



LOUVAIN
School of Management

Modélisation des flux routiers de marchandises, de la génération de la demande par une approche multi-agents à l'affectation temporelle

Jérémy PIOTTE

Thèse de doctorat 4 | 2013

Université catholique de Louvain

LOUVAIN SCHOOL OF MANAGEMENT RESEARCH INSTITUTE GROUP

Modélisation des flux routiers de marchandises, de la génération de la demande par une approche multi-agents à l' affectation temporelle
Jérémy PIOTTE X | 2013



UNIVERSITE CATHOLIQUE DE LOUVAIN

Louvain School of Management

**Modélisation des flux routiers de marchandises, de la
génération de la demande par une approche multi-
agents à l'affectation temporelle**

Jérémy PIOTTE

Thèse présentée en vue d'obtention

du grade de Docteur

en sciences économiques et de gestion

Membres du Jury :

Prof. Marcel GERARD (UCL-Mons), président

Prof. Bart JOURQUIN (UCL-Mons), promoteur

Prof. François FOUSS (UCL-Mons)

Prof. Sabine LIMBOURG (ULG)

Prof. Christian REYNAUD (NESTEAR)

Prof. Philippe TOINT (FUNDP)

Mars 2013

Remerciements

Cette recherche n'aurait pas pu voir le jour sans Monsieur le Professeur Bart Jourquin que je souhaite chaleureusement remercier. Il a attentivement suivi mes travaux et veillé à partager son expérience et ses idées. Il a ainsi enrichi considérablement ces travaux.

Je souhaite aussi remercier chacun des membres, présents et passés, du GTM, tant pour leur contribution à une ambiance agréable qu'à leur rôle dans différents échanges. Je remercie plus particulièrement Laurent Van Malderen pour ses conseils et sa patience dans nos nombreuses discussions. Je remercie aussi spécialement Monsieur le Professeur Michel Beuthe. Avidé de partager son savoir, celui-ci a su m'aiguiller dans certaines périodes d'errance intellectuelle et ses conseils ont, eux aussi, permis d'accroître la qualité de ces travaux.

Je remercie Sandrine Delhaye pour ses encouragements ainsi que pour son investissement et l'aide qu'elle m'a apporté dans la gestion de nombreux aspects administratifs durant ces quatre années.

Je souhaite manifester ma reconnaissance aux membres du GRT et plus particulièrement Messieurs les Professeurs Eric Cornelis et Philippe Toint ainsi qu'à Johan Barthelemy. Leur regard extérieur et leurs suggestions ont été précieuses et notre collaboration sur ce projet a été une expérience formidable.

Je remercie aussi les différents membres de mon jury pour avoir accepté d'assurer l'encadrement et l'évaluation de cette thèse. Je remercie tout spécialement Monsieur le Professeur François Fouss et Madame la Professeur Sabine Limbourg pour leur investissement et leur soutien dans certaines périodes de doute.

Finalement, je voudrais remercier ma famille et mes amis pour leur soutien et plus particulièrement ma compagne et mère pour leur relecture.

Table des matières

Abréviations	2
Liste des figures	3
Liste des tableaux	5
I. Introduction.....	7
II. Génération de la demande - Revue de littérature	13
II.1. Modèles de génération classiques	13
II.2. Systèmes multi-agents.....	18
II.3. Les problèmes de tournées.....	26
III. Modèle de génération de la demande.....	43
III.1. Méthodologie	43
III.2. Modélisation de la demande	47
III.3. Modélisation de l'offre	57
III.3.a. Transport pour compte propre	61
III.3.b. Fonctions de coûts temporelles	65
III.3.c. Intégration des tournées.....	69
III.4. Conclusion	90
IV. Affectation – Revue de littérature	101
V. Affectation – Algorithme semi-dynamique.....	112
VI. Validation	123
VII. Conclusion, limites de la recherche et perspectives	134
Bibliographie	138
Annexes	153

Abréviations

TSP : Traveling Salesman Problem

VRP : Vehicle Routing Problem

CVRP : Constrained Vehicle Routing Problem

DCVRP : Duration Constrained Vehicle Routing Problem

ACVRP : Asymmetric Constrained Vehicle Routing Problem

HFVRP : Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem

DVRP : Dynamic Vehicle Routing Problem

VRPTW : Vehicle Routing Problem with Time Windows

VRPPD : Vehicle Routing Problem with Pickup and Deliveries

DARP : Dial-A-Ride Problem

TDVRP : Time-Dependent Vehicle Routing Problem

SMA (ou MAS) : Systèmes Multi-Agents

TCA : (agent) Transporteur pour Compte d'Autrui

TCP : (agent) Transporteur pour Compte Propre

ToR : (affectation) Tout-ou-Rien

ToR-t : (affectation) Tout-ou-Rien temporelle

SD-fct : (affectation) Semi-dynamique à fonctions de coûts temporelles

Liste des figures

- Figure 1 : Modèle à 4 étapes
- Figure 2 : Représentation conceptuelle des composants du développement et de la validation d'un modèle (Source : Louie et Carley (2008))
- Figure 3 : Schéma général des négociations du modèle de génération de la demande de transport
- Figure 4 : Evolution temporelle de la simulation (a, b, c) et génération de la matrice OD (d)
- Figure 5 : Développement du module de demande dans le schéma des négociations du modèle de génération
- Figure 6 : Méthode de génération des distributions de fréquences et tailles d'envois des entreprises en fonction
- Figure 7 : Nombre annuel moyen d'envoi en fonction de la taille des entreprises (par groupes)
- Figure 8 : Nombre annuel moyen d'envoi en fonction de la taille des entreprises (par groupes)
- Figure 9 : Tonnage moyen par envoi en fonction de la taille des entreprises
- Figure 10 : Distributions des tonnages moyens pour les entreprises de 5 secteurs d'activités
- Figure 11 : Distributions des fréquences
- Figure 12 : Distribution des véhicules routiers de plus de 3,5T en Belgique (Fédération belge de l'Industrie de l'Automobile et du Cycle, 2011)
- Figure 13 : Ventilation des entreprises selon les distances des envois (Centre de recherches économiques, 1999)
- Figure 14 : Intégration du transport pour compte propre dans la simulation
- Figure 15 : Répartition horaire des livraisons à Bologne (Centre de recherches économiques, 1999)
- Figure 16 : Intégration des fonctions de coûts temporelles dans la simulation
- Figure 17 : Exemple triangulaire du problème de clustering
- Figure 18 : Exemple de tournée dynamique.
- Figure 19 : Graphe représentant les scores moyens calculés sur les 30 scénarios testés correspondant à différentes tailles de problèmes : 100, 250 et 300 demandes
- Figure 20 : Score normalisé obtenu par un transporteur confronté à différentes séries de demandes générées selon un modèle gravitaire avec $z=0$
- Figure 21 : Score normalisé obtenu par un transporteur confronté à différentes séries de demandes générées selon un modèle gravitaire avec $z=1$

- Figure 22 : Score normalisé obtenu par un transporteur confronté à différentes séries de demandes générées selon un modèle gravitaire avec $z=2$
- Figure 23 : Exemple de problème à deux demandes avec $\alpha \ll \beta$.
- Figure 24 : Exemple de problème à deux demandes avec $\alpha \approx \beta$.
- Figure 25 : Intégration du module de planification des tournées des transporteurs dans la simulation
- Figure 26 : Fonction représentant les valeurs de k ayant mené aux différentes proportions de marchandises transportées pour compte propre.
- Figure 27 : Simulation complète
- Figure 28 : Affectation ToR-t, exemple
- Figure 29 : Exemple d'évolution des positions de véhicules sur un réseau dont les coûts varient au fil des périodes
- Figure 30 : Affectation ToR-t de la matrice OD(t)
- Figure 31 : Affectation SD-fct de la matrice OD(t)
- Figure 32 : Affectation SD-fct de la matrice OD(t) période par période (1)
- Figure 33 : Affectation SD-fct de la matrice OD(t) période par période (2)
- Figure 34 : Comparaison entre l'affectation ToR de la matrice LIMOBEL (De Vlieger, et al., 2011) et l'affectation ToR-t ré-agrégée de la matrice OD(t) générée en début de ces travaux
- Figure 35 : Affectation ToR de la matrice OD générée dans le cadre du projet LIMOBEL
- Figure 36 : Résultats de la comparaison entre comptages et tonnages affectés par la méthode ToR-t
- Figure 37 : Résultats de la comparaison entre comptages et tonnages affectés par la méthode ToR-t en retirant les points en bordure de la zone d'étude
- Figure 38 : Répartition horaire des flux de camions simulés (rouge) et observés sur le réseau routier belge selon le SPF (bleu)

Liste des tableaux

Tableau 1 : Données extraites de l'enquête ECHO

Tableau 2 : Groupes d'entreprises par tailles

Tableau 3 : Nombre d'entreprises sondées par taille et secteur d'activité

Tableau 4 : Nombre d'envois annuels et tonnages moyen par envoi en fonction de la taille des entreprises

Tableau 5 : Répartition des véhicules routiers de plus de 3,5T (Fédération belge de l'Industrie de l'Automobile et du Cycle, 2011)

Tableau 6 : Proportions d'envois pour compte propre par les entreprises sondées (Centre de recherches économiques, 1999)

Tableau 7 : Le nombre de véhicules utilisés par les services de transport pour compte propre (Centre de recherches économiques, 1999)

Tableau 8 : Ventilation des entreprises selon les distances des envois (Centre de recherches économiques, 1999)

Table 9 : Compte rendu des actions effectuées par les agents du modèle dans un scénario de petite taille.

Tableau 10 : Compte rendu des résultats de la simulation pour différentes valeurs de k .

Tableau 11 : Classification des modèles selon Limbourg (2007).

I. Introduction

L'utilisation de la route est en constante augmentation. Qu'il s'agisse de personnes faisant les allers-retours au travail ou à l'école, allant faire leurs courses ou se déplaçant dans le cadre de leurs loisirs, ou qu'il s'agisse de véhicules transportant des matières premières ou produits finis entre producteurs, fournisseurs, dépôts ou pour approvisionner l'échoppe du coin de la rue, la route est à l'heure actuelle, encore, au centre de la plupart des activités qu'elles soient privées ou économiques.

En outre, devant l'augmentation de véhicules sur la route, la compétition entre ceux-ci pour l'utilisation du réseau se fait de plus en plus ressentir et des phénomènes en découlant, comme la congestion, deviennent eux aussi de plus en plus fréquents et importants. Ces derniers ont un impact significatif que l'on peut considérer comme une nuisance pour utilisateurs de la route, mais de manière plus pragmatique comme un coût additionnel supporté par chacun d'entre eux. Dans le cadre d'activités économiques, celui-ci représente d'ailleurs une portion non négligeable des coûts logistiques supportés par les entreprises.

Afin d'étudier, de proposer et d'analyser d'éventuelles solutions à ces problèmes, différents outils ont été mis en place dans le domaine de la recherche sur le transport. Parmi ces outils, on utilise généralement des modèles ou simulation de génération de demande. Sous des hypothèses diverses, ces modèles ont pour objectif de générer la demande de transport dans la zone étudiée. Cette demande de transport est généralement représentée par une matrice origines-destinations contenant, comme son nom l'indique, différentes paires origines-destinations. Chacune de ses paires est associée à une quantité devant être transportée depuis l'origine à la destination.

Cette matrice origines-destinations, bien qu'un bon début à l'analyse du transport dans la zone d'étude, n'est pas suffisante à l'étude de la charge du réseau.

Un processus supplémentaire est requis afin d'estimer et représenter la charge des différents tronçons du réseau étudié. Dès lors, une fois la demande de transport connue sous forme d'une matrice origines-destinations, on utilisera généralement un modèle d'affectation qui attribuera à chaque paire origine-destination un ou plusieurs chemins sur lesquels seront *affectées* les quantités correspondantes. C'est à cette étape que l'on pourra observer les flux sur le réseau étudié.

Dans certains cas, une étape préliminaire de répartition modale supplémentaire peut être requise. Cette étape vise à répartir les flux de transport entre les différents modes et moyens de transport disponibles. Néanmoins dans l'étude présentée dans cette recherche doctorale, seul le transport routier sera considéré. Dès lors, aucune attention ne sera accordée à cette répartition modale.

Dans l'optique générale présentée ici, dans un premier temps, un modèle de simulation visant à générer la demande de transport de marchandises sur un réseau routier sera proposé. Celui-ci sera ensuite illustré à travers un cas pratique concernant le réseau routier Wallon. Si des modèles de génération de la demande existent déjà dans la littérature (*Ortúzar et Willumsen (1990), Bates (2000)*), ceux-ci comportent des lacunes dont certaines pourraient être comblées. Par exemple, ces modèles sont généralement *trip-based*. Ceux-ci modélisent la demande de transport comme une série de voyages indépendants et isolés. Or, on sait qu'en réalité ces déplacements sont souvent interdépendants. Certains modèles de génération de demande *tour-based* existent, surtout dans le domaine du transport passagers. Bien que ceux-ci prennent en compte cet aspect d'interdépendance, ils tiennent toutefois rarement compte d'un aspect temporel. Alors que ce facteur a une importance capitale dans la mise au point et l'évaluation de mesures de gestion du réseau, de par la variation des flux de véhicules au fil de la journée. Finalement, on sait que le déplacement de personnes ou de marchandises est directement lié au concept de *chaines d'activités*. En effet, la demande de transport est directement dérivée du besoin pour les personnes d'être en différents endroits à différents moments ou pour des mar-

chandises d'être amenées à différents endroits en fonction des étapes de la chaîne logistique dans laquelle elles entrent en jeu. Dès lors, des modèles dits *activity-based* doivent être imaginés. Ceux-ci tiennent compte, non seulement des facteurs spatiaux et temporels, mais aussi et surtout du comportement des acteurs du transport et activités ou positions logistiques dans lesquelles ils entrent en jeu. Le modèle de génération développé dans ces travaux tente donc d'apporter une solide base méthodologique afin de générer cette demande de transport de marchandises de la manière la plus réaliste possible à travers un modèle exploratoire. Afin de tenir compte à la fois de la dimension temporelle du problème et de l'origine même des besoins de transport, le modèle présenté consiste en une simulation du comportement d'un échantillon d'acteurs du transport de marchandises. Les acteurs considérés sont essentiellement des entreprises et des sociétés de transport. Dès lors, un paradigme présenté dans la section suivante s'imposera naturellement comme très adapté à ce type de simulation : celui des systèmes multi-agents. Dans un tel système, les différents acteurs du problème sont représentés par des entités informatiques autonomes en interaction appelées « *agents* ». A partir du moment où le comportement de transporteurs est simulé, un aspect important du modèle prend forme, à savoir : les problèmes de tournées. Ces problèmes vont se voir attribuer une attention particulièrement importante de par leur rôle primordial dans la simulation. En effet, ceux-ci font office d'interface entre la demande brute en terme de besoins de services de transport et la demande en terme de capacité de réseau. Comme indiqué plus tôt, ce modèle sera ensuite appliqué à un scénario wallon pour une période d'une journée.

Dans un second temps, un modèle d'affectation sera présenté. La demande générée dans la simulation sera affectée sur le réseau routier Wallon. Ce modèle d'affectation devra pouvoir tenir compte de l'aspect temporel de la demande de transport. A ce niveau aussi, différents modèles existent dans la littérature : d'une part des modèles statiques, n'ayant pas pour objectif de tenir compte

d'une quelconque évolution du transport lors de l'affectation mais plutôt d'affecter des matrices origines-destinations importantes sur de grands réseaux, et d'autre part, des modèles d'affectation dynamiques. Ces modèles d'affectation tiennent compte de l'évolution des flux de transport dans la fenêtre de temps étudiée. Si ces modèles d'affectations permettent d'analyser des phénomènes beaucoup plus subtils, il est important de noter qu'ils sont aussi beaucoup plus gourmands en termes de temps de calculs. Ils sont généralement utilisés sur de très petits réseaux urbains avec des matrices origines-destinations réduites. Confrontés d'une part à la problématique de la notion temporelle et d'autre part à un réseau d'une envergure considérable, il a été choisi de construire un modèle d'affectation temporel se situant entre les deux types de modèles existants. Celui-ci pourra tenir compte d'un aspect temporel sans être réellement dynamique au sens strict (la nuance sera plus amplement discutée dans la section concernée), ce qui permettra d'affecter nos matrices temporelles sur un réseau de taille réaliste.

Les travaux présentés dans cette thèse ont été présentés à différents stades de leur avancement au cours des dernières années lors de différents congrès et séminaires. Ils ont été réalisés dans le cadre du projet DIDAM (Disaggregated demand and assignment models for combined passengers and freight transport). L'objectif du projet est de proposer un modèle combiné pour les transports de marchandises et de passagers, de la génération de la demande à l'affectation.

La première publication sur le sujet (Barthelemy, et al., 2009) propose de situer le contexte dans lequel le projet DIDAM se situe et de présenter les premiers jalons du modèle ainsi que les tous premiers résultats. Ce papier aborde séparément les transports de marchandises et passagers. En ce qui concerne le transport de passagers, une attention très particulière est portée à la génération de populations synthétiques. Cette étape est nécessaire car elle permettra plus tard de générer les agents représentant les acteurs intervenant dans le transport de passagers, à savoir la population. En ce qui concerne le transport de marchan-

dises, des données sur les entreprises wallonnes sont disponibles et permettent la génération des agents. La première version du modèle de génération de demande de transport de marchandises voit donc le jour un peu plus rapidement. Celui-ci se veut exploratoire et est alors en phase de test. Il simule le comportement d'un échantillon d'entreprises et de transporteurs en interaction. Les entreprises effectuent séquentiellement une ou plusieurs demandes et les transporteurs proposent un prix pour chacune d'elles. L'objectif de cette simulation étant de générer une matrice origines-destinations temporelle représentant les déplacements d'une série de camion ainsi que leur évolution au fil de la période étudiée. On peut souligner que différents aspects du transport de marchandises ne sont pas pris en compte dans ces premiers travaux, comme par exemple, la planification des tournées des transporteurs. Ceux-ci consacrent en effet un camion à chaque demande. Cette limitation majeure a rapidement été traitée et les considérations associées aux problèmes de tournées sont prises en compte par le modèle dans le papier de Barthelemy, et al. (2010). Dans ces travaux, les transporteurs, à la réception des différentes demandes, planifient leurs tournées en tentant de minimiser leur coûts de transport. Cependant le modèle est toujours incomplet. Les coûts de transport sont, par exemple, constants tout au long de la période étudiée. Piotte et Jourquin (2010), (2011a) et (2011b) se sont donc concentrés sur la composante transport de marchandise du projet pour proposer une version plus aboutie du modèle de génération de la demande de transport de marchandise. La méthode de planification des tournées utilisée par les transporteurs dans cette nouvelle version se voit améliorée. En outre, la possibilité d'utiliser des fonctions de coûts temporelles fait son apparition dans le modèle.

Cette thèse présente l'aboutissement du travail qui a été réalisé sur la composante transport de marchandise du projet. Le modèle de génération de demande de transport a été amélioré à plusieurs niveaux. Par exemple, le phénomène de transport pour compte propre est maintenant pris en compte. En outre, deux

méthodes d'affectations temporelles de la demande sont proposées en fin de manuscrit.

II. Génération de la demande - Revue de littérature

La première partie de ce manuscrit présente un modèle de génération de la demande. Cette section propose ainsi, tout d’abord, une revue de littérature sur les modèles de génération de la demande existants ainsi que leurs limitations. Ces dernières suggèrent la nécessité de modéliser le transport différemment de manière à pouvoir tenir compte des interactions entre les acteurs du système étudié. Ainsi, les systèmes multi-agents seront présentés comme alternative aux méthodes existantes et la seconde partie de cette section présente une revue de littérature sur le sujet. Finalement, au cœur de la génération de la demande se trouvent les problèmes de tournées. En effet, l’ordre dans lequel les services de transport sont effectués et la manière dont ils sont organisés influent directement la demande dérivée dans la simulation. Cet aspect fait d’ailleurs partie des plus importants et des plus complexes du modèle, c’est pourquoi il fait aussi l’objet d’une attention toute particulière et relativement conséquente en troisième et dernière partie de cette section.

II.1. Modèles de génération classiques

Comme *Vickerman* (2003) le fait remarquer, le transport de marchandises a été moins étudié que le transport de passagers. *Ortúzar* et *Willumsen* (1990) propose une série de raisons à cette observation. Tout d’abord, la principale raison pour laquelle des modèles de transport ont été développés est l’apparition de congestion urbaine sur le réseau. Cette congestion est généralement due au transport de passagers dans les zones intra-urbaines. Ensuite, la modélisation du transport de marchandises est nettement plus complexe. Elle demande de tenir compte d’un nombre plus important d’acteurs que dans le cadre du transport de passagers (entreprises qui exportent, importent, expéditeurs, chargeurs, intermédiaires,...) et d’une variété de paramètres concernant les marchandises à transporter. *Limbourg* (2007) souligne aussi que « *d’un point de vue politique, le transport de passagers est plus sensible que le transport de marchandises* ».

En outre, bien qu'il ait toujours été compris que les flux de transports étaient induits par le besoin d'un individu ou d'une marchandise d'être à différents endroits à différents moments, les modèles de transport ont historiquement été plus orientés sur l'analyse et la génération de trajets au travers de modèles dits « *trip-based* » plutôt que sur l'analyse et la génération de chaînes d'activités ou de chaînes logistiques. En dépit des travaux de *Mitchell* et *Rapkin* (1954) invitant à développer des modèles de transport intégrant les chaînes d'activités/logistiques, des modèles dits « *activity-based* » dérivant les flux de transport de ces chaînes d'activités/logistiques n'ont été développés que bien plus tard (*Hägerstrand*, 1970; *Chapin*, 1974; *Fried*, et al., 1977; *Jones*, et al., 1983). A la lumière de cette remarque, cette revue de modèles de génération de la demande présentera tout d'abord les modèles *trip-based* les plus courants pour ensuite s'attaquer à quelques modèles *activity-based*.

Lors de la mise au point d'un modèle de transport quel qu'il soit, il est de mise de commencer par analyser la zone d'étude et de la scinder en de plus petites parties. Le scénario sur lequel le modèle développé dans ce travail sera appliquée concentrera sur le territoire Belge qui sera divisé au niveau 5 de la Nomenclature des Unités Territoriales Statistiques (NUTS-5) établie par Eurostat.

Dans la plupart des domaines de recherche liés aux sciences économiques, les modèles développés confrontent souvent l'offre et la demande. Le domaine du transport n'y fait pas défaut. La demande de transport est généralement définie comme l'ensemble des quantités à transporter depuis chaque origine à chaque destination. On utilise donc naturellement communément des matrices origines-destinations afin de représenter cette demande de transport. Ces matrices contiennent généralement origine, destination et quantité transportée. On y adjoint parfois une colonne représentant l'heure de départ des marchandises à l'origine. Ce sera le cas dans la simulation développée tout au long de ce travail. L'offre de transport est, quant à elle, définie par la combinaison entre le service que les transporteurs peuvent proposer, l'infrastructure disponible, des lois imposées

par l'organisme de régulation du réseau de transport ainsi que des caractéristiques propres à chaque transporteur comme les moyens de transports dont il dispose, ces derniers étant eux-mêmes définis comme les différents types de véhicules utilisés dans les différents modes de transport.

Le modèle *trip-based* le plus fréquemment utilisé dans le cadre de la planification de transport est le modèle à quatre étapes. Il est représenté en figure 1. Les différentes étapes du modèle sont les suivantes :

- Génération : cette étape consiste à déterminer les quantités globales entrantes et sortantes de chaque zone.
- Distribution : cette étape consiste à déterminer pour chaque zone origine, la part de la quantité sortante qui aura pour destination une zone déterminée. A la sortie de cette étape, une matrice origines-destinations tous modes confondus est donc théoriquement générée.
- Répartition modale : cette étape consiste en la répartition des flux entre les différents modes de transport.
- Affectation : cette étape consiste à déterminer les chemins suivis sur le réseau par les marchandises transportées. Plus d'attention sera donnée à cette étape dans la section V.

Bates (2000) rappelle que la première version du modèle à quatre étapes a été beaucoup critiquée à cause de son caractère séquentiel. En effet, dans cette version, le modèle consiste simplement en la succession des étapes. Il note néanmoins qu'en réponse à ces critiques, une version améliorée du modèle a été utilisée dans laquelle est introduite la notion de feedback entre les différentes étapes (flèches en pointillés sur la figure 1).

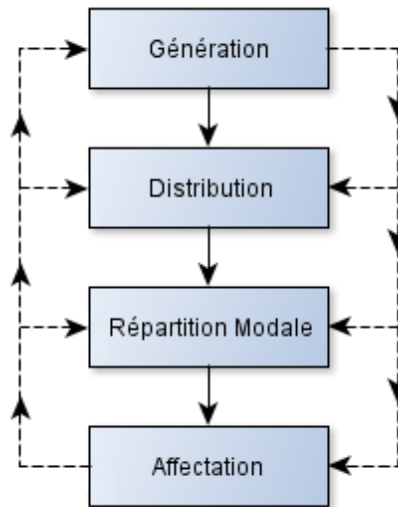


Figure 1 : Modèle à 4 étapes.

Comme *McNally* (2000) le fait remarquer, on pourrait aussi diviser le modèle à quatre étapes en un modèle à deux étapes, à savoir : génération de la demande et affectation de cette demande. C'est dans cette idée que la structure de ce travail est imaginée. En effet, les sections II, III et IV ont pour objectif d'introduire, décrire et discuter du modèle de génération de la demande développé dans le cadre de cette recherche, alors que les sections V et VI traiteront du modèle d'affectation.

Durant la seconde moitié du vingtième siècle, différents modèles de génération essentiellement *trip-based* ont été développés et méritent d'être brièvement mentionnés. Parmi ceux-ci, citons le modèle de première génération bien connu de *Casey* (1955) : le modèle gravitaire, imaginé par analogie avec le modèle de gravitation de Newton. Dans sa formulation de base, ce modèle stipule que la quantité transitant de la zone i à la zone j est donnée par l'équation : $T_{ij} = \alpha P_i P_j / d_{ij}^\beta$ où P_i et P_j sont respectivement des poids (eg : populations) attribués aux zones i et j , et, α et β des paramètres de calibration. Néanmoins, cette formulation a été remplacée par $T_{ij} = O_i D_j f(c_{ij})$ où $O_i = \sum_j T_{ij}$, $D_j = \sum_i T_{ij}$, d_{ij} représente la distance entre les zones i et j , et $f(c_{ij})$ représente la fonction de

coût (généralisé) entre les deux zones. *Furness* (1965) a proposé une méthode itérative basée sur les facteurs de croissance dont l'objectif est d'estimer les éléments T_{ij} d'une matrice origines-destinations en jouant tantôt sur les lignes, tantôt sur les colonnes afin de respecter les contraintes $O_i = \sum_j T_{ij}$ et $D_j = \sum_i T_{ij}$. Mentionnons aussi le modèle de maximisation de l'entropie, développé par *Wilson* (1974) consistant à postuler qu'en l'absence d'information sur les micro-états d'un système, ils sont tous équiprobables. Le méso-état le plus probable du système est donc celui qui est produit par le plus de combinaisons de micro-états.

Devant les difficultés des modèles *trip-based* à tenir compte de phénomènes plus ou moins subtiles, comme la congestion ou des décisions politiques, de plus en plus de modèles *activity-based* ont été développés. Dans ces modèles, une attention particulière est portée à la génération de chaînes d'activités/logistiques intégrant non seulement les temps de transport mais aussi une variété d'attributs liés aux acteurs considérés (eg : agenda, envie ou besoin strict de participer à une série d'activités dans le cadre du transport de passagers). Avec l'avènement des modèles *activity-based*, on entend donc modéliser le comportement très complexe d'acteurs, qu'ils soient des êtres humains (transport de passagers) ou des organisations ou entreprises (transport de marchandises). Avec de telles ambitions, deux questions se posent : tout d'abord, avec quel niveau de réalisme doit-on simuler un tel comportement ? Hélas, actuellement peu de travaux semblent y apporter une réponse. En effet, la manière la plus simple de la trouver est de comparer les résultats de modèles tenant compte de différents critères afin de voir lesquels sont les plus pertinents. Ensuite, de quelle quantité d'information a-t-on besoin pour modéliser ces chaînes d'activités/logistiques ? A nouveau, il semble que tant que le sujet n'est pas parfaitement maîtrisé, un nombre important d'informations de qualité est nécessaire afin de dégager lesquelles sont vraiment pertinentes et ont réellement un impact sur les chaînes d'activités/logistiques et donc les flux de transport qui en découlent. Un nombre

grandissant de travaux sur les modèles *activity-based* a donc vu le jour particulièrement durant les trente dernières années.

Parmi ceux-ci, mentionnons le projet STARCHILD (McNally et Recker, 1986; Recker, et al., 1986) est un modèle *activity-based* passagers en trois étapes se basant sur des listes d'activités planifiées pour des ménages pour générer des chaînes d'activités détaillées pour chaque membre du ménage. Plus tard, les modèles relativement similaires SCHEDULER de Gärling, et al. (1994), SMASH de Ettema et Timmermans (1995) ou encore AMOS de Kitamura (1996) ont vu le jour. Bowman et Ben-Akiva (2000) ont développé un modèle désagrégé de chaînes d'activités basé sur les modèles de choix discrets introduits par Williams (1981).

Plus d'informations sur les modèles de transport peuvent être trouvées dans les travaux de Bowman (2009), Davidson, et al. (2007), Hensher et Button (2000), Ortúzar et Willumsen (1990) et du WSP Group (2002).

Comme mentionné plus tôt, dans le modèle de génération de demande de transport présenté dans ce travail, les systèmes multi-agents jouent un rôle capital puisqu'ils permettent de représenter chaque acteur du transport par une entité autonome en interaction avec les autres et avec son environnement qu'on appellera : « *Agent* ». La sous-section suivante a pour objectif d'introduire ces systèmes et de présenter quelques-uns des travaux dans lesquels ils ont déjà été utilisés.

II.2. Systèmes multi-agents

Le but de la recherche présentée en première partie de cette thèse est de proposer une méthode de génération de matrices origines-destinations temporelles désagrégées. Différents modèles partageant, au moins partiellement, cet objectif ont été présentés dans la sous-section précédente. Cependant, comme cela a été souligné, ceux-ci font l'objet de diverses critiques. D'une part, les modèles de premier ordre comme les méthodes de facteurs croissants (Furness, 1965), de

maximisation de l'entropie (Wilson, 1974) ou gravitaire (Casey, 1955) ne représentent des alternatives crédibles face aux ambitions du projet de par leur caractère agrégé. D'autre part, si les modèles, dits de second ordre, comme les modèles logits et probits (Williams, 1977; Domencich et McFadden, 1975) sont plus adaptés à la génération de matrices désagrégées, ceux-ci ne tiennent pas compte des comportements et interactions entre les acteurs du transport. Il en va de même pour le modèle le plus usité dans la modélisation du transport : le modèle à 4 étapes.

Or, il existe un paradigme spécialement conçu pour simuler les comportements et interactions de différents acteurs d'un système en fonction de leurs besoins et/ou objectifs. Il s'agit des systèmes multi-agents. Ceux-ci sont généralement utilisés afin de simuler un système dont l'évolution dépend d'un grand nombre de paramètres propres aux acteurs qui le composent. Ce paradigme permet, en effet, de définir un ensemble d'acteurs en interactions, représentés par des « agents » pourvus de besoins et/ou d'objectifs, de comportements,... Un concepteur de systèmes multi-agents fait le choix de se concentrer sur le développement et la simulation des actions et comportements individuels des acteurs du système étudié ainsi que de leurs interactions. Il laisse donc un nombre d'entités soigneusement modélisées interagir afin d'analyser le schéma macroscopique émergeant. Parmi les références importantes, Ferber (1995) a fourni un travail théorique considérable en termes de méthodologie multi-agents plus particulièrement appliquée au domaine de l'intelligence artificielle distribuée. Il définit un agent de la manière suivante :

« On appelle agent une entité physique ou virtuelle

- a. qui est capable d'agir dans un environnement,*
- b. qui peut communiquer directement avec d'autres agents,*
- c. qui est mue par un ensemble de tendances (sous la forme d'objectifs individuels ou d'une fonction de satisfaction, voire de survie, qu'elle cherche à optimiser),*

- d. *qui possède des ressources propres,*
- e. *qui est capable de percevoir (mais de manière limitée) son environnement,*
- f. *qui ne dispose que d'une représentation partielle de cet environnement (et éventuellement aucune),*
- g. *qui possède des compétences et offre des services,*
- h. *qui peut éventuellement se reproduire,*
- i. *dont le comportement tend à satisfaire ses objectifs, en tenant compte des ressources et des compétences dont elle dispose, et en fonction de sa perception, de ses représentations et des communications qu'elle reçoit. » (Ferber, 1995)*

Et plus globalement, il définit un système multi-agents de la manière suivante :

« On appelle système multi-agents (ou SMA), un système composé des éléments suivants :

- a. *un environnement E , c'est-à-dire un espace disposant généralement d'une métrique,*
- b. *un ensemble d'objets O . Ces objets sont situés, c'est-à-dire que, pour tout objet, il est possible, à un moment donné, d'associer une position dans E . Ces objets sont passifs, c'est-à-dire qu'ils peuvent être perçus, créés, détruits et modifiés par les agents,*
- c. *un ensemble A d'agents, qui sont des objets particuliers ($A \subseteq O$), lesquels représentent les entités actives du système,*
- d. *un ensemble de relations R qui unissent des objets (et donc des agents) entre eux,*
- e. *un ensemble d'opérations Op permettant aux agents de A de percevoir, produire, consommer, transformer et manipuler des objets de O ,*
- f. *des opérateurs chargés de représenter l'application de ces opérations et la réaction du monde à cette tentative de modification, que l'on appellera les lois de l'univers. » (Ferber, 1995)*

Dans ses travaux, Ferber (1995) propose de classer les agents dans différentes catégories selon deux axes. D'une part, il distingue les agents cognitifs des agents réactifs. Les premiers sont des agents complexes capables d'effectuer des actions « intelligentes » (systèmes experts), tandis que les seconds sont des agents simples qui individuellement n'ont pas la capacité de mener des actions complexes (comme les fourmis). D'autre part, sont distingués les agents téléonomiques dont les objectifs proviennent des entrailles des agents, des agents réflexes dont les comportements sont des réactions à l'environnement. Remarquons qu'il n'est pas toujours aisé de classer un agent dans une catégorie précise, d'une part car la notion d'action « intelligente » est relativement arbitraire et d'autre part car les comportements des agents sont généralement le produit d'une interaction entre des stimuli environnementaux combinés aux objectifs internes.

Les systèmes multi-agents sont utilisés dans des domaines très divers, comme l'implémentation de systèmes experts (*Kwon et Lee, 2001*), la planification urbaine (*Valbuena, et al., 2010; Augustijn-Beckers et al., 2011*), l'écologie (*Saqalli, et al., 2010*), les sciences sociales (*Pavon, et al., 2008*), et l'étude de la propagation d'épidémies (*Carley, et al., 2006; Lee, et al., 2008*). Notons que devant cette méthodologie en plein essor, *Oliveira, et al. (1999)* a proposé une analyse des applications et sujets qu'il serait intéressant d'explorer en utilisant les systèmes multi-agents. Il met le doigt sur certaines caractéristiques de sujets de recherche qui permettraient l'utilisation pertinente de systèmes multi-agents, comme l'hétérogénéité des entités en interactions, la complexité globale du problème, le caractère dynamique de l'environnement, etc. *Park, et al. (2005)* a développé une méthode de développement de système multi-agents. Il y propose un archétype d'architecture abstrait adaptable à différents problèmes.

Davidsson, et al. (2005) ont mené une enquête plus spécifique sur l'utilisation de systèmes multi-agents dans le domaine du transport. Ils analysent entre autres les résultats d'un nombre considérable de travaux en se basant sur les critères de

maturité de *Parunak* (2000) et sur la comparaison des résultats avec d'autres méthodes existantes.

France et *Ghorbani* (2003) ont développé une micro-simulation de gestion dynamique du trafic urbain basé sur les systèmes multi-agents qu'ils testent grâce à deux scénarios : l'un où un accident se produit, et l'autre où la congestion augmente. *Adler*, et al. (2005) proposent un modèle de contrôle de trafic et de guidage visant à améliorer les performances du réseau en passant par la négociation entre les utilisateurs et les fournisseurs d'information. Leurs résultats montrent que les utilisateurs du réseau peuvent être répartis plus uniformément sur ce dernier sans compromettre leur utilité perçue. *Balbo* et *Pinson* (2005) ont développé un *Système Automatique de Traitement des Incidents en Réseaux (SATIR)* multi-agents ayant pour objectif de proposer un outil d'aide à la décision en temps réel aux bus. Ils ont testé leur modèle en modélisant des perturbations sur le réseau et en analysant la proportion de ces perturbations détectées par leur système. *Van Katwijk*, et al. (2005) ont mis au point une plateforme multi-agents. Cette plateforme peut être utilisée comme base au développement d'outils conçus pour gérer dynamiquement le trafic routier. *El Hmam*, et al. (2006) ont proposé un modèle hybride de flux de véhicules à deux niveaux. Ils simulent à l'échelle macroscopique les flux sur les grands axes en utilisant le modèle de files de *Payne* (1971). Ils utilisent des systèmes multi-agents pour simuler le comportement des utilisateurs du réseau lorsqu'ils traversent des intersections. Une autre simulation de trafic basée sur les systèmes multi-agents au niveau des intersections a été proposée par *Doniec*, et al. (2008). Dans ces travaux, les agents, dotés d'habilités d'anticipations, se présentent aux abords d'intersections. Ils perçoivent la situation du trafic et se coordonnent afin de traverser sans encombre. Notons que de tels modèles (*Magne*, et al., 2000; *Bourrel* et *Lessor*, 2003; *Leclercq* et *Moutari*, 2007) ne sont pas destinés à analyser l'impact de modifications subtiles, de décisions politiques ou de la congestion sur le processus

de décision des acteurs du transport en termes de chaîne d'activités ou d'approvisionnement.

Outre ces travaux orientés étude et analyse du trafic, quelques recherches se sont concentrées sur la logistique, les chaînes d'activités ou d'approvisionnement. *Bergkvist*, et al. (2005) et *Davidsson*, et al. (2008) ont développé une micro simulation visant à analyser l'impact de politiques gouvernementales sur les chaînes de transport. Ils analysent, entre autres, l'impact de l'adoption d'une taxe au kilomètre sur les choix du mode de transport, des quantités envoyées, etc.

Dans un tout autre domaine, *Wang*, et al. (2008) a développé un modèle multi-agents de planification de flotte, tournées et statuts des véhicules visant à recourir à des véhicules automatisés afin de desservir les zones dans lesquelles les transports publics ont peu d'incitants à se développer de par la trop faible demande. *Hackney* et *Marchal* (2011) ont analysé les liens entre différents scénarios d'interactions sociales entre personnes et les flux de passagers résultants à travers un modèle multi-agents. *Sirikijpanichkul*, et al. (2007) ont, quant à eux, utilisé les systèmes multi-agents pour optimiser la localisation de hubs intermodaux de marchandises. *Böhnlein*, et al. (2011) ont proposé un modèle multi-agents de planification de transport dans l'industrie des journaux. *Holmgren*, et al. (2012) ont proposé une micro-simulation multi-agents de génération de chaînes logistiques appelée TAPAS qu'ils ont appliqué sur un cas réel situé dans le sud de la mer Baltique. Il a montré que sa simulation permettait d'analyser l'impact de décisions politiques, toujours à un niveau microscopique. Finalement, *Wisinee*, et al. (2007) ont proposé un modèle de micro-simulation urbain générant les flux de marchandises en incorporant les relations entre les acteurs de la chaîne d'approvisionnement en se concentrant sur la ville de Tokyo. La simulation développée au cours de cette recherche doctorale vise à étendre ces derniers travaux à une zone d'étude plus vaste et dans un contexte interurbain.

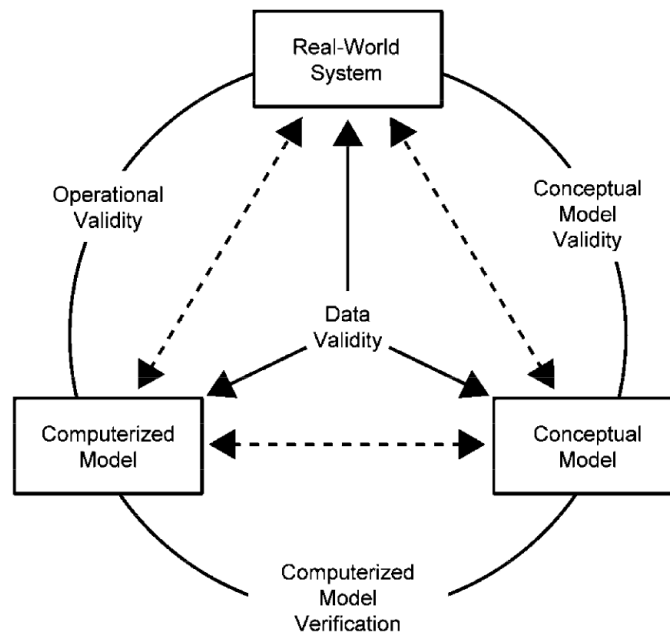


Figure 2 : Représentation conceptuelle des composants du développement et de la validation d'un modèle
(Source : Louie et Carley (2008))

L'une des difficultés majeures associée aux systèmes multi-agents réside dans la validation de la simulation. *Louie et Carley (2008)* tentent de proposer des pistes afin de valider de tels modèles. Ils font remarquer que si dans d'autres domaines, comme ceux des sciences exactes, il est possible de confronter les résultats de simulations avec une loi bien connue, les systèmes multi-agents sont souvent utilisés pour analyser des systèmes socio-politiques dont on ne connaît pas les lois et pour lesquels les méthodes traditionnelles de validations ne sont pas applicables. Ils font aussi remarquer qu'une simulation multi-agents requiert une quantité importante de données désagrégées.

Dès lors il est souvent difficile de rassembler suffisamment de données pour créer un système réaliste et valider les résultats produits par la simulation. *Louie et Carley (2008)* proposent de valider aux niveaux conceptuel, opérationnel et informatique (voir Figure 2). Une simulation multi-agents utilisant généralement différents paramètres, ils font remarquer l'importance d'analyser dans quelles

tranches de valeurs ces paramètres sont pertinents. Finalement, lorsque la simulation est composée de plusieurs modules influant les uns sur les autres, ils proposent de valider individuellement chaque module.

Si la validation du système en entier s'avère difficile, la validation individuelle du réalisme de chaque agent peut, elle aussi, représenter un vrai défi. En effet, les perceptions et comportements mêmes des agents sont parfois difficiles à définir de manière exacte. C'est par exemple le cas dans les études plus étroitement liées à la sociologie ou la psychologie. Dans ces domaines, la conception même des différents acteurs du système peut s'avérer complexe et reposer sur des fondations parfois fragiles. A ce sujet les travaux de *Garcia*, et al. (2007) ou encore *Fuentes*, et al. (2004) peuvent être cités. Ceux-ci proposent des pistes pour valider les simulations multi-agents dans ce contexte. Néanmoins, le modèle ici présenté échappe à ces difficultés car les perceptions et comportements des agents sont supposés beaucoup plus tangibles, simples, et rationnels que dans les exemples de recherches dans les domaines cités plus tôt. *Ligtenberg*, et al. (2010) proposent, quant à eux, une méthode de validation qualitative à travers la comparaison du comportement des agents de leur modèle à celui de joueurs participant à un jeu de rôle.

