.

Autres coûts

Les autres coûts sont estimés à : 234,25 €/LU.

Le Tableau A1.1.15. détermine les coûts moyens pour l'acheminement ferroviaire sur longue distance.

	Coûts totaux	Distance (km)	Coûts par tonnes.km
Couloir Patras-Gothenburg Caisse mobile Classe A ou C			
Classe A	2.866,13 €	3.186	0,050 €
Classe C	1.425,83 €	3.186	0,037 €
Couloir Gène-Manchester conteneurs			
40'	952,62 €	990	0,053 €
20'	475,65 €	990	0,040 €
Couloir Barcelone-Warsaw Caisse mobile Classe A ou C			
Classe A	2.395,77 €	3188	0,042 €
Classe C	1.198,92 €	3188	0,031 €
Moyenne			
Classe A ou conteneur 40'	6.214,52 €	7364	0,0469 €/t.km
Classe C ou conteneur 20'	3.100,40 €	7364	0,0351 €/t.km

Tableau A1.1.15. Coûts moyens d'un acheminement routier sur longue distance.

Les coûts par t.km varient entre 0,042 €/t.km et 0,053 €/t.km avec une moyenne de 0,0469 €/t.km pour les caisses mobiles de classe A ou conteneur 40 pieds. Tandis que ceux-ci varient de 0,031 €/t.km à 0,040 €/t.km avec une moyenne de 0,035 €/t.km pour les caisses mobiles de classe C ou conteneur 20 pieds. Ces coûts ont été estimés pour des locomotives électriques. Or, la base de données Eurostat, indique que, pour l'ensemble des pays concernés par notre étude, la longueur des lignes électrifiées est, pour l'année 2000, équivalente à la longueur des lignes non électrifiées. La même proportion existe pour le rapport des locomotives diesel et électrique. Cependant, d'après le rapport final du Ministère de la Mobilité des Pays-Bas (2005), les coûts estimés pour des locomotives électriques et diesel sont équivalents. Le coût pour un train de conteneur en 2002 est de 0,043 €/t.km pour les conteneurs 40 pieds et de 0,0325 €/t.km pour les conteneurs 20 pieds, ce qui est bien compris dans l'intervalle de coûts estimés par Recordit.

1.6. Acheminement fluvial

Calcul pour la section entre Bâle et Rotterdam

Une barge a une capacité de 200 EVP (ou 100 conteneurs de 40 pieds) et son taux de chargement est estimé à 75%. L'unité de chargement est le conteneur 40 pieds. Un cycle aller-retour complet prend 2 semaines.

Coût du fuel

Le coût pour transporter un conteneur de 40 pieds en sachant que le coût du fuel est de 0,35 €/l et que la consommation d'une péniche est de 8 litre/h en aval est de :

$$0,35 \text{ €/l} \times 8 \text{ l/km} / (100 \times 0,75) \times 860 \text{ km} = 32,11 \text{ €/LU.}$$

Coût du personnel

La charge salariale totale d'un équipage est de 360.000 DFL par an, sachant que le cycle aller-retour est de 2 semaines, est :

$$[1 \text{ année} / (52 \text{ semaines} / 2) \times 100 \times 0,75 \times 2 \text{ voyages}] \times 360.000 \text{ DFL/an} = 41,89 \text{ €/LU.}$$

Amortissement et intérêt

Le coût du capital pour une barge s'élève à 780.000 DFL/an et donc pour le trajet, le coût est de :

$$[1 \text{ an} / (52 \text{ semaines} / 2) \times 100 \times 0,75 \times 2 \text{ voyages}] \times 780.000 \text{ DFL} = 90,76 \text{ €/LU.}$$

Coûts de maintenance

Les coûts de maintenance s'élèvent à 70 DFL par heure de navigation, pour le trajet, le coût est de :

$$[(3 \text{ jours} \times 24 \text{ h}) / 100 \times 0,75] \times 70 \text{ DFL/h} = 30,49 \text{ €/LU.}$$

Droits de navigation, de quai et de port

La somme de ces droits est de 264,70 € par trajet, pour le trajet, le coût est de :

$$264,70 \text{ €} / (100 \times 0,75) = 3,53 \text{ €/LU.}$$

Autres coûts

Les autres coûts s'élèvent à 78.500 DFL par an incluant entre autre l'assurance :

$$[1 \text{ année} / (52 \text{ semaines} / 2) \times 100 \times 0,75 \times 2 \text{ voyages}] \times 78500 \text{ DFL} = 9,13 \text{ €/LU.}$$

Coûts indirects

Les coûts indirects sont estimés à 70.000 DFL par an :

$$[1 \text{ année} / (52 \text{ semaines} / 2) \times 100 \times 0,75 \times 2 \text{ voyages}] \times 70.000 \text{ DFL} = 8,14 \text{ €/LU.}$$

Le coût à la t.km est donc $216.05 / (18 \times 860) = 0,014 \text{ €/t.km}$ pour un conteneur de 40 pieds et de $108,02 / (12 \times 860) = 0,01 \text{ €/t.km}$ pour un conteneur de 20 pieds.

En ce qui concerne l'acheminement fluvial, l'étude Recordit n'effectue le calcul de coûts que pour la section entre Bâle et Rotterdam. Géographiquement, le marché de navigation intérieure de conteneur est concentré puisqu'il consiste essentiellement à relier les ports d'Anvers et de Rotterdam avec leur hinterland aux Pays-Bas, en Belgique et le long du Rhin en Allemagne. Les statistiques d'Eurostat montrent que les tonnes transportées entre ces trois pays et, dans une moindre mesure, la France représente 97% des transports internationaux par voies d'eau. Pour valider ces coûts de transport en navigation intérieure, nous avons également utilisé les données du rapport PINE « Prospects of Inland Navigation within the enlarged Europe ».

Le projet « PINE » s'est focalisé sur le transport de fret par voies navigables. La situation des quatre axes principaux de navigation intérieure suivants a été analysée :

- ***Le Rhin et ses affluents*** (relie les Pays-Bas, la partie Centrale Ouest de l'Allemagne, la Belgique, le Luxembourg, la France et la Suisse)
- ***Le corridor Est-Ouest*** (relie les parties Nord et Est de l'Allemagne, la Pologne et la République tchèque)
- ***Le corridor du Danube*** (relie le Sud-Est de l'Allemagne, l'Autriche, la Slovaquie, la Hongrie, la Roumanie et la Bulgarie)
- ***Le corridor Nord-Sud*** (relie les Pays-Bas, la Belgique et la France).

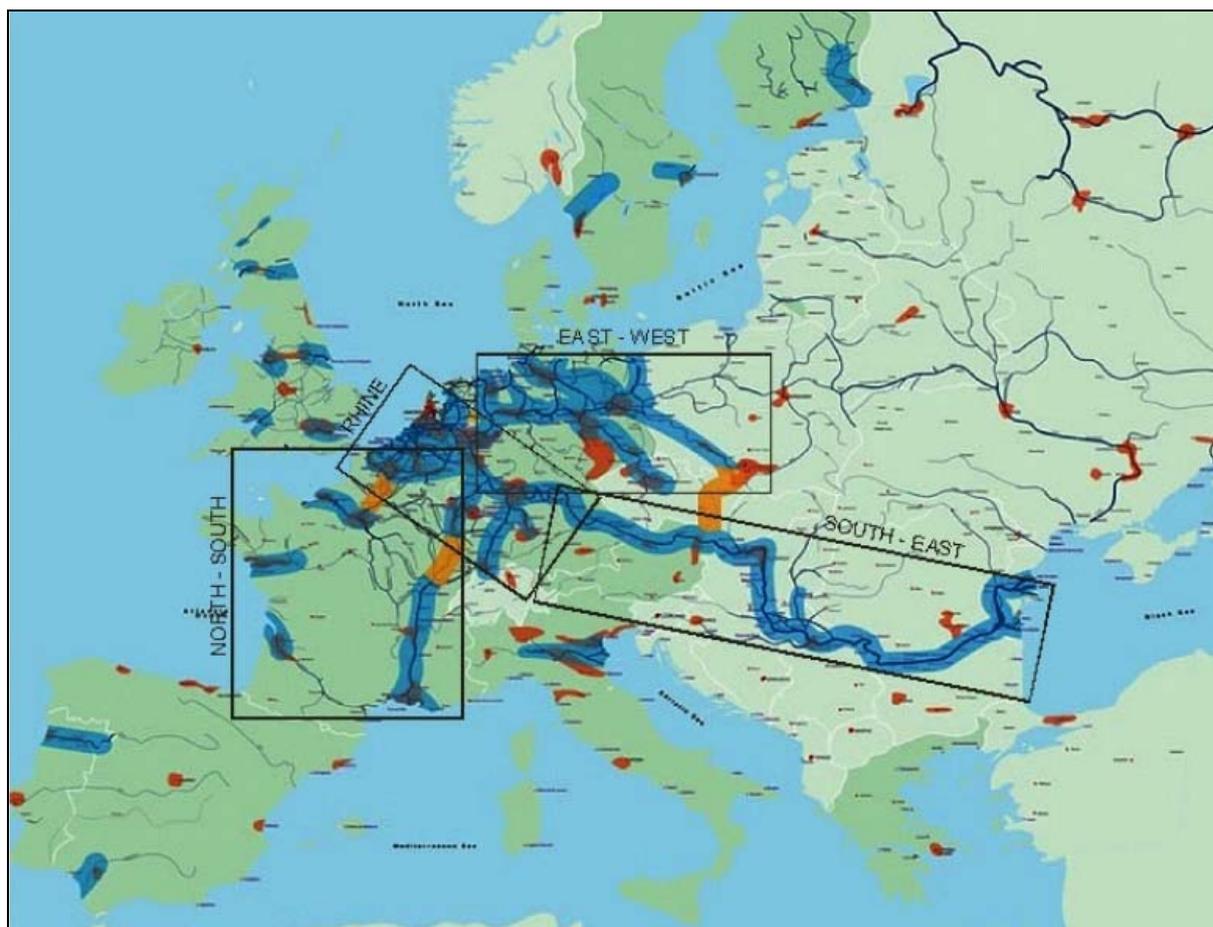


Figure A1.1. Principaux axes de navigation intérieure en Europe.

Source : Inland Navigation Europe (INE)

Comme pour les autres modes de transport, énormément de facteurs peuvent influencer les coûts. Il est nécessaire de faire un choix raisonnable et pragmatique des facteurs importants à considérer. Dans la majorité des cas les coûts des différents composants ne sont pas connus, puisque, pour des raisons concurrentielles, les compagnies ne les éditent pas. En outre, beaucoup de compagnies d'Europe de l'Est sont actuellement dans un processus de transition causant probablement des changements des structures d'organisation et de coûts.

Des évaluations de coûts ont été effectuées dans un calcul modèle en deux étapes. Des coûts pour un bateau intérieur sont scindés en coûts fixes et coûts d'opérations. Les coûts fixes comprennent les éléments suivants (coûts annuels par navire) :

- salaire de l'équipage comprenant les lois sociales ;
- maintenance et réparation ;
- amortissement ;
- intérêts ;
- assurances.

Ces dépenses sont en grande partie indépendantes des opérations du bateau. En tenant compte du nombre de jours de fonctionnement par année, on peut en déduire les coûts par heure. L'étude des coûts du rapport PINE compare les coûts des bateaux naviguant un temps équivalent par année : 300 jours d'utilisation effective du bateau et 14 h de navigation par jour.

Du point de vue du coût du personnel, les éléments jouant un rôle sur les coûts sont :

- équipage minimum requis ;
- la taille du bateau ;
- la qualification du personnel ;
- la nationalité du personnel ;
- business familial ou non.

Les coûts fixes se montent en moyenne pour l'ensemble des péniches étudiées et pour une vitesse de 12 km/h à : 0,0024 €/t.km.

Les coûts variables de navigation sont influencés par les coûts d'infrastructure ainsi que par les coûts de consommation qui sont calculés d'une manière simplifiée avec comme paramètres : la consommation de carburant moyenne par heure, le prix de carburant et un supplément pour les lubrifiants. Les coûts de consommation du rapport PINE sont estimés sur base d'un taux d'utilisation moteur de 60%. Les coûts variables s'élèvent en moyenne pour l'ensemble des péniches étudiées et pour une vitesse de 12 km/h à 0,0070 €/t.km.

L'ensemble des coûts fixes et des coûts variables est donc 0,0094 €/t.km. En supposant un taux de chargement de 75%, identique au taux de chargement de l'étude Recordit, on obtient un coût de 0,013 €/t.km. Cette valeur très proche de la valeur obtenue dans l'étude de Recordit (0,014 €/t.km pour les conteneurs 40 pieds) nous permet de valider le coût de l'acheminement fluvial.

1.7. Coûts de triage et de formation de train

Exemple de calcul pour la formation de train à la gare de triage de Brindisi

L'acheminement entre Brindisi-Milan autorise une longueur maximum de train de 500 m et le tonnage maximum de 900 tonnes. Ces contraintes déterminent une composition de 23 wagons maximum. Le taux de chargement y est de 85%. Le nombre d'heures opérationnelles annuelles est de 2000 et il y a 250 jours ouvrables de 8 heures de travail. La durée de

l'opération de triage est estimée à 40 minutes. Le calcul est effectué pour des caisses mobiles de classe A.

Amortissement de la locomotive pour la formation des trains

Le coût d'investissement pour ce genre de locomotive est de 1.500.000.000 Lires amorti sur 30 ans ; l'amortissement annuel est de 91.385.000 Lires. Le coût d'amortissement peut donc être calculé par la formule suivante :

[Amortissement annuelle de 30 ans/nombre heures opérationnelles par an] x le temps de l'opération/(le nombre d'unités de chargement x le taux de chargement)

Dans ce cas de figure, on obtient :

$$(91.385.000 \text{ Lires/an}/2000\text{h/an}) \times 0,6 \text{ h}/23 \times 0,85 = 0,81 \text{ €/LU.}$$

Maintenance de la locomotive pour la formation des trains

Le coût de maintenance pour une locomotive diesel est de 8.000.000Lires/an, ce qui conduit à 0,07 €/LU.

Salaires des attelers

Le service de triage nécessite deux personnes dont le salaire brut est de 55.600 Lires par heure opérationnelle (moyenne effectuée en tenant compte de pourcentage du salaire de nuit).

Le montant du salaire pour une équipe est donnée par

[le salaire horaire par attaleur x le nombre d'attelers dans une équipe] x le temps de l'opération/(le nombre d'unités de chargement x le taux de chargement)

$$\text{Dans ce cas : } (55.600 \text{ Lires} \times 2) \times 0,6/(23 \times 0,85)=1,89 \text{ €/LU.}$$

Salaire du personnel de contrôle du triage

Dans les coûts de la formation de train sont inclus les coûts pour l'équipe de contrôle supervisant les opérations. Le coût moyen de l'équipe de contrôle est estimé à 22 €/h et donc, on obtient un coût de : 22 € x 0,6/23 x 0,85=0,74 €/LU

Coût en diesel pour la locomotive pour la formation des trains

Le prix moyen du diesel est de 686 Lires/litre (Hors TVA). La consommation diesel de la locomotive est de 40 l/h, et donc le coût est :

[Consommation horaire x coût du diesel par litre] x temps des opérations/(le nombre d'unités de chargement x le taux de chargement) = 40 x 686 x 0,6/23 x 0,85=0,49 €/LU.

Le coût à la gare de triage revient donc à : 4 €/LU.

Le Tableau A1.1.16. reprend les coûts aux gares de triage étudiées dans Recordit.

Couloir Patras-Gothenburg Caisse mobile		
	Classe A	Classe C
Brindisi	4 €	1,99 €
Milan	3,23 €	1,62 €
Milan 2	5,33 €	2,66 €
Munich	2,15 €	0,89 €
Hambourg	6,93 €	3,47 €
Mashen	4,07 €	0,69 €
Flensburg	11 €	5,50 €
Malmoe	13,66 €	3,71 €
Couloir Gène-Manchester conteneur		
	Conteneur 40'	Conteneur 20'
Voltri	3,81 €	1,91 €
Voltri 2	8,26 €	5,87 €
Sampierdinarena	4,21 €	2,11 €
Chiasso	3,88 €	1,62 €
Couloir Barcelone-Warsaw Caisse mobile		
	Classe A	Classe C
Port Bou	3,24 €	1,625 €
Lyon	3,24 €	1,625 €
Lyon 2	3,4 €	1,69 €
Turin	4,11 €	1,21 €
Turin 2	4,555 €	2,28 €
Bologne	4,555 €	2,28 €
Bologne 2	3,61 €	1,805 €
Vérone	3,61 €	1,805 €
Vérone 2	6,4 €	3,19 €

Tableau A1.1.16. Coûts aux gares de triage étudiées dans Recordit.

Les coûts par tonne varient entre 0,119 €/t et 0,759 €/t avec une moyenne de 0,284 €/t pour les caisses mobiles de classe A ou conteneur 40 pieds. Tandis que ceux-ci varient de 0,058 €/t à 0,89 €/t avec une moyenne de 0,197 €/t pour les caisses mobiles de classe C ou conteneur 20 pieds.

1.8. Coûts de transbordement

1.8.1. Rail-Route

Le calcul est valable pour chaque type d'unités de chargement puisque chaque unité de chargement nécessite les mêmes opérations de manutention pour être transbordée de la route au rail.

Exemple de calcul pour le transbordement au terminal de Brindisi CEMAT rail-route

Ce terminal est équipé de deux chariots à portique et 14.227 unités de chargement intermodales ont été manipulées en 2000.