A titre informatif, un autre contexte peut rendre la vérification et validation (V&V) de systèmes multi-agents d'autant plus compliquée. C'est celui de l'utilisation de systèmes multi-agents comme systèmes experts dans lequel ceux-ci apprennent à résoudre de nouveaux problèmes et évoluent. Certains travaux dans la littérature sont dédiés à ce domaine comme ceux de *Jacobs*, et al. (1998) sur des méthodes de validation basées sur la programmation logique inductive, ou encore ceux d'*Al-Neaimi*, et al. (2012) qui proposent des recommandations plus générales sur la démarche à suivre pour procéder à la vérification et la validation de tels systèmes.

En conclusion, deux niveaux de validations sont généralement distingués dans la littérature. D'une part, le niveau microscopique, dans lequel la cohérence des agents individuels est testée. Ce niveau de validation n'est nécessaire que dans le cadre de simulations où les perceptions et comportements des agents sont très complexes ou requièrent d'être calibrés. Ce qui n'est pas le cas des agents constituant le modèle ici présenté. D'autre part, la validation macroscopique pouvant consister en l'analyse de la cohérence globale du système, ou en la comparaison de résultats macroscopiques à des données tirées du monde réel. C'est cette dernière option de validation qui est la plus pertinente dans le cas du modèle ici proposé, malgré le fait que cette méthode de validation dépende fortement de la qualité des données utilisées en input de la simulation.

Voilà qui conclut la sous-section de présentation des systèmes multi-agents. La prochaine sous-section va présenter les problèmes de tournées. Pour rappel, l'idée du modèle présenté dans cette recherche doctorale est de simuler le comportement des différents acteurs du monde du transport (de marchandises) et plus particulièrement celui des sociétés de transport. Les agents représentant les sociétés de transport vont être confrontés à un problème bien connu et très concret auquel sont elles-mêmes confrontées les sociétés de transport du monde réel : le problème de tournées. En effet, dès lors qu'une société de transport se voit devoir livrer un certain nombre de colis, elle doit décider de la façon dont elle va utiliser ses différents véhicules et de l'ordre dans lequel elle va visiter chacun de ses clients. Ces problèmes de tournées ont déjà fait l'objet de multiples recherches et sont des problèmes très intéressants de par la combinaison de leur aspect très concret et de leur complexité. La section suivante a pour objectif de présenter différents problèmes de tournées déjà étudiés dans la littérature et qui seront aussi abordés par nos agents représentant des sociétés de transport.

II.3. Les problèmes de tournées

Le Vehicle Routing Problem (VRP) est un problème bien connu en recherche opérationnelle. Il a été étudié intensivement depuis la fin des années 50, marquées par les travaux fondateurs de *Dantzig et Ramser* (1959), et *Land et Doig* (1960). Sous sa forme initiale, le VRP est un problème consistant en l'élaboration de tournées pour une flotte de véhicules afin de visiter un nombre de clients définis en minimisant les coûts de transport.

Ce VRP initial se voit généralement associé à diverses contraintes, que ce soit en termes de capacité de véhicules, de fenêtres de temps, de méconnaissance de la demande,... Ces nombreuses variantes de VRP proviennent de la réalité des contraintes auxquelles font face les milliers de sociétés de distribution de marchandises et de personnes dans les différentes situations dans lesquelles elles peuvent se trouver chaque jour.

Sans avoir la prétention d'être exhaustive, cette section présente le VRP général ainsi que plusieurs de ses variantes, liées de près au problème de tournées auquel sont confrontés les transporteurs : (1) Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP) et Asymmetric Capacitated Vehicle Routing Problem (ACVRP), (2) Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery (VRPPD), (3) Dial-A-Ride Problem (DARP) (4) Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem (HFVRP), (5) Stochastic Vehicle Routing Problem (SVRP), (6) Dynamic Vehicle Routing Problem (DVRP) et (7) Time-Dependent Vehicle Routing Problem (TDVRP).

Le VRP est un problème NP-complet. Il se pose comme l'extension à plusieurs véhicules du Traveling Salesman Problem (TSP), lui-même NP-complet. Ce qui signifie que seules les *petites* instances du problème peuvent être résolues exactement dans des temps de calculs acceptables. Typiquement, les algorithmes de résolution exacte peuvent résoudre des problèmes d'une taille de l'ordre de la centaine de clients. Des algorithmes de résolutions exacts et/ou des heuristiques ont été proposés dans la littérature pour chacun de ces problèmes. Les heuristiques ont pour objectif d'analyser une partie de l'espace des solutions, que ce

soit dans le cadre de la génération ou d'amélioration d'une solution. Ces heuristiques tentent de trouver une solution dont le coût sera minimal. A titre informatif, certaines méthodes de résolutions exactes sont présentées dans cette section mais une attention plus particulière sera attribuée aux heuristiques et plus précisément aux heuristiques dites *classiques* étant donné la taille du problème présenté dans ce travail. Dans la littérature, les heuristiques *classiques* sont généralement des heuristiques relativement simples vouées à être bloquées au premier minimum local rencontré dans l'analyse de l'espace des solutions. A contrario, les métaheuristiques, généralement composées de plusieurs heuristiques *classiques*, ont été imaginées afin d'analyser une plus vaste portion de l'espace des solutions. Elles possèdent des mécanismes leur permettant de sortir d'éventuelles portions de l'espace autour d'un minimum local afin de trouver un minimum plus global.

Notons que des publications dont l'objectif est de faire une revue de littérature plus complète tant sur les variantes que sur les méthodes de résolution de tous types existent, citons entre autres *Cordeau, et al. (2007)*, *Golden et Assad (1988)*, *Golden, et al. (2008)*, *Subramanian (2010)* et *Toth et Vigo (2002)*.

II.3.a. Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP)

Le Capacitated Vehicle Routing Problem symétrique est défini sur un graphe non orienté $G=(V,A)$ où $V=\{1,...,n\}$ est un ensemble de sommets représentant les n différents clients devant être visités, chacun caractérisé par une demande d_i ($i=1,...,n$). $A=\{(i,j): i,j \in V \text{ et } i \neq j\}$ est un ensemble d'arêtes liant les différents sommets de V . Une flotte de k camions de même capacité Q est disponible au sommet O correspondant au dépôt. En considérant des coûts de transport c_{ij} associés aux arêtes (i,j) , le VRP sera dit *symétrique* si $c_{ij} = c_{ji}$ quels que soient i et j . Notons que dans le cas où la matrice des coûts n'est pas symétrique, $\exists i,j : c_{ij} \neq c_{ji}$, nous parlerons d'Asymmetric Capacitated Vehicle Routing Problem (ACVRP). L'ACVRP est une généralisation du CVRP dont les applications apparaissent lors-

qu'on veut tenir compte de restrictions particulières sur le réseau comme les sens interdits, les péages,...

Le problème consiste en la détermination de la meilleure façon d'attribuer une tournée à chaque camion afin de desservir chaque client une et une seule fois par un et un seul camion (1), chaque tournée doit commencer et se finir au dépôt O (2), la charge totale de chaque camion sur chaque arête n'excède jamais sa capacité Q (3), cet ensemble de tournées minimise les coûts de transport (4). Dans cette section, les termes « coûts », « temps de transport » et « distance » seront utilisés de manière interchangeable.

Les méthodes exactes de résolution du VRP les plus connues sont basées sur les algorithmes de type *Branch-and-bound* ou *Branch-and-cut*. Différents travaux couvrent en détails ces méthodes de résolutions exactes comme ceux de *Baldacci* (2007), *Cordeau*, et al. (2007), *Laporte* et *Nobert* (1987) ou encore *Toth* et *Vigo* (2002). Dans cette section, peu d'attention sera accordée à ce type d'algorithmes car le problème abordé est de trop grande taille pour être résolu exactement en des temps de calculs réalistes. En effet, on considèrera dans cette étude plus de 400 transporteurs qui seront confrontés en tout et pour tout à près de 100000 demandes. Il est donc tout à fait inenvisageable de résoudre les problèmes de tournées de manière exacte. Dans ce cas il est d'usage de se tourner vers des méthodes heuristiques.

Un nombre important d'heuristiques a été proposé durant ce dernier demi-siècle. Les travaux de *Cordeau*, et al. (2007) dont cette section est inspirée, *Laporte* (2009), *Laporte*, et al. (2000), et *Toth* et *Vigo* (2002) les présentent en détails. Celles-ci sont classées dans deux catégories : les heuristiques *classiques* et les *métaheuristiques*. Les heuristiques *classiques* sont elles-mêmes classées en trois sous-catégories : (1) les heuristiques de construction, (2) les heuristiques en deux-phases et (3) les heuristiques d'amélioration de tournées.

Les heuristiques de construction de tournées se font généralement par insertion en partant de rien. Trois étapes sont itérées jusqu'à obtention d'une solution :

tout d'abord l'initialisation, ensuite le choix d'un ou plusieurs sommets, et finalement l'insertion de ces sommets dans les tournées. Parmi ces heuristiques de construction, la plus connue est celle de *Clarke et Wright* (1964). Elle prend comme solution initiale la solution où tous les clients sont desservis individuellement chacun par une tournée distincte. Elle se base sur la comparaison du coût de desserte de deux clients l'un après l'autre dans une même tournée par rapport à celui de dessertes dans deux tournées. Si le client i est le dernier d'une tournée et le client j le premier d'une autre, l'économie (*savings*) associée à la fusion de deux tournées est définie comme $s_{ij} = c_{i0} + c_{0j} - c_{ij}$. Ces économies s_{ij} sont alors parcourues par ordre décroissant et les tournées sont fusionnées autant que possible à condition que l'économie soit positive. Il existe d'autres algorithmes de construction sur lesquels cette section ne s'attardera pas, comme celui de *Mole et Jameson* (1976) généralisé par *Christofides* (1979).

Les heuristiques en deux-phases scindent le problème en deux sous-problèmes : le clustering consistant à regrouper les clients à visiter dans chaque tournée et la détermination de chaque tournée (TSP). Les heuristiques procédant dans cet ordre sont appelées *cluster-first-route-second*. Parmi celles-ci, la plus connue est l'heuristique *Sweep* proposée par *Gillett et Miller* (1974), *Wren* (1971), et *Wren et Holliday* (1972). En commençant par un sommet arbitraire, en utilisant les coordonnées polaires, les sommets sont parcourus par angle croissant formé par rapport au dépôt et au premier sommet. Chaque sommet est ajouté à la tournée tant que possible et lorsque ce n'est plus possible, une nouvelle tournée est créée et ainsi de suite. Mentionnons les algorithmes de type *petal* sur lesquels ont travaillé *Foster et Ryan* (1976), *Renaud* (1996) et *Ryan* (1993). D'autres algorithmes de type *cluster-first-route-second* ont été proposés entre autres par *Bramel et Simchi-Levi* (1995), et *Fisher et Jaikumar* (1981). Il existe aussi des algorithmes procédant en sens inverse par rapport aux précédents, les *route-first-cluster-second* sur lesquels ont travaillé *Beasley* (1983), et *Bertsimas et Simchi-Levi* (1996). Néanmoins, *Cordeau, et al.* (2007) rapportent que leurs résultats

sont moins bons que ceux des autres heuristiques présentées ici. Concluons cette brève revue de littérature sur les heuristiques en deux phases en rappelant les travaux de *Gendreau*, et al. (1992) qui propose l'algorithme *GENIUS*, imaginé dans le cadre du TSP et donc utilisable dans la phase de *routing*. *GENIUS* est un algorithme intégré fonctionnant lui-même en deux étapes : insertion de sommets (*GENI*) et amélioration de la tournée ainsi créée (*US*).

Finalement, les heuristiques d'amélioration de tournées sont des algorithmes de recherche locale. Généralement utilisés en plus des algorithmes présentés précédemment, ils se basent sur une solution initiale et explorent une petite portion de l'espace des solutions environnantes en effectuant des petits changements et en recalculant le coût de la solution modifiée. Si ce coût est inférieur au coût de la meilleure solution, la nouvelle solution modifiée devient la meilleure solution. Si pas, la solution modifiée est oubliée tandis qu'une autre modification est testée sur la meilleure solution et ainsi de suite. Ces algorithmes ont pour objectif de trouver la solution menant au coût minimum local. On distingue deux types de modifications : les modifications *intra-tournée* et *inter-tournée*. Notons que les heuristiques d'amélioration intra-tournées sont les mêmes que celles utilisées dans le cadre du TSP. Une littérature abondante existe dans le domaine, *Lin* (1965) propose l'heuristique *k-opt* dans laquelle, *k* arêtes sont retirées de la solution et remplacées par d'autres. Cette méthode est coûteuse en temps de calcul et on utilise généralement $k = 2$ ou 3 . Néanmoins, *Renaud* (1996) propose de ne considérer qu'un sous-ensemble des possibilités de suppression-réinsertion permettant d'utiliser une heuristique 4-opt. Plus de détails concernant les heuristiques d'amélioration peuvent être trouvés dans les travaux d'*Aarts* et *Lenstra* (1997), *Cordeau*, et al. (2007), *Gutin* et *Punnen* (2002) , *Toth* et *Vigo* (2002), *Thompson* et *Psaraftis* (1993), et *Van Breedam* (1994).

Les méthodes présentées jusqu'à présent ont l'avantage d'être rapides, cependant elles n'explorent qu'une partie très limitée de l'espace des solutions. Elles permettent donc généralement de trouver un minimum local. D'autres algo-

algorithmes plus complexes ont été imaginés dans différents travaux. Ces métaheuristiques ont pour but d'explorer une plus vaste zone de l'espace des solutions et d'avoir moins de chance d'être *bloquées* dans un minimum local. Cette efficacité en précision accrue et en portion explorée de l'espace des solutions a un prix en termes de temps de calcul, même s'ils restent tout à fait raisonnables dans la plupart des cas étudiés jusqu'à présent. Les métaheuristiques les plus connues appartiennent à la catégorie des *Tabu-Search* (TS). En partant d'une solution initiale, elles explorent itérativement l'espace des solutions proches les moins chères. Une liste des solutions récemment passées en revue est tenue à jour, la *tabu-list* et les solutions appartenant à cette liste sont interdites afin d'éviter de tourner en rond. Dans ses travaux, *Laporte* (2000) propose une revue de la littérature et une comparaison des résultats des algorithmes TS les plus connus comme le *taburoute* de *Gendreau, et al.* (1994) basé sur GENIUS, l'algorithme de recherche *Adaptive Memory Procedure* (AMP) de *Rochat et Taillard* (1995), ainsi que les algorithmes de *Taillard* (1993), et *Xu et Kelly* (1996). Plus récemment, mentionnons les algorithmes de *Chen, et al.* (2010), *Kytöjoki, et al.* (2007), *Pisinger et Ropke* (2007), *Tarantilis* (2005), et *Zachariadis et Kiranoudis* (2010).

D'autres familles de métaheuristiques inspirées de la biologie et de l'éthologie se sont développées durant les 20 dernières années. *Mester et Bräysy* (2005), *Nagata et Bräysy* (2009) et *Prins* (2004), (2009) ont proposé différentes heuristiques mémétiques dont le principe est d'hybrider un algorithme génétique avec un algorithme de recherche locale. *Reinmann* (2004) a proposé l'heuristique *D-ants* inspirée par les colonies de fourmis.

Plus d'informations sur les méta-heuristiques peuvent être trouvées dans les travaux de *Cordeau, et al.* (2007) et *Subramanian* (2010). Notons qu'il est possible d'adapter la plupart des heuristiques présentées dans cette section à des variantes différentes – et généralement plus compliquées – du VRP. Certaines ont d'ailleurs d'abord été créées pour proposer des solutions à des versions généralisées du CVRP.

II.3.b. Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery (VRPPD)

Distinguons tout d'abord le Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery (VRPSPD) du Vehicle Routing Problem with Mixed Pickup and Delivery (VRPMPD). Le VRPSPD est une variation du CVRP dans laquelle un, plusieurs ou tous les clients ont, non seulement une demande de livraison d_i , mais aussi une demande de ramassage p_i . Il s'agit donc de trouver un ensemble optimal de tournées afin à la fois de délivrer et de collecter les quantités requises par les clients.

Cette variante a plusieurs applications, notamment dans le domaine du transport par palettes. Auquel cas, les palettes sont réutilisées et donc re-collectées après livraison par les transporteurs et le transporteur fait face à un VRPSPD. L'industrie de la boisson représente un autre exemple d'application du VRPSPD. Dans ce cas, les sociétés livrent généralement des bouteilles remplies et ramassent les vidanges afin de les réutiliser.

Le VRPMPD est, quant à lui, un cas particulier du VRPSPD dans lequel sont associés aux sommets du graphe soit une demande de livraison, soit une demande de ramassage. Plus précisément, cela revient à un VRPSPD dans lequel $d_i = 0$ si $p_i > 0$ et inversement. Dans ce cas, l'application est assez directe, les clients requièrent que leurs marchandises soient transportées d'une origine à une destination. Le VRPMPD étant un cas particulier du VRPSPD, les heuristiques imaginées pour le VRPSPD sont applicables pour le VRPMPD.

Il semble que le premier auteur à avoir travaillé sur le VRPSPD soit *Min* (1989). Celui-ci présente une heuristique afin de résoudre un problème de ramassage et de livraison de livres dans des bibliothèques. Depuis lors, différentes méthodes de résolutions heuristiques ont été proposées afin de construire les meilleures solutions possibles en des temps de calculs réduits, que ce soit pour régler de

tels problèmes à un seul (TSPPD) ou à plusieurs camions (VRPPD). *Dethloff* (2001) a proposé plusieurs heuristiques d'insertion basées sur différents critères ou une composition de critères à minimiser comme la distance parcourue, la capacité résiduelle (*Casco*, et al., 1988) ou encore la surcharge radiale (*Salhi* et *Nagy*, 1999). *Nagy* et *Salhi* (2005) ont proposé une heuristique basée sur des niveaux de faisabilité de solutions. Un nombre impressionnant de métaheuristiques, essentiellement basées sur les TS ont également été proposées par *Bianchessi* et *Righini* (2007), *Chen* et *Wu* (2006), *Crispim* et *Brandão* (2005), *Gribkovskaia*, et al. (2008), *Mosheiov* (1998), *Wassan*, et al. (2008), et *Zachariadis*, et al. (2010).

Mentionnons les méthodes de résolution exactes proposées par *Angelelli* et *Mansini* (2002) et *Dell'Amico* (2006). Quelques heuristiques basées sur l'éthologie ont aussi vu le jour. *Gajpal* et *Abad* (2009) ont proposé une heuristique basée sur les colonies de fourmis et *Vural* (2003) a proposé deux heuristiques génétiques.

II.3.c. Dial-A-Ride Problem (DARP)

Le Dial-A-Ride Problem (DARP) est une généralisation du VRPPD dans laquelle les clients ont des requêtes précises en termes d'origine et destination. Dans l'exemple du transport de passagers, un client veut généralement se déplacer d'une origine précise à une destination précise. Dans le cas du transport de marchandises, on peut aussi voir le DARP comme une version *multi-commodités* du VRPPD dans laquelle chaque marchandise est différente des autres et est représentée par une commodité précise. Plus de détails concernant les VRP multi-commodités peuvent être trouvés dans les papiers de *Hernández-Pérez* et *Salazar-González* (2009) et *Psaraftis*, 2011. Dans sa forme la plus simple, le DARP consiste donc à la détermination de tournées visant à ramasser et délivrer une série de demandes précises en termes d'origine et de destination en minimisant les coûts de transport.

On associe souvent le DARP au problème de tournée avec fenêtres de temps (time windows) dans lequel les clients souhaitent être livrés à une heure précise, ou dans une fourchette de temps définie autour de cette heure souhaitée (VRPTW) (Azi, et al., 2010; Desrosiers, et al., 1995; Gutiérrez-Jarpa, et al., 2010; Solomon, 1987). L'objectif à atteindre lors de la résolution d'un tel DARP sera alors de minimiser l'insatisfaction des clients. Cette dernière est liée au fait d'être collectés et/ou desservis à un moment plus ou moins éloigné de l'instant souhaité. Dans le cas du transport de passagers, on pourra éventuellement aussi prendre en compte le temps de trajet dans la fonction objectif. En effet, un passager veut, non seulement aller d'une origine à une destination précise à des moments définis, mais aussi que le temps de son transport soit suffisamment petit.

Cordeau, et al. (2007) présentent une revue de littérature sur le DARP dans laquelle ils rappellent qu'historiquement, le DARP a d'abord été étudié dans sa version statique (SDARP). Dans un SDARP, l'ensemble des demandes arrive avant que le ou les camions ne quittent le dépôt. L'un des premiers travaux sur le SDARP a été réalisé par Psaraftis (1980). Celui-ci a étudié un SDARP à un camion dans lequel les clients effectuent des demandes sans exigences en terme de fenêtres temporelles. Son algorithme tente donc de minimiser les coûts de transport en essayant autant que possible de satisfaire les clients dans l'ordre dans lequel les demandes ont été reçues. Psaraftis (1983) a ensuite raffiné cet algorithme pour pouvoir tenir compte de fenêtres temporelles. En considérant un SDARP à un camion dans lequel les clients peuvent fixer une fenêtre de temps, soit à l'origine, soit à la destination, Sexton et Bodin (1985a) (1985b) ont proposé une heuristique basée sur les décompositions de Benders. L'une des premières méthodes de résolution d'un SDARP à plusieurs camions est due à Jaw, et al. (1986). Elle consiste en une heuristique d'insertion et a été adaptée et appliquée à un cas réel par Alfa (1986). Plusieurs algorithmes de type Cluster-first-route-second ont été proposés pour résoudre différents SDARP à plusieurs

camions, tout d'abord par *Cullen*, et al. (1981) et plus tard par *Borndörfer*, et al. (1999). Des algorithmes de clustering ont été développés par *Bodin* et *Sexton* (1986), *Desrosiers* (1991) ou encore *Dumas*, et al. (1989). Ceux-ci peuvent être appliqués avant d'utiliser un algorithme de tournée à un camion pour chaque cluster comme ceux de *Desrosiers* (1986) ou *Sexton* et *Bodin* (1985a) (1985b). Lors d'une étude sur un SDARP dans lequel les clients sont associés à une heure de départ et d'arrivée souhaitée ainsi qu'un temps de parcours maximum, *Cordeau* et *Laporte* (2003) ont développé une métaheuristique TS.

Plus récemment, des versions dynamiques du DARP (DDARP) ont été proposées et étudiées. Dans un DDARP, des demandes de transport peuvent arriver alors que le ou les camions sont déjà en route. *Madsen*, et al. (1995) ont étudié un DDARP à plusieurs véhicules de différents types dans lequel les clients sont associés à une fenêtre temporelle soit à l'origine, soit à la destination et dans lequel certaines demandes apparaissent dynamiquement durant la journée. *Coslovich*, et al. (2003) ont proposé et étudié un autre DDARP dans lequel les clients peuvent spontanément demander un voyage supplémentaire lors d'un arrêt, ces demandes devant être acceptées ou refusées au moment de la demande.

Plus de détails concernant le DARP peuvent être trouvés dans les travaux de *Cordeau*, et al. (2007) dont cette section est inspirée.

II.3.d. Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem (HFVRP)

L'Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem (HFVRP) est une variante du CVRP dans laquelle les différents camions à la disposition du transporteur ont des capacités différentes. On posera donc $F = \{0, \dots, n\}$ comme l'ensemble des différents types de véhicules. Chaque type $t \in F$ est associé une capacité Q_t , un nombre de camions disponibles N_t , un coût fixe f_t et un coût variable proportionnel à la distance parcourue par le camion. Cette variante a pour rôle de tenir

compte de la diversification dans la flotte de véhicules, souvent observée dans la réalité. En effet, les transporteurs se voient souvent diversifier leur flotte afin d'augmenter leur flexibilité. *Subramanian* (2010) rappelle, en outre, que les coûts fixes associés aux camions (assurance, maintenance, opérationnels) diffèrent par leur âge. Notons que deux versions du problème sont décrites dans la littérature. Dans la première, la flotte hétérogène est considérée infinie et l'objectif est de définir la flotte optimale en plus des tournées, on parlera alors de *Fleet Size and Mix* (FSM). Dans la seconde, il s'agira bien de considérer une flotte limitée et d'en faire le meilleur usage possible, on parlera alors généralement d'un *Heterogeneous VRP* (HVRP).

Il semble que le premier à avoir étudié le HFVRP soit *Taillard* (1999). Il propose une heuristique basée sur les générations de colonnes, composition d'une TS avec de la programmation linéaire. Différentes métaheuristiques ont ensuite été proposées comme celle de *Gendreau, et al.* (1999) qui consiste en un algorithme de type TS basé sur son algorithme *GENIUS*, et l'AMP de *Rochat et Taillard* (1995). *Imran, et al.* (2009) ont proposé une métaheuristique de recherche de voisinage variable, *Renaud et Boctor* (2002) ont proposé une heuristique basée sur l'algorithme *Sweep*.

Prins (2009) a adapté des heuristiques *classiques* de VRP au HFVRP en les combinant avec une tabu search ainsi qu'une procédure de recherche locale. *Tarantilis, et al.* (2003) et *Tarantilis, et al.* (2004) proposent deux méthodes toutes deux basées sur des critères d'acceptation de solutions. A titre informatif, mentionnons les travaux de *Liu, et al.* (2009) qui proposent une heuristique génétique ainsi que ceux de *Ochi, et al.* (1998) qui ont combiné un algorithme génétique avec une heuristique de *Scatter Search* (*Glover, et al., 2003; Laguna, 2002*). Plus d'informations sur les HFVRP peuvent être trouvées dans les travaux de *Subramanian* (2010).

II.3.e. Stochastic Vehicle Routing Problem (SVRP)

Les Stochastic Vehicle Routing Problem est une extension du VRP classique dans laquelle certains éléments ont un caractère aléatoire. Dans les principaux travaux dédiés au SVRP, on distinguera trois familles. (1) Le SVRP avec demande stochastique dans lequel la demande d_i associée à chaque client i est une variable aléatoire (VRPSD). (2) Le SVRP avec présence stochastique de clients pour lequel chaque client i devra effectivement être desservi avec une probabilité p_i (VRPSC). (3) Le SVRP avec temps de trajet stochastique où le temps de transport t_{ij} est une variable aléatoire (VRPSTT). Cette sous-section aborde brièvement ces différentes versions du SVRP ainsi que les courants de pensées actuels menant à leur résolution. Pour plus de détails, *Bertsimas (1988)* et *Cordeau, et al. (2007)* proposent une revue de littérature plus complète sur le sujet.

L'une des méthodes généralement utilisées pour résoudre un SVRP tient en deux étapes successives. Tout d'abord, une solution à priori est générée. La méthode de génération qui semble être la plus utilisée a été proposée par *Laporte et Louveau (1998)*. Ensuite, lorsque les variables aléatoires se réalisent, une phase de correction de la solution à priori permet de modifier cette solution à priori en entraînant généralement des économies ou des surcoûts par rapport à celle-ci. Différentes méthodes de correction ont, entre autres, été proposées par *Haughton (2000)*, *Laporte et Louveau (1990)*, *Secomandi (1998)*, *Yang, et al. (2000)*. Leur efficacité relative dépend en grande partie du moment à partir duquel l'information sur la réalisation des variables aléatoires est révélée. Une étude concernant cette relation entre le moment où l'information est connue et les possibilités de correction de la solution à priori est proposée par *Dror (1989)*.

Notons que d'autres méthodes de résolution de SVRP ont été proposées par *Stewart et Golden (1983)* et *Laporte (1989)*. Ces méthodes appartenant au domaine de la *Chance Constrained Programming* génèrent une solution en satisfaisant les contraintes avec une probabilité α . L'avantage de telles méthodes tient

dans le fait qu'il est possible de transformer un ensemble de contraintes stochastiques en une version déterministe. Dès lors, les algorithmes de VRP classiques s'appliquent. Néanmoins le surcoût induit par une contrainte non satisfaite est généralement ignoré dans ces méthodes.

A notre connaissance, peu d'heuristiques ont été proposées afin de résoudre le VRPSD, si ce n'est les travaux de *Secomandi* (1998), (2000) et (2003). De petites instances du VRPSD (jusqu'à 70 sommets) ont par contre été résolues exactement grâce aux travaux de *Gendreau*, et al. (1995) et *Séguin* (1994). Des heuristiques de résolution de VRPSC ont été proposées dans les travaux de *Jaillet* (1987), *Golden* et *Assad* (1988), *Jézéquel* (1985). Finalement le VRPSTT a été résolu exactement à travers des instances de 10 à 20 sommets par *Laporte*, et al. (1992).

II.3.f. Dynamic Vehicle Routing Problem (DVRP)

Le Dynamic Vehicle Routing Problem (DVRP) est défini par *Larsen* (2001) comme une variante du VRP dans laquelle *certaines informations pertinentes concernant la planification des tournées peuvent être inconnues du planificateur lorsque ces tournées commencent. En outre, les informations à la disposition du planificateur peuvent changer lorsque les tournées initiales ont été construites.* Ce type de problème est de plus en plus rencontré, que ce soit suite à la croissance des logistiques Just-In-Time ou encore l'augmentation du trafic routier, source d'incertitude et de modification de l'information concernant les temps de parcours par exemple.

D'après *Pillac*, et al. (2011), les travaux de *Wilson* et *Colvin* (1977) et ensuite *Psarftis* (1980) seraient les premiers à faire référence au DVRP. Ce type de problème est généralement et assez naturellement scindé en deux phases : la première consiste en une phase de décision basée sur l'information à disposition du planificateur avant le départ de la (ou des) première(s) tournée(s). Un ensemble

de tournées est construit sur base d'un VRP ou éventuellement d'un SVRP. Dans la seconde phase, de nouvelles informations sont révélées au planificateur. Celui-ci a donc généralement la possibilité de modifier ses tournées afin de tenir compte des nouvelles informations à sa disposition. Dans le cas le plus général, cette seconde phase de révélation ou modification de l'information peut se répéter plusieurs fois, auquel cas le planificateur peut se voir modifier ses tournées, généralement à plusieurs reprises. Dans une telle situation, l'analyse de la qualité d'un planning ne peut se faire qu'a posteriori. En effet, quelle que soit la qualité de la méthode de résolution utilisée lors de chaque étape, celle-ci peut seulement assurer la qualité de la solution courante sans promesse qu'elle soit toujours aussi bonne lorsque de nouvelles informations seront disponibles. Bien que quelques méthodes exactes pour différents problèmes de ce type aient été développées par *Psaraftis* (1980), *Wen*, et al. (2010) ou encore *Yang*, et al. (2004), les méthodes les plus souvent utilisées sont les heuristiques comme la *Multiple Plan Approach* (MPA) de *Bent* et *Van Hentenryck* (2004), généralisation de l'algorithme Tabu Search de *Gendreau*, et al. (1999). Mentionnons aussi l'heuristique développée par *Liao* et *Hu* (2011) ainsi que les algorithmes génétiques de *Benyahia* et *Potvin* (1998), *Cheung* (2008) et *Haghani* et *Jung* (2005) et les algorithmes basés sur les colonies de fourmis de *Gambardella*, et al. (2003), *Montemanni*, et al. (2005) et *Rizzoli* (2007). Des informations plus complètes sur le DVRP peuvent être trouvées dans les travaux de *Pillac*, et al. (2011) et *Larsen* (2001).

II.3.g. Time Dependent Vehicle Routing Problem (TDVRP)

Si le VRP classique postule que les coûts (ou temps de trajet) entre les différents clients i et j sont constants c_{ij} , cette hypothèse est souvent bien loin de la réalité (et encore plus dans le cas du transport urbain). En effet, avec l'augmentation du trafic sur les routes, les temps de parcours entre deux points dépendent souvent

du moment considéré dans la journée. Le Time Dependent Vehicle Routing Problem (TDVRP) se pose donc comme une extension du VRP visant à tenir compte des phénomènes tels que la congestion. Dans un TDVRP, plutôt que de considérer une matrice de coûts c_{ij} , on divisera généralement la journée en périodes T_k . Le coût (ou temps) de transport entre deux clients i et j sera donc fonction de la période T_i durant laquelle le camion quittera le client i , $c_{ij}(T_i)$.

Néanmoins, cette division de la journée pose quelques problèmes logiques. Considérons deux véhicules identiques démarrant à des instants différents d'un client i pour se rendre chez un client j . On s'attend logiquement à ce que le premier qui est parti arrive avant le second. Cette propriété est généralement appelée First-In-First-Out (FIFO) dans la littérature (Dean, 2004; Dehne, et al., 2012). Or la discrétisation du temps dans un problème n'assure plus que cette propriété logique soit respectée.

Le premier à avoir travaillé sur le TDVRP est Beasley (1983) qui a adapté un algorithme de *savings* (Clarke et Wright, 1964) à un problème de tournées en considérant le cas d'une journée divisée en seulement deux périodes. Problème dans lequel la propriété FIFO n'est pas assurée. Hill et Benton (1992) ont proposé une heuristique d'insertion simple sur un TDVRP de 210 clients et 96 périodes n'assurant pas la propriété FIFO. Malandraki (1989) et Malandraki et Daskin (1992) ont proposé une analyse des propriétés du TDVRP. Ils font, entre autres, remarquer qu'une heuristique simple de type *échange k-opt* (Lin, 1965) coûte cher en temps de calcul car il faut recalculer les heures d'arrivées des véhicules de tous les clients se situant après les arcs échangés. Ils proposent en outre des heuristiques d'insertions (*nearest-neighbor*) pour les TDVRP ainsi que le TDTSP (*Time Dependent Traveling Salesman Problem*) dans lesquelles la propriété FIFO n'est pas non plus assurée. Plus tard, Ichoua, et al. (2003) ont proposé un modèle de TDVRP avec fenêtres temporelles dans lequel la propriété FIFO est assurée. Ils ont aussi adapté la TS de Taillard, et al. (1997) afin de trouver et d'analyser

quelques solutions à leur problème sur des scénarios inspirés des problèmes à 100 clients de *Solomon* (1987).

Mentionnons finalement les travaux de *Kuo*, et al. (2009) qui proposent un autre modèle satisfaisant la propriété FIFO ainsi qu'une autre TS pour résoudre le TDVRP. Les temps de parcours des solutions trouvées par leur algorithme sont généralement inférieurs à ceux des solutions alternatives mais les distances parcourues sont généralement supérieures. Ils font donc remarquer qu'il peut y avoir un conflit entre efficacité des tournées en termes de qualité de service et en termes de transport durable.

III. Modèle de génération de la demande

III.1. Méthodologie

Le modèle présenté dans cette section a pour objectif de générer la demande de transport, sous la forme d'une matrice origines-destinations. Ce modèle veut, entre autres, pouvoir tenir compte de phénomènes comme la congestion ou servir comme outil d'analyse de l'impact de décisions politiques sur les flux de transport. Il se voudra donc de type activity-based. Comme discuté dans la section précédente, il semble que ce type de modèle soit le plus pertinent dans une telle analyse. Il s'agira donc de modéliser le comportement des acteurs du transport afin de générer les flux de transports induits par leurs activités. Une méthodologie très adaptée à ce type de modèles a été présentée dans la section précédente et consiste en l'utilisation de systèmes multi-agents. Finalement, ce modèle devrait, dans l'idéal, tenir compte des tournées planifiées par les transporteurs. Celui-ci se devra donc d'être dynamique. La matrice origines-destinations générée par le modèle devra donc comporter un paramètre temporel.

Plus précisément, les flux de transport pour une journée de travail normale sont générés à partir des interactions entre les différents acteurs du transport, représentés par des agents. L'idée est de confronter l'offre à la demande. Il y aura donc, d'une part, les entreprises qui ont besoin d'être approvisionnées en matières premières et de délivrer leurs produits finis, et, d'autre part, les sociétés de transport ayant des flottes de véhicules à leur disposition et pouvant proposer le service de transport à ces entreprises. En résumé, le modèle consiste à simuler le fait que chaque entreprise effectue itérativement une ou plusieurs demandes. Ces demandes sont distribuées temporellement tout au long d'une journée. Lors de chaque demande, les transporteurs contactés proposent chacun un prix pour le service. Finalement, l'entreprise ayant fait la demande de transport réalise une analyse des différentes offres afin de choisir la plus intéressante. Le transporteur fournissant le service de transport met alors à jour ses stocks de camions et ses

plannings de tournées. Le schéma général des négociations dans la simulation est représenté en figure 3. Dans cette figure, les flèches bleues représentent le processus de demande et les flèches rouges représentent le processus d'offre.

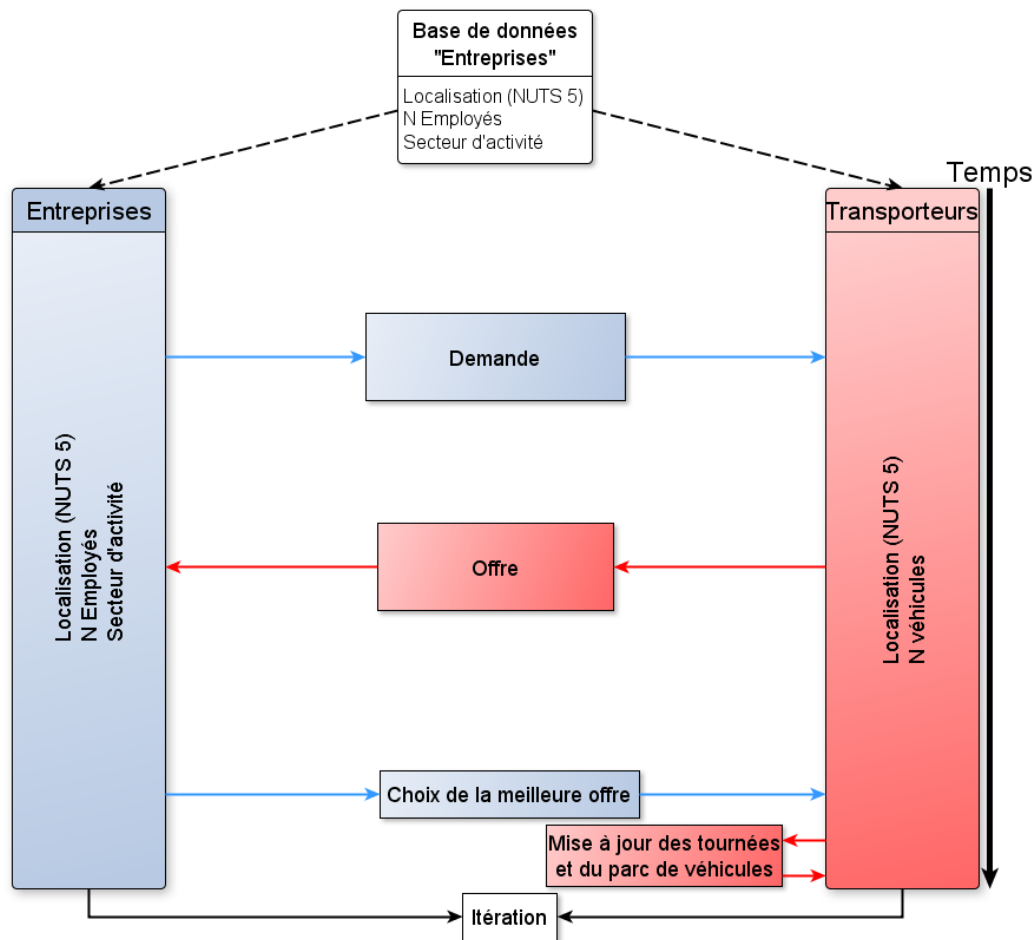


Figure 3 : Schéma général des négociations du modèle de génération de la demande de transport

Lorsque la journée est terminée, la matrice origines-destinations temporelle est générée. Chaque transporteur envoie alors à un agent « monde » les mouvements de sa flotte pour la journée. C'est cet agent monde qui s'occupe de générer la matrice OD en fin de simulation.

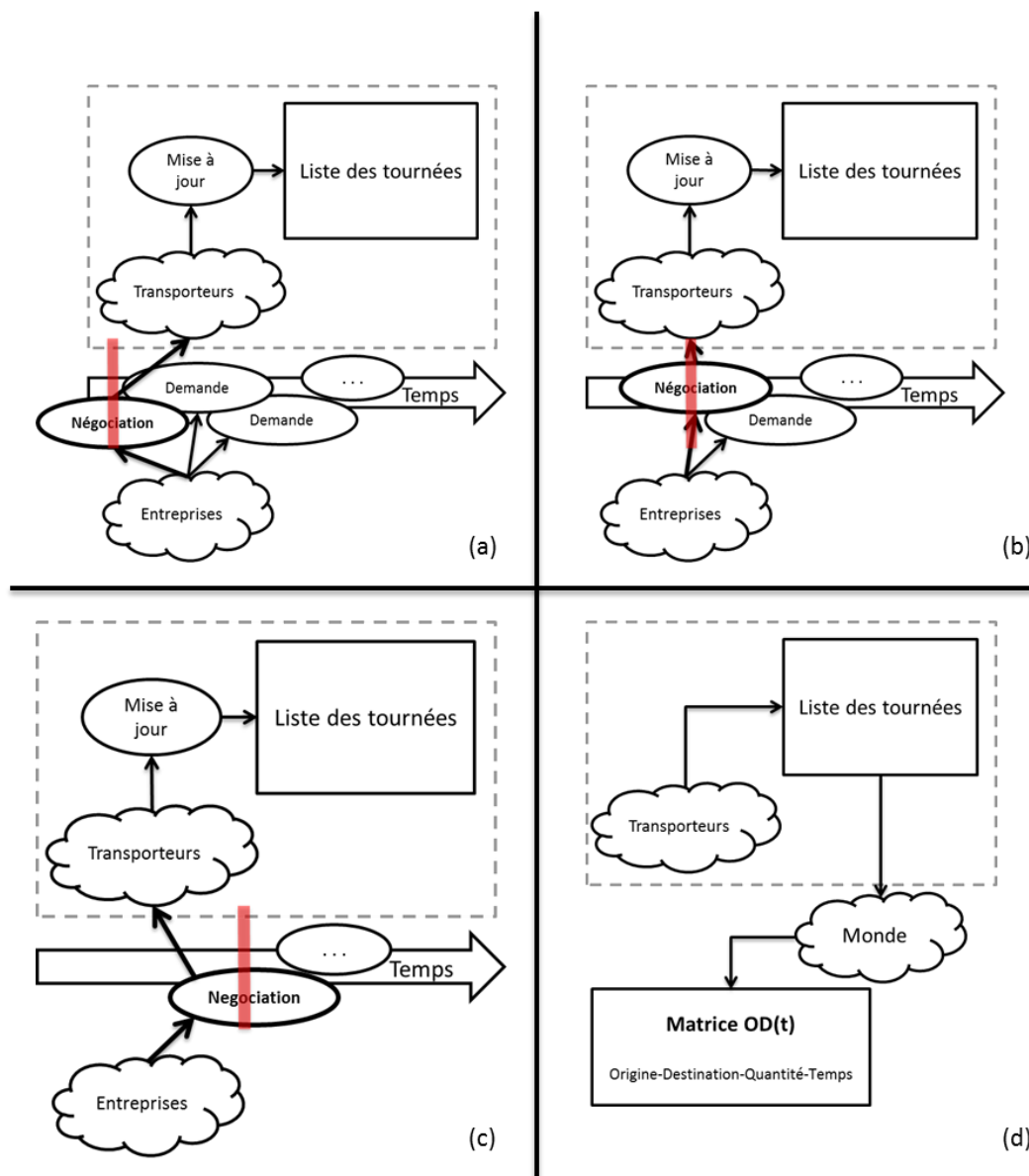


Figure 4 : Evolution temporelle de la simulation (a, b, c) et
génération de la matrice OD (d)

Il y a donc trois types d'agents en interaction dans la simulation : l'agent monde, les agents représentant les entreprises et les agents représentant les sociétés de transport. L'agent « monde » est le seul agent de son type, contrairement aux agents « entreprises » et « sociétés de transport ». Il tient deux rôles essentiels : tout d'abord, il gère les accès au disque dur, il est seul à pouvoir accéder aux bases de données et à diffuser les informations nécessaires à la génération et au

bon fonctionnement des autres agents. Ensuite, il détient la référence temporelle. C'est-à-dire qu'il est celui qui, à tout moment, tient les agents au courant de l'heure qu'il est.