Amortissement des grues

Coût d'investissement pour un reach stacker est évalué à 500.000€

Coût d'amortissement :

Amortissement annuelle (15 ans) x nombre de grues/nombre d'unités de chargement par an
 $= 47.573 \times 2/14.227 = 6,69 \text{ €/LU}$.

Maintenance et réparation de la grue

Le coût de la maintenance par an est estimé à 7% des coûts d'investissement :

$7\% \times 2 \text{ grues} \times 500.000 \text{ €} = 70.000 \text{ €/an}$

Ce qui correspond à 4,92 €/LU.

Coûts du personnel

3 travailleurs sont requis pour un terminal de moins de 20000 LU/an

Salaires moyens des ouvriers des terminaux : 56.000.000 Lires/mois

$56.000.000 \text{ Lires/an} \times 3 \text{ ouvriers} / 14.772 \text{ LU/an} = 6,2 \text{ €/LU}$.

Autres coûts pour le personnel

Recordit émet l'hypothèse que le terminal emploie 6 personnes de plus pour la maintenance, pour le personnel administratif et la gestion. En supposant que le salaire moyen est de 70.000.000 Lires/an, on obtient un coût de 15,5 €/LU.

Autres coûts

2,53 €/LU.

Le Tableau A1.1.17. reprend les coûts de transbordement aux terminaux rail-route étudiés dans Recordit.

Couloir Patras-Gothenburg Caisse mobile Classe A ou C			
Brindisi		Gothenburg	
Classe A	Classe C	Classe A	Classe C
35,84 €	35,84 €	60,07 €	39,72 €
1,99 €/t	2,99 €/t	3,34 €/t	3,31 €/t
Couloir Gène-Manchester Conteneur 40' ou 20'			
Bale		Manchester	
Conteneur 40'	Conteneur 20'	Conteneur 40'	Conteneur 20'
48,65 €	48,65 €	30 €	30 €
2,70 €/t	4,05 €/t	1,67 €/t	2,5 €/t
Couloir Gène-Manchester Caisse mobile Classe A ou C			
Warszawa			
Classe A	Classe C		
51,49 €	43,17 €		
2,86 €/t	3,60 €/t		

Tableau A1.1.16. Coûts de transbordement aux terminaux rail-route étudiés dans Recordit.

Les coûts par tonne varient entre 1,667 €/t et 3,337 €/t avec une moyenne de 2,512 €/t pour les caisses mobiles de classe A ou conteneur 40 pieds. Tandis que ceux-ci varient de 2,500 €/t à 4,054 €/t avec une moyenne de 3,290 €/t pour les caisses mobiles de classe C ou conteneur 20 pieds.

1.8.2. Rail-Rail

Le Tableau A1.1.18. reprend les coûts de transbordement aux terminaux rail-rail étudiés dans Recordit.

Couloir Patras-Gothenburg Caisse mobile Classe A ou C					
	Milan	Munich	Hambourg		
Coût du transbordement :	14,54 €	17,56 €	33,01 €		
Classe A	0,81 €/t	0,98 €/t	1,83 €/t		
Classe C	1,21 €/t	1,46 €/t	2,75 €/t		
Couloir Barcelone-Warszaw Caisse mobile Classe A ou C					
	Port Bou	Lyon	Turin	Verone	Budapest
Coût du transbordement :	28 €	28 €	35,82 €	14 €	34 €
Classe A	1,56 €/t	1,56 €/t	1,99 €/t	0,77 €/t	1,89 €/t
Classe C	2,33 €/t	2,33 €/t	2,99 €/t	1,15 €/t	2,83 €/t

Tableau A1.1.17. Coûts de transbordement aux terminaux rail-route étudiés dans Recordit

Le coût de transbordement rail-rail varie pour les caisses mobiles de classe A les coûts à la tonne varient entre 0,766 €/t et 1,990 €/t avec une moyenne de 1,422 €/t et pour les caisses mobiles de classe C les coûts à la tonne varient entre 1,148 €/t et 2,985 €/t avec une moyenne de 2,132 €/t.

1.8.3. Rail-Voie d'eau

L'étude Recordit a estimé un coût de transbordement rail-voie d'eau (sur le Rhin) de 45 € pour un transfert de conteneur 20 pieds ou 40 pieds à Bâle. C'est-à-dire un coût à la tonne de 3,750 €/t pour les conteneurs de 20 pieds et un coût à la tonne de 2,500 €/t pour les conteneurs de 40 pieds.

1.9. Coûts de chargement-déchargement

Les dépenses soutenues par l'expéditeur ou le destinataire sont supposées être essentiellement dues aux coûts du personnel de l'unité logistique ainsi qu'à d'autres coûts d'administration et d'organisation.

Coût total : 1,230 €/t pour une caisse mobile de classe A et à 1,288 €/t pour une caisse mobile de classe C.

Coût total : 1,234 €/t pour un conteneur 40 pieds et à 1,507 €/t pour conteneur 20 pieds.

Coût total : 1,268 €/t pour une caisse mobile de classe A et à 1,333 €/t pour une caisse mobile de classe C.

Les coûts par tonne varient entre 1,230 €/t et 1,268 €/t avec une moyenne de 1,244 €/t pour les caisses mobiles de classe A ou conteneur 40 pieds. Tandis que ceux-ci varient de 1,288 €/t.km à 1,507 €/t avec une moyenne de 1,376 €/t pour les caisses mobiles de classe C ou conteneur 20 pieds.

1.10. Coûts de l'unité de chargement

Couloir Patras-Gothenburg Caisse mobile Classe A ou C

Amortissement des unités de chargement

Le coût d'investissement d'une nouvelle caisse mobile de classe A ou C est de 12.500€ dépréciée en 5 ans, ce qui conduit à un coût d'amortissement de 2.500 €/an. Le coût total sur le couloir Patras-Gothenburg est calculé comme suit :

[Annuité d'amortissement /jours opérationnels] x temps de transit entre Patras-Gothenburg.

Puisque le nombre de jours opérationnels par an est estimé à 250 et le temps de transit est de 6 jours, le coût d'amortissement de l'unité de chargement est de 60 €.

Maintenance de l'unité de chargement

La maintenance pour une caisse mobile est estimée à 5 % de l'annuité d'amortissement, le coût de maintenance pour l'entièreté du couloir est donc de 3 €.

Autres coûts

Le montant des coûts administratifs et organisationnels le long du couloir est estimé à 150,41 €/LU pour une caisse mobile de classe A et à 89,58 €/LU pour une caisse mobile de classe C.

Coût total : 0,003 €/t.km pour une caisse mobile de classe A et à 0,003 €/t pour une caisse mobile de classe A.

Couloir Gène-Manchester Conteneur 40 pieds ou 20 pieds

Amortissement des unités de chargement

Le coût d'amortissement d'un conteneur 40 pieds est de 8.500 Lires/jour (4,39 €/jour) et de 6.500 Lires/jour (3,36 €/jour) pour un conteneur 20 pieds.

Maintenance de l'unité de chargement

La maintenance pour un conteneur 40 pieds est de 1,76 €/LU et de 1,34 €/LU pour un conteneur 20 pieds.

Autres coûts

Pour un conteneur 40 pieds les autres coûts s'élèvent à 100,79 €/LU et à 63,21 €/LU pour un conteneur 20 pieds.

Coût total : 0,003 €/t.km pour une caisse mobile de classe A et à 0,003 €/t.km pour une caisse mobile de classe A.

Couloir Barcelone-Warsaw Caisse mobile Classe A ou C

Amortissement des unités de chargement

Le coût d'investissement d'une nouvelle caisse mobile de classe A ou C est de 12.500 € dépréciée en 5 ans, ce qui conduit à un coût d'amortissement de 2.500 €/an. Puisque le nombre de jours opérationnels par an est estimé à 250 et le temps de transit est de 8 jours, le coût d'amortissement de l'unité de chargement est de 80 €.

Maintenance de l'unité de chargement

La maintenance pour une caisse mobile est estimée à 5 % de l'annuité d'amortissement, le coût de maintenance pour l'entièreté du couloir est donc de 4 €.

Autres coûts

Ces coûts sont estimés à 156,65 €/LU pour une caisse mobile de classe A et à 94,70 €/LU pour une caisse mobile de classe C.

Coût total : 0,004 €/t.km pour une caisse mobile de classe A et à 0,004 €/t.km pour une caisse mobile de classe A.

Ces coûts sont moindres dans le cas du transport tout à la route puisque la longueur et la durée du trajet sont également plus petits. Cependant, la plus grosse partie de l'ensemble des coûts provient de la catégorie « autres coûts » qui n'est pas disponible pour un transport tout à la route. Le manque d'informations sur ces coûts ainsi que leur minime importance par rapport aux autres coûts de transport nous conduisent à formuler l'hypothèse simplificatrice : les coûts de l'unité de chargement seront de 0,003 €/t.km pour chaque mode de transport.

2. Coûts annuels des terminaux rail-route.

Le Tableau A1.2.1. reprend les coûts annuels des terminaux rail-route. Ceux-ci sont classés en fonction du nombre d'unités de chargement qui peuvent y être transbordées.

ITU/jour	ITU/an	Coût minimum par ITU	Coût maximum par ITU	Coût minimum du terminal par an	Coût maximum du terminal par an	Coût moyen du terminal par an
100	25000	60,00 €	60,00 €	1.500.000 €	1.500.000 €	1.500.000 €
200	50000	39,00 €	55,00 €	1.950.000 €	2.750.000 €	2.350.000 €
300	75000	38,00 €	47,50 €	2.850.000 €	3.562.500 €	3.206.250 €
400	100000	34,00 €	40,00 €	3.400.000 €	4.000.000 €	3.700.000 €
500	125000	32,00 €	44,00 €	4.000.000 €	5.500.000 €	4.750.000 €
600	150000	31,00 €	39,00 €	4.650.000 €	5.850.000 €	5.250.000 €
700	175000	28,50 €	35,50 €	4.987.500 €	6.212.500 €	5.600.000 €
800	200000	32,00 €	33,00 €	6.400.000 €	6.600.000 €	6.500.000 €
900	225000	30,50 €	32,00 €	6.862.500 €	7.200.000 €	7.031.250 €
1000	250000	29,00 €	35,00 €	7.250.000 €	8.750.000 €	8.000.000 €

Tableau A1.2.1. Coûts annuels des terminaux rail-route

3. Economie d'échelle pour les acheminements par train

Le Tableau A1.3.1. reprend le taux de chargement sur les différentes connexions étudiées dans Recordit.

Connexion	Taux de chargement	Nombre de kilomètres
Brindisi-Milan	85 %	895 km
Milan-Munich	75 %	650 km
Munich-Hambourg	80 %	842 km
Hambourg-Maschen	100 %	20 km
Maschen-Göteborg	75 %	872 km
Gene-Chiasso	50 %	200 km
Chiasso-Bâle	50 %	364 km
Felixstowe-Manchester	75 %	872 km
Barcelone-Port Bou	90 %	165 km
Port Bou-Lyon	85 %	550 km
Lyon-Turin	85 %	343 km
Turin-Bologne	85 %	330 km
Bologne-Vérone	85 %	117 km
Vérone-Villa Opicina	75 %	287 km
Segment slovène	75 %	305 km
Segment croate	75 %	60 km
Segment hongrois vers Budapest	75 %	273 km
Segment hongrois vers Warsaw	75 %	247 km
Segment slovaque	75 %	116 km
Segment polonais	75 %	395 km

Tableau A1.3.1. Taux de chargement sur les différentes connexions ferroviaires.

Le Tableau A1.3.2. détermine la réduction de coût qui peut être réalisée sur les deux connexions où le taux de chargement est de 50% et par unité de chargement.

Gene-Chiasso	Taux de chargement	
Par 40'	50%	100%
Amortissement de la locomotive	33,28	16,64
Maintenance et réparation de la locomotive	5,67	2,835
Amortissement des wagons	18,2	18,2
Maintenance des wagons	16,24	16,24
Salaire du personnel	40,02	20,01
Coûts d'électricité	21,45	10,725
Rail track user charge	17,73	17,73
Autres coûts	104,83	104,83
Somme	257,42	207,21
Pourcentage de réduction	20%	
Par 20'	50%	100%
Amortissement de la locomotive	16,64	8,32
Maintenance et réparation de la locomotive	2,835	1,4175
Amortissement des wagons	9,1	9,1
Maintenance des wagons	8,12	8,12
Salaire du personnel	20,01	10,005
Coûts d'électricité	10,725	5,3625
Rail track user charge	8,865	8,865
Autres coûts	104,83	104,83
Somme	181,125	156,02
Pourcentage de réduction	14%	
Chiasso-Bâle		
Par 40'	50%	100%
Amortissement de la locomotive	72,8	36,4
Maintenance et réparation de la locomotive	15,05	7,525
Amortissement des wagons	18,2	18,2
Maintenance des wagons	10,92	10,92
Salaire du personnel	48,75	24,375
Coûts d'électricité	54,26	27,13
Rail track user charge	30,83	30,83
Autres coûts	200,8	200,8
Somme	451,61	356,18
Pourcentage de réduction	21%	
Par 20'	50%	100%
Amortissement de la locomotive	36,4	18,2
Maintenance et réparation de la locomotive	7,525	3,7625
Amortissement des wagons	9,1	9,1
Maintenance des wagons	5,46	5,46
Salaire du personnel	24,375	12,1875
Coûts d'électricité	27,13	13,565
Rail track user charge	15,415	15,415
Autres coûts	200,8	200,8
Somme	326,205	278,49
Pourcentage de réduction	15%	

Tableau A1.3.2. Détermination de la réduction de coût possible sur différentes connexions ferroviaires

Annexe 2

Formulations du problème du p -hub médian tenant compte de l'existence des hubs déjà implantés.

La fonction objectif (3.8) doit minimiser le coût total de transport. Cette formulation suppose qu'aucun hub ne soit déjà implanté. Cependant, certains hubs existent ; la formulation suivante permet de minimiser le coût total de transport en localisant p hubs (p est le nombre de nouveaux hubs à implanter) en tenant compte du fait que p' hubs sont déjà implantés. Nous allons diviser l'ensemble des localisations en : I : l'ensemble des localisations potentielles, J : l'ensemble des hubs existants et T l'ensemble complet des sites : $T=I \cup J$. Nous supposons que $I \cap J=\emptyset$: ce qui interdit l'implantation d'un deuxième hub au même site. L'objectif est donc de minimiser le coût total en trouvant p localisations parmi l'ensemble I et d'affecter les utilisateurs parmi les $p + p'$ localisations.

Variables de décision:

$X_{ij} = 1$ si le nœud i est affecté au hub localisé au nœud $j \forall i, j \in T$

0 sinon

$Y_{km}^i \geq 0 \forall i, k, m \in T$

Minimiser:

$$\sum_{i \in T} \sum_{k \in T} C_{ik} X_{ik} (\chi O_i + \delta D_i) + \sum_{i \in T} \sum_{k \in T} \sum_{m \in T} \alpha C_{km} Y_{km}^i \quad (\text{A2.1})$$

Sous contraintes:

$$X_{ij} = 1 \quad \forall i \in J \quad (\text{A2.1.1})$$

$$\sum_{x \in I} X_{kk} = p \quad (\text{A2.1.2})$$

$$\sum_{k \in T} X_{ik} = 1 \quad \forall i \in T \quad (\text{A2.1.3})$$

$$X_{ik} \leq X_{kk} \quad \forall i, k \in T \quad (\text{A2.1.4})$$

$$\sum_{m \in T} Y_{km}^i - \sum_{m \in T} Y_{mk}^i = O_i X_{ik} - \sum_{j \in T} W_{ij} X_{jk} \quad \forall i, k \in T \quad (\text{A2.1.5})$$

$$X_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in T \quad (\text{A2.1.5})$$

$$Y_{km}^i \geq 0 \quad \forall i, k, m \in T \quad (\text{A2.1.6})$$

La contrainte supplémentaire (A2.1.1) stipule les hubs déjà implantés. Les autres contraintes sont identiques aux contraintes (3.8.1) à (3.8.6).

Annexe 3

Groupe et Chapitre NSTR

Le tableau de l'annexe 3 indique les groupes NST-R appartenant à chaque chapitre ainsi qu'une description du type de marchandises.

Groupe de marchandises	Chapitre NST-R	Description
1	0	Céréales
2		Pommes de terre, autres légumes frais ou congelés, fruits frais
3		Animaux vivants, betteraves à sucre
4		Bois et liège
5		Matières textiles et déchets, autres matières premières d'origine animale ou végétale
6	1	Denrées alimentaires et fourrages
7		Oléagineux
8	2	Combustibles minéraux solides
9	3	Pétrole brut
10		Produits pétroliers
11	4	Minerais de fer, ferrailles, poussières de hauts fourneaux
12		Minerais et déchets non ferreux
13	5	Produits métallurgiques
14	6	Ciments, chaux, matériaux de construction manufacturés
15		Minéraux bruts ou manufacturés
16	7	Engrais naturels ou manufacturés
17	8	Produits carbochimiques, goudrons
18		Produits chimiques, excepté produits carbochimiques et goudrons
19		Cellulose et déchets
20	9	Véhicules et matériel de transport, machines, moteurs, même démontés, et pièces
21		Articles métalliques
22		Verre, verrerie, produits céramiques
23		Cuirs, textiles, habillement, articles manufacturés divers
24		Articles divers

Tableau A3.1. Description des groupes de la NST-R..