Les agents « entreprises » sont générés munis de certaines caractéristiques comme leur localisation géographique, leur fréquence d'envoi ainsi que la taille de ces envois. Ceux-ci ont une perception limitée des transporteurs. Lors de chaque demande, ils ne contactent en effet qu'un ensemble limité de transporteurs se situant soit très près de l'origine, soit très près de la destination, soit près des arcs du réseau joignant l'origine à la destination du transport demandé. Les agents « entreprises » n'ont pas de connaissance, perception ou représentation directe du réseau routier en lui-même. Les agents « entreprises » sont capables de contacter des agents « transporteurs » et d'analyser une série d'offres de services. Enfin, l'objectif des agents « entreprises » est que leurs marchandises soient transportées d'une origine à une destination.

Les agents « transporteurs » sont, quant à eux, caractérisés par leur localisation géographique ainsi qu'un parc de véhicules. Ils perçoivent le réseau à travers des matrices de coût $c_{ij}(t)$, représentant le coût pour aller de la zone i à la zone j à l'instant t . C'est sur base de ces dernières qu'ils peuvent proposer des prix pour leurs services. Plus d'attention sera donnée à ces matrices dans la sous-section III.iii.1. Les agents « transporteurs » sont capables de communiquer exclusivement avec les agents « entreprises » qui les ont contactés. Il est notable que les agents « transporteurs » sont incapables de communiquer entre eux, ce qui limite ce modèle à négliger d'éventuels cas de sous-traitance. Finalement, les agents « transporteurs » sont capables de fournir le service de transport requis par les agents « entreprises » et tendent à maximiser leurs profits en remplissant autant de contrats que possible et en utilisant leur flotte de camions de la manière la plus intelligente possible. Ils se voient donc faire face à un problème de tournée qui sera abordé plus en détail dans la section III.iii.2.

Un cas d'application a été mis au point afin de tester la simulation. Ce scénario concerne la Wallonie, et les différents agents représentant les acteurs du transport ont été générés grâce à la base de données « Entreprises » (*Service public de Wallonie*, 2008). Cette base de données publiée par « La Direction des Réseaux d'Entreprises » de la Région wallonne contient plus de 4800 entreprises localisées en Wallonie dont plus de 400 sociétés de transport. Elle est basée sur des questionnaires écrits, validée par biais téléphonique et est mise à jour tous les 6 mois. Notons que cette base de données a été « nettoyée ». Ainsi, les entreprises dont les secteurs d'activités peuvent difficilement être associés à une source de transport de marchandises significative ont été enlevées. Cette soustraction concerne par exemple les entreprises administratives, de certains services (informatique, de conseils en gestion,...), éducatives, etc. Pour plus de détails, le tableau fourni en annexe 1 reprend l'ensemble des divisions de la nomenclature NACE ainsi que celles qui ont été gardées (notées d'un 'V') pour la simulation et celles abandonnées (notées d'un 'X').

Chaque agent représentant une entreprise Wallonne est caractérisé par :

- sa localisation géographique au niveau d'agrégation NUTS-5 (ie, le niveau de la commune en Belgique),
- son nombre d'employés,
- et son secteur d'activité principal.

Chaque agent représentant un transporteur est caractérisé par :

- sa localisation géographique au niveau d'agrégation NUTS-5 (ie, le niveau de la commune en Belgique),
- et son nombre d'employés.

III.2. Modélisation de la demande

L'objectif de cette section est de décrire le module de demande du modèle. Ce module simule le fait que chaque entreprise va séquentiellement effectuer une demande (figure 4). Une demande est constituée de différents éléments, à savoir

: une origine, une destination, une quantité à transporter et une heure souhaitée d'arrivée à la destination associée à une fréquence d'envoi. Dans ce modèle, l'origine d'une demande est toujours localisée au même endroit que l'entreprise demandeuse. La définition de la destination des marchandises peut être faite grâce à des méthodes utilisées lors de l'étape de distribution du modèle à 4 étapes. A ce sujet, différentes méthodes existent dans la littérature, comme les méthodes de facteurs de croissance comme celle de Furness (1965) ou encore les modèles synthétiques ou gravitaires. Ces derniers sont les plus adaptés à être utilisés dans le cas présent. En effet, il est facilement possible de construire un modèle stochastique basé sur le modèle gravitaire de *Casey* (1955). Pour une entreprise localisée dans la zone NUTS-5 A , la probabilité de choisir la zone i comme destination pour un transport est donnée par la formule : $x_{Ai} = G_A \frac{E_i}{r_{Ai}^z}$ où r_{Ai} est la distance séparant les zones A et i , E_i est le nombre d'employés dans la zone i , G_A est un facteur de normalisation choisi de telle manière que $\sum_i x_{Ai} = 1$ et z est un paramètre de la simulation. On utilisera généralement $z = 2$, pour être cohérent avec le modèle gravitaire de base et les usages dans la littérature.

On peut noter que le paramètre associé au poids des zones E_i est uniquement fonction du nombre d'employés de la zone i . Il pourrait être judicieux de tenir compte, d'une manière ou d'une autre, du nombre d'habitants de cette même zone. Néanmoins cela demanderait de mener une étude approfondie sur la façon dont on pourrait calibrer de tels poids. Il s'agirait de comprendre dans quelle mesure le nombre d'habitants d'une zone représenterait une forme d'attraction pour le transport de marchandises et surtout dans quelles proportions en comparaison du nombre d'employés dans cette zone. Cependant, cette simulation se voulant exploratoire, il a été décidé de se limiter à considérer le nombre d'employés de chaque zone. Ce processus est schématisé en bleu dans la figure 5.

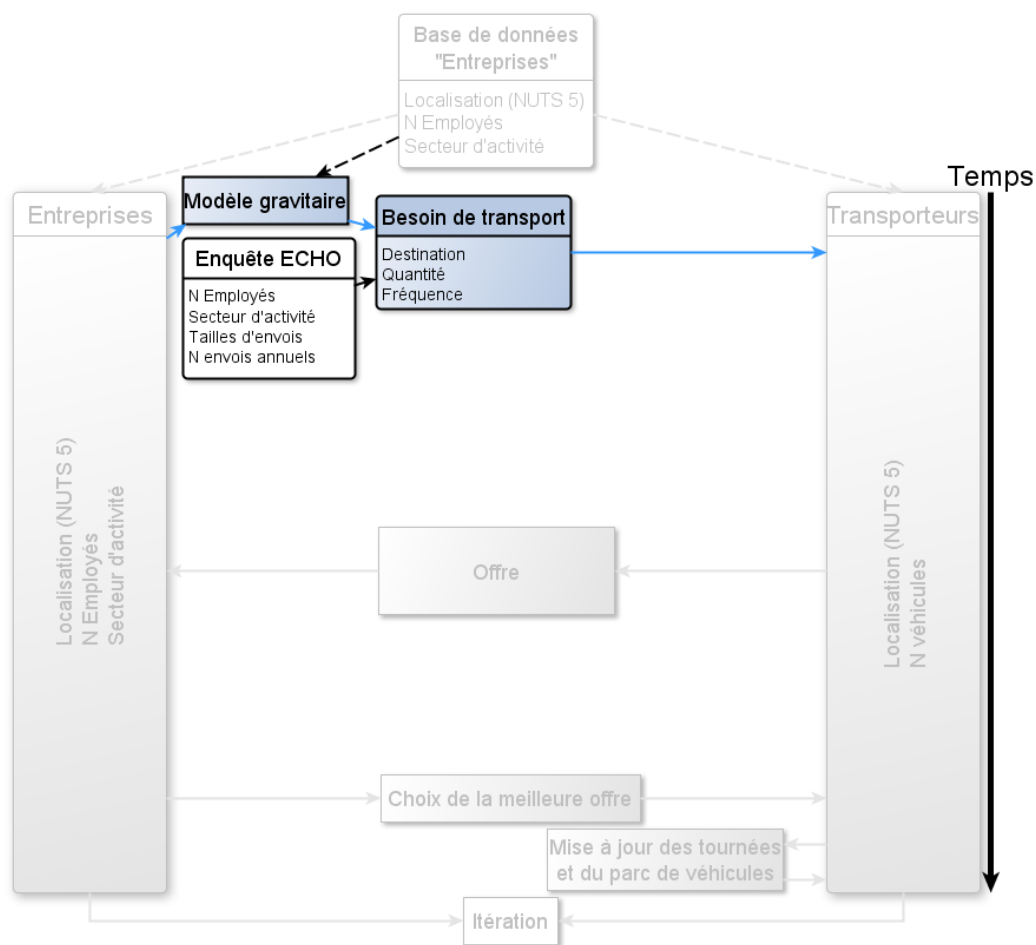


Figure 5 : Développement du module de demande dans le schéma des négociations du modèle de génération

En ce qui concerne les tailles et fréquences d'envois pour le cas pratique considéré dans cette recherche, elles ont été estimées en utilisant l'enquête ECHO de Guilbault, et al. (2008). Cette enquête réalisée par l'*Institut National de Recherche sur les Transports et leur sécurité* (INRETS) a pour objectif d'analyser les pratiques dans le transport. Elle couvre un peu moins de 3000 entreprises et trouve son originalité dans le fait de proposer un bon nombre d'informations au niveau des envois de marchandises et des organisations logistiques. Il est notable que l'enquête ECHO révèle que pas moins de 50% des envois concernent des tailles d'envois inférieures à 30kg.

Une extraction de données de cette enquête a été réalisée. Un tableau de données concernant un échantillon de quelques milliers d'entreprises françaises a été produit. Ce tableau contient, entre autres, pour chaque entreprise:

- numéro d'identification,
- secteur d'activité principal,
- nombre de réceptions/an,
- nombre d'envois/an,
- pourcentages d'envois de colis de tailles comprises entre $0T$; $0,03T$; $0,3T$; $3T$; $30T$ et $300T$,
- et taille de l'entreprise sous la forme de groupes (voir tableau 1).

Il se présente donc sous la forme suivante :

id	NACE	réceptions annuelles	envois annuels	envois <0.03T (%)	envois <0.3T (%)	envois <3T (%)	envois <30T (%)	envois <300T (%)	Taille
1	21	3600	3600	0,1	0,5	0,2	0,15	0,05	2
2	15	15000	17000	0,55	0,25	0,15	0,05	0	5
3	63	600	560	0,3	0,35	0,25	0,05	0,05	3
..	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Tableau 1 : Données extraites de l'enquête ECHO

Groupe	Nombre d'employés
1	$1 \leq E_i < 4$
2	$5 \leq E_i < 10$
3	$10 \leq E_i < 20$
4	$20 \leq E_i < 50$
5	$50 \leq E_i < 100$
6	$100 \leq E_i < 200$
7	$200 \leq E_i < 500$
8	$500 \leq E_i < 1000$
9	$1000 \leq E_i$

Tableau 2 : Groupes d'entreprises par taille

NACE\taille	1	2	3	4	5	6	7	8	9	totaux
01	0		0	1	0	1	0	0	0	2
15	0		40	75	71	52	42	15	4	299
16	0		0	0	0	1	0	0	0	1
17	0		11	25	18	24	15	1	1	95
18	0		5	4	7	3	2	1	0	22
19	0		5	3	4	10	3	0	0	25
20	0		10	20	13	10	2	2	0	57
21	0		6	8	20	17	18	6	0	75
22	0		15	21	19	16	7	2	1	81
23	0		2	6	1	0	4	1	1	15
24	0		18	54	49	45	46	19	10	241
25	0		17	19	17	18	22	8	5	106
26	0		8	21	28	22	7	5	3	94
27	0		7	23	25	22	16	6	6	105
28	0		33	59	62	24	12	8	1	199
29	0		13	22	14	20	15	17	3	104
30	0		1	5	2	2	4	1	0	15
31	0		8	7	16	7	16	10	6	70
32	0		8	16	15	8	8	4	12	71
33	0		12	13	16	10	8	3	1	63
34	0		4	12	8	3	24	19	18	88
35	0		0	1	3	3	0	1	2	10
36	0		11	24	23	6	11	4	1	80
37	0		10	14	10	4	3	0	0	41
50	0		6	4	4	0	1	0	0	15
51	0		128	200	199	103	44	10	5	689
52	1		5	5	2	4	0	2	0	19
63	8		8	24	12	18	21	1	0	92
90	0		2	2	2	1	0	0	0	7
totaux	9		393	688	660	454	351	146	80	2781

Tableau 3 : Nombre d'entreprises sondées par taille et
secteur d'activité

Une analyse de ces données a donc été réalisée afin d'attribuer à chaque entreprise, en fonction de sa taille et de son secteur d'activité, des fonctions de distri-

bution de tailles et fréquences d'envois. Ces dernières sont ensuite utilisées pour caractériser les entreprises du scénario d'essai sous l'hypothèse que les caractéristiques des envois soient semblables en France et en Wallonie. Cette analyse se base essentiellement sur des régressions effectuées sur les échantillons de données de l'enquête ECHO (Guilbault, et al., 2008). Il s'agit donc de construire une distribution de tailles d'envois et une distribution de fréquences d'envois pour chaque classe d'entreprise. Une classe d'entreprise étant définie comme un ensemble d'entreprises de même taille (groupe) et de même secteur d'activité principale. La figure 6 montre le processus méthodologique de génération de ces distributions en rouge, ainsi que son application dans le scénario considéré en utilisant les données de l'enquête ECHO en bleu. Les formes arrondies indiquent des lacunes dans les données utilisées ayant pour première conséquence la nécessité d'agréger les données de l'enquête et induisant aussi le fait de négliger un potentiel lien statistique entre fréquence d'envois et secteur d'activité principal. La méthode de génération des distributions de tailles d'envois et de fréquences d'envois en fonction des caractéristiques des entreprises du cas d'application est décrite plus en détail dans les lignes qui suivent.

Dans un premier temps, le nombre d'entreprises pour chaque classe a été estimé (tableau 3). On constate dès lors que la plupart des classes à un tel niveau de désagrégation sont sous-représentées. En effet, pas loin de 60% des classes comportent moins de 5 observations. Il s'avère donc d'ores et déjà impossible de construire une distribution pour chaque classe sans agréger les données d'une manière ou d'une autre.

C'est donc sur des données ré-agrégées que le travail a été effectué. Cette analyse tente, d'une part, de mettre en exergue un lien statistique entre fréquences et/ou tailles d'envois et taille des entreprises et, d'autre part, entre fréquences et/ou tailles d'envois et secteur d'activité principal des entreprises.

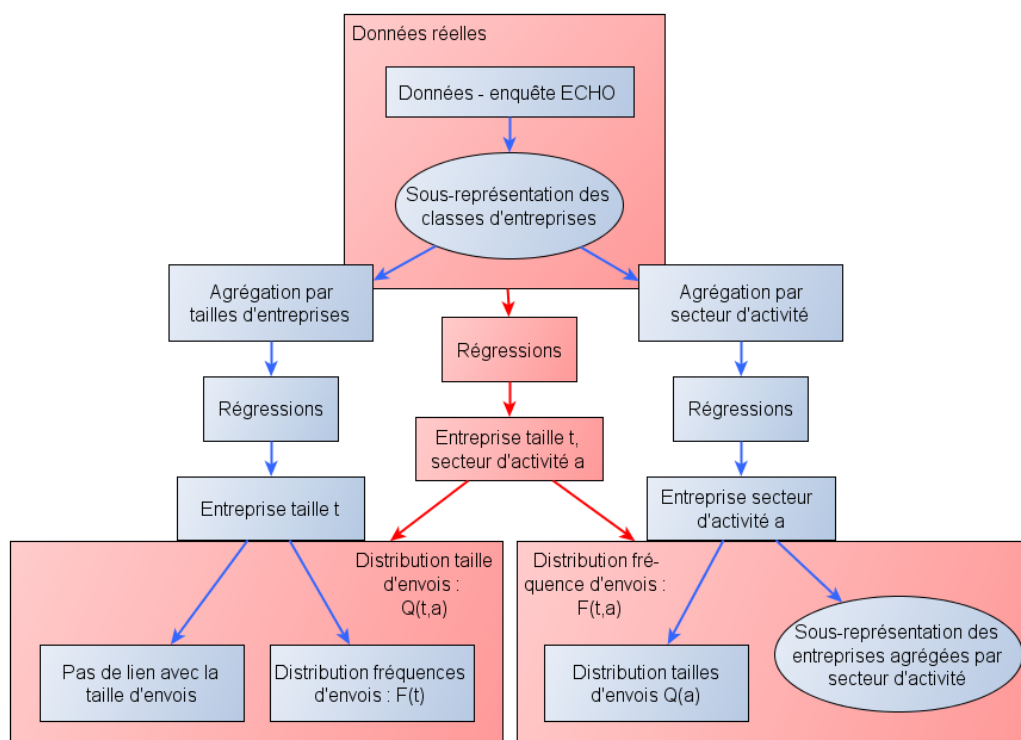


Figure 6 : Méthode de génération des distributions de fréquences et tailles d'envois des entreprises en fonction de leur taille et de leur secteur d'activité. Méthodologie (rouge) et application à l'enquête ECHO (bleu)

Taille	N# envois/ans	Tonnage moyen[T]/envoi
1	922222	1969,304
2	922222	1969,304
3	390725	9336,109
4	687187	24776,020
5	1068113	8534,162
6	1299867	10834,841
7	1407478	25158,407
8	1511404	15601,056
9	1836875	32785,781

Tableau 4 : Nombre d'envois annuels et tonnages moyen par envoi en fonction de la taille des entreprises

Les données obtenues lors du regroupement des entreprises ont d'abord été analysées par tailles dans le tableau 4. Cela permet de représenter graphiquement le nombre moyen d'envois annuels (figure 7 et 8) et les tailles d'envois moyennes (figure 9) en fonction des tailles des entreprises. D'ores et déjà, il peut être noté qu'il n'y a que 9 entreprises dans les groupes 1 et 2. Ces deux groupes ne seront donc pas représentés dans les graphes.

A la lumière de ces graphes, il semble qu'il y ait effectivement un lien entre le nombre annuel d'envois (et donc la fréquence d'envoi) et la taille d'une entreprise considérée. Par contre il semble difficile de mettre en évidence un lien entre tonnage par envoi et taille de l'entreprise expéditrice.

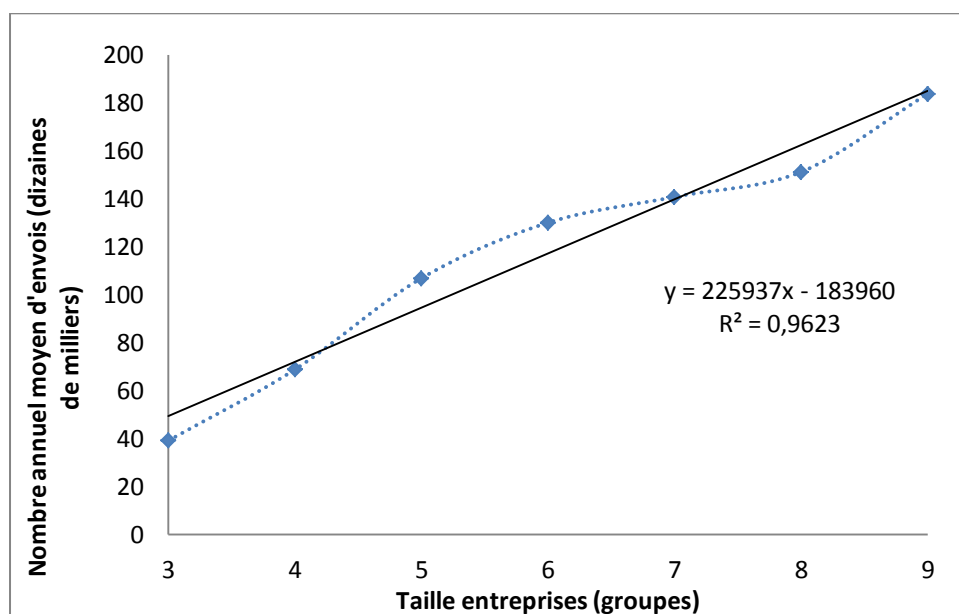


Figure 7 : Nombre annuel moyen d'envoi en fonction de la taille des entreprises (par groupes)

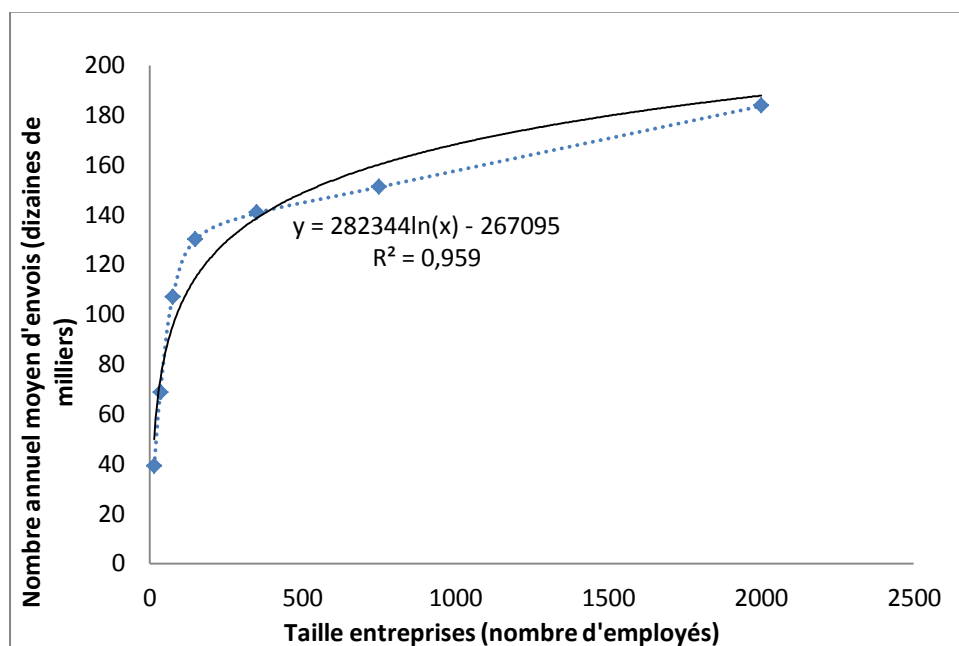


Figure 8 : Nombre annuel moyen d'envoi en fonction de la taille des entreprises (par groupes)

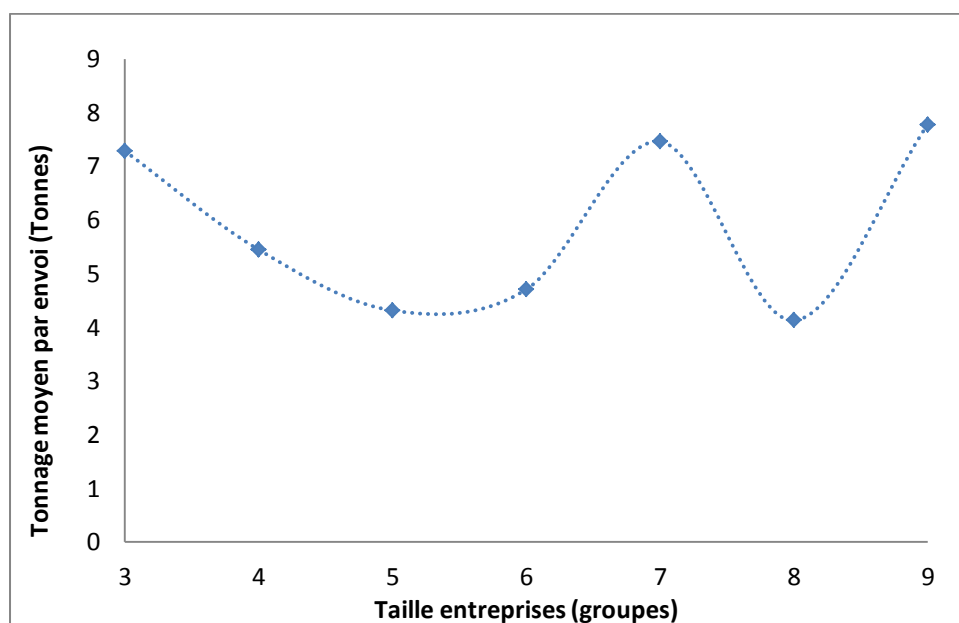


Figure 9 : Tonnage moyen par envoi en fonction de la taille des entreprises

Ensuite, les groupes d'entreprises de même secteur d'activité ont été analysés. Malheureusement, dans plus de 30% des cas, le secteur d'activité comporte

moins de 25 entreprises. Il est donc impossible de dériver des distributions statistiques fiables sur les nombres d’envois annuels. Par contre, en ce qui concerne les tailles d’envois, bien que certains secteurs d’activités ne comportent que peu d’entreprises sondées, celles-ci ont donné des renseignements plus précis sur les tailles d’envois. Des distributions de tailles d’envois ont, dès lors, pu être générées pour chaque secteur d’activité. A titre d’illustration, les distributions de 5 groupes d’entreprises appartenant à 5 secteurs différents ont été tracées dans la figure 10. Pour garder cette figure lisible, toutes les distributions n’ont pu être reprises. Toutefois, par souci d’exhaustivité, l’ensemble des distributions pour chacun des secteurs NACE représenté dans l’enquête ECHO est fourni en annexe. Alors que la figure 11 montre les distributions de fréquences d’envois pour les entreprises de différentes tailles.

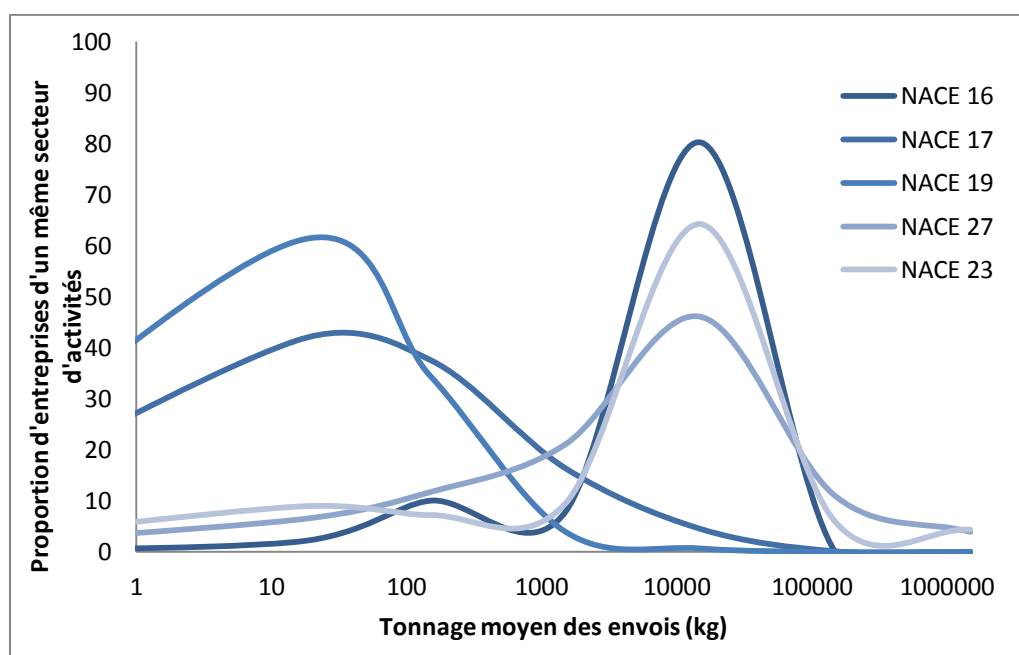


Figure 10 : Distributions des tonnages moyens pour les entreprises de 5 secteurs d’activités

En conclusion, on sait que la caractérisation d’un grand nombre d’acteurs dans le cadre d’une simulation microscopique requiert un nombre important de données désagrégées (*Ortúzar et Willumsen (1990)*). A notre connaissance, ECHO fait par-

tie de ce qui s'est fait de plus précis dans le domaine. Cependant, il semble que ça ne soit toujours pas suffisant. En effet, de multiples secteurs d'activités ainsi que les entreprises de petites tailles (moins de 10 employés) sont sous-représentés, voir même absents. Il a néanmoins été possible de dériver des fonctions de distributions de tailles d'envois en fonction des secteurs d'activités et des distributions de fréquences d'envois en fonction des tailles d'entreprise. Ce travail n'a pu être fait qu'en négligeant les liens « tailles d'envois-tailles des entreprises », « fréquences d'envois-secteurs d'activité » et les liens croisés. On peut partiellement se rassurer quant à cette hypothèse au regard de la figure 9 semblant indiquer qu'il n'y a pas de relation entre tonnage moyen et taille d'entreprise.

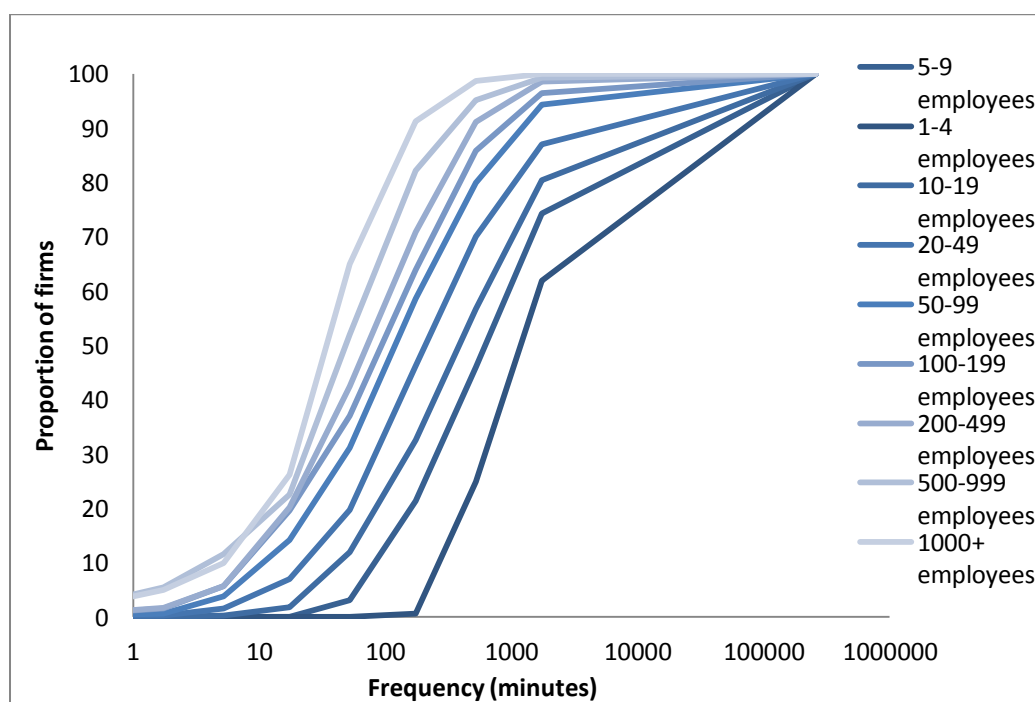


Figure 11 : Distributions des fréquences

III.3. Modélisation de l'offre

Cette section aborde la génération et le fonctionnement des agents-transporteurs. Ceux-ci sont caractérisés par leur localisation géographique et une

flotte de véhicules. En effet, chaque agent transporteur possède un nombre de véhicules dont il pourra faire usage à sa guise afin de proposer des services de transports aux différentes entreprises lorsqu'elles en feront la demande. Ces camions ont, bien sûr, une capacité limitée qui pourra être différente d'un camion à l'autre. En effet, les transporteurs (que ce soit pour compte propre ou pour compte d'autrui) disposent généralement de parcs hétérogènes afin de pouvoir se permettre plus de souplesse dans le service qu'ils proposent.

En ce qui concerne la génération de ces agents « transporteurs » dans le scénario pratique considéré, la base de données « entreprises » (*Service public de Wallonie*, 2008) a été utilisée, au même titre que les agents-entreprises. Grâce à celle-ci, les agents « transporteurs » sont caractérisés par leur localisation géographique et leur nombre d'employés. Ce nombre d'employés permet d'estimer le parc de véhicules. En première approximation, il a été choisi d'attribuer à chaque agent-transporteur autant de camions qu'il a d'employés.

En ce qui concerne les capacités des différents véhicules, la *Fédération belge de l'Industrie de l'Automobile et du Cycle* (2011) met à disposition des données concernant la répartition des parcs de camions et tracteurs de plus de 3,5T en Belgique. Ces données sont représentées en table 5, ainsi qu'un graphe représentant la distribution de véhicules routiers de plus de 3,5T en fonction de leur capacité en figure 12.

On peut noter que ces données montrent deux pics importants pour les véhicules routiers de grande capacité correspondant aux capacités 18-20T et 22-26T. Cependant, concernant les véhicules de plus petite capacité (<12T), il est difficile de négliger une ou l'autre catégorie puisqu'elles semblent toutes plus ou moins équitablement représentées. En conséquence, lors de la génération des agents transporteurs, les capacités des parcs de véhicules qui leur seront attribués se baseront sur cette distribution.

Les agents-transporteurs auront pour objectif de maximiser leurs revenus en essayant d'obtenir autant de contrats que possible et en faisant le meilleur usage possible de leur flotte. Ils seront donc confrontés à une combinaison complexe de variantes de VRP dans laquelle les transporteurs tenteront de minimiser leurs coûts de transport. Ce problème de tournée sera plus amplement décrit en fin de section. Ceci dit, il peut être souligné que, dans le cadre d'une simulation qui se veut dynamique, les coûts de transport doivent être, si pas dynamique au sens premier, temporels. En effet, dans cette simulation, des fonctions de coûts seront utilisées. Celles-ci seront « temporelles », à défaut d'être réellement dynamiques pour des raisons de temps de calcul. Cette nuance sera explicitée dans la sous-section traitant des fonctions de coûts. Quoiqu'il en soit, il semble capital de considérer que les coûts de transport varient au fil de la journée en fonction, par exemple, de l'utilisation du réseau par les flux de passagers. Ces fonctions de coûts étant un prérequis pour la planification des tournées (VRP) à laquelle devra procéder tout transporteur (pour compte propre ou compte d'autrui). Elles seront abordées en sous-section III.3.b. La méthode de planification de tournée utilisée par les transporteurs sera quant à elle abordée en sous-section III.3.c.

Avant d'entrer dans le vif du sujet concernant les problèmes de tournées, cette section traitera en premier lieu du transport pour compte propre. A la frontière entre demande et offre de transport, le transport pour compte propre est un service de transport qu'une entreprise effectue elle-même et pour elle-même. Plus concrètement, certaines entreprises possèdent leur propre département de transport et un parc de véhicule qu'elles utilisent alors, généralement, en priorité. Nous nous trouvons donc clairement dans le domaine de l'offre du service, bien que ce service soit offert par et pour un acteur de demande.

Capacité (kg)	Camions	Tracteurs	Total	Proportion
< 4001	479	425	904	0,66
4001 - 6000	10273	29	10302	7,53
6001 - 8000	11659	70	11729	8,58
8001 - 10000	7541	68	7609	5,56
10001 - 12000	16908	144	17052	12,47
12001 - 14000	3602	93	3695	2,70
14001 - 16000	3229	62	3291	2,40
16001 - 18000	4743	6619	11362	8,31
18001 - 20000	14119	30575	44694	32,69
20001 - 22000	143	161	304	0,22
22001 - 26000	19611	2678	22289	16,30
> 26000	3356	108	3464	2,53
Total	95663	41032	136695	100

Tableau 5 : Répartition des véhicules routiers de plus de 3,5T (*Fédération belge de l'Industrie de l'Automobile et du Cycle, 2011*)

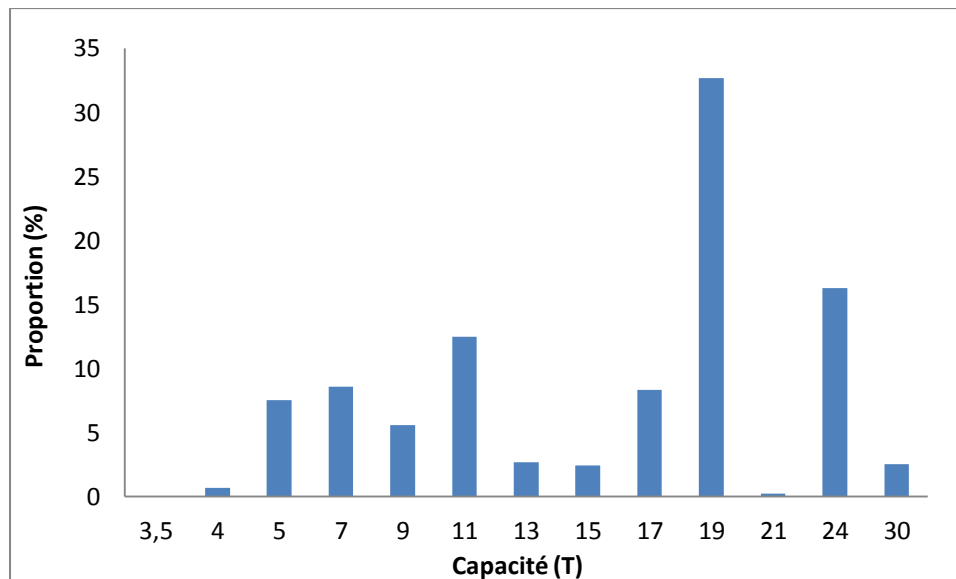


Figure 12 : Distribution des véhicules routiers de plus de 3,5T en Belgique (*Fédération belge de l'Industrie de l'Automobile et du Cycle, 2011*)

Afin de lever toute ambiguïté, lorsque nous discuterons de transporteurs pour compte propre, associés à une entreprise, ils seront appelés agents-transporteurs-pour-compte-propre (ou AT-CP). Les agents transporteurs-pour-compte-d'autrui (ou AT-CA) seront des agents représentant les sociétés de transport autonomes. A défaut, lorsque la simple dénomination agents-transporteurs sera utilisée, elle concernera indifféremment les deux catégories d'agents-transporteurs. La génération et le fonctionnement des AT-CP sont abordés dans la sous-section III.3.a.

III.3.a. Transport pour compte propre

Dans le cas pratique qui nous occupe, environ 27% des marchandises transportées en Belgique en 2010 l'ont été par le biais du transport pour compte propre, selon Eurostat (<http://epp.eurostat.ec.europa.eu>, 2011). Soit, des entreprises ayant leur propre service de transport et utilisant leurs propres camions. Le développement d'un modèle de génération de demande de transport semble donc bien requérir la prise en compte du transport pour compte propre.

Méthodologiquement, celui-ci est géré dans la simulation de la manière suivante: la proportion P d'entreprises les plus importantes de l'échantillon traité dans la simulation se voit attribuer un agent-transporteur-cp. Cette proportion doit être calibrée afin que les marchandises transportées par compte propre soient de 27% du total des marchandises transportées. L'hypothèse implicite est donc faite que les entreprises employant le plus grand nombre de personnes sont les plus susceptibles d'avoir leur propre service de transport.

Un agent-transporteur-cp est semblable à un agent-transporteur-ca, si ce n'est qu'il ne peut communiquer qu'avec l'entreprise à laquelle il est associé. Celle-ci ne fait d'ailleurs pas appel aux AT-CA tant que son agent-transporteur-cp est capable de remplir ses demandes. En effet, l'hypothèse est que les entreprises ayant leur propre service de transport utilisent en priorité leurs propres camions

jusqu'à ce qu'ils soient complètement utilisés. Cette hypothèse est discutée dans le rapport du *Centre de recherches économiques* (1999) qui a mené une enquête sur les pratiques dans le domaine du transport pour compte propre parmi quelques 750 entreprises en Europe. Il semble qu'en fonction des entreprises, certains services de transport pour compte propre proposent parfois aussi un service de transport pour autrui à d'autres entreprises lorsque leur flotte est susceptible d'être sous-utilisée. Au même titre, il arrive qu'une entreprise préfère faire appel à un transporteur professionnel pour transporter de petits volumes afin de minimiser ses coûts ou de maintenir la qualité de son service de livraison bien qu'elle dispose de son propre service de transport ayant encore des camions disponibles.

Cependant, de tels phénomènes mériteraient d'être beaucoup plus étudiés individuellement et mieux compris avant d'être intégrés dans une simulation de l'envergure de celle qui est ici présentée. Il a donc été décidé de se cantonner à cette hypothèse d'utilisation prioritaire des flottes propres des entreprises. En outre cette dernière est confortée par le tableau 6 (*Centre de recherches économiques*, 1999) montrant qu'un grand nombre d'entreprises semble transporter la quasi-totalité de leurs marchandises grâce à leur service de transport (54% des entreprises utilisent leur service pour plus de 80% de leurs transports parmi lesquelles presque 35% utilisent le compte propre pour 100% de leurs transports).

L'agent-transporteur-cp associé à une entreprise est localisé au même endroit que celle-ci et se voit attribuer une flotte de véhicules sur base des données mises à disposition, à savoir le tableau 7 tiré du rapport du *Centre de recherches économiques* (1999). Ce tableau concerne l'ensemble des 750 entreprises Européennes sondées. Dans la mesure du possible, il serait judicieux de mener une enquête similaire au niveau national afin d'affiner l'information sur le domaine et de comparer les pratiques belges aux pratiques européennes. L'intégration du transport pour compte propre est représentée dans la figure 14.

Proportion des envois en CP (%)	N entreprises	Proportion entreprises (%)
1-10	55	7,58
11-20	37	5,10
21-30	26	3,58
31-40	46	6,34
41-50	54	7,44
51-60	45	6,20
61-70	61	8,41
71-80	76	10,48
81-90	74	10,20
91-100	251	34,62
Tot	725	100

Tableau 6 : Proportions d'envois pour compte propre par les entreprises sondées (*Centre de recherches économiques, 1999*)

Nombre de camions	1-5	6-10	11-15	16-20	21-30	31-50	51-100	101-200	200+	Total
Nombre d'entreprises	219	125	75	45	54	57	54	47	45	721

Tableau 7: Le nombre de véhicules utilisés par les services de transport pour compte propre (*Centre de recherches économiques, 1999*)

D'autres informations intéressantes peuvent être extraites du même rapport. Les entreprises sondées ont été rassemblées en fonction des distances moyennes correspondant à leurs envois pour compte propre et compte d'autrui (tableau 8 et figure 13). Ce tableau donne la répartition des distances moyennes des envois respectivement sur 100% de transport de compte propre et 100% du transport pour compte d'autrui. Il montre l'impact de la distance sur le choix des entreprises de transporter elles-mêmes leurs marchandises ou de faire une demande à un transporteur extérieur. On observe logiquement que les demandes à trans-

porteurs extérieurs se font pour des envois plus lointains. Il pourrait être intéressant de tenir compte de ce paramètre dans la simulation. Néanmoins, cela requerrait aussi une analyse plus poussée du comportement et du processus de décisions interne aux entreprises. Devant le manque de données désagrégées à ce niveau, il a fallu se résigner à négliger l'impact de la distance du transport sur le choix d'une entreprise ayant un service de transport de procéder elle-même au transport ou de le léguer à un transporteur extérieur.