Annexe 4

Configuration à neuf hubs

La configuration à neuf hubs est obtenue par l'ajout d'un hub situé aux environs de Bordeaux à la configuration à huit hubs. La Figure A4.1. représente la localisation de ces hubs, les aires de marché ainsi que le réseau ferroviaire inter-hub.

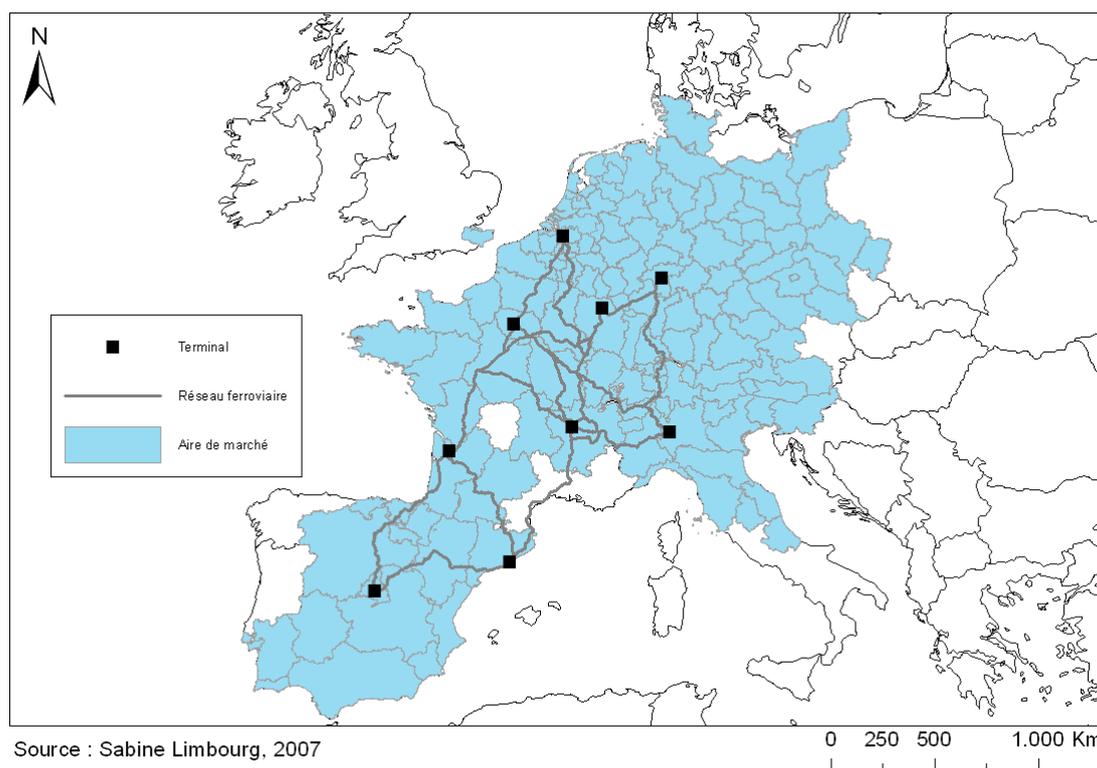


Figure A4.1. Réseau ferroviaire inter-hub et aire de marché pour une configuration à neuf hubs.

Nous constatons que la répartition du flux sur les différents modes varie par rapport à la situation de référence. La part de marché du réseau ferré croît de +5,21 % alors que dans le même temps, celle du réseau routier recule de 5,17 %. Ceci représente un transfert de 15,27 milliards de t.km de la route vers le rail. Le coût total diminue de 2,36 % par rapport à celui du scénario de référence.

Configuration à dix hubs

La configuration à dix hubs est obtenue par l'ajout d'un hub situé aux environs de Mulhouse à la configuration à neuf hubs. La répartition du flux sur les différents modes varie par rapport à la situation de référence, la part de marché du réseau ferré croît de +6,63 % alors que dans le même temps, celle du réseau routier recule de 6,59 %. Ceci représente un transfert de

19,38 milliards de t.km de la route vers le rail. La Figure A4.2. représente la localisation de ces hubs, les aires de marché ainsi que le réseau ferroviaire inter-hub.

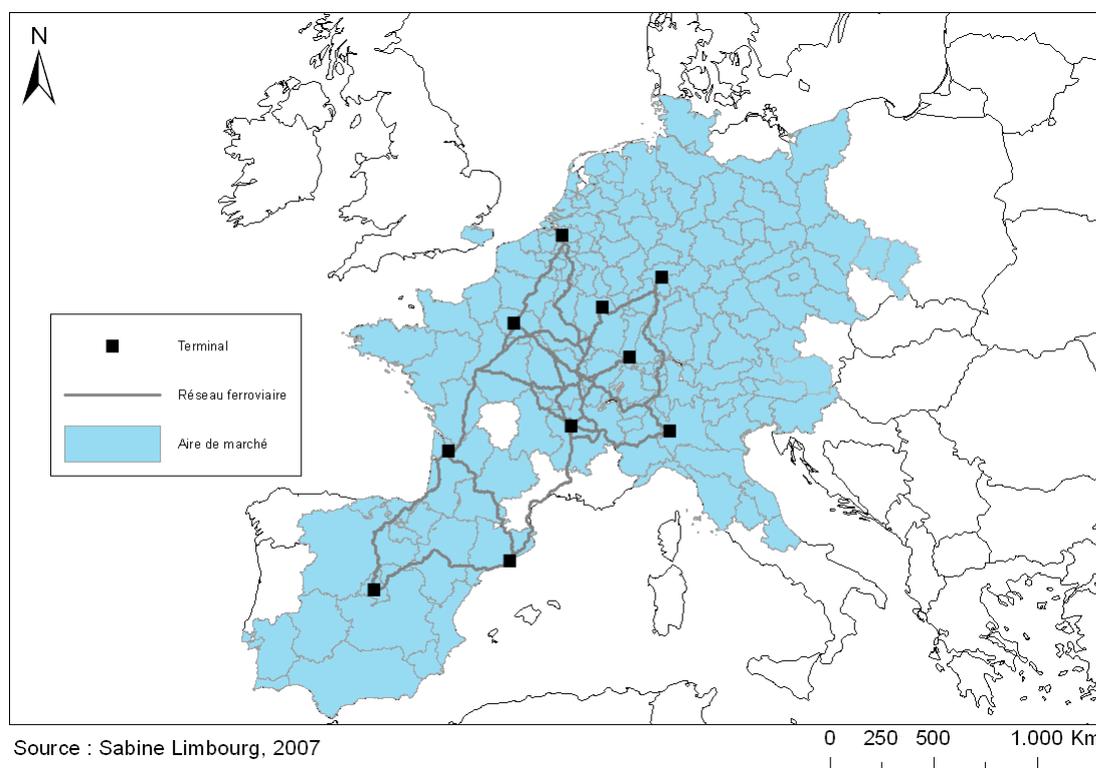


Figure A4.2. Réseau ferroviaire inter-hub et aire de marché pour une configuration à dix hubs.

Annexe 5

Configuration à neuf hubs en utilisant les coûts externes

La Figure A5.1. montre notamment que, dans la configuration à neuf hubs, cinq hubs changent de localisation par rapport à la configuration obtenue pour les coûts internes et pour le même nombre de hubs. De plus, toutes les connections inter-hubs sont utilisées par le transport combiné sauf deux connections : celle entre Hanover et Eindhoven et celle entre Milan et Oberbayen.

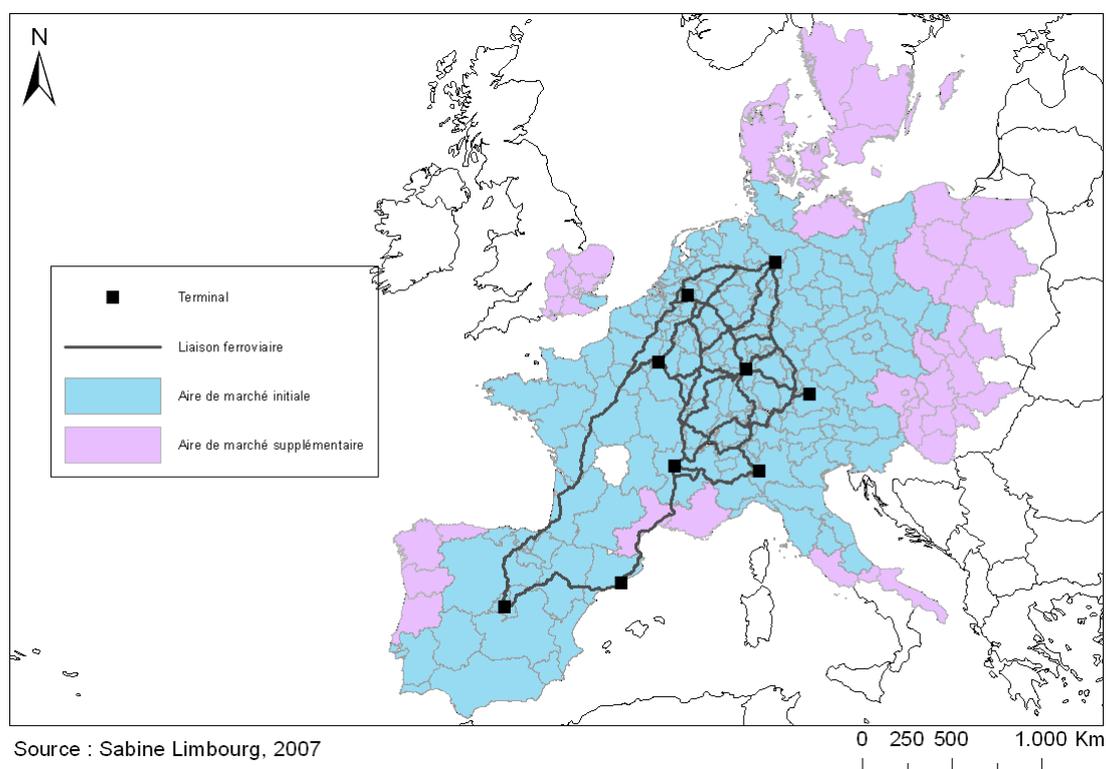


Figure A5.1. Réseau ferroviaire inter-hub et aire de marché pour une configuration à huit hubs en tenant compte des coûts externes.

La part de marché du réseau ferré croît de 7,06 % alors que celle du réseau routier diminue de 6,93 %. Ceci représente un transfert supplémentaire de 19,64 milliards de t.km de la route vers le rail. La diminution des coûts totaux est de 2,72 %.

Glossaire

Ce glossaire est basé sur le document : « *Terminologie en transport combinés* » de la Conférence Européenne des Ministres des Transports en 2001.

CAISSE MOBILE :

Unité conçue pour le transport de marchandises, adaptée de manière optimale en fonction des dimensions des véhicules routiers et équipée d'éléments de préhension permettant le transbordement entre modes, habituellement rail-route.

A l'origine, de telles unités n'étaient généralement pas empilables lorsqu'elles étaient pleines et ne pouvaient pas être prises par le haut. Maintenant, beaucoup de caisses peuvent être gerbées et prises par le haut. Ce qui les distingue des conteneurs est qu'elles sont ajustées aux dimensions des véhicules routiers. Pour être utilisées sur le rail, elles doivent être homologuées par l'union internationale des chemins de fer. Quelques-unes sont équipées de pieds rétractables, utilisés en dehors du véhicule.

CHARGEUR/EXPÉDITEUR :

Personne qui confie à d'autres (commissionnaire de transport/intermédiaire de transport, opérateur de transport/transporteur) le soin d'acheminer ses marchandises à un destinataire.

CONTENEUR :

Terme générique employé pour une boîte conçue pour le transport de marchandises, suffisamment solide pour un usage répété, généralement empilable et dotée d'éléments permettant le transfert entre modes.

ÉCARTEMENT DES VOIES :

Distance entre les faces intérieures des rails sur une ligne de chemin de fer. Elle est en général de 1,435 m.

Il existe d'autres écartements qui sont la règle dans certains pays d'Europe : par exemple, 1.676 m en Espagne et au Portugal, 1.524 m en Russie.

EMPOTAGE/DEPOTAGE :

Opération de chargement ou de déchargement de marchandises à l'intérieur d'une UTI.

EVP/TEU :

Equivalent Vingt Pieds. Unité de mesure correspondant à un conteneur ISO de 20 pieds de long (6,10 m), employée pour exprimer des capacités ou des flux de transport.

FERROUTAGE :

Transport combiné rail-route.

GERBAGE :

Stockage ou transport d'UTI l'une sur l'autre.

GRUE :

Grue conventionnelle utilisée pour soulever des marchandises par un câble passant par une flèche.

OPÉRATEUR DE TRANSPORT/TRANSPORTEUR :

Personne responsable de l'acheminement des marchandises, par ses propres moyens ou ceux d'autrui.

PALETTE :

Plate-forme, généralement en bois, permettant une manutention plus facile des marchandises. Les dimensions normalisées les plus utilisées en Europe sont : 1000 mm x 1200 mm et 800 mm x 1200 mm.

PLATEFORME LOGISTIQUE :

Concentration géographique d'organismes et d'entreprises indépendants, traitant de transport de marchandises (par exemple, commissionnaires de transport, expéditeurs, opérateurs de transport, douane) et de services auxiliaires (par exemple, entreposage, entretien et réparation), comprenant au moins un terminal.

POINT NODAL – HUB :

Point central pour la collecte, le tri, le transbordement et la redistribution des marchandises dans une zone géographique donnée.

Le concept “Hub” est issu du vocabulaire utilisé en transport aérien, tant pour les personnes que pour les marchandises. Il consiste en la desserte de tous les points d'un territoire déterminé à partir d'un point central unique (concept « Hub-and-Spoke »).

PORTIQUE ROULANT :

Grue portique pouvant faire évoluer la charge dans les trois dimensions, hauteur, largeur, longueur et évoluant elle-même en site propre, soit sur rails, soit sur pneus, couramment affectée à une surface de manœuvre limitée.

De telles grues sont en général utilisées pour le transbordement rail/route et/ou navire/quai.

« REACH STACKER » :

Grue automobile équipée d'un dispositif de levage frontal lui permettant de déplacer ou gerber des UTI.

SEMI-REMORQUE :

Un véhicule de transport de marchandises sans moteur, destiné à être attelé à un véhicule à moteur de manière telle qu'une partie substantielle de son poids et du chargement est supportée par ledit véhicule. Il peut faire l'objet d'adaptations spécifiques pour convenir au transport combiné.

TARE :

Poids de l'UTI ou du véhicule sans chargement.

TERMINAL :

Lieu équipé pour le transbordement et le stockage des UTI.

TONNE.KM OU T.KM:

Tonne.kilomètre: transport d'une tonne sur un kilomètre.

TRANSBORDEMENT :

Mouvement des UTI d'un moyen de transport à un autre.

TRANSPORT MULTIMODAL :

Acheminement d'une marchandise empruntant deux modes de transport différents ou plus.

TRANSPORT INTERMODAL :

Acheminement d'une marchandise utilisant deux modes de transport ou plus mais dans la même unité de chargement ou le même véhicule routier, et sans empotage ni dépotage.

Par extension, l'intermodalité caractérise un système de transport en vertu duquel deux modes de transport ou plus sont utilisés par la même unité de chargement ou le même

véhicule routier, sans empotage ou dépotage, pour permettre une chaîne de transport de porte à porte.

TRANSPORT COMBINÉ :

Transport intermodal dont les parcours principaux, en Europe, s'effectuent par rail, voie navigable ou mer et dont les parcours initiaux et/ou terminaux, par route, sont les plus courts possible.

**TRANSPORT MARITIME A COURTE DISTANCE - SHORT SEA SHIPPING-
CABOTAGE MARITIME :**

Mouvement de marchandises par voie maritime entre ports situés en Europe et entre ports situés en Europe et ports situés dans des pays tiers dont le littoral donne sur l'une des mers fermées servant de frontière à l'Europe.

UNITÉ DE CHARGE :

Charge palettisée ou unité préemballée dont la surface au sol est conforme aux dimensions des palettes et qui peut être chargée dans une UTI.

UNITÉ DE TRANSPORT INTERMODAL (UTI) :

Conteneurs, caisses mobiles et semi-remorques convenant au transport intermodal.

VOIE DE CHARGEMENT :

Voie sur laquelle sont réalisées les opérations de transbordement des UTI.

Bibliographie

Arnold P, 2002, « *Localisations optimales, logique multi-réseaux et terminaux de transport multimodal : formalisation et applications* », Thèse, Département de Géologie et de Géographie, Université catholique de Louvain.

Arnold P, Marchand H, Peeters D, Thomas I, 2002, « Pour une localisation optimale des centres de transbordement entre réseaux de transport : formulation et extensions », *The Canadian Geographer*, 45, 3, 2002, 427-436.

Arnold P., Peeters D. et Thomas I, 2004, « *Modelling a rail/road intermodal transportation system* », *Transportation Research Part E* 40, 255-270.

Bach L., 1981, « *The problem of aggregation and distance for analyses of accessibility and access opportunity in location allocation models* », *Environment and Planning A*;13:955-78.

Ballis A , 2002, « *Innovative Technologies for Intermodal transfer Points* », European Community project.

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.

Bar-Gera H. et Boyce D., 2003, « *Origin-based algorithms for combined travel forecasting models* », *Transportation Research B*, Vol 37, N° 5, pp. 405-422.

Bar-Gera H., 2002, « *Origin-Based Algorithm for the Traffic Assignment Problem* », *Transportation Science*, Vol 36, N° 4, pp. 398-417.

Baumol, W.J. et H.D. Vinod, 1970. « *An inventory theoretic model of freight transport demand* ». *Management Science*, 16 (7), pp. 413-421.