Distance (km)	CP (%)	CA (%)
1-49	14	6
50-99	20	10
100-249	38	26
250-499	23	37
500+	5	22
Tot	100	101

Tableau 8 : Ventilation des entreprises selon les distances des envois (*Centre de recherches économiques, 1999*)

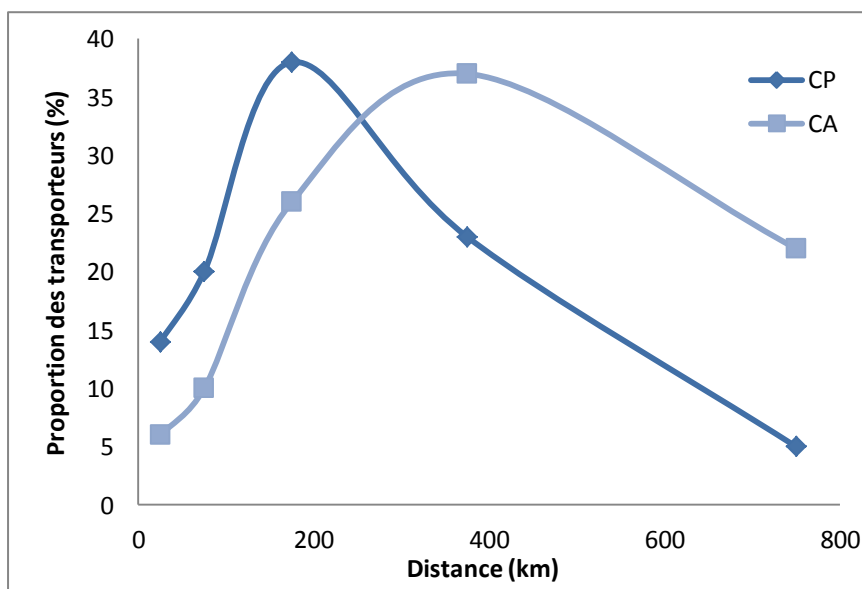


Figure 13 : Ventilation des entreprises selon les distances des envois (*Centre de recherches économiques, 1999*)

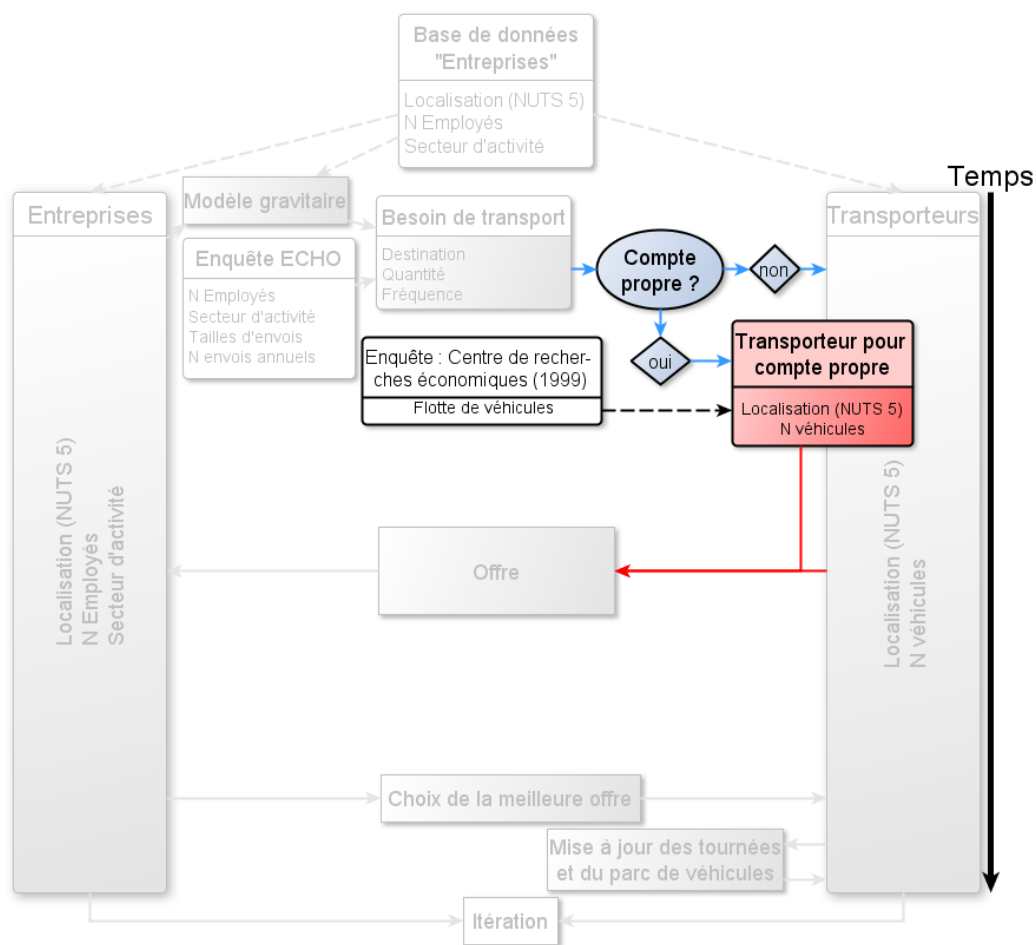


Figure 14 : Intégration du transport pour compte propre dans la simulation

Le processus de calibration du nombre d'entreprises disposant d'un service de transport pour compte propre sera présenté et discuté dans la partie conclusive de cette section, car sa réalisation nécessite que le modèle soit complet.

III.3.b. Fonctions de coûts temporelles

Comme expliqué précédemment, lorsqu'un agent-transporteur reçoit une demande, il tente de déterminer la manière la plus rentable d'intégrer la paire origine-destination associée à la demande dans l'une de ses tournées. Cela lui permet, en outre, d'estimer ses propres coûts et de faire une proposition de prix à

l'entreprise demandeuse. Pour ce faire, il se base sur des fonctions de coûts décrivant le coût de transport c_{ij} entre chaque sommet du réseau. Bien que cette section ne prévoie pas de décrire en détails le modèle de planification des tournées, il est notable que le coût, dont les sociétés de transport tiennent compte dans cette simulation, est en fait le temps de parcours sur chaque axe. Aussi, les mots coûts et temps de parcours et éventuellement distances seront utilisés de manière interchangeable. Les agents-transporteurs vont donc tenter de minimiser le temps passé par leurs camions sur les routes en maximisant le nombre de contrats remplis. Dès lors, il semble pertinent, dans le cadre du développement d'une simulation qui se veut dynamique, de tenir compte de la variation du temps de parcours sur les axes routiers au fil de la journée.

A priori, on imagine que la manière la plus pertinente de modéliser ces fonctions de coûts serait d'imaginer un modèle complètement dynamique où les fonctions de coûts seraient mises à jour dans la simulation à tout instant en fonction des flux prévus sur chaque arcs du réseau. Néanmoins, un tel modèle requerrait une puissance de calcul énorme, surtout pour un scénario à l'échelle de celui fixé dans nos objectifs. En outre, toute l'attention de cette recherche est portée sur le transport de marchandises. Or, on estime généralement que celui-ci représente environ 20% de la charge de véhicules sur le réseau. Dès lors l'impact de cette source de transport semble nettement moins intéressant à analyser de manière dynamique car, de toute façon, l'impact des 80% de flux restant ne pourra lui-même être dynamiquement généré. Cela est dû au fait que les flux de passagers ne seront pas simulés dans ce travail. Pour ces deux raisons, le choix a été fait d'utiliser des fonctions de coûts temporelles variant au fil de la journée plutôt que réellement dynamiques.

Dans cette optique, la journée a donc été divisée en périodes. Lors des tests, une journée de transport a été simulée. Les premières demandent doivent arriver à destination autour de 6h du matin tandis que les dernières doivent arriver à 20h. Ce choix a été fait sur base d'autres données extraites de l'enquête du *Centre de*

recherches économiques (1999) représentées en figure 15. Ce graphe de la répartition horaire des livraisons à Bologne montre que le nombre d’envois avant 6h du matin et après 20h est négligeable. La journée simulée fait donc 14h. C’est pourquoi il a été décidé de la diviser en 14 périodes d’une heure.

Dans la littérature, plusieurs fonctions de coûts ont été imaginées pour tenir compte de l’impact du trafic sur les différents arcs sur le temps de parcours de ces derniers. Si on écrit C_a^0 , le temps de parcours de l’arc a en flux libre, K_a , la capacité de l’arc a , la fonction de *Smock* (1962) estime le temps de parcours de l’arc a durant la période t comme étant $C_a(t) = C_a^0 \cdot e^{x_a(t)/K_a}$ où $x_a(t)$ est le flux de véhicules sur l’arc a durant la période t . Cette fonction a été généralisée par *Overgaard* (1967) qui a proposé d’estimer le temps de parcours sur l’arc a durant la période t comme $C_a(t) = C_a^0 \cdot \alpha^{\beta x_a(t)/K_a}$, où α et β sont des paramètres de calibration. Néanmoins, la formule la plus employée dans la littérature, et celle que nous avons choisi d’utiliser, a été proposée par le *Bureau of Public Roads* (1964) : $C_a(t) = C_a^0 \cdot (1 + \alpha (x_a(t)/K_a)^\beta)$, où α et β sont des paramètres de calibration dont les valeurs habituellement utilisées dans le cadre de transport interurbain sont respectivement 0,15 et 4.

Pour chaque arc, sur base des temps de parcours en flux libre et des capacités, les flux de véhicules pour chaque période ont été estimés. Pour ce faire, une matrice origines-destinations statique des flux de passagers de niveau de désagrégation NUTS-5 provenant du projet LIMOBEL (*De Vlieger, et al., 2011*) a été utilisée ainsi que la répartition de l’utilisation du réseau routier sur une journée (*Service public fédéral Mobilité et Transports, 2005*).

A cette étape, une remarque importante peut être faite sur la méthode de génération de ces fonctions de coûts. Malheureusement, ces dernières n’assurent pas la propriété First-In-First-Out abordée dans la section II.3.g. Cela signifie qu’un paradoxe pourrait apparaître dans le cas où la pente de la fonction de coût serait, à un certain moment, inférieure à -1. Dans ce cas, le temps de parcours

d'une origine à une destination à l'instant t pourrait-être inférieur de plus d'une heure au temps de parcours entre ce même couple origine-destination à l'instant $t-1$ et un véhicule démarrant plus tard depuis l'origine pourrait arriver plus tôt à destination. Pour plus de clarté, voici un exemple. Supposons qu'un transporteur aurait estimé qu'à midi, il lui faut 3h pour aller d'une origine à une destination alors qu'il ne lui faudra qu'1h pour faire le même trajet s'il démarre à 13h. Un paradoxe fait donc son apparition : s'il démarre à midi, il arrivera à 15h alors que s'il démarre à 13h, il arrivera à 14h, soit une heure plus tôt.

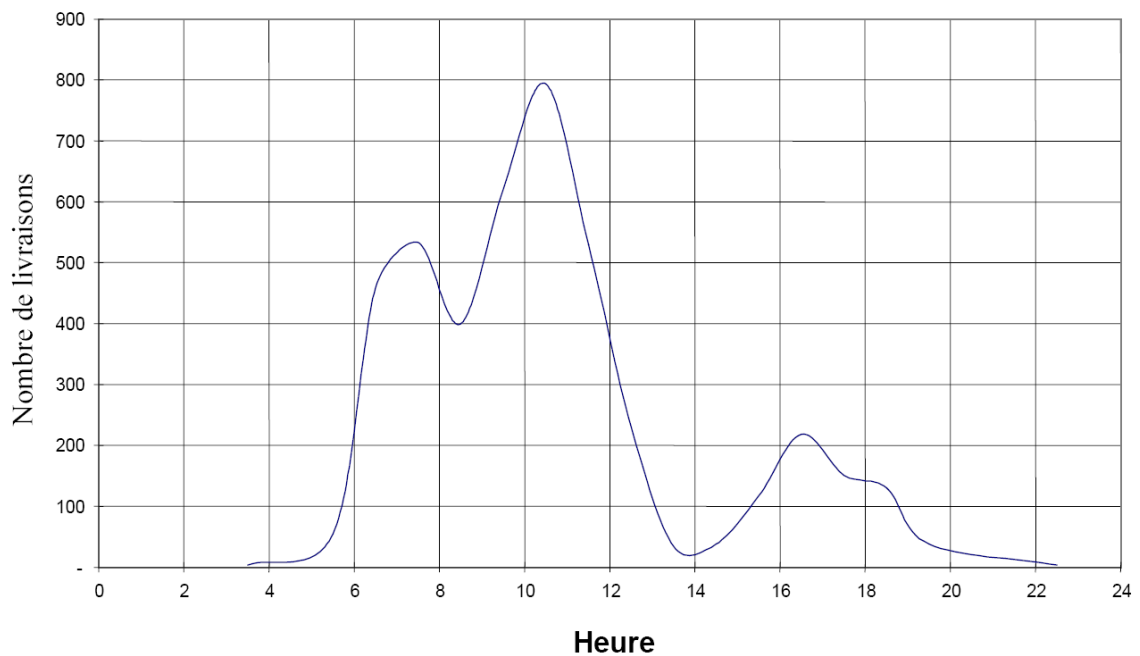


Figure 15 : Répartition horaire des livraisons à Bologne
(Centre de recherches économiques, 1999)

Cependant, bien que la méthode utilisée n'assure pas la propriété FIFO, des tests sur les fonctions générées ont été réalisés afin de vérifier si cette condition était violée dans le cas pratique. Ce n'est jamais le cas avec les données utilisées dans ce travail. Ceci s'explique principalement par le fait que cette étude porte essentiellement sur un cas interurbain où la congestion apparaissant dans le réseau est généralement moindre que celle observée dans les contextes intra-urbains.

Finalement, c'est donc sur base de ces fonctions que les transporteurs estimeront leurs propres coûts et qu'ils tenteront d'optimiser leurs tournées. L'intégration de ce module de fonctions de coûts temporelles dans la simulation est représentée en figure 16.

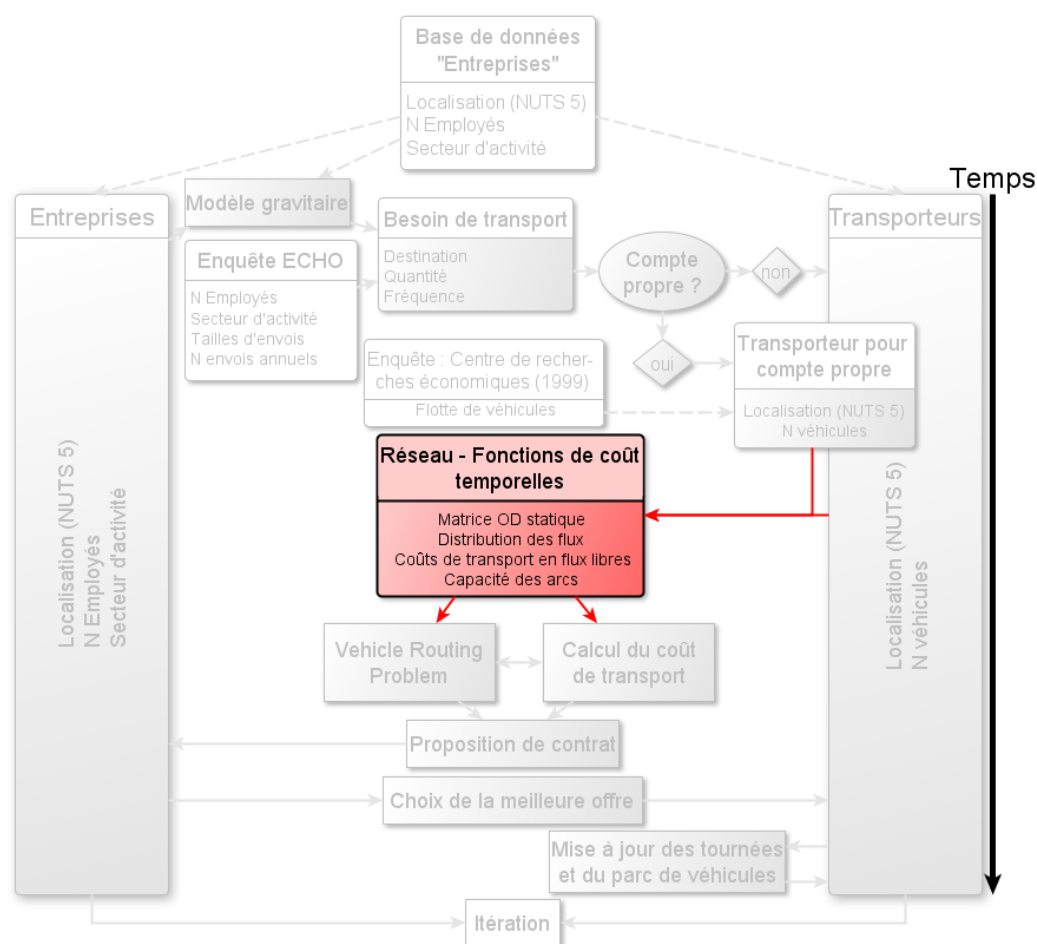


Figure 16 : Intégration des fonctions de coûts temporelles dans la simulation

III.3.c. Intégration des tournées

Comme expliqué plus tôt, au cours de la simulation présentée dans ce travail, des agents représentant les sociétés de transport sont confrontés à une série de demandes au fil de la journée. Leur objectif est de proposer à autant d'entreprises que possible leur service. Plus exactement, ils cherchent, d'une part, à maximiser

le nombre de contrats remplis et, d'autre part, à minimiser leurs coûts de transport, en l'occurrence le temps de transport. Ces deux objectifs sont complémentaires puisqu'une utilisation optimale des camions réduira non seulement les coûts de transport, mais permettra en même temps de remplir un plus grand nombre de contrats. Cette section s'articule de la manière suivante : tout d'abord, le problème de tournée (VRP) traité dans ce modèle sera présenté, ensuite un algorithme de résolution du VRP tenant compte des contraintes de la simulation sera proposé et, finalement, l'intégration du module de tournées dans la simulation sera décrite.

Clé de voute de cette simulation, la façon dont les transporteurs planifieront les tournées est d'une importance capitale car en lien direct avec la structure des flux qui seront affectés sur le réseau. Le sujet a donc fait l'objet d'un travail approfondi, d'une part pour son rôle critique dans l'ensemble du travail réalisé et, d'autre part, pour la complexité du problème abordé.

Le problème de tournées abordé dans ce travail se veut être une reproduction la plus réaliste possible des problèmes de tournées auxquels sont confrontées les sociétés de transport dans le monde réel. Il se caractérise par diverses caractéristiques qui séparément se sont déjà vues analysées dans une multitude de travaux à travers différentes variations du VRP (voir section II.3.). Néanmoins, à notre connaissance, il existe peu (voire pas) de littérature tenant compte d'une combinaison aussi complète de variations dans un même problème de tournées.

Afin de décrire le problème, considérons un transporteur. Celui-ci dispose d'un parc de véhicules de capacités limitées (CVRP). De manière générale, ces capacités peuvent être différentes d'un véhicule à l'autre, comme expliqué en début de cette section. Il devra donc être tenu compte de cette contrainte liée à la variante HFVRP.

Il a été postulé que les chauffeurs ne pouvaient pas rouler plus d'un certain nombre d'heures. On pourrait donc appeler cette variation un *Duration Cons-*

trained Vehicle Routing Problem (DCVRP) apparenté au CVRP commun, si ce n'est que la contrainte associée au DCVRP pose une limitation temporelle plutôt qu'en termes de capacité. La limite a été fixée à 8h dans le scénario de test. Il pourrait être intéressant d'affiner cet aspect de la simulation en implémentant les restrictions légales précises. Néanmoins, dans le souci de ne pas s'étendre à un nouveau sujet complexe, cela n'a pas été fait actuellement.

Comme expliqué dans la section précédente, chaque demande reçue par un transporteur est composée de différents constituants que sont l'origine, la destination, la quantité et l'heure de livraison souhaitée. De par cette définition des demandes, le problème de tournées auquel est confronté notre transporteur est un problème de type *Dial-A-Ride* (DARP). En effet, chaque demande comporte une origine précise et une destination précise et les origines et destinations des différentes demandes reçues ne peuvent être confondues.

En outre, la conséquence de l'aspect temporel des demandes et du fait que ces demandes comportent un élément « heure de livraison souhaitée » est que le problème de tournée rencontré par les transporteurs est dynamique (DVRP). Les demandes affluant tout au long de la journée, il est plus que probable que vienne un moment à partir duquel de nouvelles demandes seront faites, alors que des décisions ont été prises. Plus concrètement, si on considère qu'un transporteur reçoit deux demandes sur la journée, il peut recevoir la première au matin. Celle-ci demandant de transporter quelques kilogrammes de marchandise de Mons à Charleroi, dont l'heure de livraison souhaitée est midi. Il peut ensuite, dans l'après-midi, recevoir l'autre demande de transport d'une faible quantité de Charleroi à Mons avec pour heure de livraison souhaitée 16h. Dans cet exemple précis, le transporteur est confronté à une modification de l'information alors qu'une tournée a déjà eu lieu puisqu'il est vraisemblable que sa première tournée ait déjà fait l'aller-retour.

Une question se pose donc à la lecture de l'exemple précédent. S'il avait reçu les deux demandes suffisamment tôt (soit, avant que son camion ne démarre), le transporteur aurait-il pu combiner les deux demandes dans un seul aller-retour avec un seul camion ? La réponse est oui. Tout d'abord, le transporteur aurait pu faire attendre son camion à Charleroi afin de respecter autant que possible les contraintes temporelles et de remplir les deux demandes avec un seul camion quitte à « gaspiller » un certain potentiel de transport entre les deux trajets (pendant l'attente du camion). Ensuite, dans l'hypothèse où le transporteur aurait reçu les deux demandes avant que son camion ne soit parti, il aurait pu proposer à l'une des entreprises de livrer les marchandises à une heure différente de l'heure initialement souhaitée afin d'éviter cette attente du camion entre les deux trajets. Dans ce cas, le transporteur se verrait confronté à une autre variante du VRP, à savoir le Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW). Cependant, cette contrainte n'a pas pu être prise en compte par manque de données permettant de générer des fenêtres temporelles (time-windows) réalistes, comme expliqué dans la section précédente.

Au-delà du type de problème de tournée rencontré par les agents transporteurs ou de la manière dont ils l'aborderaient, ce phénomène soulève de nouvelles questions. Notamment celle de l'élasticité de l'aspect temporel des demandes du point de vue de l'entreprise. On imagine que certaines entreprises pourraient avoir besoin que leur marchandises soient livrées à une heure très précise, sans possibilité de manœuvre, alors que d'autres pourraient être très ouvertes quant à l'heure de livraison. Une information précise sur le sujet serait nécessaire à la génération des « time windows » associées aux différentes demandes car les exigences en termes de rapidité ou ponctualité de livraison peuvent être très variables d'une entreprise à une autre en fonction de sa stratégie logistique. Néanmoins, à notre connaissance, de telles données ne sont pas disponibles. En outre, devant la complexité du problème déjà tenu en compte, l'implémentation

de ces time-windows dans l'algorithme de planification des tournées s'avèrerait très compliquée. Celles-ci n'ont donc pas été intégrées dans ces travaux.

D'autre part, la valeur accordée au temps par les entreprises a dû être négligée elle-aussi. Bien que différents travaux (*Albrantes et Wardman, 2011; Alvarez, et al., 2007; Bruzelius, 2001*) estiment cette valeur pour le transport de passagers ou de marchandises, ainsi que la valeur d'autres aspects qualitatifs associés aux services de transport (*Zamparini, et al., 2011*), la prise en compte de cet aspect nécessiterait de prendre en compte les time windows. En effet, dès lors qu'une valeur serait attribuée au temps par les entreprises, un transporteur devrait savoir quelle marge de manœuvre il a dans l'optimisation de ses tournées, pour savoir dans quelle mesure il peut modifier les heures de livraison de ses différents transports afin de réduire ses coûts au maximum. Il a donc été postulé que les entreprises sont relativement souples en termes horaires. L'hypothèse est faite qu'elles acceptent volontiers de voir leur livraison avancée ou retardée, tant qu'elle a lieu dans la même journée. Cette hypothèse a le mérite de simplifier considérablement le modèle. Il peut se justifier par le fait qu'une entreprise ne sera prête à payer plus cher pour un transport pour qu'une livraison soit faite spécifiquement à l'heure souhaitée que dans de rares cas où un retard entraînerait un arrêt de production. Un tel cas pourrait se produire pour des entreprises travaillant en « just-in-time » (*Fazel, et al., 1998; Maiga et Jacobs, 2009; Schniederjans M.J. et Cao Q., 2000; Amasaka, 2007*).

Pour pouvoir se permettre plus de réalisme à ce niveau de la simulation, il serait intéressant de mener des travaux plus approfondis afin d'analyser les besoins des entreprises en terme de respect des horaires.

Finalement, comme expliqué dans la section précédente, les fonctions de coûts associées aux différents arcs du réseau dépendent de l'heure de la journée afin de tenir compte de la présence de véhicules liés au trafic de personnes. Bien que dans la construction de ces fonctions de coûts temporelles, rien n'assure qu'elles

respectent la propriété FIFO, il se trouve qu'avec les données utilisées pour les construire, c'est bien le cas. Ceci s'explique principalement par l'aspect interurbain pour lequel la simulation a été construite.

En résumé, le problème de tournées abordé dans cette section et auquel font face les agents transporteurs (tant roulant pour compte propre que pour compte d'autrui) est un problème comportant les caractéristiques des variantes du VRP suivantes :

- contrainte de capacité des camions (CVRP),
- flotte hétérogène (HFVRP),
- contrainte de durée maximale de trajet (DCVRP),
- problème de tournée Dial-A-Ride (DARP), dans lequel chaque demande est associée à une origine et une destination précise,
- problème de tournées dynamique (DVRP), et
- fonctions de coûts temporelles (TDVRP).

Avant d'aborder l'algorithme de gestion des tournées utilisé par les transporteurs, une remarque est primordiale : dans la grande majorité de la littérature, les algorithmes de gestion des tournées sont proposés et testés sur des petits problèmes en comparaison du problème abordé ici. En effet, on imagine généralement ce type d'algorithmes pour un transporteur devant visiter quelques centaines de clients au mieux. Notons que dans cette simulation, il y a plus de 400 transporteurs privés pour parfois plus de 1000 transporteurs pour compte propre. Le nombre de demandes simulées est de l'ordre de la centaine de milliers et pour chacune d'elles, plusieurs transporteurs sont contactés afin que l'entreprise demandeuse soit confrontée à un vrai choix de la meilleure offre. Il va donc de soi que tout le point de cette section n'est pas de proposer une méthode de résolution de VRP révolutionnaire en termes d'efficacité mais bien d'appliquer et de combiner des méthodes existantes les plus rapides possible à un problème plus complexe que ceux généralement abordés et surtout d'une envergure bien plus importante.

La méthode utilisée par les agents transporteurs lors de la planification de leur tournée est une heuristique classique inspirée de l'algorithme *GENIUS* de Gendreau, et al. (1992). Initialement, cet algorithme a été imaginé pour résoudre un Traveling Salesman Problem (TSP) (ie. le cas particulier du VRP dans lequel le transporteur ne dispose que d'un camion). Cet algorithme appelé *insert & shake* a donc été adapté mais conserve ses deux membres principaux lui valant son nom, une heuristique d'insertion (insert) et une heuristique de mélange (shake).

Il est à rappeler que, dès lors que les demandes sont reçues de manière séquentielle, arrivera un moment où le premier camion devra quitter le dépôt pour entamer sa tournée alors que d'autres demandes peuvent encore être transmises au transporteur. Néanmoins, vu les faibles dimensions de la région étudiée (la Wallonie), nous supposons que le trajet d'un camion ne changera plus après que celui-ci ait quitté le dépôt. Dès lors, toute insertion dans un trajet ne peut avoir lieu que dans des trajets assignés à des camions encore situés au dépôt.

En ce qui concerne l'heuristique d'insertion, un transporteur tentera d'insérer la paire origine-destination dans ses tournées de la manière la moins coûteuse possible lors de la réception de chaque demande. Au départ, aucune route n'a encore été créée. Un premier camion sera affecté à la paire origine-destination associée à la première demande reçue par le transporteur. Ensuite, lors de la réception de chaque demande, toutes les possibilités d'insertions seront comparées entre elles et avec la possibilité d'affecter un nouveau camion à la paire considérée. A chaque fois qu'un nouveau camion doit être affecté à une paire origine-destination, le transporteur attribuera le camion à la plus petite capacité possible suffisante au transport de la quantité demandée. S'il tente d'insérer une paire origine-destination dans un camion ayant déjà une tournée et que la contrainte de capacité est violée, le transporteur essayera si possible d'affecter un camion de plus grande capacité au transport dans le cas où cela mènerait à une solution de meilleure qualité.

Ceci dit, dans l'état actuel, cette méthode pose un problème. Si on considère un transporteur et qu'on postule qu'il n'affecte de nouveau camion à une paire origine-destination que dans le cas où ce sera plus rentable que la solution correspondant à l'insertion optimale dans les trajets existants respectant les contraintes, cela reviendra pour le transporteur à résoudre des TSP les uns après les autres. En effet, dans tous les cas de figure, insérer un (ou plusieurs) sommet(s) dans un trajet existant sera plus rentable que d'utiliser un nouveau camion pour créer un nouveau trajet comportant ce(s) sommet(s).

Ceci peut être montré en utilisant le théorème de Pythagore dans un petit exemple triangulaire (voir figure 17) : oublions pour un moment l'aspect dynamique de la simulation pour nous concentrer sur le cas simple où un camion fait l'aller-retour entre son dépôt et un point A (dans ce cas, on peut supposer qu'il collecte des marchandises au point A et les livre dans la même zone NUTS-5 que le dépôt). Posons a , le coût de transport séparant le dépôt du point A. Ce transport coûte donc $2a$. Supposons que le transporteur reçoit une seconde demande de transport de marchandises d'un point B vers la zone NUTS-5 du dépôt. Posons b , le coût de transport pour relier le dépôt au point B et c le coût de transport pour relier les points A et B.

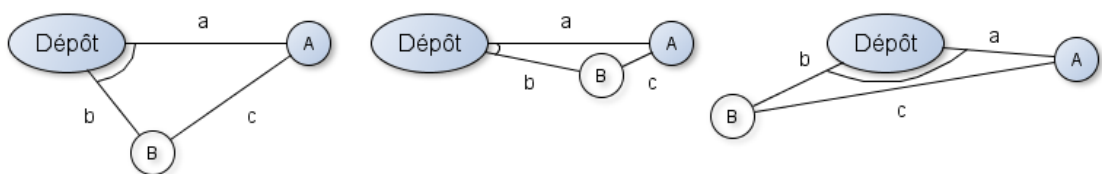


Figure 17 : Exemple triangulaire du problème de clustering.

Le transporteur a donc le choix entre utiliser un camion pour chacune des demandes, auquel cas le coût de transport sera de $2a + 2b$, ou combiner les deux transports dans un seul camion, pour un coût de transport de $a + b + c$.

Or, par Pythagore on sait que $c = \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cos \widehat{ab}}$. Donc, quels que soient a et b , $|a - b| \leq c \leq a + b$. Par conséquent, le coût induit par le transport combiné en un camion de deux demandes est toujours inférieur ou égal au coût induit par les transports des demandes dans deux camions distincts.

Ce problème de clustering est bien connu et a déjà été étudié dans la littérature (voir section II.3.). Différents algorithmes existent pour palier à ce problème, qu'ils soient de type cluster-first-route-second ou inversement route-first-cluster-second. Néanmoins, ils ne sont généralement pas adaptés à un problème dynamique comme celui décrit ici. En effet, dans le problème considéré dans ce travail, les planificateurs de tournées (les transporteurs) font face à des demandes de manière séquentielle et se doivent d'insérer chaque paire de sommets (origine-destination) à chaque réception de demande. Dès lors, un algorithme cluster-first-route-second est clairement inapplicable car le clustering requiert d'avoir déjà connaissance, si pas de tous les sommets associés aux demandes, au moins d'un certain nombre d'entre eux.

Il serait peut-être possible de développer un algorithme de type route-first-cluster-second dans lequel chaque sommet est inséré dans un seul trajet sans se soucier des violations de contraintes. Cela serait réalisé avant une seconde phase dans laquelle le planificateur scinderait le trajet créé jusqu'alors en plus petits pour les affecter à différents camions en veillant à ne pas violer les différentes contraintes. Ceci dit, devant la complexité des contraintes du problème étudié, rien n'assure qu'il aurait été possible pour les transporteurs de procéder à un tel clustering en respectant toutes les contraintes. En outre, dans les deux cas, des transporteurs pourraient accepter des demandes qu'ils ne sont pas en mesure de remplir puisqu'ils ne planifieraient finalement leurs tournées qu'a posteriori. Un algorithme d'insertion intégré dans lequel le clustering et la construction des trajets (routing) se font en parallèle lors du traitement de chaque demande a donc été développé.

La méthode qui a été utilisée pour intégrer routing et clustering dans l'heuristique d'insertion utilisée dans ces travaux repose sur l'introduction d'un paramètre γ ($0 \leq \gamma \leq 1$) pondérant l'économie minimum à réaliser lors de la combinaison de deux demandes dans une même tournée. Concrètement, supposons un transporteur n'ayant planifié qu'une tournée d'un coût C_1 , alors qu'une nouvelle demande lui arrive. Affecter un camion à cette demande (et donc créer une seconde tournée) lui coûterait C_s alors que l'augmentation de coût pour combiner cette demande avec les précédentes et l'insérer dans la première tournée serait δ_C (on sait que $\delta_C \leq C_s$). Le transporteur combinera les deux demandes si et seulement si $\delta_C \leq \gamma C_s$. On remarque que si $\gamma = 0$, le transporteur ne combinera jamais tant qu'il aura des camions vides au dépôt. En effet, $\delta_C \leq 0$ ne sera vrai que si une demande concerne une origine et une destination déjà visitées dans une tournée. Il utilisera donc chaque camion pour un transport avant de commencer à insérer une nouvelle paire origine-destination dans une tournée existante. Inversement, si $\gamma = 1$, le transporteur combinera toujours et remplira chacun de ses camions les uns après les autres car $\delta_C \leq C_s$ est toujours vrai. Il n'utilisera alors que le minimum de camion, ce qui ne veut pas dire qu'il aura opté pour une tournée qui minimise ses coûts de transport.

On peut mieux comprendre le paramètre γ et son impact à travers un petit exemple qui peut également apporter une validation conceptuelle partielle du modèle de génération de tournée. Supposons un scénario à un transporteur disposant de 2 camions d'une capacité de 25T. Ce transporteur reçoit séquentiellement 5 demandes au cours de la période simulée dont les destinations sont toutes situées à son dépôt pour des raisons de simplicité. La contrainte sur la durée maximale de transport est aussi temporairement oubliée par les mêmes. L'ordre de réception, les quantités, la distribution spatiale des origines des demandes ainsi que les coûts (temps) de parcours des arcs du réseau sont représentés en figure 18. Finalement, pour construire ses tournées, le transporteur ne

procèdera qu'à des insertions. La partie « shake » de l'heuristique n'est donc pas utilisée pour cet exemple.

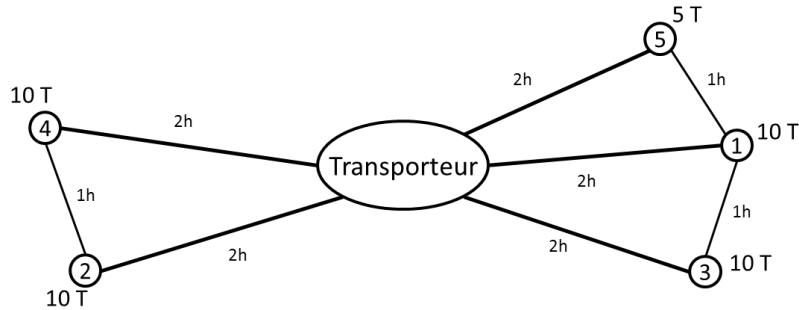


Figure 18 : Exemple de tournée dynamique.

Ce cas illustratif n'a bien sûr pas été choisi au hasard. Il représente un scénario, probablement rare, dans lequel un transporteur se voit confronté à des demandes telles que s'il les insère l'une après l'autre dans des camions en remplissant chaque camion avant d'en utiliser un nouveau ($\gamma = 1$), il n'aboutira vraisemblablement pas à la tournée optimale. La solution optimale de cet exemple est évidente : De par la structure du réseau, il est clair que l'utilisation de deux camions pour livrer respectivement les sommets 5, 1 et 3, et 4 et 2 permet d'aboutir à la tournée optimale.

Comparons la méthode d'insertion avec les deux valeurs extrêmes de γ . Quel que soit γ , le transporteur va attribuer la demande 1 à un camion vide. Un premier camion ira donc récolter les marchandises du sommet 1. Ensuite, si $\gamma = 1$, le transporteur va insérer la demande 2 dans ce même camion qui se dirigera donc vers le sommet 2, au passage celui-ci livrera les marchandises de la demande 1 au dépôt. La demande 3 sera à nouveau insérée dans le camion qui, à nouveau, livrera ses marchandises au dépôt en se dirigeant vers le sommet 3, et ainsi de suite jusqu'à la 5^e demande. Au final, un seul camion sera utilisé pour cet exemple et il aura roulé 20h. Le coût total en temps pour le transporteur sera donc de 20h. Supposons maintenant avoir pris une valeur de $\gamma = 0$. Dans ce cas, après la première demande, le transporteur utilisera son second camion pour

aller chercher les marchandises de la demande 2. Il insèrera ensuite la troisième demande dans la tournée qui minimise le coût d'insertion, soit la tournée 1. Le premier camion a donc actuellement pour planning de partir du dépôt en direction du sommet 1, d'aller ensuite au sommet 3 pour rentrer au dépôt. De la même manière, la demande 4 sera insérée dans la tournée 2. Le camion 2 aura donc pour planning la série de sommet suivante : Dépôt-4-2-Dépôt, pour un temps de parcours de 5h. Et finalement la demande 5 sera insérée dans la tournée 1. Le premier camion aura donc comme tournée : Dépôt-5-1-3-Dépôt, pour un temps de parcours de 6h. Le coût total de transport est donc de 11h et la solution optimale aura été trouvée pour cet exemple en utilisant $\gamma = 0$.

Il est notable que si une contrainte temporelle avait été utilisée, par exemple si les camions avaient été limités à 6h de transport maximum, l'algorithme utilisant $\gamma = 0$ aurait aussi mené à l'optimale de l'exemple. Cette fois, cependant, l'utilisation de $\gamma = 1$ aurait mené à un comportement semblable : La demande 1 aurait été affectée au camion 1. L'insertion de la demande 2 dans le même camion aurait violé la contrainte temporelle, dès lors elle aurait dû être affectée au camion 2. La suite aurait été similaire à la planification de tournée avec $\gamma = 0$. Ainsi les deux solutions auraient été identiques quel que soit γ . Finalement, si la limite temporelle avait été fixée à 8h, un troisième camion aurait été nécessaire pour transporter les demandes en utilisant uniquement l'algorithme d'insertion sur cet exemple précis.

Notons que cet exemple n'a pas pour but de calibrer le paramètre mais simplement d'en justifier l'existence et de permettre d'appréhender sa portée et son impact. Dès lors, ce paramètre a été calibré sur différents scénarios comportant un seul transporteur. Celui-ci est confronté à un nombre de demandes comparable au nombre de demandes rencontrées par les transporteurs lors de l'application de la simulation au scénario wallon, à savoir pour 100, 250 et 500 demandes. Pour chacune des tailles considérées, 30 scénarios différents ont été testés dont les caractéristiques des demandes sont générées de manière sto-

chastique selon les mêmes critères que celles du modèle. Ces scénarios ont été générés de manière stochastique sur les hypothèses du modèle gravitaire. S'il est habituellement d'usage d'utiliser des scénarios « benchmark » existants dans la littérature, ce n'est, hélas, pas possible ici puisqu'il n'existe, à notre connaissance, pas de scénario « benchmark » qui tienne en compte les nombreuses contraintes associées au VRP étudié ici. Ceux-ci auraient permis non seulement de calibrer le paramètre γ ici discuté mais aussi de se faire une idée de la qualité des solutions générées en comparaison avec d'autres algorithmes.

Le coût total des tournées que l'algorithme a généré pour le transporteur a été relevé, ainsi que le nombre de demandes remplies pour chaque scénario. Finalement, un « score » a été calculé sur base de ces données. Celui-ci est égal au nombre de demandes remplies par le transporteur divisé par le coût total des tournées qu'il a construites. Notons que le taux de demandes remplies observé lors de ces tests est resté à peu près constant et a toujours été compris entre 96% et 98%. Dès lors, seules les moyennes sur le score calculées pour les scénarios de mêmes dimensions sont montrées en figure 19, celui-ci étant juste inversement proportionnel aux coûts totaux supportés par le transporteur à un facteur constant près.

Malgré la possibilité d'observer des structures telles que celle décrite en figure 17 qui favoriseraient des valeurs optimales de γ inférieures à 1, il ressort que la valeur optimale dans les conditions de notre simulation reste néanmoins très proche de 1 si pas 1. En effet, pour les deux plus petites dimensions considérées, on observe une augmentation du score à partir de valeurs proches de 0.8 pour atteindre un palier autour de 0.9. Tandis que pour ce qui est des scénarios de plus grande taille, il semble que le paramètre n'ait pas d'impact. En conclusion, la valeur optimale de γ semble être très proche de 1 et plus le nombre de demandes est grand, moins l'impact de γ semble se faire ressentir. Ces deux observations sont cohérentes et peuvent s'expliquer assez simplement.

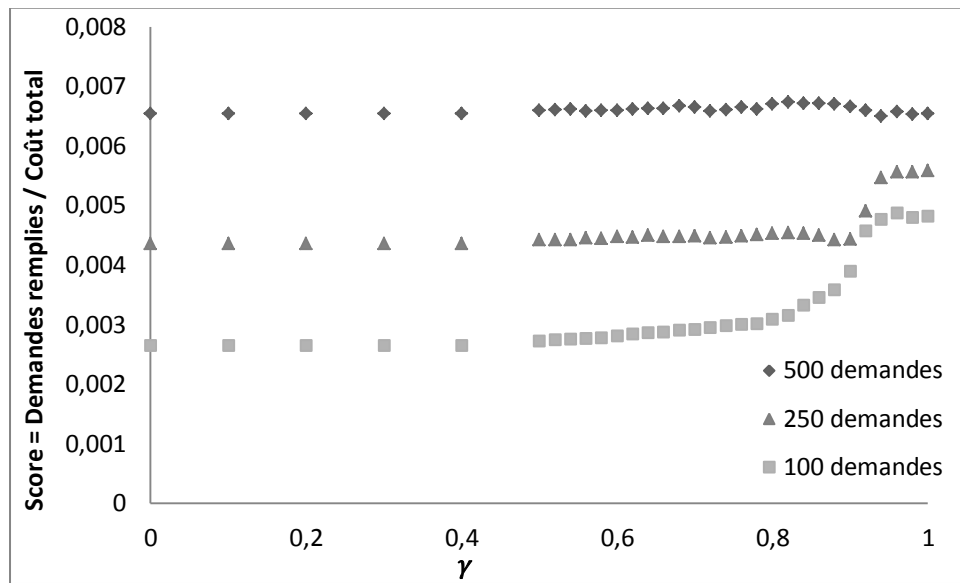


Figure 19 : Graphe représentant les scores moyens calculés sur les 30 scénarios testés correspondant à différentes tailles de problèmes : 100, 250 et 300 demandes

D'une part, rappelons que les caractéristiques géographiques des demandes sont générées selon un modèle gravitaire. La probabilité de devoir se rendre dans une ville est inversement proportionnelle au carré de la distance de l'origine à cette ville. Les points les plus visités sont donc statistiquement les plus proches. En outre, une même ville peut être destination (ou origine) de plusieurs demandes. Ceci est d'autant plus vrai si elle représente un pôle d'attraction plus important (lié à son nombre d'employés). Il semble donc assez logique que dans le cas ici étudié, la stratégie la plus rentable consiste à combiner un maximum les demandes reçues et de manière quasiment systématique. Si les demandes étaient réparties de manière plus homogène, des tests semblables permettent d'estimer des valeurs optimales du paramètre γ différentes. A titre informatif, quelques tests ont été réalisés pour une série de scénarios de différentes tailles mais dont les caractéristiques géographiques des demandes sont générées selon un modèle gravitaire $x_{Ai} = G_A \frac{E_i}{r_{Ai}^z}$ avec respectivement $z = 0, 1$ et 2 . Pour analyser ces différents scénarios, introduisons un « score normalisé ». Celui-ci a pour rôle de

permettre de comparer l'évolution du score en fonction de γ en termes de pourcentages par rapport au score obtenu pour $\gamma = 0$. Pour un scénario d'une taille et un exposant de modèle gravitaire donnés, il est défini comme :

$$\text{Score normalisé} = K_s \frac{\text{Nombre de demandes remplies}}{\text{Coût de transport total}}$$

où K_s est un paramètre dépendant du scénario lui-même défini comme :

$$K_s = \frac{\text{Coût de transport total pour l'observation } \gamma=0}{\text{Nombre de demandes remplies pour l'observation } \gamma=0}.$$

De cette manière, la valeur prise par le score normalisé en $\gamma = 0$ lors de chaque scénario considéré est toujours 1 tandis que les scores normalisés pour les autres valeurs de γ montrent l'évolution relative à cette première valeur. Les figures 19, 20 et 21 représentent le score normalisé pour ces différents scénarios. Celles-ci attestent de l'impact de l'hétérogénéité géographique des demandes sur la valeur optimale du paramètre γ .