Beasley JE, 2006, <http://people.brunel.ac.uk/~mastjjb/jeb/info.html>

Beasley JE, 1990, « *OR-Library: distributing test problems by electronic mail* », *Journal of the Operational Research Society* 41(11) (1990) pp1069-1072.

Beckmann M., Mc Guire C.B., Winsten C.B., 1956, « *Studies in the Economics of Transportation* », Yale University Press, New Haven, Connecticut.

Ben-Akiva, M., Bergman M. J., Daly A. J. et Ramaswamy R., 1984, « *Modelling Inter-Urban Route Choice Behavior* », *Proceedings of the 9th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, pp. 299-330.

Beuthe M., C. Bouffieux, J. De Maeyer, G. Santamaria, E. Vandaele, M. Vandresse et F. Witlox, 2005, « *A multicriteria analysis of stated preferences among freight transport alternatives* », in A. Reggiani and L. Schintler, éd., *Methods and Models in Transport and Telecommunications: Cross-Atlantic Perspectives*, Springer-Verlag.

- Beuthe M., Degrandart F, Geerts J-F. et Jourquin B, 2002, « *External costs of the Belgian interurban freight traffic: a network analysis of their internalization* », *Transportation Research Part D* 7, pp. 285–301.
- Beuthe, M, Jourquin B et Charlier J, 2000, « *De la compétitivité des réseaux de transports intermodaux de marchandises en Europe* », *C.E.M.T*, Thème 2.
- Berry B.J.L., 1967, « *Geography of Market Centers and Retail Distribution.* », Englewood Cliffs: Prentice Hall Inc.
- Bhourri N., « *Intermodalité : Bilan et perspectives des systèmes informatiques* », Rapport de convention DTT.
- Boley D.L., 1998, « *Principal Direction in Divisive Partitioning* », *Data Mining and Knowledge Discovery* Vol 2-4, pp 325-344.
- Bontekoning Y.M., 2002, « *Towards new-generation terminal operations. Identifying implementation obstacles* » Trail Reports in Transportation Planning N° R2002/02.
- Bontekoning Y.M. et Kreutzberger E., 2001, « *Towards new-generation terminal operations. A performance evaluation study* », Trail Reports in Transportation Planning N° R2001/02.
- Bouffioux Ch., M. Beuthe et T. Pauwels, 2006, « *La qualité des services de transport de marchandises : une analyse agrégée des ordres de préférence déclarés* », *Les Cahiers Scientifiques des transports* N° 50, pp. 135-158.
- Bowersox, D.J., Closs, D.J. et Helferich O.K., 1986, « *Logistical management* », Macmillan Publishing Company, New York.
- Boyce D, Ralevic-Dekic B. et Bar-Gera H., 2002, « *Convergence of traffic assignments: How much is enough?* », *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 130, No. 1, pp. 49-55.
- Bureau of Public Roads, 1964, « *Traffic Assignment Manual* », Urban Planning Division, US Department of Commerce, Washington DC.
- Burrell, J.E., 1968, « *Multiple Road Assignment and its application to Capacity Restraint* », *Proceedings of the 4th International Symposium on the Theory of Traffic Flox, Strassenbahn and Strassenverherhehrslectnick*, 86.
- Button K.J. et Hensher D.A., 2001, « *Handbook on Logistics and Supply Chain Management* », Eds. A. Brewer.
- Campbell J.F., 1994, « *Integer Programming Formulations of Discrete Hub Location Problems* », *European Journal of Operational Research* 72(2), 387-405.
- 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.
- Casillas PA., 1987, « *Data aggregation and the p-median problem in continuous space* », In: Ghosh, A, Rushton, G, editors, *Spatial analysis and location allocation models*. New York: Van Nostrand Reinhold Publishers:327-44.

Church R.L., ReVelle, C., 1974, « *The maximal covering location problem* », Papers of the Regional Science Association 32, 101–118.

C.E.M.T., 1998, « *Rapport sur la situation actuelle du transport combiné en Europe* »

Ceylan, H et Bell, G. H., 2005, « *Genetic algorithm solution for the stochastic equilibrium transportation networks under congestion* », Transportation Research Part B: Methodological, Volume 39, Issue 2, pp 169-185.

Comité National Routier (<http://www.cnr.fr/>), page consultée en novembre 2006.

Cormen T. H., Leiserson C. E, Rivest R. L. et Cliff Stein C, 2001, « *Introduction to Algorithms* » (Second Edition), MIT Press and McGraw-Hill.

Current JR, Schilling DA., 1987, « *Elimination of source A and source B errors in p-median location problem* », Geographical Analysis;19(2):95-110.

Current JR, Schilling DA., 1990, « *Analysis of errors due to demand data aggregation in the set covering and maximal covering location problems* », Geographical Analysis; 22:116-26.

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.

Daskin M., 1995, « *Network and discrete location: Models* », Algorithms and Applications, Wiley Interscience, NY.

Daubresse, Mp, 1997, « *Schéma national des plates-formes multimodales* ». La Documentation Française.

Davidson, K. B., 1966, « *A flow–travel time relationship for use in transportation planning* » Proc. 3rd ARRB Conf. 3 (1), pp. 183-194.

Deming W.E., 1978, « *On a rational relationship for certain costs of handling motor freight over the platform* », Transportation Journal, 17, 5-11.

Devletoglou N, 1965, « *A Dissenting View of Duopoly and Spatial Competition* », Duopoly and Spatial Competition, Economica.

Dial R.B., 1971, « *A Probabilistic Multipath Traffic Assignment Model which Obviates Path Enumeration* », Transportation. Research.,5, pp.83-112.

Dijkstra E.W., 1959, « *A note on two problems in connection with graphs* », Numerische Mathematik, Vol 1, pp. 269-271.

Domencich T., McFadden D., 1975, « *Urban travel demand: a behavioural analysis* », North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 215 p.

Duda R.O., Hart P.E., Stork D.G., 2001, « *Pattern Recognition (Second Edition)* » John Wiley & Sons Eds, NewYork, NY.

- 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., « *Uncapacitated Single and Multiple Allocation p -Hub Center Problems* », non publié.
- ESPON, 2004, « *Transport services and networks: territorial trends and basic supply of infrastructure for territorial cohesion* », www.espon.lu.
- Francis RL, Lowe TJ, Rayco MB, 1996, « *Row-column aggregation for rectilinear distance p -median problems* ». *Transportation Science*; 30(2):160-74.
- Francis, R.L., Lowe, T.J., Rushton, G., Rayco, M.B., 1999, « *Aggregation methods for multi-facility location problems: Strategies for containing error* », *Geographical Analysis* 31, 67–87.
- Francis R.L., Lowe T.J., Rayco B et Tamir A, 2005, « *Aggregation Error for Location Models: Survey and Analysis* », Working paper.
- Frank M. et Wolfe P., 1956, « *An algorithm for quadratic programming* », *Naval Research Logistics Quarterly*, Vol 3 , pp. 95-110.
- Geerts J.F. and Jourquin B., 2001, « *Freight Transportation Planning on the European Multimodal Network: the case of the Walloon Region* », *European Journal for Transport Infrastructure Research*, Vol 1, No. 1.
- Goldman A.J., 1969, « *Optimal location for centers in a network* », *Transportation Science* 3, 352-360.
- Goodchild MF, 1979, « *The aggregation problem in location-allocation* », *Geographical Analysis*; 11(3):240-55.
- 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.
- Hansen P et Delattre M, 1978, « *Complete-Link Cluster Analysis by Graph Coloring* », *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 73, No. 362 , pp. 397-403.
- Harker P.T., 1987, « *Predicting intercity freight flows* », VNU Science Press.
- Hart P. E., Nilsson N. J. et Raphael B., 1968, « *A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths* », *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics SSC4* Vol. 2, pp. 100-107.
- Hart P. E., Nilsson N. J. et Raphael B., 1972, « *Correction to A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths* », *SIGART Newsletter*, 37, pp. 28-29.
- Higginson J.K., 1993, « *Modeling shipper costs in physical distribution analysis* », *Transportation research. Part A, Policy and practice* 27:22, 113-124, Elsevier.

Hoover E, 1937, « *Location theory and the shoe and leather industries.* », Harvard University Press, Cambridge.

Hotelling H., 1929, « *Stability in Competition* », The Economic Journal, Vol. 39, p 41-57.

Huriot J.M. et Perreux J., 1973, « *On the Weber Problem with Rectangular Distance: A Comment.* », Management Science, Vol. 20, No. 3, Theory Series, pp. 418-419.

Johnson D.B., 1973, « *A note on Dijkstra's shortest path algorithm* ». Journal A.C.M., Vol 20, N° 3, pp. 385-388.

Jourquin B., 1995, « *Un outil d'analyse économique des transports de marchandises sur des réseaux multi-modaux et multi-produits: Le réseau virtuel, concepts, méthodes et applications* », PhD Thesis, Facultés Universitaires Catholiques de Mons, Belgium.