D'autre part, pour rappel, le paramètre γ est utilisé par le transporteur lors de la réception d'une demande de transport s'il est face à la question de savoir s'il va combiner cette nouvelle demande dans une tournée existante ou s'il va utiliser un camion encore inoccupé. Si le nombre de demandes est très important par rapport au nombre de camions que le transporteur possède, les deux politiques extrêmes représentées par des valeurs de γ de 0 et 1 deviennent très semblables. En effet, considérons la stratégie d'insertion avec $\gamma = 0$ correspondant au choix du transporteur de systématiquement utiliser un nouveau camion pour une nouvelle demande tant que des camions n'ont pas de tournée. Dès lors qu'il aura utilisé chacun de ses camions, soit après un nombre faible de demandes par rapport au total, il procédera exactement de la même façon que s'il appliquait une stratégie $\gamma = 1$ correspondant au choix d'insérer les demandes dans des tournées existantes autant que possible.

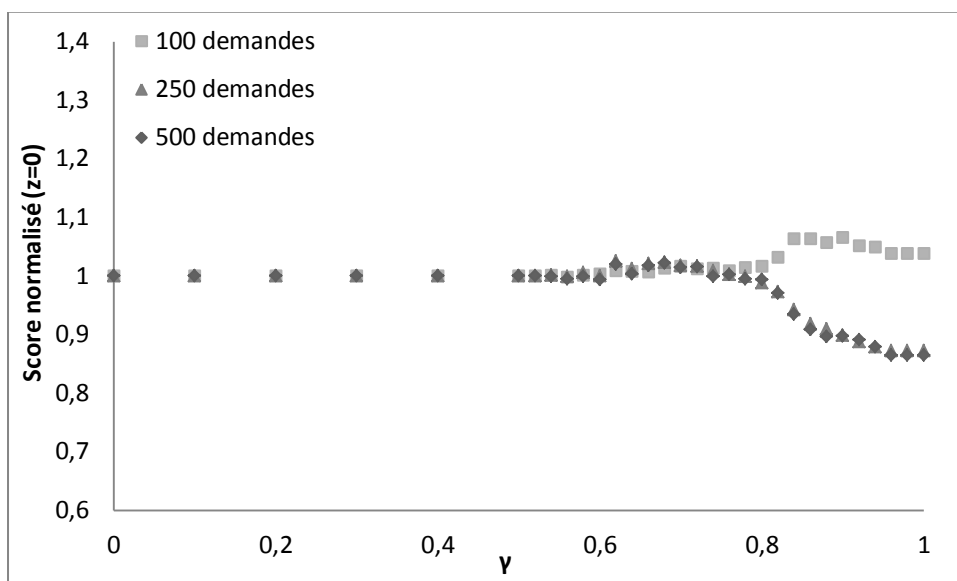


Figure 20 : Score normalisé obtenu par un transporteur
confronté à différentes séries de demandes générées se-
lon un modèle gravitaire avec $z=0$

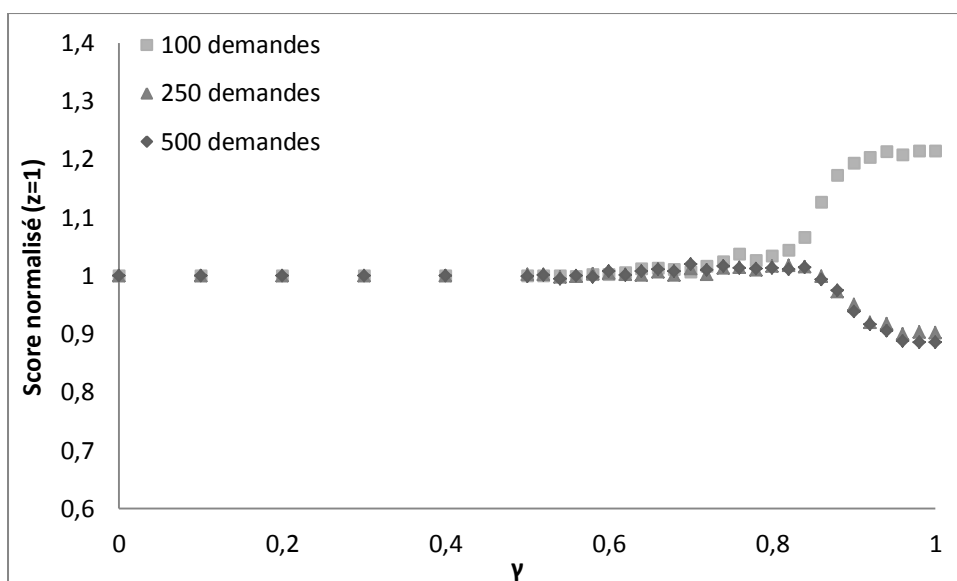


Figure 21 : Score normalisé obtenu par un transporteur
confronté à différentes séries de demandes générées se-
lon un modèle gravitaire avec $z=1$

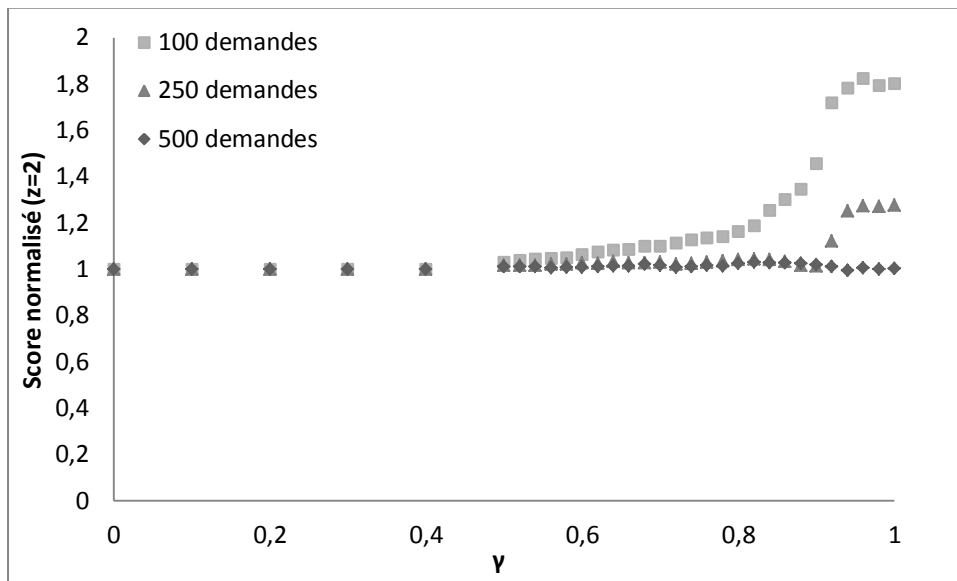


Figure 22 : Score normalisé obtenu par un transporteur
confronté à différentes séries de demandes générées se-
lon un modèle gravitaire avec $z=2$

En conclusion, comme attendu, deux facteurs influencent la valeur optimale de γ ainsi que la sensibilité de la qualité des tournées générées en fonction de ce paramètre.

D'une part, l'exposant z utilisé dans le modèle gravitaire : on constate que sur un scénario où les envois concernent des paires origines-destination ayant tendance à être répartie sur une zone plus vaste (ie. $z=0$), la sensibilité diminue. Ceci est dû au fait que la réduction marginale de coût engendrée par une amélioration des tournées est plus faible lorsque les distances qui séparent les origines des destinations sont plus importantes. En effet, dans ce cas, une composante incompressible du coût est liée à la distance moyenne séparant chaque origine de sa destination associée. Dès lors, si cette distance moyenne est plus grande, la part incompressible du coût des tournées l'est aussi. Ce faisant, la variation marginale de coût possible découlant du choix de combiner ou pas est donc plus faible. Un petit exemple permet de mieux appréhender ce phénomène :

Si on pose $\alpha = \text{moyenne}\{d(o_i, d_i)\}$ et $\beta = \text{moyenne}\{d(\text{Dep}, o_i) + d(d_i, \text{Dep})\}$, on sait que $\alpha \leq \beta$ car dans le pire des cas, soit l'origine, soit la destination du transport sont situés au même endroit que le dépôt. Alors le sommet associé doit être, en moyenne, à une distance α de celui-ci puisque l'origine et la destination sont séparés de cette distance α . Dans ce cas limite, $\alpha = \beta$.

Si en moyenne, la distance séparant origine de sa destination associée est faible par rapport aux distances séparant chaque sommet du dépôt, on est dans le cas $\alpha \ll \beta$ avec un scénario (à deux demandes) du type représenté en figure y.

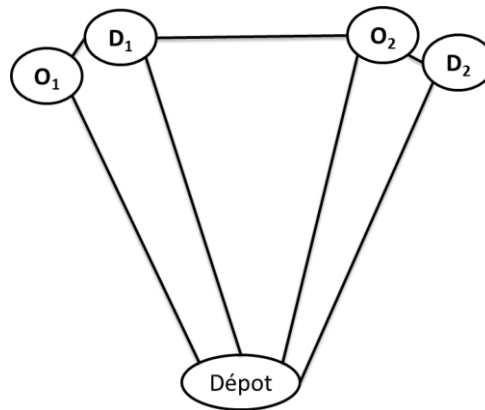


Figure 23 : Exemple de problème à deux demandes avec $\alpha \ll \beta$.

Inversément, si $\alpha \approx \beta$, on est dans un scénario (à deux demandes) du type représenté en figure 24.

Dans chacun des cas, le coût de transport C peut être estimé, lorsque le transporteur combine les 2 demandes dans un camion ou lorsqu'il envoie un camion par demande :

Si le transporteur envoie deux camions : $C = 2 * (\alpha + \beta)$

Si le transporteur combine les deux demandes : $C = 2 * (\alpha + \frac{\beta}{2} + \delta)$ le facteur $\frac{1}{2}$ devant β apparaît car seul l'un des deux arcs doit être parcouru (soit l'arc dépôt-origine, soit l'arc dépôt-destination). En moyenne, le coût associé à deux-ci est

donc réduit de moitié. En contrepartie, un arc supplémentaire doit être parcouru, pour rejoindre l'origine 2 depuis la destination 1. Son coût a été noté δ .

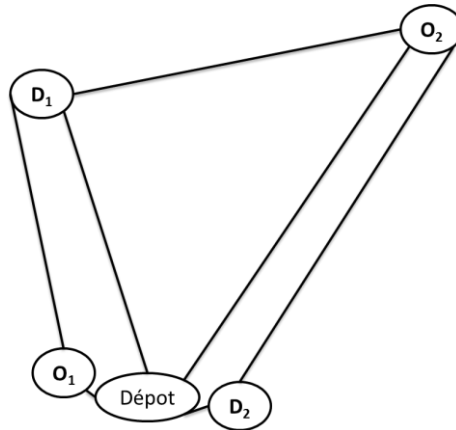


Figure 24 : Exemple de problème à deux demandes
avec $\alpha \approx \beta$.

Il est intéressant de noter que si la réduction marginale de coût liée à la combinaison des demandes est calculée, on obtient :

$$\Delta C = \frac{2 * (\alpha + \beta) - 2 * (\alpha + \frac{\beta}{2} + \delta)}{2 * (\alpha + \beta)}$$

Donc,

$$\Delta C = \frac{(\frac{\beta}{2} - \delta)}{(\alpha + \beta)}$$

α a donc disparu du numérateur, dès lors si on compare les deux types de scénarios on voit que dans le scénario où $\alpha \ll \beta$ mène à une variation marginale de coût supérieure au cas où $\alpha \approx \beta$.

D'autre part, on constate que cette même sensibilité est généralement plus faible lorsque l'on considère des scénarios de plus grande taille. Ceci était aussi attendu. Comme expliqué plus tôt, supposons que le nombre de demandes dé-

passe de loin le nombre de camions à disposition du transporteur. Dès lors, des valeurs extrêmes de γ , même si elles correspondent à des stratégies différentes, reviennent globalement à des comportements semblables. En effet, considérons un transporteur disposant de n camions et confronté à m demandes avec $m \gg n$. Si le transporteur applique l'heuristique d'insertion présentée dans ces travaux avec $\gamma = 0$, il utilisera un camion différent pour les n premières demandes. Il sera, ensuite, obligé d'intégrer les demandes suivantes dans des tournées existantes, ce qui revient à utiliser $\gamma = 1$, à partir de la demande $n+1$. En conclusion, à partir du moment où le transporteur n'aura plus de camion vide à disposition, il agira de la même façon quelle que soit la valeur de γ .

Dans le cas pratique qui nous occupe, l'exposant utilisé dans le modèle gravitaire a été fixé à $z=2$ et le nombre moyen de demandes que traitent les transporteurs est de l'ordre de 250. On en conclut donc que la valeur optimale de γ , dans ce cas spécifique, est de 1 ou proche de 1. On note que l'amélioration de la qualité des tournées pour cette valeur est de l'ordre de 20% par rapport aux valeurs de γ inférieures à 0,9.

Comme mentionné plus tôt, l'heuristique d'insertion présentée jusqu'ici est combinée par les transporteurs avec une heuristique de mélange. C'est cette heuristique que les prochaines lignes vont décrire. Cette heuristique permet aux transporteurs d'améliorer leur efficacité globale en retirant et en réinsérant certains points des tournées existantes. Deux éventualités sont possibles et le choix est arbitraire lors du lancement de l'heuristique. D'une part, un couple origine-destination peut-être enlevé de l'une des tournées existantes et réinséré comme s'il provenait d'une nouvelle demande. Dans ce cas, l'heuristique classique d'insertion présentée plus tôt est utilisée. Cette possibilité permet non seulement d'améliorer les tournées du transporteur au niveau routing mais aussi au niveau clustering car un couple origine-destination peut-être enlevé d'une tournée pour être réinséré dans une autre. La seconde possibilité est la suivante : un seul des sommets origine-destination peut-être enlevé d'une tournée et réinsé-

ré. Dans ce cas, il ne peut bien sûr être réinséré que dans la même tournée. S'il représentait l'origine d'un transport, il sera réinséré à la meilleure position possible avant la destination correspondante en ne violant pas de contraintes. Et à l'inverse, si ce sommet représentait une destination, il sera réinséré à la meilleure position possible après l'origine associée en ne violant pas de contraintes.

La méthode est présentée en détails dans les lignes suivantes :

1. *Pour chaque tournée existante, poser $\beta=0$;*
 - a. *Copier la tournée et appliquer l'algorithme d'insertion,*
 - b. *Si l'insertion n'a pas pu être faite,*
 - i. *Si $\beta=0$, appliquer l'algorithme de mélange, poser $\beta=1$ et aller à l'étape a ;*
 - ii. *Si $\beta=1$, ne pas insérer dans cette tournée ;*
2. *Ne conserver que la copie minimisant le coût additionnel δ_c lié à l'insertion ;*
3. *Si tous les camions sont déjà affectés à une tournée, remplacer la tournée originale par sa copie et stopper l'algorithme. Sinon, créer une tournée ne remplissant que le contrat traité dont le coût sera noté C_s ;*
4. *Si $\delta_c > \gamma * C_s$ ou si la liste des tournées du transporteur est vide, attribuer à un camion libre la tournée ne remplissant que le contrat. Sinon, remplacer la tournée originale par sa copie ;*

Le détail des composants de cet algorithme insert&shake est proposé en annexe 2 sous forme de pseudocode. Tandis que son intégration dans le modèle est présentée dans la figure 25.

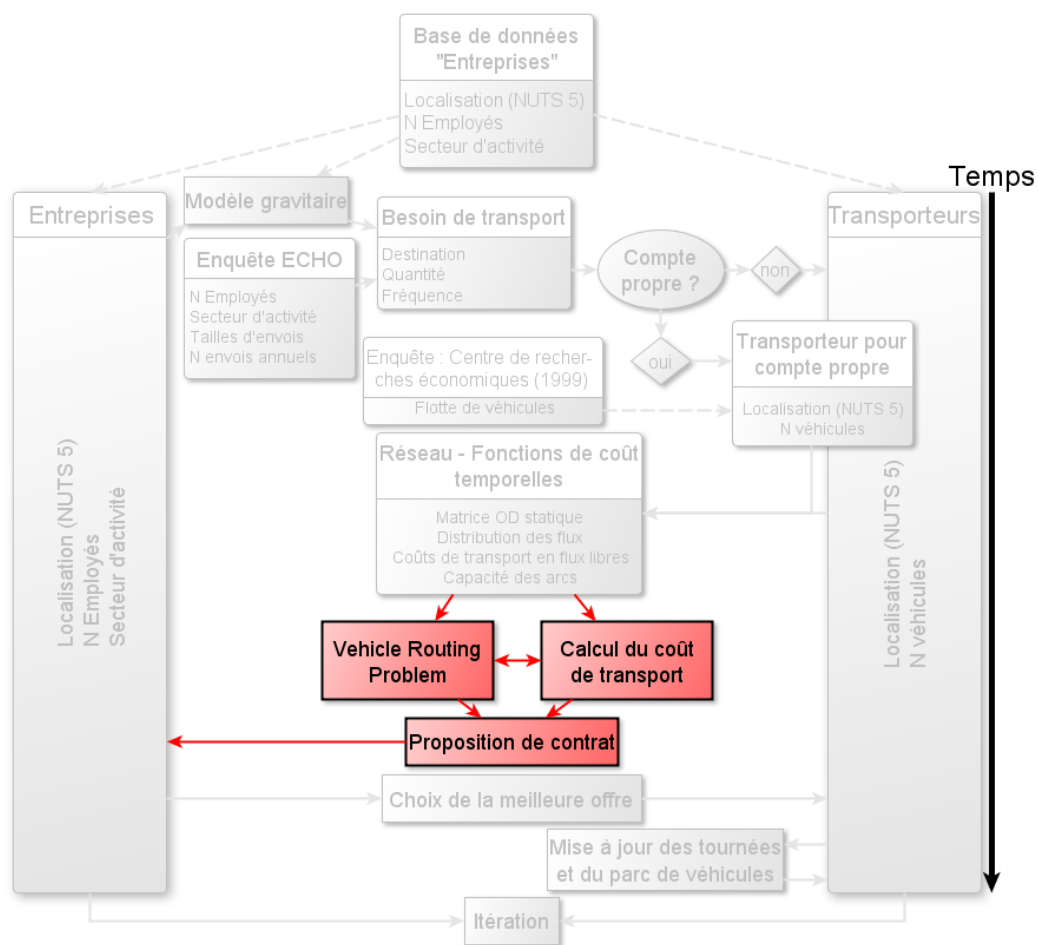


Figure 25 : Intégration du module de planification des tournées des transporteurs dans la simulation

III.4. Conclusion

On est à présent en mesure de dresser un bilan du modèle de génération de la demande de transport. Cette section reprend les principales hypothèses, fonctionnalités et limitations de la simulation d'abord au niveau méthodologique et ensuite dans son application au scénario Wallon présenté dans cette recherche. Tout d'abord, les acteurs du transport considéré dans le modèle sont des entreprises et des sociétés de transport. Celles-ci sont supposées en interaction directe et aucun acteur intermédiaire n'est pris en compte par la simulation. L'échantillon d'acteurs considérés est représenté par des agents. Ces agents sont ensuite mis en relation les uns avec les autres, et la demande de transport est

dérivée des interactions entre demande de service de transport (entreprises) et offre du service de transport (sociétés de transport). En ce qui concerne la demande de service de transport, les entreprises effectuent des demandes caractérisées par une origine située à l'entreprise demandeuse, une destination générée grâce à un modèle gravitaire, ainsi qu'une quantité et une fréquence. En ce qui concerne l'offre de service de transport, deux sources d'offre de service ont été prises en compte. D'une part, les sociétés de transport privées qui proposent leur service pour autrui et, d'autre part, les sociétés de transport pour compte propre. Ces transporteurs disposent d'une flotte de véhicule hétérogène.

Chaque transporteur pour compte propre n'est capable de communiquer et de fournir un service qu'à l'entreprise à laquelle il est associé puisqu'il représente un service interne à cette entreprise. Celle-ci utilisera aussi ses camions en priorité. Notons que dans le modèle développé ici, les transporteurs ne communiquent pas entre eux. On ne peut donc voir apparaître de phénomène de sous-traitance pourtant existant dans le monde réel. Une simulation dans laquelle apparaîtraient des phénomènes de sous-traitance bien qu'envisageable en terme de construction requerrait des temps de calculs trop importants.

Lors de la réception d'une demande, chaque transporteur se voit confronté à un problème d'insertion de cette demande dans une ou plusieurs tournées. Le problème de tournée abordé dans ce travail est, à notre connaissance, l'un des plus complets et réalistes qui aient été abordés dans la littérature en termes de contraintes compte tenu de la taille du problème. Il combine les *Dial-a-Ride Problem*, *Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem*, *Time-Dependent Vehicle Routing Problem*, *Dynamic Vehicle Routing Problem*, *Capacitated Vehicle Routing Problem*, et *Duration Constrained Vehicle Routing Problem*. Le coût de transport étant dépendant du moment de la journée, des fonctions de coûts temporelles ont été utilisées. Des fonctions temporelles ont été choisies à l'instar de fonction réellement dynamique pour différentes raisons. La principale étant de faire des économies en temps de calcul, mais aussi car le modèle est essentiellement des-

tiné à des applications interurbaines. Les fonctions utilisées n'assurent pas la condition *First-In-First-Out*. Cela signifie qu'un paradoxe gênant pourrait apparaître lors de l'utilisation de cette simulation, à savoir qu'un transporteur démarrant d'un endroit à une heure spécifique pour une destination spécifique arrive plus tard qu'un autre transporteur parti lui aussi de la même origine pour la même destination mais plus tard.

Finalement, une matrice origine-destination temporelle est générée suite à ce processus. Celle-ci a plusieurs particularités intéressantes en plus de son aspect temporel. Tout d'abord, elle est bien dérivée des besoins de transport. Ensuite, elle tient compte des planifications de tournées des transporteurs. Finalement, elle contient les transports à vide.

Une première application du modèle a été faite sur un scénario fictif de très petite taille dans lequel 5 entreprises effectuent 1 ou 2 demandes à 2 transporteurs entre 6h et 8h du matin. L'une d'elles possède un service de transport pour compte propre qui sera donc exclusivement utilisé tant qu'il disposera de camions. Ce scénario a pour objectif d'examiner la validation informatique et conceptuelle du modèle. Le bilan des interactions inter-agents est rapporté en table 9. Les prix proposés par les transporteurs sont proportionnels au temps de parcours associés au coût d'insertion de la demande dans les tournées. On peut y vérifier que les entreprises sélectionnent effectivement systématiquement l'offre de transport la moins chère qui, dans ce scénario test, est toujours proposée par le transporteur TCA-1. On constate aussi que ce transporteur tente systématiquement d'insérer les demandes concernant des petits tonnages et il ne crée de nouvelle tournée que lorsque le tonnage de la demande est proche de la capacité de ses camions (26T).

Début simulation...

Entreprise E-1 demande de transporter 0.286 T à la minute 366 pour la paire (o,d)=(4219,1350).
 Transporteur TCA-1 reçoit demande Entreprise E-1 => proposition (création tournée temporaire)
 Transporteur TCA-2 reçoit demande Entreprise E-1 => proposition (création tournée temporaire)
 Entreprise E-1 reçoit proposition de TCA-1, prix : 738.0
 Entreprise E-1 reçoit proposition de TCA-2, prix : 1329.0
 Entreprise E-1 choisi offre de TCA-1, prix : 738.0
 Transporteur TCA-1 contrat validé par Entreprise E-1 => sauvegarde des modifications de tournées

Entreprise E-2 demande de transporter 8.484 T à la minute 367 pour la paire (o,d)=(5000,6820).
 Transporteur TCA-1 reçoit demande Entreprise E-2 => proposition (insertion temporaire dans tournée)
 Transporteur TCA-2 reçoit demande Entreprise E-2 => proposition (création tournée temporaire)
 Entreprise E-2 reçoit proposition de TCA-1, prix : 984.3
 Entreprise E-2 reçoit proposition de TCA-2, prix : 1854.0
 Entreprise E-2 choisi offre de TCA-1, prix : 984.3
 Transporteur TCA-1 contrat validé par Entreprise E-2 => sauvegarde des modifications de tournées

Entreprise E-3 demande de transporter 0.023 T à la minute 372 pour la paire (o,d)=(1420,1470).
 Transporteur TCA-1 reçoit demande Entreprise E-3 => proposition (insertion temporaire dans tournée)
 Transporteur TCA-2 reçoit demande Entreprise E-3 => proposition (création tournée temporaire)
 Entreprise E-3 reçoit proposition de TCA-1, prix : 208.1
 Entreprise E-3 reçoit proposition de TCA-2, prix : 871.0
 Entreprise E-3 choisi offre de TCA-1, prix : 208.1
 Transporteur TCA-1 contrat validé par Entreprise E-3 => sauvegarde des modifications de tournées

Entreprise E-4 demande de transporter 26.0 T à la minute 406 pour la paire (o,d)=(6000,6110).
 Transporteur TCA-1 reçoit demande Entreprise E-4 => proposition (création tournée temporaire)
 Transporteur TCA-2 reçoit demande Entreprise E-4 => proposition (création tournée temporaire)
 Entreprise E-4 reçoit proposition de TCA-1, prix : 65.0
 Entreprise E-4 reçoit proposition de TCA-2, prix : 811.0
 Entreprise E-4 choisi offre de TCA-1, prix : 65.0
 Transporteur TCA-1 contrat validé par Entreprise E-4 => sauvegarde des modifications de tournées

Entreprise E-5 demande de transporter 23.217 T à la minute 453 pour la paire (o,d)=(4650,4360).
 Transporteur TCP reçoit demande Entreprise E-5 => proposition (création tournée temporaire)
 Entreprise E-5 reçoit proposition de TCP, prix : 0.0
 Entreprise E-5 choisi offre de TCP, prix : 0.0
 Transporteur TCP contrat validé par Entreprise E-5 => sauvegarde des modifications de tournées

Entreprise E-1 demande de transporter 24.803 T à la minute 464 pour la paire (o,d)=(4219,1350).
 Transporteur TCA-1 reçoit demande Entreprise E-1 => proposition (création tournée temporaire)
 Transporteur TCA-2 reçoit demande Entreprise E-1 => proposition (création tournée temporaire)
 Entreprise E-1 reçoit proposition de TCA-1, prix : 596.8
 Entreprise E-1 reçoit proposition de TCA-2, prix : 1341.0
 Entreprise E-1 choisi offre de TCA-1, prix : 596.8
 Transporteur TCA-1 contrat validé par Entreprise E-1 => sauvegarde des modifications de tournées

Entreprise E-5 demande de transporter 0.026 T à la minute 473 pour la paire (o,d)=(4650,4367).
 Transporteur TCP reçoit demande Entreprise E-5 => proposition (insertion temporaire dans tournée)
 Entreprise E-5 reçoit proposition de TCP, prix : 0.0
 Entreprise E-5 choisi offre de TCP, prix : 0.0
 Transporteur TCP contrat validé par Entreprise E-5 => sauvegarde des modifications de tournées

Entreprise E-3 demande de transporter 0.074 T à la minute 475 pour la paire (o,d)=(1420,1380).
 Transporteur TCA-1 reçoit demande Entreprise E-3 => proposition (insertion temporaire dans tournée)
 Transporteur TCA-2 reçoit demande Entreprise E-3 => proposition (création tournée temporaire)
 Entreprise E-3 reçoit proposition de TCA-1, prix : 322.3
 Entreprise E-3 reçoit proposition de TCA-2, prix : 773.0
 Entreprise E-3 choisi offre de TCA-1, prix : 322.3
 Transporteur TCA-1 contrat validé par Entreprise E-3 => sauvegarde des modifications de tournées

Fin des processus de négociation, finalisation de la matrice OD en cours...

Table 9 : Compte rendu des actions effectuées par les agents du modèle dans un scénario de petite taille.

Cet algorithme a ensuite été appliqué à un scénario de taille réelle. A savoir, le scénario Wallon dans lequel tous les agents ont été générés à l'aide de la base de données « *Entreprises* ». Un premier filtrage a eu lieu quant aux membres représentés dans l'échantillon d'entreprises. Ce filtrage a essentiellement retiré de l'échantillon les entreprises dont le secteur d'activité principal correspond à un secteur NACE qui ne peut être considéré comme source pertinente de transport de marchandises. Les tailles et fréquences d'envois de ces entreprises ont été générées à l'aide de l'enquête ECHO.

Les flottes des transporteurs ont été générées sur base de données de la *Fédération belge de l'Industrie de l'Automobile et du Cycle* (2011). Un nombre de transporteur pour compte propre a été généré et calibré de manière à ce que quelque 27% de marchandises soient transportés par ce type de transporteur, en accord avec les données d'*Eurostat*, et ces transporteurs sont associés avec les entreprises employant le plus de personnel dans l'échantillon considéré. Devant le manque de données pouvant attester d'une différence de flotte de véhicules entre transporteurs pour compte propre et transporteurs privés, ils se voient attribuer une flotte sur base des mêmes statistiques.

Les résultats du processus de calibration qui concerne les entreprises disposant d'un service de transport pour compte propre figurent en tableau 10. Celui-ci contient différentes valeurs résultant du scénario d'une journée de transport sur le réseau routier Wallon, au cours de laquelle 95867 demandes de transport ont été émises. On voit que la valeur de k qui mène au résultat le plus proche de la réalité observée en termes de proportion de quantités transportées pour compte propre est $k=0,4$. Cela signifie que, dans le cas d'application, 40% des entreprises se voient attribuer un service de transport pour compte propre.

Dans ce même tableau on constate logiquement que la proportion de quantités transportées pour compte propre augmente avec la proportion d'entreprises disposant de leur propre service de transport. On remarque aussi que la variation

de la proportion de quantité transportée pour compte propre est relativement faible autour de $k=0,4$. En effet, d'après Eurostat, cette proportion a été comprise entre 25% et 31% entre 2002 et 2011. Dès lors les valeurs de $k=0,3$ et $k=0,5$ pourraient aussi représenter des scénarios réalistes en termes de quantités transportées pour compte propre. Sur base de ces résultats, il est, par ailleurs, possible de déduire la valeur que doit prendre le paramètre k pour qu'une proportion définie marchandises soit transportée pour compte propre. Cette déduction se fait en utilisant la figure 26 qui met en graphique les valeurs de k ayant mené aux différentes proportions de marchandises transportées pour compte propre.

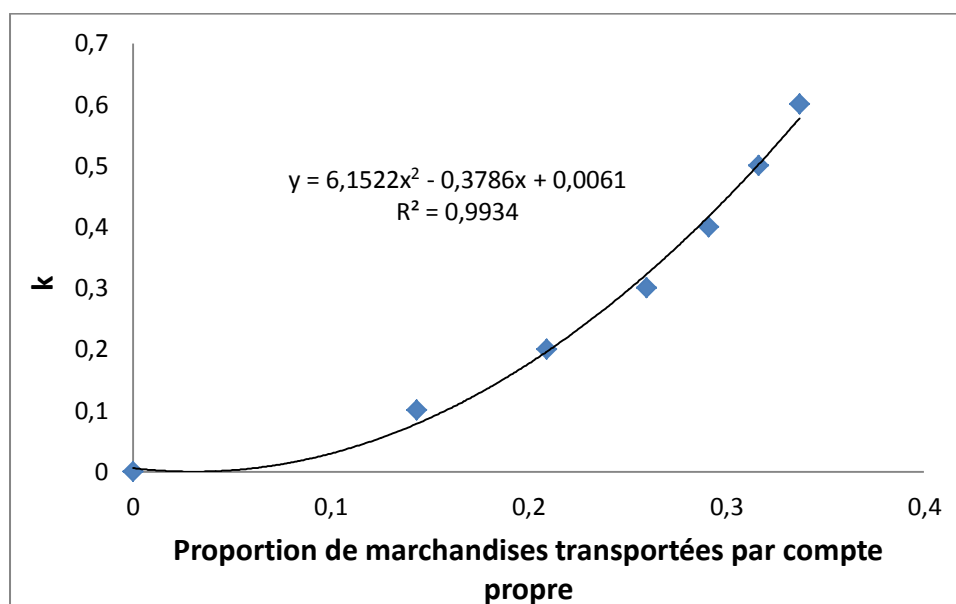


Figure 26 : Fonction représentant les valeurs de k ayant mené aux différentes proportions de marchandises transportées pour compte propre.

La quantité transportée par camion par jour se voit aussi logiquement réduite lorsque le nombre d'entreprises disposant d'un service de transport augmente. Ce phénomène est naturel puisque le nombre total de camion augmente. Dès lors si une quantité comparable est transportée dans différents scénarios par un

plus nombre de camions de plus en plus grand, ceux-ci sont de moins en moins chargés.

On observe aussi une augmentation de la distance totale parcourue avec la proportion d'entreprises transportant elles-mêmes leurs marchandises. Ceci est dû au fait que les agents TCP ont tendance à construire des tournées de moindre qualité que les agents TCA. En effet, les agents TCA reçoivent un nombre de demande supérieur aux TCP car ceux-ci sont ouverts à toutes les entreprises. Ce plus grand nombre de demandes reçues par les TCA est donc à l'origine d'un plus grand nombre d'alternatives de tournées possibles pour ces derniers. En outre, un filtre naturel se crée : lorsque les TCA proposent un prix, seul le moins cher - et donc celui qui a pu procéder à l'insertion la moins coûteuse - est sélectionné par l'entreprise demandeuse. Globalement les tournées ont donc tendance à être de meilleure qualité pour les TCA que pour les TCP qui, quelle que soit la qualité de leur tournée, ont moins de possibilités d'améliorations puisqu'ils font face à moins de demandes.

L'importance de cet impact du transport pour compte propre sur la qualité des tournées générées, à travers la distance totale parcourue par les camions, se doit d'être soulignée. Si on considère un scénario sans transport pour compte propre, $4,4 \cdot 10^5$ T de marchandises sont transportées, la distance totale parcourue est de $3,76 \cdot 10^6$ km pour un nombre de tonnes*kilomètres de $3,9 \cdot 10^7$. Alors que si 60% des entreprises utilisent leur propre service de transport sous les hypothèses du modèle, $4,8 \cdot 10^5$ T sont transportées mais cette fois, pour une distance totale parcourue de $7,96 \cdot 10^6$ km et un nombre de tonnes*kilomètres de $4,09 \cdot 10^7$. Soit pour une augmentation des quantités transportées de l'ordre de 10%, la distance totale parcourue par les camions est doublée tandis que le nombre de tonnes*kilomètres reste à peu près stable avec une variation maximale de l'ordre de 10% sur l'ensemble des scénarios testés.

k	N# lignes OD	Quantité totale [T]	Quantité CP [T]	Quantité CP [%]	Distance totale [km]	TKm totaux	Quantité [T]/ (camion*jour)	Taux de charge- ment [%]
0	65901	444853	0	0	3765359	3,97E+07	53,05	41,64
0,1	86208	465307	66781	14,35	5403321	4,10E+07	27,24	39,29
0,2	96102	471418	98696	20,93	6247402	4,13E+07	17,52	38,34
0,3	103813	474196	123124	25,96	6894524	4,11E+07	13,55	37,38
0,4	107959	477105	138886	29,11	7223342	4,16E+07	10,95	37,82
0,5	112382	478801	151539	31,64	7686690	4,09E+07	9,31	36,60
0,6	115612	480787	162026	33,70	7964310	4,09E+07	7,98	36,48

Tableau 10 : Compte rendu des résultats de la simulation
pour différentes valeurs de k.

Il est notable que si le modèle n'assure pas la propriété FIFO, de par le caractère interurbain du cas d'application, la congestion observée varie suffisamment lentement que pour que la condition *First-In-First-Out* soit tout de même vérifiée dans celui-ci. On peut raisonnablement s'attendre à ce que ce soit le cas dans la plupart des cas d'application interurbains où en tous cas dans les scénarios où la congestion ne varie pas trop.

En ce qui concerne l'implémentation technique du modèle, historiquement, les premières versions ont vu le jour sous la plateforme *JADE* (Java Agent DEvelopment Framework). Ce choix a été posé en début de projet, à la suite d'une analyse des différentes plateformes existantes. Celles-ci ont été comparées sur base de critères comme la documentation disponible, la popularité, le caractère Open-Source, les normes de qualité,... Parmi ces normes de qualité, on peut souligner que la *FIPA* (*Fondation for Intelligent Physical Agents*, 2012), associée à IEEE Computer Society propose une série de caractéristiques requises au niveau des objets pour que ceux-ci puissent être considérés comme des agents. Les plateformes reprises par la *FIPA* assurent aussi l'interopérabilité des systèmes. Parmi les alternatives considérées à l'époque, les plus répandues étaient *Agent Development Kit* (2008), *Grasshopper* (Baümer et Magedanz, 1999), *JADE* (Bellifemine,

et al., 2007), *MATSim* (*MATSim development team*, 2007) et *ZEUS* (*Hyacinth*, et al., 1999). Sur base de ces différents critères, JADE ou MATSim étaient les plateformes les plus appropriées. Le choix s'est finalement posé sur JADE, car la communauté d'utilisateur était plus large et plus active.

JADE est une plateforme Open-Source développée en JAVA et dédiée à l'implémentation de systèmes multi-agents. Distribuée par Telecom Italia, elle permet, entre autres, la parallélisation des algorithmes sur plusieurs machines, voire même sur des appareils mobiles. Les applications tests du modèle de génération, simulation le comportement d'un petit nombre d'acteur visaient à lui apporter une validation conceptuelle. Ces essais ont donc été réalisés sur base de la plateforme *JADE* et les premiers résultats ont été encourageants. Cependant, lors du passage de scénarios de petite taille à des scénarios de tailles réelles, des gros problèmes de temps de calculs ont fait leur apparition. Ils ont trouvé leur origine, non seulement à des niveaux prévus plus tôt, comme lors des constructions de tournées mais aussi lors de l'utilisation de fonctions spécifiques à la plateforme. Profitant de la nature « open source » de *JADE*, certaines des fonctions ont, dans un premier temps, été reprogrammées pour avoir plus de contrôle sur leur consommation en temps de calcul. Néanmoins, une autre source de perte de temps résidait dans le fait que chaque agent était matérialisé par un thread. (morceau de programme s'exécutant de manière autonome). Ces threads sont utiles dans un processus informatique qui peut être décomposé en tâches indépendantes qui s'exécutent de manière parallèle. Cette technique peut s'avérer particulièrement efficace lorsqu'elle est implémentée sur une ordinateur qui dispose de plusieurs processeurs (ou cœurs), car chaque thread peut être affecté à un processeur. Ainsi, dans le cas qui nous occupe, chaque agent était donc représenté par un thread. Dès lors, devant le nombre important d'agents à simuler (plusieurs milliers), la machine faisant tourner le modèle passait finalement plus de temps à passer de thread en thread (d'agent en agent) à chercher lequel n'est

pas en attente plutôt qu'à réellement faire fonctionner les threads (agents) qui doivent effectuer un calcul, une demande, etc.

Le modèle présenté dans cette thèse a donc été re-programmé en JAVA (JDK 1.6). Il n'a toutefois pas été parallélisé pour éviter le problème de switch entre plusieurs milliers de threads. Il est probable qu'il aurait été possible de le paralléliser, par exemple, au niveau de l'algorithme de planification des tournées, ce qui pourrait potentiellement améliorer les temps de calculs.

Pour le scénario d'application, le modèle aura finalement été appliqué sur un Intel® Pentium® D CPU 3.6Ghz disposant de 8Gb de mémoire RAM, un disque dur tournant à 7200 tpm. Le système d'exploitation est Windows XP SP1 en version 64bits. Sur cette machine, la génération de flux dynamiques pour le réseau routier Wallon prend environ 24h. En fonction des paramètres discutés plus tôt. A titre informatif, la matrice OD(t) générée en output de ce processus contient 107959 lignes. Ces temps de calculs pourraient déjà être nettement plus courts si un ordinateur plus récent était utilisé.

Le schéma final représentant la simulation visant à générer la demande de transport est dessiné en figure 27. La confrontation d'offre et de demande est représentée grâce aux couleurs bleue et rouge, tandis que les données utilisées pour le cas d'application sont en blanc.

IV. Affectation – Revue de littérature

Dans les sections précédentes, un modèle de génération de matrices origines-destination temporelles a été présenté. Celui-ci simule les comportements et interactions entre les acteurs du transport de marchandises afin de générer cette matrice origines-destinations. Comme mentionné plus tôt, si l'on veut situer cette simulation par rapport à d'autres modèles existants, elle est analogue aux trois premières étapes du très répandu modèle à quatre étapes (*Bates (2000); McNally (2000)*). Ainsi, comme *McNally (2000)* l'a suggéré, les trois premières étapes ont été condensées dans cette simulation visant à générer la demande de transport de marchandises sur le réseau routier Wallon et son évolution au cours d'une journée de travail. Dès lors la suite logique à cette simulation est l'utilisation d'un modèle d'affectation afin de représenter les flux de véhicules sur le réseau considéré. Cette section présentera tout d'abord différents modèles d'affectations statiques les plus utilisés. Une attention particulière sera ensuite donnée à des modèles plus raffinés d'affectations dynamiques et aux dernières avancées scientifiques sur le sujet.

L'objectif de base d'une méthode d'affectation est de déterminer les chemins que vont suivre les différentes quantités présentes dans la matrice origines-destinations affectée. Ces chemins peuvent dépendre d'une multitude de paramètres simples ou plus complexes. Dans une méthode basique, l'idée est donc de déterminer pour chaque paire origine-destination le chemin qu'emprunteront les marchandises en transit. Dans la première méthode présentée, chaque paire origine-destination se voit associée à un seul chemin sur lequel seront affectées toutes les marchandises correspondantes. Cette méthode a donc naturellement été appelée méthode *Tout-ou-Rien* (ToR). Les chemins sont déterminés en appliquant un algorithme de plus court chemin. Comme leur nom l'indique, ces algorithmes ont pour objectif de trouver pour chaque paire origine-destination le chemin le plus court qui sera supposé être le chemin employé par les utilisateurs

du réseau. Il existe différents algorithmes du genre. Mentionnons les algorithmes de *Bellman-Ford-Moore* (Bellman, 1958; Ford et Fulkerson, 1962; Moore, 1959), de *Johnson* (1973), de *Pape* (1974),... Une revue plus complète à leur sujet ainsi qu'une analyse sur leur efficacité peuvent être trouvée dans les travaux de *Jourquin* et *Limbourg* (2006) et *Zhan* et *Noon* (1998). Ces travaux justifient en outre notre choix qui se portera sur l'algorithme de *Dijkstra* (1959). En effet, s'ils concluent que l'algorithme de *Pape* est le plus efficace pour calculer les plus courts chemins entre toutes les paires origines-destinations possibles, ils soulignent que dans le cas où seul un échantillon réduit de destinations est à considérer pour chaque origine, l'utilisation de l'algorithme de *Dijkstra* (1959) se révèle alors plus pertinente. Justement, dans des problèmes réels, seul un petit nombre de destinations est généralement à considérer pour chaque origine de par la structure des flux de marchandises (ou même de passagers). En effet, pour chaque origine, ceux-ci sont généralement distribués sur un échantillon de destinations et non sur l'ensemble des destinations possibles.

L'algorithme ToR fait donc une série d'hypothèses simplificatrices très fortes rappelées, entre autres, dans les travaux de *Limbourg* (2007) ou encore de *Jourquin, et al.* (2006), à savoir :

- tous les transporteurs se rendant d'un point à un autre du réseau empruntent le même itinéraire et le même mode de transport,
- les arcs du réseau ont une capacité infinie et aucune congestion n'apparaît,
- l'affectation se fait à partir des centroïdes correspondant à la demande d'une zone. Chacun des transporteurs d'une zone précise sera supposé effectuer ses envois depuis la centroïde associée.

Ces hypothèses sont peu réalistes dans les cas réels. En effet, on sait que des utilisateurs du réseau de transport emprunteront des chemins différents pour un même transport entre deux points. Ces différences de décisions proviennent essentiellement des phénomènes négligés dans l'affectation ToR. Dans la réalité,

la perception des coûts de chaque arc des utilisateurs du réseau varie, ce qui mène à des choix de chemins (et parfois de mode) différents. De plus, les arcs du réseau ont une capacité limitée, ce qui peut induire des phénomènes de congestion et donc pousser les transporteurs à emprunter différents chemins. En outre, ces transporteurs ne se situent pas forcément tous près de la centroïde de la zone à laquelle ils appartiennent. Dès lors certains peuvent, par exemple, être situés à côté d'un dépôt ferroviaire tandis que d'autres pas (surtout si on considère des matrices très agrégées et donc que les zones sont assez étendues). Dans ce cas, le choix d'un mode de transport ou d'un autre sera clairement différent entre les transporteurs allant d'une même centroïde à une même autre.

Notons que dans le cas qui nous occupe, ces critiques peuvent être légèrement tempérées pour plusieurs raisons. Tout d'abord, nous ne nous concentrons que sur le transport routier, dès lors nous nous abstrayons des problèmes de diversification d'utilisation de mode de transport même si à l'intérieur de ce même mode, plusieurs chemins devraient être envisagés par les transporteurs. Ensuite, nous nous concentrons sur un modèle essentiellement interurbain. Dès lors la congestion devrait être relativement limitée, mis à part aux abords des grandes agglomérations lors des heures de pointes. Finalement, nous travaillons à une échelle d'agrégation très faible (NUTS 5). Dès lors l'écart à la réalité induit en supposant les transporteurs localisés sur la centroïde de la zone à laquelle ils appartiennent est relativement réduit.

Suite à ces défaillances du modèle d'affectation ToR, qui n'en reste pas moins une première approche intéressante, d'autres modèles ont été développés. *Ortúzar* et *Willumsen* (1990) proposent une classification de ses modèles, reprise par *Jourquin* et *Limbourg* (2006) et par *Limbourg* (2007). En fonction des subtilités dont tiennent comptes les méthodes d'affectation, elles seront généralement de différents types repris en tableau 11. Les subtilités principales ont été discutées dans le paragraphe précédent, il s'agit bien sûr de la contrainte de capacité ainsi que de la perception variable des coûts de transport sur le réseau pour dif-

férents utilisateurs. La méthode d'affectation ToR représentant la classe de modèle où aucun des deux phénomènes n'est tenu en compte alors qu'à l'autre extrême des modèles de type équilibre stochastiques ont pour vocation de tenir compte à la fois des contraintes de capacité et de perception variable des coûts des utilisateurs du réseau.

		Perception variable des coûts	
		Non	Oui
Contrainte de capacité	Non	Tout-ou-Rien	Stochastique
	Oui	Equilibre	Equilibre stochastique

Tableau 11 : Classification des modèles selon Limbourg (2007).

Si dans l'idéal, une méthode d'affectation devrait tenir compte des contraintes de capacité et des phénomènes stochastiques liés à la perception des coûts par les utilisateurs, l'application d'une méthode aussi complète est excessivement lourde. Les travaux dans le domaine n'ont été appliqués que sur de petits réseaux comportant, tout au plus, quelques dizaines d'arcs (Bergomi, 2009; Ceylan et Bell, 2005; Prashker et Bekhor, 2000; Rosa et Maher, 2002; Zhang, et al., 2011; Zhu, et al., 2012). Il n'est donc, à l'heure actuelle, pas envisageable d'appliquer une méthode d'affectation d'équilibre stochastique sur des réseaux complets à l'échelle à laquelle nous souhaitons travailler.

D'autres modèles d'affectations intermédiaires ont été développés durant ces dernières années. Tout d'abord, des modèles stochastiques imaginés pour tenir compte de la différence de perception des coûts entre les différents utilisateurs du réseau. Si de premier abord, ces méthodes semblent bien plus adaptées au transport de passagers qu'au transport de marchandises où des facteurs subjectifs devraient avoir moins leur place, Jourquin et Limbourg (2006) font remarquer que les méthodes d'affectations stochastiques peuvent tout à fait se justifier dans le cadre du transport de marchandises. En effet, « *la perception des coûts*

de transport peut être différente d'une entreprise à l'autre en fonction de leur localisation dans la région à laquelle elles appartiennent, même si celle-ci est peu étendue, ou encore en fonction de leur organisation ». L'idée de ces modèles se fait généralement en deux étapes. D'abord, la génération d'une série de chemins alternatifs et ensuite la répartition des flux sur ces différents chemins.

En ce qui concerne la génération de chemins différents, *Ben-Akiva* (1984) propose d'utiliser des chemins ayant différentes caractéristiques précises comme le chemin le plus court, le chemin le plus rapide, le chemin avec le plus d'autoroutes. Cependant, cette méthode requiert une importante quantité d'informations sur le réseau. Actuellement, *Martins*, et al. (2000) est à l'origine d'un algorithme de *k*-chemins des plus rapides, à notre connaissance. Celui-ci a été adapté par *Jourquin* et *Limbourg* (2007) et *Limbourg* (2007) pour être utilisé dans une méthode d'affectation multi-flux, elle-même appliquée sur un grand réseau transeuropéen multimodal. La génération des *k*-chemins se fait par une augmentation des coûts associés aux arcs utilisés de manière successive. A titre informatif, l'algorithme décrit par *Jourquin* et *Limbourg* (2007) et *Limbourg* (2007) est repris ici :

0. $n=0$;
1. Calcul du chemin le moins coûteux ; $n=n+1$;
2. Augmenter le coût de chaque arc appartenant aux chemins calculés précédemment (par exemple augmentation de 50%) ;
3. Itérer. Retour au point 1 tant que $n < k$;

Une fois ces chemins générés, il s'agit de répartir les flux sur ces derniers. Le modèle qui a été retenu est un modèle Logit Multinomial.

Pour rappel, ces modèles multi-flux ont vu le jour afin de tenir compte de la distribution des flux sur différents chemins ne s'expliquant pas par des problèmes de congestions mais plutôt par des phénomènes stochastiques liés aux préférences individuelles des utilisateurs du réseau. A l'inverse, des modèles tenant

en compte la capacité des arcs et de l'apparition de congestion sur le réseau ont fait leur apparition. Ces modèles dits *d'équilibre* se basent généralement sur les principes d'équilibre de *Wardrop* (1952):

A l'équilibre, le trafic sur le réseau est arrangé de telle manière qu'aucun utilisateur ne peut réduire ses coûts de transport en modifiant son trajet. Dès lors, à l'équilibre, tous les chemins choisis entre chaque paire origine-destination ont un coût égal entre eux et inférieur à tous les chemins non retenus.

Citons à titre informatif la *méthode des moyennes successives* (MSA : *Method of Successive Averages*) (*Smock*, 1962) dont le principe consiste à procéder à une série d'affectations ToR appliqué pour obtenir des flux auxiliaires sur base d'une mise à jour des coûts de transport par rapport à l'itération précédente (ces coûts étant initialisés aux coûts en flux libres) jusqu'à l'atteinte d'un critère d'arrêt, la méthode de *Frank-Wolfe* (*Frank et Wolfe*, 1956) qui est très similaire, et finalement, l'affectation incrémentale dont le principe consiste à affecter les uns après les autres différentes proportions de la matrice origines-destination considérée. Plus de détails quant à ses techniques peuvent être trouvés dans les travaux de *Jourquin et Limbourg* (2006).

Le lecteur désireux d'en savoir davantage sur les modèles d'affectations statiques trouvera des détails supplémentaires dans les travaux d'*Ortúzar et Willumsen* (1990) ou encore *Sheffi* (1984).

Les modèles d'affectation présentés jusqu'à présent sont des modèles d'affectation statiques. Ceux-ci peuvent sans peine être appliqués sur des réseaux de grande envergure (eg. réseau transeuropéen) de par leur complexité relativement faible induisant des temps de calculs acceptables même sur des réseaux étendus. Ils prennent généralement en input une matrice origines-destinations très agrégée, tant au niveau des régions représentées dans les matrices (agrégation au niveau NUTS-5 fréquente) que temporellement (eg. matrices

annuelles). Si ces modèles peuvent dans certains cas tenir compte de phénomènes de congestion globaux, il est tout à fait inenvisageable de prétendre observer l'apparition ou la dissipation de cette congestion ou encore l'évolution du trafic au long de la journée. De telles analyses requièrent l'utilisation de méthodes plus complexes que sont les modèles d'affectations dynamiques.

Une littérature relativement abondante est disponible sur ce vaste sujet que constituent les méthodes d'affectation dynamiques. Cependant, à l'heure actuelle, la complexité de ses algorithmes ne les rend utilisables que sur des réseaux d'une taille assez réduite. Ils sont d'ailleurs le plus souvent utilisés dans des cas intra-urbains. Généralement, le principe de base derrière l'affectation dynamique consiste à tenir à jour les fonctions de coûts associées à chaque arc tout au long de l'affectation. Plus précisément, lors du chargement de chaque véhicule sur un arc, la fonction de coût associée à l'utilisation de cet arc se voit augmenter sensiblement. Dès lors les plus courts chemins sont susceptibles de changer lors du traitement de chaque ligne de la matrice origines-destinations. On comprend donc assez rapidement qu'un re-calcul des chemins les plus courts à chaque itération de la méthode d'affectation est extrêmement coûteux en temps de calculs.

A titre informatif, mentionnons les travaux d'*Akamatsu* (2000) qui a proposé un modèle basé sur l'équilibre dynamique des utilisateurs (*DUE : Dynamic User Equilibrium*). Celui-ci analyse entre autres deux réseaux théoriques saturés représentant respectivement les heures de pointe du matin et du soir. Dans le premier, les utilisateurs veulent se rendre d'une série de nœuds différents vers un même nœud, et inversement, dans le second les utilisateurs du réseau veulent tous quitter le même nœud pour se rendre à des destinations diverses. Il met aussi le doigt sur un paradoxe qu'il discute dans ses travaux. Il remarque que lorsqu'on augmente la capacité de l'un des arcs du réseau, cela peut mener à une solution dont le coût global est supérieur au coût avant augmentation de la capacité. Il décrit ce paradoxe comme la version dynamique du paradoxe de *Braess* (*Mu-*

chland, 1970). Bellei, et al. (2005) proposent, quant à eux un modèle, lui aussi basé sur le *DUE*, mais en utilisant une *carte de chargement du réseau dynamique* associée à des *fonctions de performance des arcs* qui leur permettent de résoudre un problème de point fixe sans devoir itérer sur les habituelles affectations des flux suivies du re-calcul des coûts des arcs. Une étude permise par des modèles d'affectations dynamiques et le *DUE* a été d'analyser le déplacement des goulots d'étranglement apparaissant dans les embouteillages. Cette étude a été réalisée par Juran, et al. (2009) et appliquée sur un réseau représentant la région de Tel Aviv (environ 200 arcs). D'autres travaux basés sur le *DUE* ont été proposés entre autres par He, et al. (2010), Kamga, et al. (2011), Watling (2006),...

Des méthodes sensiblement différentes dans leur conception ont été proposées, comme celles basées sur l'optimale perçue dynamiquement par l'utilisateur (*DUO : Dynamic User Optimum*) comme les méthodes de Kuwahara et Akamatsu (2001) permettant d'analyser les files apparaissant dans les embouteillages à travers un petit réseau théorique ou encore le modèle *Cell-based* de Lo et Szeto (2002a) et (2002b) permettant d'observer formation et dissipation de queues et même du trafic en accordéon sur de petits réseaux (1 à 7 arcs seulement).

Finalement des méthodes plutôt basées sur de la simulation de trafic ont été proposées par Ben-Akiva, et al. (2012) avec *DynaMIT-P* qui modélise le choix du chemin, avec modélisation explicite des bandes de circulation afin de simuler l'évolution de files et possibilité de tenir compte des très petits arcs et de l'impact des piétons et des cyclistes. Cette méthode a été appliquée à un réseau intra-urbain de la région de Beijing. Friedrich, et al. (2000) proposent une méthode basée sur l'apprentissage des utilisateurs au fur et à mesure de leur utilisation du réseau. Cette méthode a, elle aussi été appliquée sur un réseau assez petit (24 arcs). Parmi ces méthodes de simulation, il existe différents modèles d'affectations basés sur le paradigme multi-agents. Ces modèles simulent généralement le comportement de chaque véhicule individuellement sur un réseau

de plus ou moins grande taille. Le modèle SPSS-DTA de *Park et Kim* (2001) permet, par exemple, de suivre l'évolution de véhicules sur différents tronçons routiers et d'observer des dépassements entre véhicules, leurs changements de bandes ou encore la formation de files lors de l'apparition de congestion.

S'il est vrai que les recherches en affectation dynamique ne sont généralement applicables que dans des scénarios de petite taille, les méthodes d'affectation multi-agents profitent de la parallélisation des algorithmes. En effet, chaque agent, considéré comme une entité individuelle, peut être simulé individuellement sur le réseau par un processeur. Dès lors l'ensemble des agents peut se voir simulé sur une multitude de processeurs, ce qui permet ainsi de gagner considérablement en temps de calcul. Des simulations de ce type ont pu voir le jour grâce, entre autres, au développement des processeurs et clusters de ces dernières décennies.

Dans cette optique, le modèle *TRANSIMS* proposé par *Nagel et Rickert* (2001) se constitue de 4 modules : génération de population, génération de plans d'activités, choix modal et de trajet, et micro-simulation de trafic. Cette simulation a d'ailleurs été utilisée dans différents cas d'applications. Par exemple, *Cetin, et al.* (2002) ou encore *Raney et Nagel* (2004) utilisent le modèle pour simuler le trafic routier sur le scénario Gotthard, scénario suisse dans lequel quelque 50000 véhicules démarrent d'endroits répartis sur tout le territoire suisse entre 6h et 7h du matin pour se rendre à Lugano, dans la partie Italophone au sud de la Suisse.

Ceci dit, la prise en compte des variations de flux sur le réseau requiert généralement un processus itératif dans la simulation. Par exemple, dans le modèle *TRANSIMS*, c'est une forme de modèle d'équilibre qui est utilisé. Initialement, la simulation va avoir lieu sous l'hypothèse de coûts de transport en flux libre sur le réseau. Ensuite, itérativement les coûts de transport sur chacun des arcs vont être recalculés et une partie des véhicules va avoir l'opportunité de modifier cer-

taines des décisions (e.g. heure de départ, chemin emprunté,...). Ce processus de feedback est discuté en détail dans les travaux de *Raney et Nagel* (2004) mentionnés plus tôt. Une autre méthode est cependant utilisée par *Zhu, et al.* (2007) dans le développement de leur modèle de choix de chemin basé sur les systèmes multi-agents. Dans celle-ci, les agents partagent des informations (e.g. temps de parcours,...) lorsqu'ils ont effectué un chemin. Ainsi, les agents choisissent leur trajet sur base des informations collectées depuis leur « réseau social ».

Les objectifs de ce type de méthodes sont multiples : tout d'abord la possibilité d'observer des phénomènes du trafic (e.g. dépassements, etc.) mais aussi la prise en compte de la congestion. Néanmoins, ces méthodes d'affectations sont généralement destinées à être utilisées pour le trafic de passagers.

Ces dernières remarques sont à l'origine du choix qui a été posé de développer ici une méthode intermédiaire entre les modèles d'affectations statiques et dynamiques et non une méthode multi-agents. En effet, d'une part, le modèle se veut être d'application dans des scénarios macroscopiques de transport routier de marchandises journaliers. Dès lors, s'il est facilement envisageable de modifier le planning d'une journée à un échantillon important de passagers, cela requiert une puissance de calcul nettement supérieure lorsqu'il s'agit de transport de marchandises. Cette remarque provient de différentes observations. Tout d'abord, un véhicule représenté par un agent dans le cadre du transport de passagers peut être considéré comme indépendant et autonome. Or, un véhicule transportant des marchandises ne l'est pas. En effet, si celui-ci venait à modifier sa tournée, ça aurait des implications sur une variété d'acteurs du transport, à savoir les entreprises demandeuses. En outre, l'indépendance des véhicules de transport de fret pose à nouveau problème dès lors qu'un véhicule pourrait se voir attribuer une livraison supplémentaire à la place d'un autre. Au-delà de ce problème d'indépendance des acteurs du transport, la chaîne d'activités d'un passager contient au plus une petite dizaine de sommets si on la voit comme une tournée. Or les tournées effectuées par les transporteurs peuvent contenir un

nombre bien plus important de sommets. Dès lors les temps de calculs requis pour effectuer des modifications dans ces tournées peuvent être bien plus importants si on veut tendre vers une optimisation des tournées.

Finalement, si le modèle présenté dans cette recherche doctorale se veut applicable dans des scénarios journaliers à caractère macroscopique, l'impact attendu de la congestion est assez réduit. Dès lors, l'un des intérêts fondamentaux d'une simulation multi-agents lors de l'affectation tombe à l'eau. L'objectif du modèle ici présenté n'est pas non plus de tenir compte des phénomènes du trafic aussi fins que les dépassements, etc.

Néanmoins, ces remarques doivent être prises en compte si ce modèle voulait être appliqué à des cas particuliers de réseau fortement congestionné. Des informations complémentaires sur le passage du statique au dynamique dans des méthodes d'affectations classiques ou multi-agents peuvent être trouvées dans les travaux de *Nagel* et *Flötteröd* (2009).

Il est notable qu'une littérature abondante existe aussi dans le domaine de la modélisation du comportement des utilisateurs du réseau sous influence d'information. Ceci dit, ce domaine s'éloigne passablement du sujet de cette recherche. Il n'est donc pas présenté dans ces travaux.

V. Affectation – Algorithme semi-dynamique

Comme présenté plus tôt, différents modèles d'affectations existent dans la littérature. Ceux-ci peuvent être distingués en différentes catégories parmi lesquelles on différenciera les modèles d'affectation statiques des modèles d'affectation dynamiques. Différents modèles de chaque type ont été présentés et tant leurs points forts que leurs limites ont été soulignés. Si les modèles statiques sont généralement rapides et peuvent être appliqués à de grands réseaux, ils ne permettent pas de voir les flux de véhicules évoluer sur le réseau étudié. A contrario, les modèles dynamiques plus gourmands en termes de temps de calculs permettent de voir et d'analyser l'évolution des flux de véhicules au fil du temps de manières plus ou moins fines en fonction des modèles. Cependant, ceux-ci ne peuvent être appliqués sur des réseaux de grande envergure. Ils sont généralement utilisés sur de très petits réseaux théoriques ou dans des cas de trafic intra-urbain où le nombre d'arc est relativement limité.

Dans ces travaux, un modèle d'affectation adapté est nécessaire afin d'être utilisé sur le réseau assez important, par exemple le réseau routier Wallon dans le cas d'application présenté dans ce travail. En outre, il serait intéressant d'observer l'évolution des flux de véhicules sur ce réseau au fil de la journée. L'utilisation de modèles d'affectations purement dynamiques serait, dès lors, trop lourde, tandis que les modèles d'affectation statiques, trop simples ne permettraient pas de voir évoluer les flux sur le réseau. Dès lors un type de modèle d'affectation à mi-chemin entre les deux a été imaginé. Le type de méthodes d'affectation présentées dans cette section a été appelé : méthodes d'affectation semi-dynamiques (ou encore méthodes d'affectation temporelles). Ces méthodes sont basées sur la méthode d'affectation ToR. Celles-ci peuvent être vues comme des extensions naturelles aux méthodes statiques présentées plus tôt.

Pour chacun des deux modèles d'affectations présentés dans ce travail, la première étape consiste à diviser l'espace temporel étudié en périodes. En

l'occurrence, des journées de travail commençant à 6h et finissant lorsque tous les camions sont rentrés à destination (généralement aux alentours de 23h) scindées en périodes d'1h ont été utilisées dans le cas d'application.

La première méthode qui a été développée est relativement simple. C'est l'extension naturelle de la méthode d'affectation Tout-ou-Rien puisque l'algorithme de Dijkstra est utilisé pour trouver les plus courts chemins entre chaque paire origine-destination de la matrice, indépendamment des heures de départs. Les coûts utilisés sont alors les coûts en flux libres. Une fois ces chemins trouvés, les différents arcs sont chargés pour chaque période en fonction des heures de départs aux origines. Nous avons appelé cet algorithme ToR-t, pour Tout-ou-Rien temporel. En voici une description synthétique des grandes étapes :

- 1. Calcul des plus courts chemins sur base des coûts de transport en flux libres grâce à l'algorithme de Dijkstra ;*
- 2. Pour chacune des périodes, pour chaque arc de chaque chemin correspondant à une ligne de la matrice $OD(t)$, incrémenter la charge sur l'arc si le véhicule le traverse pendant la période courante ;*

Un exemple d'affectation d'une matrice $OD(t)$ simple est donné en figure 28. Dans cet exemple, quelques tonnes de marchandises sont envoyées depuis quelques grandes villes entre 10h et 10h30 et en direction de Bruxelles. Un peu plus tard, vers 12h, on observe d'autres envois cette fois-ci en provenance de Bruxelles en direction d'Anvers, Bruges, Tournai et Neufchâteau. On peut y observer l'évolution des flux sur le réseau routier à travers les différentes périodes représentées. Dans cet exemple, ces périodes sont de 30minutes, comme indiqué en coin inférieur gauche du GIS.

Cet algorithme, premier prototype de modèle d'affectation semi-dynamique, est très simple de conception et d'utilisation. Cependant on s'attend à ce qu'il présente des faiblesses assez importantes. Le reproche majeur qu'on peut lui faire est d'utiliser des fonctions de coûts identiques pour chaque période étudiée. En

effet, l'intérêt d'un modèle « semi-dynamique » aux fonctions de coûts constantes dans le temps semble bien faible. Notons néanmoins que dans le cas de l'affectation d'une matrice sur un réseau faiblement congestionné comme c'est généralement le cas dans le cas d'études interurbaines, ce modèle peut s'avérer suffisant puisque les coûts de transport sur les arcs ne varieront pas ou trop peu. Cette première méthode ne semble applicable qu'aux réseaux peu congestionnés. Malgré cette grosse lacune, elle n'en reste pas moins une première ébauche en direction d'un second modèle plus raffiné, cette fois.

La seconde méthode semi-dynamique qui a été développée parcourt la matrice origines-destinations temporelle générée plus tôt et affecte période par période les flux de marchandises. Cette fois, les fonctions de coûts associées aux arcs peuvent être différentes pour chaque période. En outre, pour chaque période, la méthode affecte non seulement les flux mais retient aussi l'endroit où les différents véhicules se trouvent à la fin de celle-ci. Seule la portion de trajet effectuée dans la période i par les véhicules est donc affectée et chargée, tandis que la suite de leur trajet se faisant dans la période $i+1$ est effectivement affectée et chargée sur les arcs à cette période.

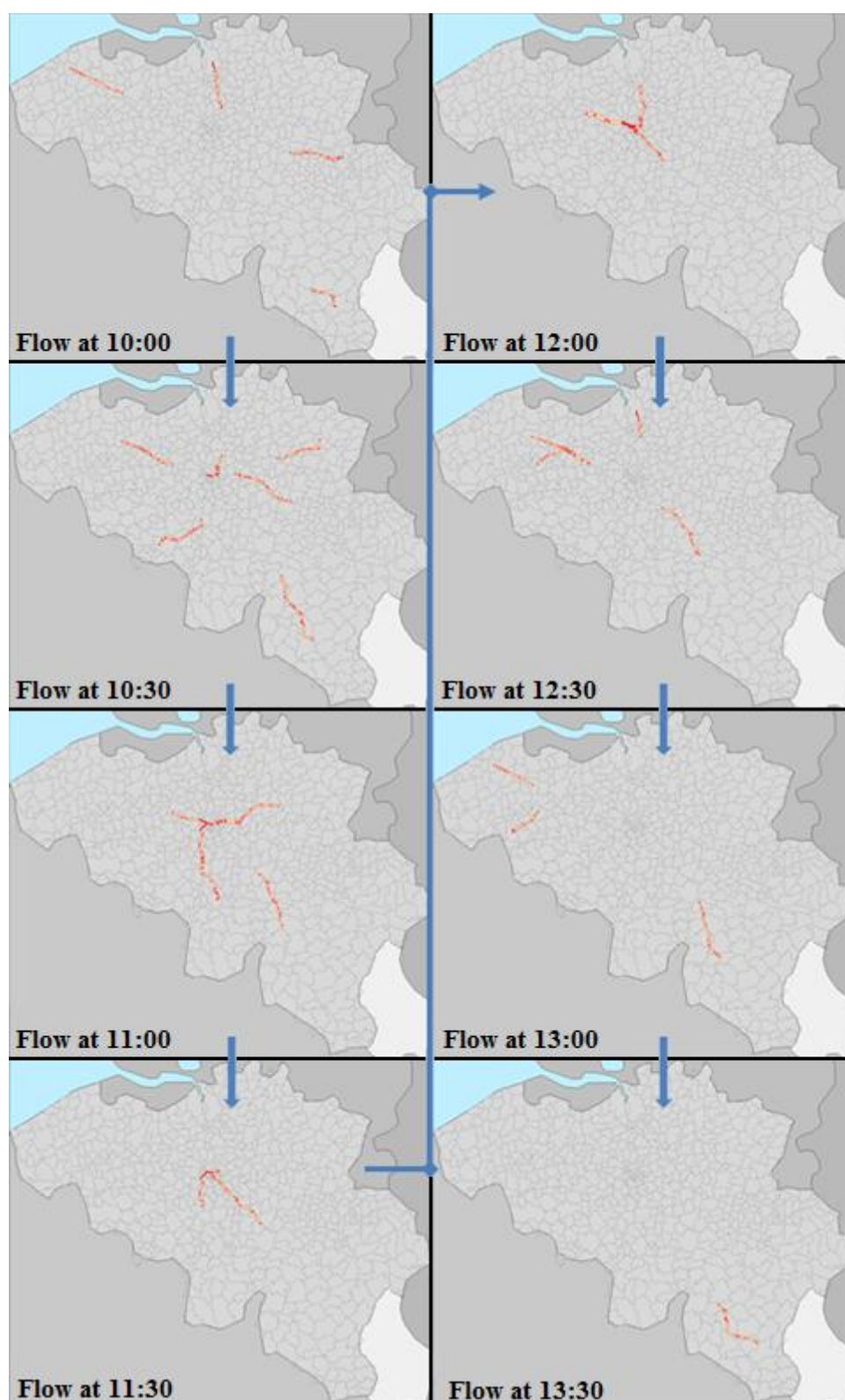


Figure 28 : Affection ToR-t, exemple

Plus précisément, la matrice origines-destinations temporelle est parcourue à chaque période et toutes les quantités démarrant durant la période considérée sont affectées sur le chemin le moins coûteux reliant l'origine à la destination. Dans les cas où le trajet est complètement accompli durant la période courante, les paires origines-destinations affectées sont retirées de la matrice. Dans le cas contraire, la méthode calcule où se situent les véhicules à la fin de la période. Pour chacun des véhicules encore en transit à la fin de la période, seuls les arcs parcourus durant la période considérée sont chargés. Tandis que la paire origine-destination est mise à jour de telle sorte de créer une nouvelle origine là où le véhicule se trouve en fin de période courante. L'heure de départ de cette origine coïncide avec le début de la nouvelle période et la destination est inchangée. Ainsi la suite du trajet est effectivement affectée et chargée dans la (voire les) prochaine(s) période(s). Les grandes étapes de cet algorithme sont donc :

Pour chaque période p ,

- 1. Calculer les plus courts chemins sur base des coûts de transport de la période courante à l'aide de l'algorithme de Dijkstra ;*
- 2. Pour chaque chemin correspondant à une ligne de la matrice $OD(t)$,*
 - a. Pour chaque arc, charger celui-ci si le véhicule le traverse durant la période courante ;*
 - b. Sauver la position de véhicule en fin de période. Si celui-ci n'est pas sur un nœud du réseau, créer un nœud temporaire O' . Remplacer la ligne $\{O, D, Q, t\}$ de la matrice par $\{O', D, Q, t_{p+1}\}$ où t_{p+1} est l'heure de fin de période ;*

Un petit exemple est donné en figure 29. On y trouve un petit réseau dont les coûts (en minutes) varient au fil des périodes. Chaque période fait 60 minutes et trois véhicules démarrent de la même origine lors des débuts des périodes 0, 1 et 2, en direction d'une même destination. Dans les trois cadres supérieurs, on observe l'évolution de la position des véhicules sur le réseau à chaque début de période (à gauche) ainsi que l'évolution des chemins les plus courts perçus par

les véhicules (à droite). On peut remarquer que les véhicules ne s'arrêtent pas forcément sur un nœud du réseau à la fin d'une période comme c'est le cas pour le premier véhicule (rouge) lors de la période $T=2$. A ce moment, la méthode d'affectation crée un nœud temporaire et calcule le plus court chemin entre celui-ci et la destination du véhicule. Notons aussi que si un algorithme ToR est utilisé pour calculer les chemins empruntés par les véhicules, ceux-ci empruntent tout de même des chemins différents de par la diversité de leur perception des coûts en fonction de leur heure de départ, comme le montre l'exemple précédent.

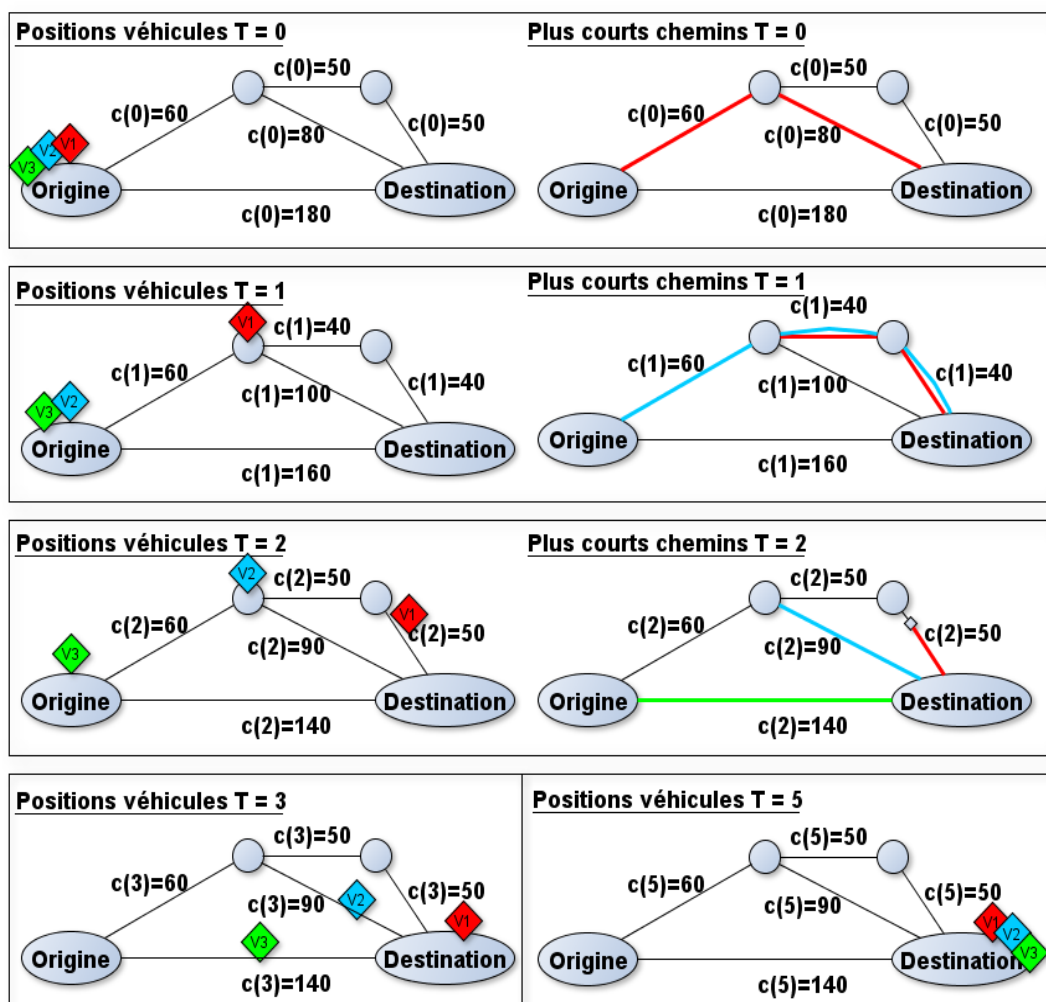


Figure 29 : Exemple d'évolution des positions de véhicules sur un réseau dont les coûts varient au fil des périodes

Ce modèle n'est plus sujet aux mêmes limitations que sa version statique. Si on peut lui reprocher de ne pas tenir compte de la perception variable des coûts de transport pour les différents utilisateurs du réseau, il permet tout de même d'observer une diversification de la perception des coûts de transport en fonction de l'heure de départ des véhicules, comme le montre l'exemple précédent. Cette remarque reste vraie même lorsqu'on compare des véhicules démarrant dans une même période. Cette méthode est donc un grand pas en avant depuis la simple méthode d'affectation ToR en direction des modèles d'affectation dynamiques et multi-flux. Cependant, une limitation est à noter : les coûts de transport sur les différents arcs ne sont pas dynamiquement remis à jour car, comme expliqué en début de section, un modèle dynamique au sens strict requerrait des temps de calculs trop importants. Néanmoins, cette limitation est, dans le cas pratique actuel, d'assez faible importance, d'une part parce que le domaine d'application du modèle développé concerne essentiellement le transport interurbain et d'autre part car la part du transport de marchandises, sur lequel se concentre le modèle, est généralement faible en comparaison du transport de passagers. Par exemple, en Belgique la part du transport de marchandises est en moyenne de l'ordre de 20%.

Notons finalement que s'il est possible d'afficher les résultats d'une affectation semi-dynamique période par période, il reste toujours possible de ré-agréger les flux sur les différents arcs et d'afficher le flux total sur chacun d'eux. Cette fonctionnalité trouvera son intérêt dans la comparaison des résultats produits par les travaux présentés dans cette thèse à ceux proposés dans différentes sources. Les figures 26 et 27 montrent les flux ré-agrégés obtenus respectivement suite à une affectation ToR et une affectation semi-dynamique à fonctions de coûts temporelles (SD-fct), tandis que les séries de figures 28 et 29 montrent l'évolution au cours du temps des flux affectés sur le réseau en utilisant, aussi, la méthode semi-dynamique à fonctions de coûts temporelles. Lorsqu'on compare les deux affectations en figures 26 et 27, l'utilisation du tronçon d'autoroute Mouscron-

Gand-Bruxelles dans la première figure et pas dans l'autre attire notre attention au premier coup d'œil. Cette différence est, d'une part, due au fait que d'après les données à notre disposition, il semble que ce tronçon soit surutilisé par les passagers, et d'autre part, due au fait que les marchandises transitant sur ce tronçon d'après l'affectation ToR-t y transitent à des heures de pointe. Plus précisément, dans la première des deux figures, les véhicules sont affectés sur le réseau pour emprunter le chemin de plus faible coût sur base des coûts en flux libre sur les arcs. Alors que dans la seconde, des fonctions de coûts temporelles sont utilisées. Or pour certains des arcs du tronçon concerné, ces fonctions de coûts explosent. Ceci est dû au fait que la quantité de passagers sur ces arcs estimée dans la matrice OD du projet LIMOBEL est supérieure à leur capacité. Dès lors, en tenant compte de ces variations de coûts, l'algorithme semi-dynamique à fonctions de coûts temporelles ne reprend, lui, pas ce tronçon comme chemin de plus faible coût pour rejoindre Mouscron (et les environs) et Bruxelles (et les environs).

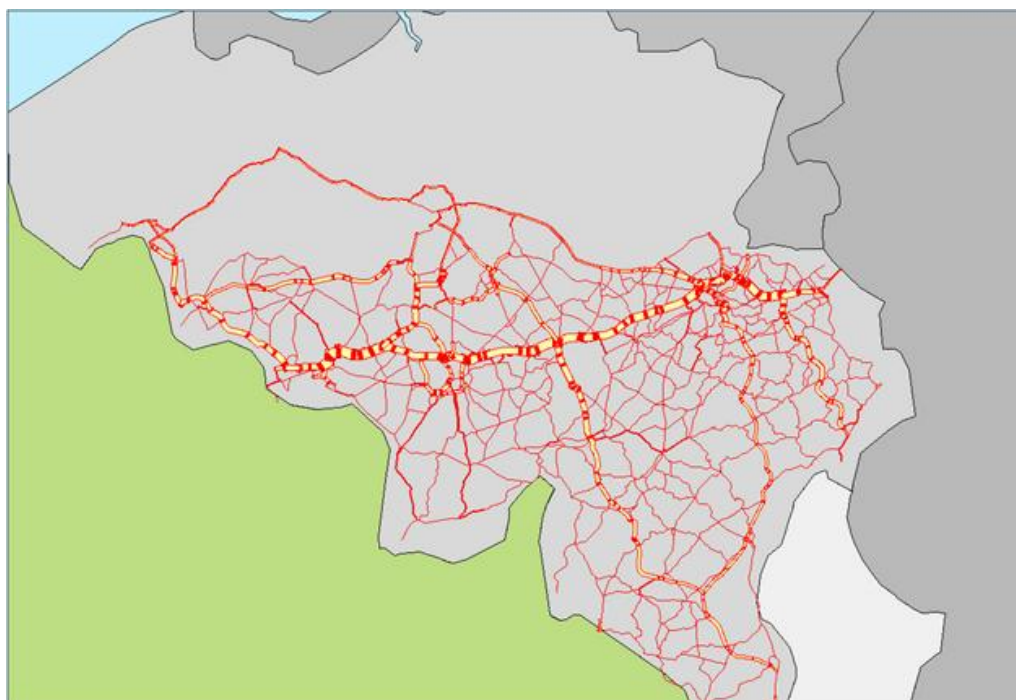


Figure 30 : Affectation ToR-t de la matrice OD(t)

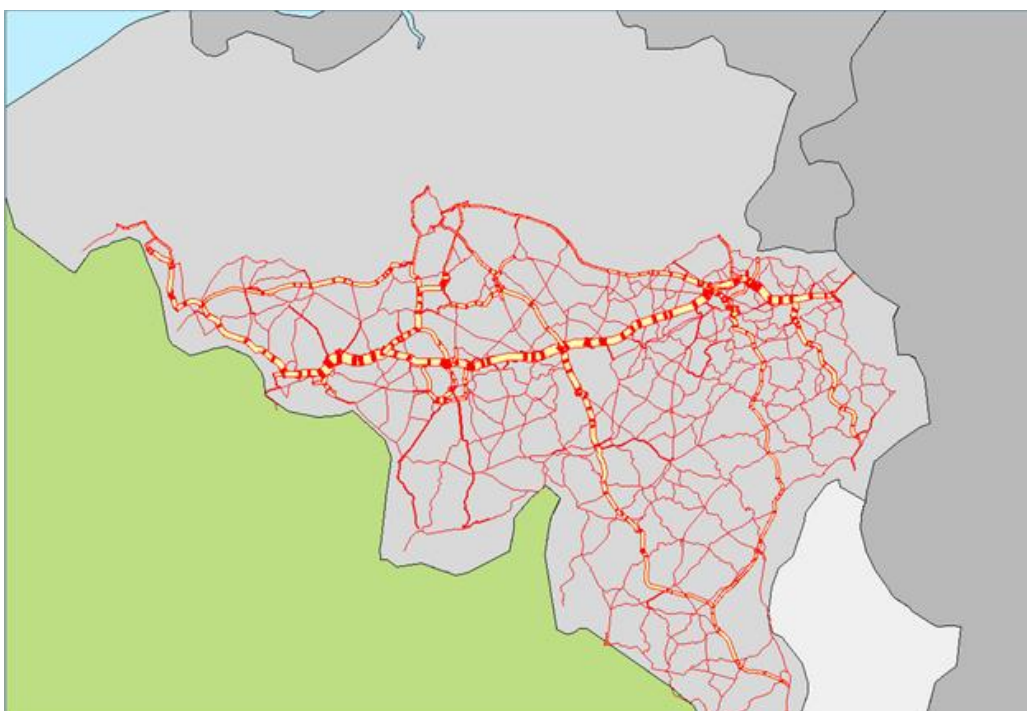


Figure 31 : Affectation SD-fct de la matrice OD(t)

Une analyse plus en détails des résultats de ces travaux est proposée dans la section suivante où nous allons exporter et confronter nos chiffres à ceux proposés dans d'autres études.