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.

Jourquin B. et Limbourg S., 2006, « *Equilibrium Traffic Assignment on Large Virtual Networks, Implementation issues and limits for multi-modal freight Transport* », European Journal of Transport and Infrastructure Research, Vol 6, n°3, pp. 205-228.

Kara-Yetis B. et Tansel. B., 2000, « *On the single assignment p-hub center problem* ». European Journal of Operational Research, 125.

Kara-Yetis B. et Tansel. B., 2003, « *The single-assignment hub covering problem: model and linearization* ». Journal of the Operational Research Society, 54:59-64.

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, May 2004.

Kresge, D.T. et Roberts, P.O., 1971, « *Systems Analysis and Simulation Models* », Techniques of Transport Planning », Vol. II, Meyer, J.R. (Ed.), The Brookings Institute, Washington, D.C.

Lai J.Z.C., Liaw Y-C. et Liu J, 2007, « *Fast k-nearest-neighbor search based on projection and triangular inequality* », Pattern Recognition, Volume 40, Issue 2, Pages 351-359 Jim Z.C. Lai, Yi-Ching Liaw and Julie Liu.

Langley, C.J., Jr., 1980. « *The inclusion of transportation costs in inventory models: some considerations* », Journal of Business Logistics, 2, pp. 106-125.

Le Blanc, L.J., Morlock, E.K. et Pierskalla, W.P., 1975, « *An Efficient Approach to Solving the Road Network Equilibrium Assignment Problem* », Transportation Research, Vol 9, N° 5, pp. 309-318.

Livre blanc, 2001, « *La politique européenne des transports à l'horizon 2010 : l'heure des choix* ».

- Lösch A., 1940, « *Die räumliche ordnung der wirtschaft.* », Iena. Traduction anglaise: « *The economics of location.* » Yale university Press, New Haven. 1954.
- 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.*
- Martins E.Q.V., Pascoal M.M.B. et Santos J.L.E., 2000, « *A new improvement for a k shortest paths algorithm* », *Investigação Operacional*, 21(1):47-60 (2001).
- ME&P and WSP, 2002, « *Review of Freight Modelling* », DfT Integrated Transport and Economic Appraisal. Report prepared for the United Kingdom Department of Transport.
- Ministère français des Transports, de l'Équipement, du tourisme et de la Mer : « *Les dossiers d'analyse des politiques publiques des transports* » : tome 2, 2004 http://www.statistiques.equipement.gouv.fr/rubrique.php?id_rubrique=307, page consultée en novembre 2006.
- Mulvey, J.M. and Crowder, H.P., 1979, « *Cluster analysis: an application of Lagrangian relaxation* », *Management Science* 25/4, p329-340.
- NEA, 2004, « *Vergelijkingskader modaliteiten* », Transcare, Sterc.
- Nielsen O. A., 2004, « *A stochastic multi-modal freight transport assignment model with random coefficients* », *World Conference on Transport Research Society (WCTRS).*
- 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
- Niérat P., 1998, « *Anatomie d'un réseau intermodal hub-and-spoke* », *Rapport Inrets n°220*, Arcueil, 75 p.
- O'Kelly M., 1986, « *The location of interacting hub facilities* », *Transportation Science* 20, 92-106.
- 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.
- Overgaard K.R., 1967, « *Urban transportation planning: traffic estimation* », *Traffic Quarterly*, Vol 26, N° 2, pp. 197-218.
- Owen S.H. et Daskin M.S. 1998, « *Strategic facility location: A review* », *European Journal of Operational Research* 111 423-447.

- Palander T., 1935, « *Beitrage zur standortstheorie.* » Almqvist et Wiksells Boktryckeri, Uppsala.
- Pallottino, S., 1984, « *Shortest-Path Methods: Complexity, Interrelations, and New Propositions* », *Networks* 14, 257–267.
- Pape, U., 1974, « *Implementation and Efficiency of Moore Algorithms for the Shortest Root Problem* », *Math. Program.* 7, 212–222.
- PINE, 2004, « *Prospects of Inland Navigation in an Enlarged Europe (PINE)* » http://europa.eu.int/comm/transport/iw/prospect/index_fr.htm.
- Plastria, F., 2001, « *On the choice of aggregation points for continuous p-median problems: A case for the gravity center* », *TOP* 9, 217–242.
- Ponsard C., 1955, « *Economie et espace* », Sedes, Paris.
- Prashker, J.N. et Bekhor S, 2000, « *Some observations on stochastic user equilibrium and system optimum of traffic assignment* », *Transportation Research Part B: Methodological*, Volume 34, Issue 4, Pages 277-291.
- Quinet E., Vickerman R., 2004, « *Principles of Transport Economics* », Edwar Elgar, Cheltenham,UK.
- Racunica I and Wynter L., 2005, « *Optimal location of intermodal freight hubs* », *Transportation Research Part B* 39, 453-477.
- Rao, M.R., 1971, « *Cluster analysis and mathematical programming* », *Journal of the American Statistical Association* Volume 66, pp 622-626.
- RECORDIT, 2001, « *REal COst Reduction of Door-to-door Intermodal Transport* », <http://www.recordit.org/>.
- ReVelle C.S. et Eiselt H.A. (2005) « *Location analysis: A synthesis and survey* », *European Journal of Operational Research* 165 1–19.
- Schneider, W., 2003, « *The german national freight transport model* », *Conference on National and International Freight Transport Models*, Freiburg, Allemagne.
- Sheffi, Y., 1985, « *Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods* », Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- SIMET project, 1995, « *Future Optimum Terminals for Intermodal Transport* », Doc.Euret/411/95 Brussels.
- Smith D.M., 1981, « *Industrial location. An economic geography analysis.* » 2 édit. N.Y, J Wiley & sons.
- Smock R.J., 1962, « *An iterative assignment approach to capacity restraint on arterial networks* ». *Highway Research Board Bulletin*, Vol 156, pp. 1-13.

- Stratec, 2004, « *Elaboration d'un schéma de développement de la logistique intégrée dans les réseaux de terminaux de fret en région wallonne* ».
- Tavasszy, L., 1996, « *Modelling European Freight transport Flows* », PhD thesis,. Technical University of Delft, The Netherlands.
- 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.
- TERMINET, « *Technical annex* », Delft University of Technology, Delft, November 1996.
- Thomas R., 1991, « *Traffic Assignment Techniques* », Avebury Technical, England
- Toint, P. et Wynter, L., 1996, « *Asymmetric Multiclass Traffic Assignment: A coherent formulation* », Proceedings of the 13th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, ed. J.-B. Lesort, Pergamon, Exeter.
- Transportation Research Board, 2000, « *Highway Capacity Manual* »
- U.I.R.R., Union Internationale des sociétés de transport combiné Rail-Route, <http://www.uirr.com/>.
- Vernimmen B. et Witlox F., 2003, « *The inventory-theoretic approach to modal choice in freight transport: literature review and case study* », Brussels Economic Review - Cahier Economiques de Bruxelles.
- Vervoort K, Split W, 2005, « *Economische toets variant 3: Betalen per kilometer vracht* », Ministerie van Verkeer en Waterstaat.
- Vickerman, R.W., 2003, « Freight traffic », in ECMT, « *Managing the Fundamental Drivers of Transport Demand* », Proceedings of the International Seminar December 2002, Paris: OECD.
- Wardrop J.G., 1952, « *Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research* », proceedings of the Institute of Civil Engineers, Part II, Vol 1, pp. 325-378.
- Weber A., 1909, « *Theory of the Location of Industries* », University of Chicago.
- Wilson A.G., 1974, « *Urban and regional models in geography and planning*, Wiley.
- Wilson A.G. et Bennet R.J., 1985, « *Mathematical Methods in Human Geography and Planning* », John Wiley & Sons, New York.
- Wiegmans B. W., Masurel E and Nijkamp P, 1999, « *Intermodal freight terminals: an analysis of the terminal market* », Transportation planning and technology, Intermodality and Sustainable Freight Transport, vol. 23, no 2 (20 ref.), pp. 105-128.
- Wiegmans B, 2003, « *Performance conditions for container terminals* », Thesis, Vrije Universiteit Amsterdam.

WSP Group, 2002, « *Review of Freight Modelling Report B2 – Review of Models in Continental Europe and Elsewhere* ».

Zhao, P., Batta, R., 1999, « *Analysis of centroid aggregation for the Euclidean distance p -median problem* », *European Journal of Operational Research* 113, 147–168.

Zhao, P., Batta, R., 2000, « *An aggregation approach to solving the network p -median problem with link demands* », *Networks* 36, 233–241.

Zhan F.B. et Noon C. E., 1998, « *Shortest Path Algorithms : An Evaluation using Real Road Networks* », *Transportation Science*, Vol. 32, No. 1, pp. 65-73.