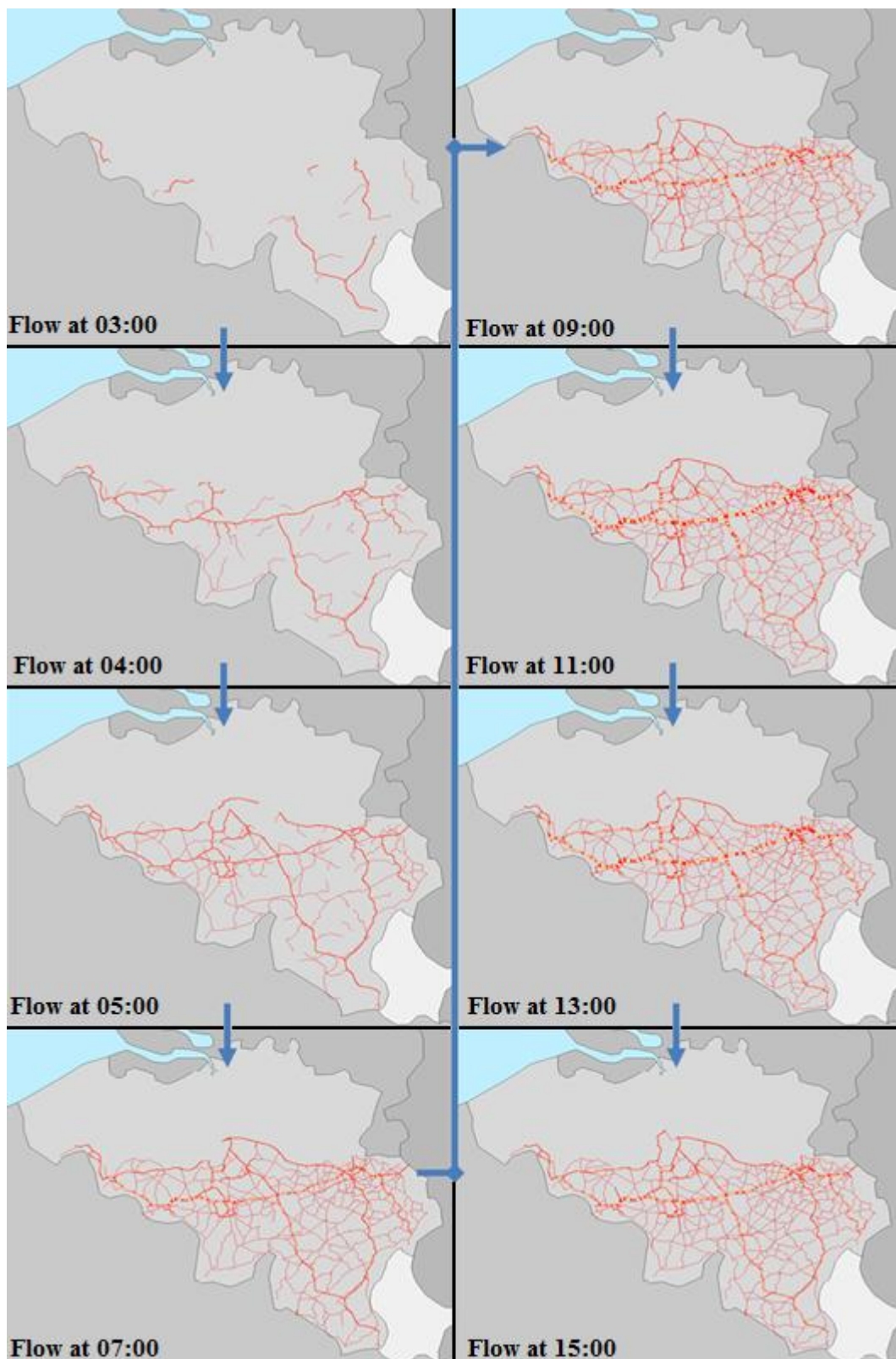


Figure 32 : Affectation SD-fct de la matrice OD(t) période
par période (1)

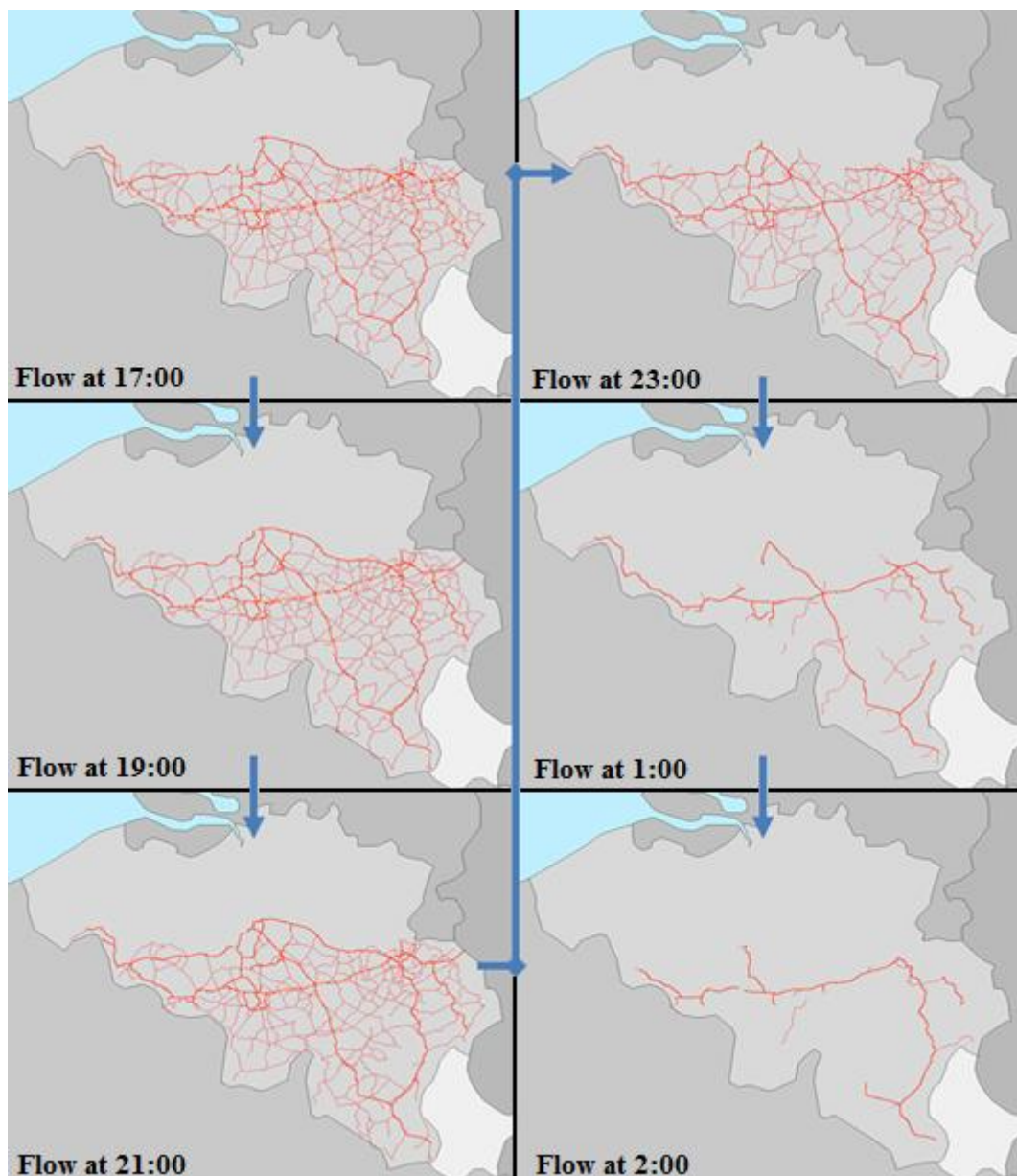


Figure 33 : Affectation SD-fct de la matrice OD(t) période
par période (2)

VI. Validation

Avant toute chose, rappelons que cette recherche se veut d'un caractère exploratoire à bien des niveaux. Jusqu'alors, à notre connaissance, il n'existait pas de modèle aussi désagréé que celui qui a été développé dans cette recherche. Et avant même sa réalisation ou son utilisation éventuelle dans des cas concrets, bon nombre de questions se posaient. A savoir : sera-t-il envisageable de simuler le comportement individuel d'un nombre aussi important d'acteurs ainsi que leurs interactions ? Sera-t-il possible de rassembler suffisamment de données que pour utiliser un tel modèle ? Quelles hypothèses simplificatrices devront être faites ? Ou encore, quelle sera la sensibilité de nos résultats à ces hypothèses ? Ces questions, généralement d'ordre plus théorique et pragmatique ont, pour la plupart, trouvé réponse dans les sections précédentes. Celle-ci se concentrera donc sur l'étape délicate de la confrontation des résultats obtenus au cours des travaux présentés plus tôt à d'autres résultats d'études ou enquêtes.

Puisqu'il n'existe, à notre connaissance, pas d'étude donnant des résultats aussi fins que cette recherche. Il est, dès lors, impossible de comparer directement les matrices temporelles générées en première partie de cette thèse ou les résultats bruts d'une affectation semi-dynamique de ces dernières. Pour comparer le comparable, certaines données doivent être ré-agrégées pour être au moins partiellement validées. C'est ainsi que la première étape de confrontation se profile.

Pour rappel, une matrice origines-destinations temporelle a été générée en première partie de cette thèse. Celle-ci peut être affectée en utilisant une méthode d'affectation semi-dynamique à fonctions de coûts temporelles (SD-fct). Si le résultat et l'intérêt de cette affectation sont de pouvoir afficher la charge sur les différents arcs du réseau au fil des périodes (prédéfinies) tout au long d'une journée, cette méthode peut aussi ré-agréger les flux afin d'afficher le total des marchandises ayant transité sur chaque arc. C'est cette première fonctionnalité

qui sera utilisée afin de comparer les résultats de cette étude à des données existantes.

Les premières données auxquelles seront comparés les résultats de cette recherche proviennent du projet LIMOBEL (De Vlieger, et al., 2011). Au cours de leurs propres travaux, De Vlieger, et al. (2011) ont, entre autres, produit une matrice origines-destinations européennes de fret dont les marchandises proviennent, aboutissent ou transitent en Belgique. Ces matrices ont elles-mêmes été générées sur base de matrices provenant du projet TRANS-TOOLS (Burgess, et al., 2008) sur lesquelles deux corrections majeures ont dû être faites. Tout d'abord, une méthode de désagrégation leur a été appliquée car si le projet TRANS-TOOLS a pu se contenter de matrices de granularité NUTS-2, ce n'est pas le cas du projet LIMOBEL où l'attention est portée sur le territoire belge qui nécessite une granularité NUTS-5. Pour ce faire, un indice d'attraction a été calculé pour chaque zone NUTS-5 du territoire belge sur base de données datant tout de même de 1995. Sur base de ces indices, les marchandises à destination ou provenant de zones NUTS-2 Belges ont été réparties entre les zones NUTS-5 correspondantes. Une méthode de correction a ensuite été appliquée afin de coller au mieux aux comptages mis à disposition par le SPW (2005). Cette correction consiste en une méthode d'affectation tournant en boucle et modifiant à chaque itération les quantités envoyées afin de se rapprocher des comptages jusqu'à atteindre un équilibre avec une marge d'erreur satisfaisante fixée à 2%. Les matrices ainsi finalement générées sont donc un peu particulières puisqu'elles sont « *d'une granularité NUTS-2-NUTS-2 pour les flux transitant en Belgique, une granularité NUTS-5-NUTS-2 pour les exports Belges et une granularité NUTS-2-NUTS-5 pour les imports Belges* » (De Vlieger, et al., 2011).

De la matrice générée dans le projet LIMOBEL, seules les lignes concernant les envois Wallonie-Wallonie ont été conservées puisque c'est l'unique origine de transport tenu en compte dans le cas particulier analysé dans cette recherche. La matrice a ensuite été affectée en utilisant une méthode d'affectation ToR clas-

sique. Les flux sur les différents arcs composant le réseau ont finalement été comparés après chacune des affectations. La figure 34 montre cette comparaison. Chacun des points représente un arc avec pour abscisse la charge (journalière) prévue par l'affectation de la matrice OD(t) et pour ordonnée la charge (annuelle) prévue par l'affectation de la matrice générée dans le projet LIMOBEL (De Vlieger, et al., 2011).

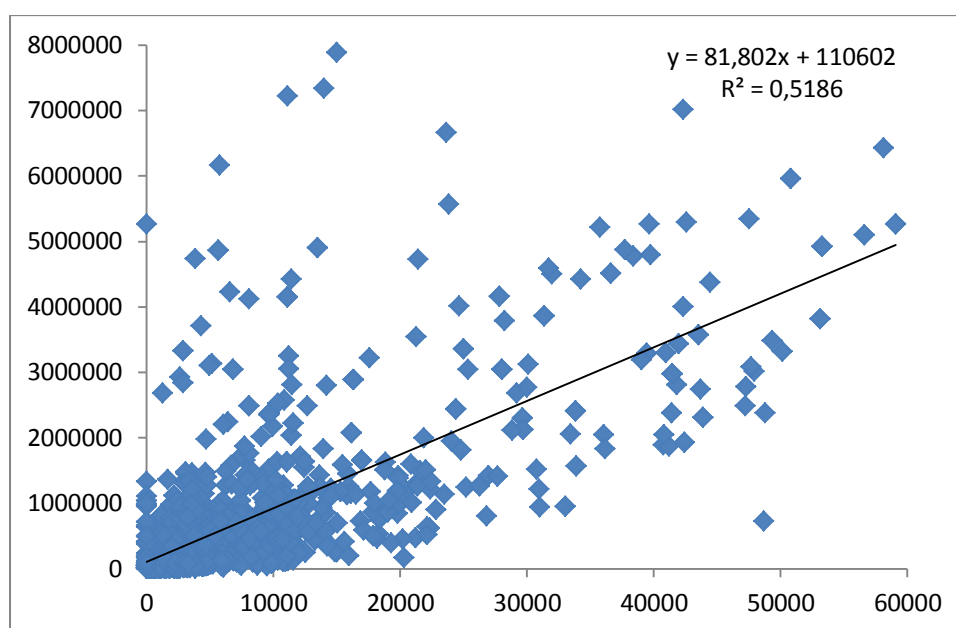


Figure 34 : Comparaison entre l'affectation ToR de la matrice LIMOBEL (De Vlieger, et al., 2011) et l'affectation ToR-t ré-agrégée de la matrice OD(t) générée en début de ces travaux

De cette figure 34, on remarque que le R^2 est de 0.518. Ce R^2 laisse place à des perspectives d'améliorations. Si la liste des hypothèses faites dans ces travaux ou encore celles faites dans le projet LIMOBEL pourraient être rappelées, analysées, et éventuellement retouchées, l'amélioration la plus importante qui pourrait être apportée tient très probablement dans l'échantillon d'acteurs simulés. En effet, outre les diverses hypothèses simplificatrices ont été faites et discutées dans les sections précédentes, seul l'échantillon d'entreprises que représente la base de données « Entreprises » (Service Public de Wallonie, 2008) a pu être considéré.

La question de sa représentativité statistique peut clairement se poser puisque cette base de données ne concerne que les entreprises actives dans les secteurs de la production, de la sous-traitance métallique et plastique-élastomère, des services aux entreprises ainsi que dans l'environnement. En outre, seules les entreprises dont le siège social est localisé en Wallonie sont contenues dans cette base de données. Or un grand nombre d'entreprises plus ou moins importantes voient leur siège social localisé à Bruxelles ou en Flandre alors qu'elles disposent de sièges d'exploitation en Wallonie. Parmi celles-ci, nous pouvons, par exemple, mentionner les plus grands acteurs du secteur de la distribution.

Dès lors, si les entreprises se trouvant dans la base de données « Entreprises » (*Service Public de Wallonie, 2008*) peuvent comporter une base acceptable aux essais préliminaires d'une simulation telle que celle décrite dans ces travaux, il semble naturel qu'un échantillon d'entreprises plus représentatif de la population réelle mènerait à des résultats plus fiables. Pour rappel les résultats des affectations de la matrice générée dans ses travaux selon les deux méthodes semi-dynamiques sont représentés dans les figures 26 et 27. Pour la comparaison, le résultat d'une affectation ToR de la matrice générée dans le projet LIMOBEL est donné en figure 35.

Une autre remarque peut être faite. Le lecteur attentif aura peut-être tenté d'analyser la forme de la droite représentée dans la figure 34 afin d'estimer le ratio entre la quantité de marchandises moyenne annuelle et la quantité de marchandises moyenne journalière en utilisant le facteur de x dans l'équation. Hélas une telle comparaison n'a pas de sens car le projet LIMOBEL n'a pas pour vocation de tenir compte des tournées. Dès lors, si l'on veut avoir une idée du ratio entre ces deux valeurs, il convient de comparer les quantités totales envoyées simulées lors de la simulation présentée plus tôt avec les quantités totales envoyées selon la matrice OD Wallonie-Wallonie provenant de la matrice. On obtient alors un ratio de 871.

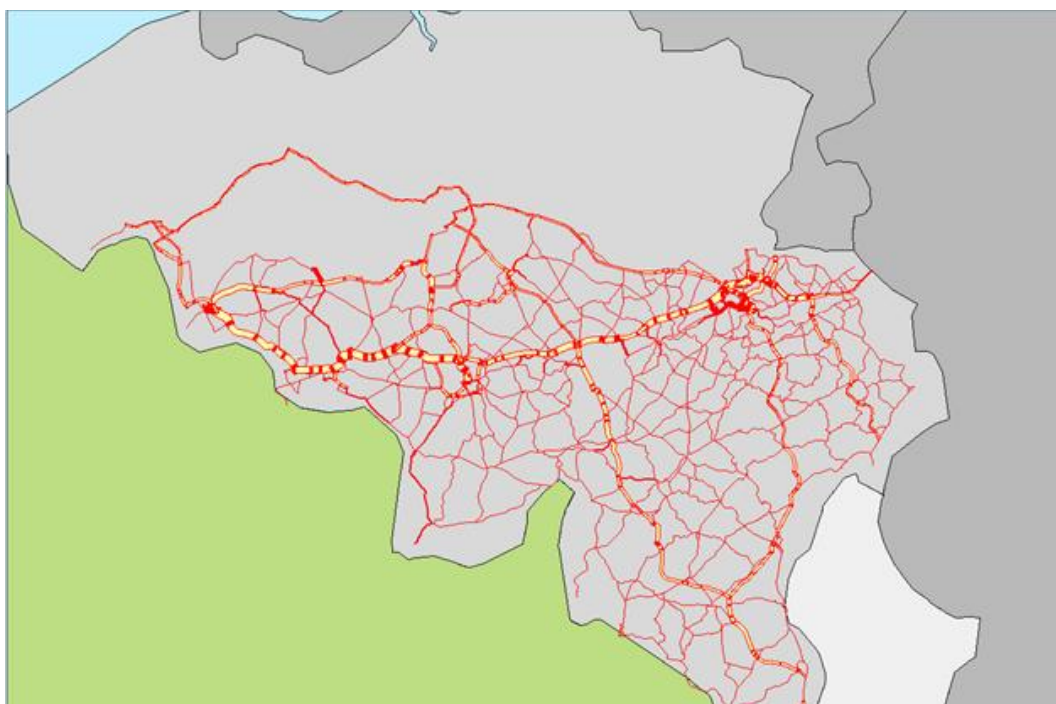


Figure 35 : Affectation ToR de la matrice OD générée dans le cadre du projet LIMOBEL

Outre la comparaison des résultats de l'affectation ToR-t de la matrice OD(t) générée en première partie de ce travail avec ceux de l'affectation ToR de la matrice générée au cours du projet LIMOBEL, il est possible de comparer les résultats de l'affectation ToR-t de la matrice OD(t) avec des données de comptages mises à dispositions par le *Service Public Fédéral* (2005) et le *Service Public de Wallonie* (2010).

Ces données ont fait l'objet d'un premier traitement. En effet, le Service Public de Wallonie propose des comptages journaliers sur le réseau routier Belge. Cependant, ces comptages estiment le nombre de véhicules, tous types confondus, se déplaçant sur le réseau. Or si l'on veut comparer une affectation de matrice de fret avec des comptages, il faut que ces comptages concernent le fret uniquement. C'est ici que les données mises à disposition par le Service Public Fédéral entrent en jeu. Celui-ci propose une estimation des parts de véhicules des différents types sur les arcs du réseau. En combinant ces deux tables de comp-

tages, il a été possible de construire une table estimant le nombre de camions et camionnettes (supposés comme sources principales du transport routier de marchandises) empruntant le réseau routier sur une journée. Quelque 90 arcs ont été choisis principalement sur le réseau autoroutier. Notons que le travail de comparaison avec ces comptages doit se faire manuellement en comparant la valeur dans les tables de comptage au tonnage affecté sur l'arc correspondant dans NODUS, c'est pour cette raison qu'un nombre de points a été défini. Le tonnage estimé sur ces arcs lors de l'affectation ToR-t de la matrice OD(t) a alors été comparé aux comptages. Notons au passage que des tonnes sont donc comparées à un nombre de camions. Les résultats de cette comparaison se retrouvent en figure 36. De manière analogue à la précédente comparaison, chaque point représente l'un des arcs choisis, son abscisse représentant le nombre de véhicule d'après comptages et son ordonnée représentant le nombre de tonnes affectées par la méthode ToR-t.

On constate que le R^2 est de 0.46. Cependant, un coup d'œil plus attentif aux deux jeux de données permet de montrer que les plus gros écarts entre ceux-ci sont à peu près systématiquement en bordure de la région étudiée. Ceci s'explique principalement de par le fait que les imports, exports et transits ont été complètement négligés dans la génération de la matrice OD(t). Si l'on retire, cette fois, les quelque 18 points situés en bordure de la région étudiée et qu'on procède à la même comparaison (figure 37), on se rend compte que les résultats sont sensiblement meilleurs avec un $R^2=0.677$.

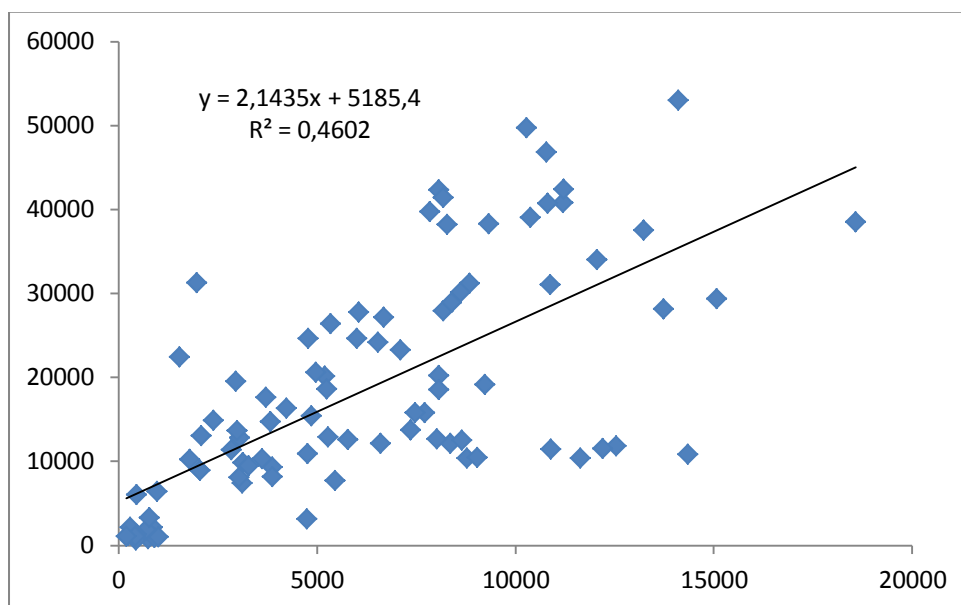


Figure 36 : Résultats de la comparaison entre comptages et tonnages affectés par la méthode ToR-t

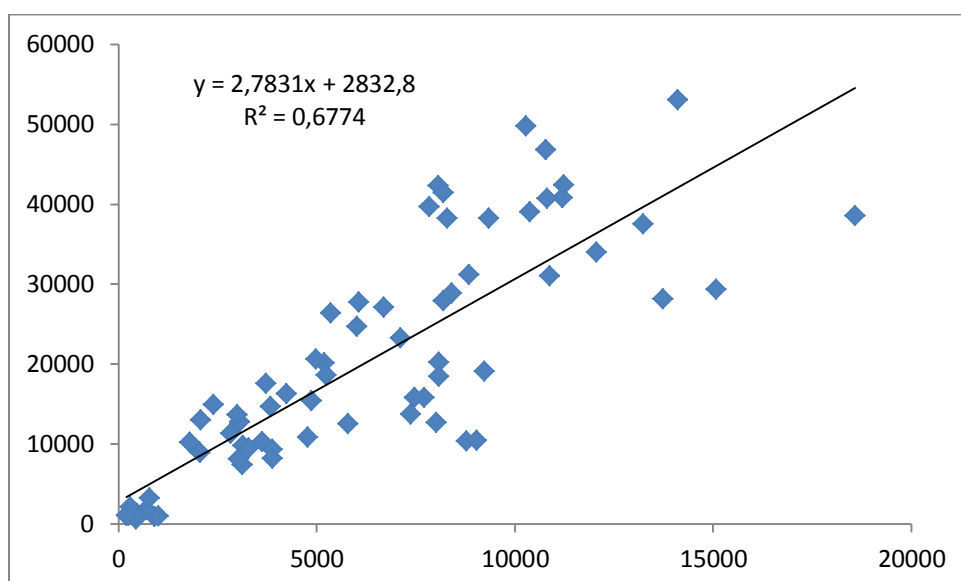


Figure 37 : Résultats de la comparaison entre comptages et tonnages affectés par la méthode ToR-t en retirant les points en bordure de la zone d'étude

Ces résultats plus encourageants doivent être nuancés. En effet, si le R^2 semble indiquer une corrélation de meilleure qualité, il ne faut pas oublier que celui-ci a été calculé sur un nombre de points de comptages inférieur au nombre de points

de comparaisons existant entre les affectations ToR-t de la matrice OD(t) et ToR de la matrice LIMOBEL. Néanmoins, ces résultats confirment un plus grand réalisme dans le cœur de la région étudiée par rapport aux bords et semblent indiquer qu'il faudrait vivement tenir compte des flux liés à l'import-export et au transit.

Enfin, une dernière comparaison a été effectuée. Comme indiqué en début de section, de par le caractère agrégé des données disponibles dans les différentes enquêtes et statistiques auxquelles les résultats produits dans ces travaux peuvent être comparés, ces derniers ont dû être ré-agrégés. Jusqu'à présent, le facteur temporel des matrices produites dans ces travaux a donc été un peu oublié. La dernière comparaison proposée dans cette section a pour objectif de pallier à cette lacune. Les données de références disponibles sur le sujet sont mises à disposition par le *Service Public Fédéral Mobilité et Transports* (2005). Elles sont en deux parties. Il y a d'une part, une répartition horaire des flux journaliers (jour ouvré) et d'autre part, la répartition journalière de la proportion de camions de tous types dans le trafic. En combinant ces deux distributions, il est naturellement possible de produire une répartition journalière des camions sur le réseau routier belge. L'hypothèse est ensuite faite que cette répartition est la même sur le réseau routier wallon que sur le réseau routier belge. Afin de comparer cette répartition journalière de camions aux résultats produits dans ces travaux, ces derniers ont été ré-agrégés par tranche horaire, cette fois. La figure 38 montre les deux distributions.

Si, dans les grandes lignes, les formes générales des deux courbes sont comparables, on observe tout de même des différences entre les deux distributions. Tout d'abord, entre minuit et 5h du matin, nos résultats prévoient moins de flux que ce qui est observé par le SPF. Cette différence est due au fait que dans la simulation présentée en début de cette thèse, l'hypothèse est faite que l'heure d'arrivée minimale des demandes a été fixée à 6h. Dès lors, de par la zone étudiée, les premiers camions ne démarrent dans le pire des cas que 2 ou 3 heures

avant. Notons néanmoins que cette différence est mineure et que la proportion des flux journaliers négligée n'est que de l'ordre de 1% par heure entre minuit et 5h.

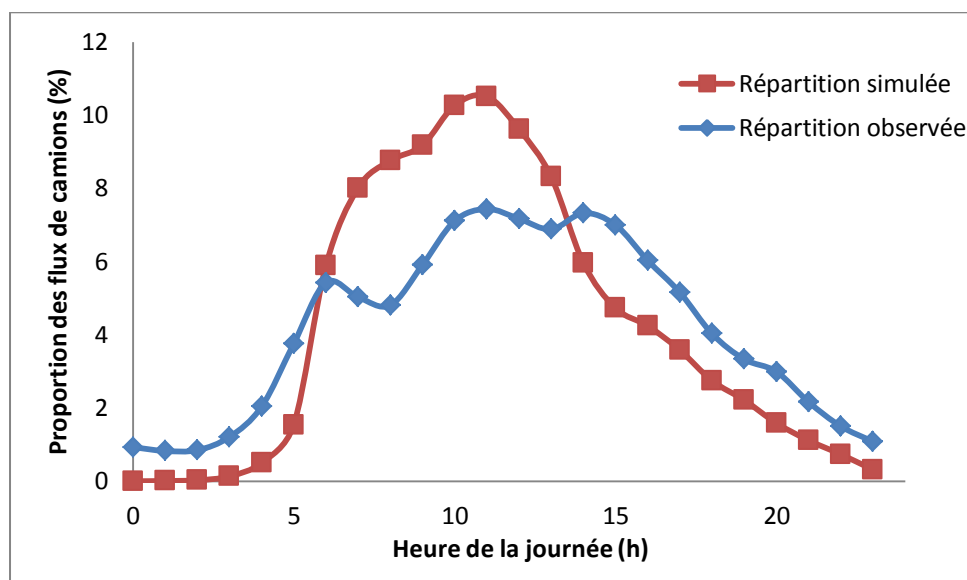


Figure 38 : Répartition horaire des flux de camions simulés (rouge) et observés sur le réseau routier belge selon le SPF (bleu)

La seconde différence, plus importante, concerne les périodes entre 5h et 14h et entre 14h et minuit. Au cours de la première de ces périodes, le modèle surestime la proportion de flux tandis qu'il la sous-estime en fin de journée. Cette différence est, elle-aussi, induite par une hypothèse de la simulation présentée en première partie de cette thèse. Rappelons-nous des demandes faites par les agents représentant des entreprises et de l'algorithme de planification des tournées utilisé par les agents représentant les sociétés de transport. Si une heure d'arrivée à destination est bien fournie par l'agent-entreprise lors de l'envoi de sa demande, il a été souligné que sans données appropriées, il est très difficile de tenir compte d'un coût associé à un écart par rapport à l'heure de livraison souhaitée. Dès lors, l'algorithme de planification des tournées utilisé par les agents transporteurs ne peut tenir compte de fenêtres temporelles. L'ordre dans lequel

les livraisons sont effectuées par les agents transporteurs peut donc être altéré de telle manière que certaines marchandises arrivent plus tôt ou plus tard que l'heure de livraison souhaitée, même si autant que faire se peut, les agents transporteurs tenteront de respecter ces horaires. L'impact de cette limitation du modèle se ressent dans la figure 35. En effet, en l'absence de fenêtres temporelles associées aux demandes, les agents transporteurs vont se voir condenser les demandes afin de minimiser les temps d'attente de leurs véhicules et les temps morts pour leurs chauffeurs. Les véhicules vont donc maximiser le nombre de contrats remplis par tournées en première moitié de journée afin de minimiser les coûts de transport. En seconde moitié de journée, les quantités à livrer restantes dans la simulation seront donc inférieures à ce qui est observé dans la réalité et qui aurait probablement pu être simulé s'il était possible d'implémenter ces fenêtres temporelles, associées aux demandes, durant lesquelles les livraisons doivent être faites.

Malgré ces hypothèses et limitations, soulignons tout de même que le coefficient de corrélation entre les deux distributions est de 0.881, ce qui équivaut à un R^2 de 0.777.

Notons aussi que si l'on compare les figures 15 et 34, on s'aperçoit que la répartition horaire des flux simulée est d'autant plus cohérente avec les données utilisées afin de générer la distribution horaire des demandes faites par les agents-entreprises. Dès lors que le nombre de demandes faites l'après-midi est très faible, on imagine facilement que le troisième pic visible sur la répartition observée par comptage pourrait difficilement apparaître aussi clairement dans la simulation. Cette remarque pourrait aussi indiquer une différence entre la façon dont le transport est réparti entre les deux moitiés de la journée entre la ville de Bologne (représentée en figure 15) et la tendance moyenne en Belgique.

En conclusion, différentes comparaisons ont été effectuées sur des données ré-agrégées : d'une part sur la répartition des flux journaliers sur le réseau et

d'autre part sur la distribution des flux dans la journée. Les résultats de ces comparaisons sont cohérents même s'ils indiquent que des améliorations sont possibles. Ceux-ci semblent mettre le doigt sur les principales limitations du modèle actuel : tout d'abord, la nécessité d'avoir à disposition des données représentatives de la population d'acteurs simulés. Ensuite, les effets de bords semblent jouer un rôle important dans le cas qui nous occupe. En effet, les comparaisons aux comptages donnent des résultats de l'ordre de 50% meilleurs lorsqu'on néglige les arcs connectant directement la frontière de la zone d'étude et l'échangeur le plus proche. Finalement, la prise en compte de fenêtres temporelles associées aux demandes des entreprises semble nécessaire si l'on veut améliorer la cohérence entre la distribution journalière des flux observée dans les comptages et celle qui est prédite par le modèle présenté dans ces travaux. Ceci dit, cette limitation est elle aussi liée à la nécessité de disposer d'une quantité importante d'informations sur le comportement des acteurs à simuler.

VII. Conclusion, limites de la recherche et perspectives

La conclusion de la recherche présentée dans cette thèse s'articule autour d'un bref résumé des différentes étapes composant les modèles proposés. Ces modèles se composent d'une part d'une simulation de génération de la demande de transport routier de marchandises dont l'objectif est de produire une matrice origines-destinations temporelle désagrégée. Cette simulation utilise le paradigme multi-agents et doit se baser sur des données statistiques et observations réelles. Ce besoin en données constitue, comme nous l'avons souligné dans l'analyse des résultats, l'un des points faibles majeurs d'une telle simulation. En effet, dès lors que l'on souhaite simuler le comportement d'une population d'acteurs, il est nécessaire de disposer d'une quantité d'informations importante et de qualité. Or il est souvent très difficile de se procurer des statistiques fiables et en quantité suffisante. Néanmoins la mise au point technique et méthodologique de la simulation a été possible. Celle-ci constitue déjà une réussite de par les questions qu'elle soulevait avant même sa réalisation.

La simulation a ensuite été appliquée au territoire Wallon (divisé en zones de granularité NUTS-5) en utilisant les différentes bases de données citées et décrites plus tôt dans cette thèse, même si certaines comportent des lacunes dans le cadre de l'utilisation présente.

Les acteurs du secteur étudié ont été représentés par des agents en interactions. Dans le cas pratique testé, ceux-ci ont été générés grâce à la base de données « Entreprises » qui a constitué la meilleure alternative, même si elle ne répond pas parfaitement aux besoins d'une telle simulation.

La simulation du comportement des différents agents requiert de nouvelles données en input : d'une part, des informations sur les fréquences et tailles d'envois en fonction du secteur d'activité ainsi que sur la tendance à transporter des marchandises pour compte propre en ce qui concerne les agents-entreprises, et

d'autre part, des informations sur les parcs de véhicules en ce qui concerne les agents-transporteurs. Les données qui ont été utilisées dans le cas pratique testé dans ces travaux proviennent de l'enquête ECHO, ainsi que diverses statistiques Belges et Européennes.

La destination des envois est générée suivant un modèle gravitaire. Dans le cas pratique, les attractions des différentes zones sont basées sur le nombre d'employés dans chacune d'elles et la distance qui sépare ces zones. Le nombre d'habitants dans chaque zone est donc négligé dans le calcul de son attractivité. Cette limitation ne pourrait être levée qu'à condition de mener une étude préalable sur l'impact relatif des habitants des zones sur de tels indices d'attractivités et bien sûr de disposer du nombre d'habitants de chaque zone.

Confrontés aux demandes des différents agents-entreprises, les agents-transporteurs procèdent à la planification de tournées dont les coûts varient au fil de la journée. Rappelons que l'hypothèse est posée qu'il n'y a pas d'interactions entre agents-transporteurs et donc pas de possibilité, actuellement, de simuler des phénomènes de sous-traitance qu'on sait existants dans le monde réel.

Finalement, lorsqu'une journée a été simulée, une matrice origines-destinations temporelle est générée. Celle-ci peut être affectée selon deux méthodes à mi-chemin entre les méthodes statiques et dynamiques. Tout d'abord, le modèle d'affectation Tout-ou-Rien temporel (ToR-t) consiste en l'affectation ToR de la matrice origines-destinations temporelle et ensuite à l'affichage période par période des flux sur le réseau. Ensuite, le modèle d'affectation Tout-ou-Rien à fonctions de coûts temporelles (ToR-fct) consiste en l'affectation période par période des quantités représentées dans la matrice origines-destinations temporelle avec pour chaque arc et chaque période un coût potentiellement différent. Les résultats des affectations du scénario de test sont cohérents avec les comptages et les résultats d'autres études mais indiquent que des possibilités d'améliorations

existent. Ils confirment aussi le rôle capital que jouent les données utilisées en input à la simulation de génération de la demande. La confrontation des résultats de ces travaux à des comptages effectués sur le terrain par le SPF et le SPW semble inviter à tester le modèle en utilisant des données de meilleure qualité. Ces tests supplémentaires permettraient de mieux percevoir l'impact des différentes hypothèses théoriques qui ont été faites.

Une autre limitation du modèle, dont les effets se font ressentir lors de l'analyse des résultats, réside dans le fait de ne pas tenir compte de fenêtres temporelles (Time-windows) lors de la génération des demandes des entreprises. Encore une fois, la première étape afin de tenir compte de la nécessité pour les entreprises que certaines marchandises arrivent dans une certaine fourchette horaire serait de disposer d'informations statistiques sur les tendances dans le domaine. A notre connaissance, il n'existe cependant, actuellement, pas de données publiées sur le sujet. Ceci dit, dans un second temps, il faudrait modifier l'algorithme de planification des tournées utilisé par les transporteurs afin de respecter ces obligations horaires. L'implémentation de cette contrainte semble envisageable. Elle n'augmenterait pas énormément les temps de calculs, même si la qualité des solutions trouvées s'en verrait certainement réduite. De nombreuses études ont déjà été réalisées sur le sujet. Plus d'informations sur le sujet peuvent, par exemple, être trouvées dans les travaux de *Cordeau, et al.* (2007).

En outre, la comparaison des résultats aux comptages met l'accent sur la nécessité d'élaborer une méthode permettant de tenir compte des flux provenant des imports/exports/transits. Ceci pourrait, par exemple, être fait de manière approchée en générant un agent-entreprise supplémentaire à chaque point de sortie du réseau autoroutier. Ces agents procéderaient à du transport pour compte propre et posséderaient une infinité de camions. A condition d'avoir des données sur les imports, exports et flux en transits, ces derniers pourraient être facilement implémentés dans la simulation.

Comme cela a été souligné à de multiples reprises au cours de ce manuscrit, les travaux présentés ici se veulent, avant tout, représenter une avancée qui combine des concepts théoriques bien établis. La simulation proposée en première partie de cette thèse tient en la combinaison d'une multitude de concepts différents provenant de toutes parts dans le monde du transport. Cette simulation a été conçue de manière à ce que tout nouvel apport dans le modèle soit aussi simple et pratique que possible. En effet, de par sa conception, le modèle présenté dans ces travaux permet potentiellement d'intégrer de nouvelles contraintes et règles à différents niveaux en ne nécessitant pas de le ré-imaginer complètement.

Bibliographie

- Aarts E.H.L. et Lenstra J.K. (Eds) (1997) : *Local Search in Combinatorial Optimization*, Wiley, Chichester.
- Adler J.L., Satapathy G., Manikonda V., Bowles B. et Blue V.J. (2005) : *A multi-agent approach to cooperative traffic management and route guidance*, Transportation Research B, Vol. 39, Issue 4, 297–318.
- Agent Development Kit (2008) : <http://www.tryllian.com/adk.html>.
- Akamatsu T. (2000) : *A dynamic traffic equilibrium assignment paradox*, Transportation Research Part B, Vol. 34, pp. 515–531.
- Alfa A.S. (1986) : *Scheduling of vehicles for transportation of elderly*, Transportation Planning and Technology, Vol. 11, pp. 203–212.
- Albrantes P.A.L. et Wardman M.R. (2011) : *Meta-analysis of UK values of travel time: An update*, Transportation Research Part A, Vol. 45, pp. 1–17.
- Al-Neaimi A., Qatawneh S. et Al Saiyd N. (2012) : *Conducting verification and validation of multi-agent systems*, International Journal of Software Engineering & Applications (IJSEA), Vol. 3, No. 5, pp. 115–124.
- Alvarez O., Cantos P. et Garcia L. (2007) : *The value of time and transport policies in a parallel road network*, Transport Policy, Vol. 14., pp. 366–376.
- Amasaka K. (2007) : *Applying New JIT—Toyota's global production strategy: Epoch-making innovation of the work environment*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 23, pp. 285–293.
- Angelelli E. et Mansini R. (2002) : *Quantitative Approches to Distrubution Logistics and Supply Chain Management*, Springer, Berlin-Heidelberg.
- Augustijn-Beckers E-W., Flacke J. et Retsios B. (2011) : *Simulation informal settlement growth in Dar es Salaam, Tanzania: An agent-based housing model*, Computers, Environment and Urban Systems, vol. 35, pp. 93–103.
- Azi N., Gendreau M., Potvin J.-Y. (2010) : *An exact algorithm for a vehicle routing problem with time windows and multiple use of vehicles*, European Journal of Operational Research, Vol. 202, pp. 756–763.
- Balbo F. et Pinson S. (2005) : *Dynamic modeling of a disturbance in a multi-agent system for traffic regulation*, Decision Support System, Vol. 41, pp. 131–146.
- Baldacci R., Toth P., Vigo D. (2007) : *Recent advances in vehicle routing exact algorithms*, 4OR, Vol. 5, Issue 4, pp. 269–298.
- Barthelemy J., Cornelis E., Jourquin B., Limbourg S., Piotte J. et Toint P. (2009) : *The DID-AM framework: Disaggregated demand and assignment models*, Proceedings of the BIVC-GIBET Transport Research Day 2009, volume Part 2, pp. 791–801, Cathy Macharis & Laurence Turcksin eds - <http://hdl.handle.net/2268/40417>.
- Barthelemy J., Cornelis E., Jourquin B., Piotte J., Toint P. (2010) *Towards microsimulation of passenger and freight transport competition: advances in synthetic population generation and simulation of the behavior of freight actors*, Proceedings of the World Conference on Transport Research 2010, Lisbon, Portugal.
- Bates J. (2000) : *History of Demand Modelling*. Dans : Hensher D.A. et Button K.J., *Handbook of Transport Modelling*, Vol.1, pp. 11–33, Pergamon, UK.
- Beasley, J.E. (1983) : *Route-first cluster-second methods for vehicle routing*. Omega 11, 403–408.

- Bellei G., Gentile G. et Papola N. (2005) : *A within-day dynamic traffic assignment model for urban road networks*, Transportation Research Part B, Vol. 39, pp. 1-29.
- Bellifemine F.L., Caire G. et Greenwood D. (2007) : *Developing Multi-Agent Systems with JADE*, Wiley.
- Bellman R. (1958) : *On a routing problem*, Quarterly of Applied Mathematics, Vol. 16, pp. 87-90.
- Ben-Akiva M.E., Bergman M.J., Daly A. et Ramaswamy R. (1984) : *Modelling Inter-Urban Route Choice Behavior*, Proceedings of the 9th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, pp. 299-330
- Ben-Akiva M.E., Gao S., Wei Z. et Wen Y. (2012) : *A dynamic traffic assignment model for highly congested urban networks*, Transportation Research Part C, Vol. 24, pp. 62-82.
- Bent R. et Van Hentenryck P. (2004) : *Regrets Only! Online stochastic optimization under time constraints*, Proceedings of the 19th National Conference on Artificial Intelligence, pp. 501-506, San Jose, CA.
- Benyahia I. et Potvin J.Y. (1998) : *Decision support for vehicle dispatching using genetic programming*, IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Part A - Systems and Humans, Vol. 28, Issue 3, pp. 306-314.
- Bergkvist M., Davidsson P., Persson J.A. et Ramstedt L. (2005) : *A Hybrid Micro-Simulator for Determining the Effects of Governmental Control Policies on Transport Chains*, Multi-Agent-Based Simulation IV, LNAI 3415. Springer, Berlin, Germany.
- Bergomi M. (2009) : *Traffic Assignment Problem: The stochastic User Equilibrium*, Master Thesis, Institute for Operations Research, Swiss Federal Institute of Technology Zürich.
- Bertsimas D.J. (1988) : *Probabilistic combinatorial optimization problems*, PhD thesis, Operations Research Center, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.
- Bertsimas D.J. et Simchi-Levi D. (1996) : *A new generation of vehicle routing research: Robust algorithms addressing uncertainty*, Operations Research, Vol. 44, pp. 286-304.
- Bianchessi N. et Righini G. (2007) : *Heuristic algorithms for the vehicle routing problem with simultaneous pick-up and delivery*, Computers & Operations Research, Vol. 34, Issue 2, pp. 578-594.
- Bodin L.D. et Sexton T. (1986) : *The multi-vehicle subscriber dial-a-ride problem*, TIMS Studies in Management Science, Vol. 26, pp. 73-86.
- Böhnlein D., Schweiger K et Tuma A. (2011) : *Multi-agent based transport planning in the newspaper industry*, <http://www.journals.elsevier.com/international-journal-of-production-economics/>, Vol. 131, pp. 146-157.
- Borndörfer R., Grötschel M., Klostermeier F. et Küttner, C. (1999) : *Telebus Berlin: Vehicle scheduling in a dial-a-ride system*. Dans : Wilson N.H.M. (Eds.), Computer-Aided Transit Scheduling. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, Vol. 471. Springer-Verlag, pp. 391-422.
- Bourrel E. et Lessort J.B. (2003) : *Mixing micro and macro representations of traffic flows: a hybrid model based on the LWR theory*, Proceedings: 82th Transportation Research Board, pp. 193-200.
- Bowman J.L. (2009) : *Historical Development of Activity Based Model Theory and Practice*, Traffic Engineering and Control, Vol. 50, No. 2, pp. 59-62 (part 1), Vol. 50, No. 7, pp. 314-318 (part 2).

- Bowman J.L. et Ben-Akiva M.E. (2000) : Activity-based disaggregate travel demand model system with activity schedules, *Transportation Research Part A*, Vol. 35, pp. 1-28.
- Bramel J. et Simchi-Levi D. (1995) : *A location based heuristic for general routing problems*, *Operations Research*, Vol. 43, pp. 649-660.
- Bruzeliuss N. (2001) : *The valuation of logistics improvements in CBA of transport investments – a survey*. Report prepared for the Swedish Institute for Transport and Communications Analysis (SIKA).
- Bureau of Public Roads (1964) : *Traffic Assignment Manual*, Urban Planning Division, US Department of Commerce, Washington DC.
- Burgess A., Chen T.M., Snelder M., Schneekloth N., Korzhenevych A., Szimba E., Kraft M., Krail M., Nielsen O., Hansen C., Martino A., Fiorello D. et Christidis P. (2008) : *Final Report TRANS-TOOLS (TOOLS for Transport forecasting And Scenario testing) Deliverable 6*, Funded by 6th Framework RTD Programme. TNO Inro, Delft, Netherlands.
- Carley K.M., Fridsma D.B., Casman E., Yahja A., Altman N., Chen L.C., Kaminsky B. et Nave D. (2006) : *BioWar: scalable agent-based model of bioattacks*, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part A: Systems and humans*, vol. 36, pp. 252–265.
- Casco D.O., Golden B.L., Wasil E.A. (1988) : *Vehicle routing with backhauls: Models, algorithms, and case studies*. In: Golden BL, Assad AA (eds) *Vehicle routing: Methods and studies*, pp. 127–147. Elsevier, Amsterdam.
- Casey H.J. (1955) : *Applications to traffic engineering of the law of retail gravitation*, *Traffic Quarterly*, IX, Vol. 1, pp. 23-35.
- Centre de recherches économiques (1999) : *Le transport routier de marchandises pour compte propre en Europe*, Conférence Européenne des ministres des transports.
- Cetin N., Nagel K., Raney B. et Voellmy A. (2002) : Large-scale multi-agent transportation simulations, *Computer Physics Communications*, Vol. 147, pp. 559-564.
- Ceylan H. et Bell G.H. (2005) : *Genetic algorithm solution for the stochastic equilibrium transportation networks under congestion*, *Transportation Research Part B*, Vol. 39, pp. 169-185.
- Chapin F.S. (1974) : *Human activity pattern in the city*. New York : Wiley.
- Chen J. F. et Wu T. H. (2006) : *Vehicle routing problem with simultaneous deliveries and pickups*, *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 57, Issue 5, pp. 579–587.
- Chen P., Kuan Huang H. et Dong X.-Y. (2010) : *Iterated variable neighborhood descent algorithm for the capacitated vehicle routing problem*, *Expert Systems with Applications*, Vol. 37, Issue 2, pp. 1620-1627.
- Cheung B.K.S., Choy K.L., Li C.-L., Shi W. et Tang J. (2008) : *Dynamic routing model and solution methods for fleet management with mobile technologies*, *International Journal of Production Economics*, Vol. 113, Issue 2, pp. 694-705.
- Christofides N., Mingozzi A., Toth P., Sandi C. (Eds) (1979) : *The vehicle routing problem*, *Combinatorial Optimization*, Wiley, Chichester, pp. 315-338.
- Clarke G., Wright J.W. (1964) : *Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points*, *Operations Research*, Vol. 12, pp. 568-581.
- Cordeau J.-F. et Laporte G. (2003) : *A tabu search heuristic for the static multi-vehicle dial-a-ride problem*, *Transportation Research part B*, Vol. 37, pp. 579–594.
- Cordeau J.-F., Laporte G., Potvin J.-Y. et Savelsbergh M.W.P. (2007) : *Transportation on demand*. Dans : Barnhart C. et Laporte G. (Eds), *Transportation, Handbooks in Op-*

- erations Research and Management Science, vol. 14, Elsevier, Amsterdam, ch. Transportation on Demand, pp. 429-466.
- Cordeau J.-F., Laporte G., Savelsbergh M.W.P. et Vigo D. (2007) : *Vehicle Routing*. Dans : Barnhart C. et Laporte G. (Eds), *Transportation, Handbooks in Operations Research and Management Science*, vol. 14, Elsevier, Amsterdam, ch. Vehicle Routing, pp. 367-428.
- Coslovich L., Pesenti R. et Ukovich W. (2003) : *A two-phase insertion technique of unexpected customers for a dynamic dial-a-ride problem*, Technical report, Università di Trieste, Italy.
- Crispim J. et Brandão J. (2005) : *Metaheuristics applied to mixed and simultaneous extensions of vehicle routing problems with backhauls*, *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 56, Issue 7, pp. 1296–1302.
- Cullen F.H., Jarvis J.J. et Ratliff, H.D. (1981) : *Set partitioning based heuristics for interactive routing*, *Networks*, Vol. 11, pp. 125–143.
- Dantzig G., Ramser J. H. (1959): *The truck dispatching problem*, *Management Science* 6, pp. 80-91.
- Davidson W., Donnelly R., Vovsha P., Freedman J., Ruegg S., Hicks J., Castiglione J. et Picado R. (2007) : *Synthesis of first practices and operational research approaches in activity-based travel demand modeling*, *Transportation Research Part A*, Vol. 41, pp. 464–488.
- Davidsson P., Henesey L., Ramstedt L., Törnquist J. et Wernstedt F. (2005) : *An analysis of agent-based approaches to transport logistics*, *Transportation Research Part C*, Vol. 13, pp. 255-271
- Davidsson P., Holmgren J., Persson J.A. et Ramstedt L. (2008) : *Multi Agent Based Simulation of Transport Chains*, *Proceedings of 7th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2008)*, Padgham, Parkes, Müller and Parsons (eds.), May, 12-16., 2008, Estoril, Portugal, pp. 1153-1160.
- De Vlieger I., Mayeres I., Michiels H., Schrooten L., Vanhulsel M., Gusbin D., Hoornaert B., Vandresse M., Van Steenberghe A., Dewaele D. et Jourquin B. (2011) : *Long-run Impacts of Policy Packages on Mobility in Belgium – LIMOBEL. Final Report*, Science for a Sustainable Development.
- Dean B.C. (2004) : *Shortest paths in FIFO Time-dependent Network: Theory and Algorithms*, Massachusetts Institute Of Technology.
- Dehne F., Omran M.T. et Sack J.R. (2012) : *Shortest Paths in Time-Dependent FIFO Networks*, *Algorithmica*, Vol. 62, pp. 416–435
- Dell'Amico M., Righini G. et Salani M. (2006) : *A branch-and-price approach to the vehicle routing problem with simultaneous distribution and collection*, *Transportation Science*, Vol. 40, Issue 2, pp. 235-247.
- Desrosiers J., Dumas Y., Solomon M. M. et Soumis F. (1995) : *Time Constrained Routing and Scheduling*, *Network Routing*. Dans : Ball M.O. et al. (eds), *Handbooks in Operations Research and Management Science*, Vol. 8, pp. 35-139.
- Desrosiers J., Dumas Y. et Soumis F. (1986) : *A dynamic programming solution of the large-scale singlevehicle dial-a-ride problem with time windows*, *American Journal of Mathematical and Management Sciences*, Vol. 6, pp. 301–325.
- Desrosiers J., Dumas Y., Soumis F., Taillefer S. et Villeneuve D. (1991) : *An algorithm for miniclustering in handicapped transport*, Technical Report G-91-22, GERAD, HEC Montréal.

- Dethloff J. (2001) : *Vehicle routing and reverse logistics: the vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up*. OR Spektrum, Vol. 23, pp. 79-96.
- Dijkstra E.W. (1959) : *A note on two problems in connection with graphs*, Numerische Mathematik, Vol. 1, pp. 269-271.
- Doniec A., Mandiau R., Piechowiak S. et Espié S. (2008) : *A behavioral multi-agent model for road traffic simulation*, Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol. 21, pp. 1443-1454.
- Domencich T. et McFadden D. (1975) : *Urban Travel Demand: A Behavioural Analysis*, North-Holland, Amsterdam.
- Dror M., Laporte G. et Trudeau P. (1989) : *Vehicle routing with stochastic demands : Properties and solution frameworks*, Transportation Science, Vol. 23, pp. 166-176.
- Dumas Y., Desrosiers J. et Soumis F. (1989) : *Large scale multi-vehicle dial-a-ride problems*, Technical Report G-89-30, GERAD, HEC Montréal.
- El Hmam M.S., Abouaïssa H., Jolly D. et Benasser A. (2006) : *Simulation hybride de flux de trafic basée sur les systèmes multi-agents*, Proceedings: 6e conférence Franco-phone de Modélisation et Simulation: MOSIM'06.
- Ettema D. et Timmermans H. (1995) : *Theories and models of activity patterns*. Dans : Ettema D. et Timmermans H. (eds), *activity-based approaches to travel analysis*. Elsevier Science, pp. 1-36.
- Fazel F., Fischer K.P. et Gilbert E.W. (1998) : *JIT purchasing vs. EOQ with a price discount: An analytical comparison of inventory costs*, Int. J. Production Economics, Vol. 54, pp. 101-109.
- Fédération belge de l'Industrie de l'Automobile et du Cycle (2011) : <http://www.febiac.be/public/statistics.aspx?FID=23&lang=FR>
- Ferber J. (1995) : *Les systèmes multi-agents. Vers une intelligence collective*, Intereditions, Paris.
- Fondation for Intelligent Physical Agents (2012) : <http://www.fipa.org>.
- Fisher M.L. et Jaikumar R. (1981) : *A generalized assignment heuristic for the vehicle routing problem*, Networks, Vol. 11, pp. 109-124.
- Ford L.R. et Fulkerson D.R. (1962) : *Flows in Networks*, Princeton University Press.
- Foster B.A. et Ryan D.M. (1976) : *An integer programming approach to the vehicle scheduling problem*, Operations Research, Vol. 27, pp. 367-384.
- France J. et Ghorbani A.A. (2003) : *A multiagent system for optimizing urban traffic*. Dans IEEE/WIC International Conference on Intelligent Agent Technology (IAT 2003), Halifax, Canada, pp. 411-414.
- Frank M. et Wolfe P. (1956) : *An algorithm for quadratic programming*, Naval Research Logistics Quarterly, Vol. 3, pp. 95-110.
- Fried L., Havens J. et Thall M. (1977) : *Travel Behavior – a synthesized theory*, NCHRP, Transportation Research Board, Washington DC, Final Report.
- Friedrich M., Hofsäß I., Nökel K. et Vortisch P. (2000) : *A dynamic Traffic Assignment Method for Planning and Telematic Applications*, Proceedings of Seminar K, European Transport Conference, Cambridge, pp. 29-40.
- Rubén Fuentes R., Gómez-Sanz J.J. et Pavón J. (2004) : *A Sociological Framework for Multi-agent Systems Validation and Verification*. Dans: proceeding of: Conceptual Modeling for Advanced Application Domains, Shanghai, Chine.
- Furness (1965) : *Time function iteration*, Traffic Engineering and Control, Vol. 7, pp. 458-60.

- Gajpal Y. et Abad P. (2009) : *And ant colony system (ACS) for vehicle routing problem with simultaneous delivery and pickup*, Computers & Operations Research, Vol. 36, Issue 12, pp. 3215-3223.
- Gambardella L., Rizzoli A., Oliverio F., Casagrande N., Donati A., Montemanni R. et Lucibello E. (2003) : *Ant colony optimization for vehicle routing in advanced logistics systems*, Proceedings of the International Workshop on Modelling and Applied Simulation (MAS 2003), pp. 3-9.
- Garcia R., Rummel P. et Hauser J. (2007) : *Validating agent-based marketing models through conjoint analysis*, Journal of Business Research, Vol. 60, pp. 848-857
- Gärling T., Kwan M.P. et Golledge (1994) : *Computational process modeling of household activity scheduling*, Transportation Research part B, Vol. 28, pp. 355-364.
- Gendreau M., Guertin F., Potvin J.-Y. et Taillard E. (1999) : *Parallel tabu search for real-time vehicle routing and dispatching*, Transportation Science, Vol. 33, Issue 4, pp. 381-390.
- Gendreau M., Hertz A. et Laporte G. (1992) : *New insertion and postoptimization procedures for the traveling salesman problem*, Operations Research, Vol. 40, pp. 1086-1094.
- Gendreau M., Hertz A. et Laporte G. (1994) : *A tabu search heuristic for the vehicle routing problem*, Management Science, Vol. 40, pp. 1276-1290.
- Gendreau M., Laporte G., Musaraganyi C. et Taillard E.D. (1999) : *A tabu search heuristic for the heterogeneous fleet vehicle routing problem*, Computers & Operations Research, Vol. 26, pp. 1153-1173.
- Gendreau M., Laporte G. et Séguin R. (1995) : *An exact algorithm for the vehicle routing problem with stochastic customers and demands*, Transportation Science, Vol. 29, pp. 143-155.
- Gillett B.E., Miller L.R. (1974) : *A heuristic algorithm for the vehicle-dispatch problem*, Operations Research, Vol. 21, pp. 340-349.
- Glover F., Laguna M. et Martí R. (2003) : *Advances in Evolutionary Computation: Theory and Applications*. Dans: Ghosh A. et Tsutsui S. (Eds.), Springer-Verlag, New York, pp. 519-537.
- Golden B. L. et Assad A.A. (1988) : *Vehicle Routing : Methods and Studies*, North-Holland, Amsterdam.
- Golden B., Raghavan S. et Wasil E. (2008) : *The Vehicle Routing Problem : Latest Advances and New Challenges*, Springer, New York.
- Baümer C. et Magedanz T. (1999) : *Grasshopper – A Mobile Agent Platform for Active Telecommunication Networks*, Lecture Notes in Computer Science, Vol 1699, pp. 19-32.
- Gribkovskaia I., Laporte G. et Shyshou A. (2008) : *The single vehicle routing problem with deliveries and selective pickups*, Computers & Operations Research, Vol. 35, pp. 2908-2924.
- Guilbault M., Costa G., Franc P., Gouvernal E. Hémerly C. and Rizet C. (2008) : *'ECHO : Envois – Chargeurs – Opérateurs de transport'*, Synthèse INRETS No. 56.
- Gutiérrez-Jarpa G., Desaulniers G., Laporte G. et Marianov V. (2010) : *A branch-and-price algorithm for the Vehicle Routing Problem with Deliveries, Selective Pickups and Time Windows*, European Journal of Operational Research, Vol. 206, pp. 341–349.
- Gutin G., Punnen A.P. (Eds) (2002) : *The Traveling Salesman Problem and Its Variations*, Combinatorial Optimization, Kluwer Academic Publishers.

- Hackney J. et Marchal F. (2011) : *A coupled multi-agent microsimulation of social interactions and transportation behaviour*, Transportation Research Part A, vol. 45, pp. 296-309.
- Hägerstrand T. (1970) : *What about people in regional science ?*, Papers of the Regional Science Association, Vol. 24, pp. 7-21.
- Haghani A. et Jung S. (2005) : *A dynamic vehicle routing problem with time-dependent travel times*, Computers & Operations Research, Vol. 32, Issue 11, pp. 2959-2986.
- Haughton M.A. (2000) : *Quantifying the benefits of route reoptimisation under stochastic customer demands*, Journal of the Operational Research Society, Vol. 51, pp. 320-332.
- He X., Guo X. et Liu H.X. (2010) : *A link-based day-to-day traffic assignment model*, Transportation research Part B, Vol. 44, pp. 597-608.
- Hensher D.A. et Button K.J. (2000) : *Handbook of Transport Modelling*, Vol.1, Pergamon, UK
- Hernández-Pérez H. et Salazar-González J.-J. (2009) : *The multi-commodity one-to one pickup-and-delivery traveling salesman problem*, European Journal of Operational Research, Vol. 196, pp. 987–995.
- Hill A.V. et Benton W.C.(1992) : *Modeling intra-city time-dependent travel speeds for vehicle scheduling problems*, Journal of the Operations Research Society, Vol. 43, Issue 4, pp. 343–351.
- Holmgren J., Davidsson P., Persson J.A. et Ramstedt L. (2012) : *TAPAS: A multi-agent-based model for simulation of transport chains*, Simulation Modelling Practice and Theory, Vol. 23, pp. 1–18.
- Hyacinth S.N., Divine T.N., Lyndon C.L. et Jaron C.C. (1999) : *ZEUS: A Toolkit and Approach for Building Distributed Multi-Agent Systems*, Applied Artificial Intelligence, Vol. 13, pp. 129-185.
- Ichoua A., Gendreau M. et Potvin, J. Y. (2003) : *Vehicle dispatching with timedependent travel times*, European Journal of Operational Research, Vol. 144, pp. 379–396.
- Imran A., Salhi S. et Wassan N. A. (2009) : *A variable neighborhood-based heuristic for the heterogeneous fleet vehicle routing problem*, European Journal of Operational Research, Vol. 197, pp. 509–518.
- Jacobs N., Driessens K. et De Raedt L. (1998) : *Using ILP systems for verification and validation of multi agent systems*, Lecture notes in computer science, Vol. 1446, pp. 145-154
- Jaillet P. (1987) : *Stochastic routing problems*. Dans : Andreatta G., Mason F., Serafini P. (Eds) : *Stochastics in Combinatorial Optimization*, World Scientific, Singapour, pp. 197-213.
- Jaw J., Odoni A.R., Psaraftis H. et Wilson N.H.M. (1986) : *A heuristic algorithm for the multi-vehicle advance-request dial-a-ride problem with time windows*, Transportation Research part B, Vol. 20, pp. 243–257.
- Jézéquel A. (1985) : *Probabilistic vehicle routing problems*, MSc dissertation, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.
- Johnson D.B. (1973) : *A note on Dijkstra's shortest path algorithm*, Journal A.C.M., Vol. 20, no. 3, pp. 385-388.
- Jones P.M., Dix M.C., Clarke M.I. et Heggie I.G. (1983) : *Understanding travel behavior*. Aldershot : Gower.

- Jourquin B. et Limbourg S. (2006) : *Equilibrium traffic assignment on large Virtual Networks: Implementation issues and limits for multi-modal freight transport*, European Journal for Transport and Infrastructure Research, Vol. 6, no. 3, pp. 205-228.
- Jourquin B. et Limbourg S. (2007) : *Une procédure d'affectation multi-flux et multimodale appliquée aux réseaux transeuropéens de fret*, Les Cahiers Scientifiques du Transport, no. 52, pp. 9-25.
- Juran I., Prashker J.N., Bekhor S. et Ishai I. (2009) : *A dynamic traffic assignment model for the assessment of moving bottlenecks*, Transportation Research Part C, Vol. 17, pp. 240-258.
- Kamga C.N., Mouskos K.C. et Paaswell R.E. (2011) : *A methodology to estimate travel time using dynamic traffic assignment (DTA) under incident conditions*, Transportation Research Part C, doi:10.1016/j.trc.2011.02.004 (Article in press).
- Kitamura R., Pas E.I., Lula C.V., Lawton T.K. et Benson P.E. (1996) : *The sequenced activity mobility simulator (SAMS) : and integrated approach to modeling transportation, land use and air quality*, Transportation, Vol. 23, No. 3, pp. 267-291.
- Kuo Y., Wang C-C., Chuang P-Y. (2009) : *Optimizing goods assignment and the vehicle routing problem with time-dependent travel speeds*, Computers & Industrial Engineering, Vol. 57, pp. 1385–1392.
- Kuwahara M. et Akamatsu T. (2001) : *Dynamic user optimal assignment with physical queues for a many-to-many OD pattern*, Transportation Research Part B, Vol. 35, pp. 461-479.
- Kwon O.B. et Lee J.J. (2001) : *A multi-agent intelligent system for efficient ERP maintenance*, Expert System with Applications, vol. 21, pp. 191-202.
- Kytöjoki J., Nuortio T., Bräysy O. et Gendreau M. (2007) : *An efficient variable neighborhood search heuristic for very large scale vehicle routing problems*, Computers & Operations Research, Vol. 34, Issue 9, pp. 2743-2757.
- Laguna M. (2002) : Scatter Search. Dans : Pardalos P. M. et Resende M. G. C. (Eds.), Handbook of Applied Optimization, Oxford University Press, pp. 183-193.
- Land A.H. et Doig A.G.(1960):*An automatic method of solving discrete programming problems*, Econometrica, vol. 28 (3), pp. 497-520.
- Laporte G. (2009) : *Fifty years of vehicle routing problem*. Transportation science, Vol. 43, Issue 4, pp. 408-416.
- Laporte G., Gendreau M., Potvin J.-Y. et Semet F. (2000) : *Classical and modern heuristics for the vehicle routing problem*, International Transactions in Operational Research, Vol. 7, pp. 285-300.
- Laporte G. et Louveaux F.V. (1990) : *Formulations and bounds for the stochastic capacitated vehicle routing problem with uncertain supplies*. Dans : Gabzewicz J, Richard J.-F., Wolsey L. (Eds), *Economic Decision Making: Games, Econometrics and Optimisation*. North-Holland, Amsterdam, pp. 443-455.
- Laporte G. et Louveaux F.V. (1998) : *Solving stochastic routing problems with the integer L-shaped Method*. Dans : Crainic T.G., Laporte G. (Eds) : *Fleet Management and Logistics*, Kluwer Academic, Boston, pp. 159-167.
- Laporte G., Louveaux F.V. et Mercure H. (1989) : *Models and exact solutions for a class of stochastic location-routing problems*, European Journal of Operational Research, Vol. 39, pp. 71-78.
- Laporte G., Louveaux F.V. et Mercure H. (1992) : *The vehicle routing problem with stochastic travel times*, Transportation Science, Vol. 26, pp. 161-170.

- Laporte G. et Nohet Y. (1987) : *Exact algorithms for the vehicle routing problem*, Annals of Discrete Mathematics, Vol. 31, pp. 147-184.
- Larsen A. (2001) : *The Dynamic Vehicle Routing Problem*, PhD thesis, Technical University of Denmark, Denmark.
- Leclercq L. et Moutari S. (2007) : *Hybridization of a class of "second order" models of traffic flow*, Simulation Modelling Practice and Theory, vol. 15, pp. 918-934.
- Lee B.Y., Bedford V.L., Roberts M.S. et Carley K.M. (2008) : *Virtual epidemic in a virtual city: simulating the spread of influenza in a US metropolitan area*, Translational Research, vol. 151, Issue 6, pp. 275-287.
- Liao T.-Y. et Hu T.-Y. (2011) : *An object-oriented evaluation framework for dynamic vehicle routing problems under real-time information*, Expert Systems with Applications, Vol. 38, pp. 12548-12558.
- Ligtenberg A., Van Lammeren R.J.A., Bregt A.K. et Beulens A.J.M. (2010) : *Validation of an agent-based model for spatial planning : A role-playing approach*, Computers, Environment and Urban Systems, Vol. 34, pp. 424-434.
- Limbouurg (2007) : *Planification Stratégique de Systèmes de Transport de Marchandises en Europe*, PhD Thesis, Facultés Universitaires Catholiques de Mons.
- Lin S. (1965) : *Computer solutions of the travelling salesman problem*, Bell System Technical Journal, Vol. 44, pp. 2245-2269.
- Liu S., Huang W. et Ma H. (2009) : *An effective genetic algorithm for the fleet size and mix vehicle routing problems*, Transportation Research Part E, Vol. 45, pp. 434-445.
- Lo H.K. et Szeto W.Y. (2002a) : *A Cell-Based Dynamic Traffic Assignment Model: Formulation and Properties*, Mathematical and Computer Modelling, Vol. 35, pp. 849-865.
- Lo H.K. et Szeto W.Y. (2002b) : *A cell-based variational inequality formulation of the dynamic user optimal assignment problem*, Transportation Research Part B, Vol. 36, pp. 421-443.
- Louie M.A. et Carley K.M. (2008) : *Balancing the criticisms: Validating multi-agent models of social systems*, Simulation Practice and Theory, Vol. 16, pp. 242-256.
- Madsen O.B.G., Ravn H.F. et Rygaard J.M. (1995) : *A heuristic algorithm for a dial-a-ride problem with time windows, multiple capacities, and multiple objectives*, Annals of Operations Research, Vol. 60, pp. 193-208.
- Magne L., Rabut S. et Gabard J. (2000) : *Towards a hybrid macro-micro traffic flow simulation model*, Proceedings of the INFORMS Salt Lake City String 2000 Conference.
- Maiga A.S. et Jacobs F.A. (2009) : *JIT performance effects: A research note*, Advances in Accounting, incorporating Advances in International Accounting, Vol. 25, pp. 183-189.
- Malandraki C. (1989) : *Time dependent vehicle routing problems: Formulations, solution algorithms and computations experiments*, PhD Thesis, Northwestern University, Evanston, Ill.
- Malandraki C. et Daskin M.S. (1992) : *Time dependent vehicle routing problems: Formulations, properties and heuristic algorithms*, Transportation Science, Vol. 26, Issue 3, pp. 185-200.
- 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, Vol. 21, no. 1, pp. 47-60.
- MATSim development team (ed.) (2007) : *MATSim: Aims, approach and implementation*, IVT, ETH Zürich, Switzerland.

- McNally M.G. (2000) : *The Four-Step Model*. Dans : Hensher D.A. et Button K.J., *Handbook of Transport Modelling*, Vol.1, pp. 34-52, Pergamon, UK.
- McNally M.G. et Recker W.W. (1986) : *On the formation of household travel/activity patterns*, Institute of Transportation Studies, University of California, Irvine, CA, USDOT Final Report.
- Mester D. et Bräysy O. (2005) : *Active guided evolution strategies for large scale vehicle routing problem with time windows*, Computers & Operations Research, Vol. 32, pp. 1593-1614.
- Min H. (1989) : *The multiple vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up points*, Transportation Research, Vol. 23, Issue 5, pp. 377-386.
- Mitchell R. et Rapkin C. (1954) : *Urban traffic : A function of land use*. New York : Columbia University Press.
- Mosheiov G. (1998) : *Vehicle routing with pick-up and delivery: tour-partitioning heuristics*, Computers & Industrial Engineering, Vol. 34, Issue 3, pp. 669-684.
- Mole R.H. et Jameson S.R. (1976) : *A sequential route-building algorithm employing a generalized savings criterion*, Operational Research Quarterly, Vol. 27, pp. 503-511.
- Montemanni R., Gambardella L.M., Rizzoli A.E. et Donati A.V. (2005) : *Ant colony system for a dynamic vehicle routing problem*, Journal of Combinatorial Optimization, Vol. 10, Issue 4, pp. 327-343.
- Moore E.F. (1959) : *The shortest path through a maze*, Proceedings of an International Symposium on the Theory Switching, Cambridge, Harvard University Press, pp. 285-292
- Muchland J.D. (1970) : *Braess's paradox of traffic flow*, Transportation Research, Vol. 4, pp. 391-394.
- Nagata Y. et Bräysy O. (2009) : *Edge assembly-based memetic algorithm for the capacitated vehicle routing problem*, Networks, Vol. 54, Issue 4, pp. 205-215.
- Nagel K. et Flötteröd G. (2009) : *Agent-based traffic assignment: going from trips to behavioral travelers*, 12th International Conference on Travel Behaviour Research (IATBR), Jaipur.
- Nagel K. et Rickert M. (2001) : *Parallel implementation of the TRANSIMS micro-simulation*, Parallel Computing, Vol. 27, pp. 1611-1639.
- Nagy G. et Salhi S. (2005) : *Heuristic algorithms for single and multiple depot vehicle routing problems with pickups and deliveries*, European Journal of Operational Research, Vol. 162, pp. 126-141.
- Ochi L., Vianna D., Drummond L. M. A. et Victor A. (1998) : *An evolutionary hybrid metaheuristic for solving the vehicle routing problem with heterogeneous fleet*, Lecture notes in computer science, Vol. 1391, pp. 187-195.
- Oliveira E., Fisher K. et Stepankova O. (1999) : *Multi-agent systems: which research for which applications*, Robotics and Autonomous Systems, Vol. 27, pp. 91-106
- Ortúzar J.D. et Willumsen L.G. (1990) : *Modelling Transport*, John Wiley & Sons, Winchester, UK.
- Overgaard K.R. (1967) : *Urban transportation planning: traffic estimation*, Traffic Quarterly, vol.26, no. 2, pp. 197-218.
- Pape (1974) : *Implementation and efficiency of Moore-algorithms for the shortest route problem*, Mathematical Programming, Vol. 7, pp. 212-222.
- Park K. et Kim W. (2001) : *A systolic parallel simulation system for dynamic traffic assignment: SPSS-DTA*, Expert Systems with Applications, Vol. 21, pp. 217-227.

- Park S. et Sugumaran V. (2005) : *Designing multi-agent systems: A framework and application*, Expert Systems with Applications, vol. 28, pp. 259-271
- Parunak H.V.D.(2000) : *Agents in overalls: experiences and issues in the development and deployment of industrial agent-based systems*, International Journal of Cooperative Information Systems, Vol. 9, Issue 3, 209-227.
- Pavon J., Arroyo M., Hassan S. et Sansores C. (2008) : *Agent-based modelling and simulation for the analysis of social patterns*, Pattern Recognition Letters, vol. 29, pp. 1039-1048.
- Payne H. J. (1971) : *Models of freeway traffic and control*, Mathematical Models of Public Systems, Vol. 1, pp. 51-61.
- Pillac V., Gendreau M., Gu  ret C. et Medaglia A.L. (2011) : *A review of Dynamic Vehicle Routing Problems*, CIRRELT, <https://www.cirrelt.ca/DocumentsTravail/CIRRELT-2011-62.pdf>.
- Piotte J. et Jourquin B. (2010) *A disaggregated dynamic freight transport simulation*, Proceedings of the NECTAR Cluster 2 conference, Mons, Belgium.
- Piotte J. et Jourquin B. (2011a) *An agent based dynamic road freight transport demand generation*, Proceedings of the NECTAR 2011 conference, Antwerp, Belgium.
- Piotte J. et Jourquin B. (2011b) *An agent based dynamic road freight transport demand generation*, Proceedings of the BIVC-GIBET Transport Research Day 2011 conference, Namur, Belgium.
- Pisinger D. et Ropke S. (2007) : *A general heuristic for vehicle routing problems*, Computers & Operations Research, Vol. 34, Issue 8, pp. 2403-2435.
- Prashker J.N. et Bekhor S. (2000) : *Some observations on stochastic user equilibrium and system optimum of traffic assignment*, Transportation Research Part B, Vol. 34, pp. 277-291.
- Prins C. (2004) : *A simple effective evolutionary algorithm for the vehicle routing problem*, Computers & Operations Research, Vol. 31, pp. 1985-2002.
- Prins C. (2009) : *Two memetic algorithms for heterogeneous fleet routing problems*, Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol. 22, Issue 6, pp. 916-928.
- Psaraftis H. (1980) : *A dynamic-programming solution to the single vehicle many-to-many immediate request dial-a-ride problem*, Transportation Science, Vol. 14, Issue 2, pp. 130-154.
- Psaraftis H. (1983) : *An exact algorithm for the single-vehicle many-to-many dial-a-ride problem with time windows*, Transportation Science, Vol. 17, pp. 351-357.
- Psaraftis H. (2011) : *A multi-commodity, capacitated pickup and delivery problem: The single and two-vehicle cases*, European Journal of Operational Research, Vol. 215, pp. 572-580.
- Raney B. et Nagel K. (2004) : *Iterative route planning for large-scale modular transportation simulations*, Future Generation Computer Systems, Vol. 20, pp. 1101-1118.
- Recker W.W., McNally M.G. et Root G.S. (1986) : *A model of complex travel behavior : Part I – theory ; Part II – operational model*, Transportation Research part A, Vol. 20, pp. 307-330.
- Reinmann M., Doerner K., et Hartl R.F. (2004) : *D-Ants: Savings based ants divide and conquer for the vehicle routing problem*, Computers & Operations Research, Vol. 31, pp. 563-591.
- Renaud J., Boctor F. (2002) : *A sweep-based algorithm for the fleet size and mix vehicle routing problem*, European Journal of Operational Research, Vol. 140, pp. 618-628.

- Renaud J, Boctor F.F. et Laporte G. (1996) : *An improved petal heuristic for the vehicle routing problem*, Journal of Operational Research Society, Vol. 47, pp. 329-336.
- Rizzoli A, Montemanni R., Lucibello E. et Gambardella L. (2007) : *Ant colony optimization for real-world vehicle routing problems*, Swarm Intelligence, Vol. 1, pp. 135-151.
- Rochat Y. et Taillard E.D. (1995) : *Probabilistic diversification and intensification in local search for vehicle routing*, Journal of Heuristics, Vol. 1, pp. 147-167.
- Rosa A. et Maher M. (2002) : *Stochastic User Equilibrium Assignment with Multiple User Classes and Elastic Demand*, Proceedings of the 13th Mini-Euro Conference and 9th Meeting of the Euro Working Group on Transportation.
- Ryan D.M., Hjørrib C. et Glover F. (1993) : *Extensions of the petal method for vehicle routing*, Journal of Operational Research Society, Vol. 44, pp. 289-296.
- Salhi S. et Nagy G. (1999) : *A cluster insertion heuristic for single and multiple depot vehicle routing problems with backhauling*, Journal of the Operational Research Society, Vol. 50, pp. 1034-1042.
- Saqalli M., Gérard B., Biellers D. et Defourny P. (2010) : *Testing the impact of social forces on the evolution of Sahelian farming systems: A combined agent-based modeling and anthropological approach*, Ecological modelling, vol. 221, pp. 2714-2727.
- Schniederjans M.J. et Cao Q. (2000) : *A note on JIT purchasing vs. EOQ with a price discount: an expansion of inventory costs*, Int. J. Production Economics, Vol. 65, pp. 289-294.
- Secomandi N. (1998) : *Exact and heuristic dynamic programming algorithms for the vehicle routing problem with stochastic demands*, PhD thesis, Faculty of the College of Business Administration, University of Houston, TX.
- Secomandi N. (2000) : *Comparing neuro-dynamic programming algorithms for the vehicle routing problem with stochastic demands*, Computers & Operations Research, Vol. 27, pp. 1201-1225.
- Secomandi N. (2003) : *Analysis of a rollout approach to sequencing problems with stochastic routing applications*. Journal of Heuristics, Vol. 9, pp. 321-352.
- Séguin R. (1994) : *Problèmes stochastiques de tournées de véhicules*, PhD thesis, Département d'informatique et de recherche opérationnelle, Université de Montréal, Canada.
- Service Public de Wallonie : Direction générale opérationnelle, économie, emploi et recherche, (2008) : *'Entreprises'*, Région wallonne : <http://economie.wallonie.be>
- Service Public de Wallonie (2010) : *Recensement circulation 2010*, Direction générale opérationnelle des Routes et des Bâtiments du SPW.
- Service PublicFédéral Mobilité et Transports(2005) : *Recensement général de la circulation 2005*, partie IV, No.37.
- Sexton T. et Bodin L.D. (1985a) : *Optimizing single vehicle many-to-many operations with desired delivery times: I. Scheduling*, Transportation Science, Vol. 19, pp. 378-410.
- Sexton T. et Bodin L.D. (1985b) : *Optimizing single vehicle many-to-many operations with desired delivery times: II. Routing*, Transportation Science, Vol. 19, pp. 411-435.
- Sheffi Y. (1984) : *Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis With Mathematical Programming*, Prentice Hall.
- Sirikijpanichkul A., Van Dam K.H., Ferreira L. et Lukszo S. (2007) : *Optimizing the location of intermodal freight hubs: an overview of agent based modelling approach*, Journal of transportation systems engineering and information, Vol 7, pp. 71-81.
- Smock R.J. (1962) : *An iterative assignment approach to capacity restraint on arterial networks*, Highway Research Board Bulletin, vol. 159, pp. 1-13.

- Solomon M.M. (1987) : *Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints*, Operations Research, Vol. 35, No. 2., pp. 254-265.
- Stewart W.R. et Golden B.L. (1983) : *Stochastic vehicle routing: A comprehensive approach*, European Journal of Operational Research, Vol. 14, pp. 371-385.
- Subramanian A. (2010) : *Heuristic, Exact and Hybrid Approaches for Vehicle Routing Problems*, PhD thesis, Universidade Federal Fluminense, Brazil.
- Taillard E.D. (1993) : *Parallel iterative search methods for vehicle routing problems*, Networks, Vol. 23, pp. 661-673.
- Taillard E.D. (1999) : *A heuristic column generation method for heterogeneous fleet*. Operations Research - Recherche opérationnelle, Vol. 33, Issue 1, pp. 1-14.
- Taillard E.D., Badeau P., Gendreau M., Guertin F. et Potvin, J.-Y. (1997) : *A tabu search heuristic for the vehicle routing problem with soft time windows*, Transportation Science, Vol. 31, pp. 170-186.
- Tarantilis C.D. (2005) : *Solving the vehicle routing problem with adaptive memory programming methodology*, Computer & Operations Research, Vol. 32, Issue 9, pp. 2309-2327.
- Tarantilis C.D., Kiranoudis C. et Vassiliadis V. (2003) : *A list based threshold accepting metaheuristic for the heterogeneous fixed fleet vehicle routing problem*, Journal of the Operational Research Society, Vol. 54, pp. 65-71.
- Tarantilis C.D., Kiranoudis C. et Vassiliadis V. (2004) : *A threshold accepting metaheuristic for the heterogeneous fixed fleet vehicle routing problem*, Journal of Operational Research, Vol. 152, pp. 148-158.
- Thompson P.M. et Psaraftis H.N. (1993) : *Cyclic transfer algorithms for multi vehicle routing and scheduling problems*, Operation Research, Vol. 41, pp. 935-946.
- Toth P. et Vigo D. (2002) : *The Vehicle Routing Problem*, Monographs on Discrete Mathematics and Applications, SIAM, Philadelphia.
- Valbuena D., Verburg P.H., Veldkamp A., Bregt A.K. et Ligtenberg A. (2010) : *Effects of farmers' decisions on the landscape structure of a Dutch rural region: An agent-based approach*, Landscape and Urban Planning, vol. 97, pp. 98-110.
- Van Breedam A. (1994) : *An analysis of the behavior of heuristics for the vehicle routing problem for a selection of problems with vehicle-related, customer-related, and time-related constraints*, PhD thesis, University of Antwerp, Belgium.
- Van Katwijk R.T., Van Koningsbruggen P., De Schutter B. et Hellendoorn J. (2005) : *Test bed for multiagent control systems in road traffic management*, Transportation Research Record, no. 1910, pp. 108-115.
- Vickerman R.W. (2003) : *Freight traffic*. Dans : ECMT, Managing the Fundamental Drivers of Transport Demand, Proceedings of the International Seminar December 2002, Paris : OECD.
- Vural A.V. (2003) : *A GA based meta-heuristic for capacited vehicle routing problem with simultaneous pick-up and deliveries*, Master's thesis, Graduate School of Engineering and Natural Sciences, Sabanci University, Turquie.
- Wang F., Yang M. et Yang R. (2008) : *Simulation of Multi-Agent based Cybernetic Transportation System*, Simulation Modelling Practice and Theory, Vol. 16, pp. 1606-1614.
- 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.

- Wassan N. A., Wassan A. H. et Nagy G. (2008) : *A reactive tabu search algorithm for the vehicle routing problem with simultaneous pickups and deliveries*, Journal of Combinatorial Optimization, Vol. 15, Issue 4, pp. 368–386.
- Watling D. (2006) : *User equilibrium traffic network assignment with stochastic travel times and late arrival penalty*, European Journal of Operational Research, Vol. 175, pp. 1539-1556.
- Wen M., Cordeau J.F., Laporte G. et Larsen J. (2010) : *The dynamic multi-period vehicle routing problem*, Computers & Operations Research, Vol. 37, pp. 1615-1623.
- Williams H.C.W.L. (1977) : *On the formation of travel demand models and economic evaluation measures of user benefit*, Environment and Planning, Vol. 9, Part A, n°3, pp. 285-344.
- Williams H.C.W.L. (1981) : *Travel demand forecasting: an overview of theoretical developments*, Transport and Public Policy Planning, Mansell, London
- Wilson A.G. (1974) : *Urban and Regional Models in Geography and Planning*, John Wiley & Sons, London.
- Wilson N. et Colvin N. (1977) : *Computer control of the Rochester dial-a ride system*, Technical Report R77-31, Dept. of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts.
- Wisinee W., Kazushi S., Shoji M. et Pairoj R. (2007) : *Microsimulation model for modeling freight-agents interactions in urban freight movement*, Proceedings: 86th annual meeting of the Transportation Research Board, Washington (DC), Paper 07-2224.
- Wren A. (1971) : *Computer in Transport Planning and Operation*, Ian Allan, London.
- Wren A. et Holliday A. (1972) : *Computer scheduling of vehicles from one or more depots to a number of delivery points*, Operational Research Quarterly, Vol. 23, pp. 333-344.
- WSP Group (2002) : *Review of Freight Modelling Report B2 – Review of Models in Continental Europe and Elsewhere*.
- Xu J. et Kelly J.P. (1996) : *A network flow-based tabu search heuristic for the vehicle routing problem*, Transportation Science, Vol. 30, pp. 379-393.
- Yang J., Jaillet P. et Mahmassani H (2004) : *Real-time multivehicle truckload pickup and delivery problems*, Transportation Science, Vol. 38, Issue 2, pp. 135-148.
- Yang W.H., Mathur K. et Ballou R.H. (2000) : *Stochastic vehicle routing with restocking*, Transportation Science, Vol. 34, pp. 99-112.
- Zachariadis E.E. et Kiranoudis C.T. (2010) : *An open vehicle routing problem metaheuristic for examining wide solution neighborhoods*, Computers & Operations Research, Vol. 37, Issue 4, pp. 712-723.
- Zachariadis E.E., Tarantilis C.D. et Kiranoudis C.T. (2010) : *An adaptative memory methodology for the vehicle routing problem with simultaneous pick-ups and deliveries*, European Journal of Operational Research, Vol. 202, Issue 2, pp. 401-411.
- Zamparini L., Layaa J. et Dullaert W. (2011) : *Monetary values of freight transport quality attributes: A sample of Tanzanian firms*, Journal of Transport Geography, Vol. 19, pp. 1222-1234
- 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.
- Zhang C., Chen X. et Sumalee A. (2011) : *Robust Wardrop's user equilibrium assignment under stochastic demand and supply : Expected residual minimization approach*, Transportation Research Part B, Vol. 45, pp. 534-552.

- Zhu C., Jia B., Li X. et Gao Z. (2012) : *A Stochastic Mixed Traffic Equilibrium Assignment Model Considering User Preferences*, Procedia – Social and Behavioral Sciences, Vol. 43, pp. 466-474.
- Zhu S., Levinson D. et Zhang L. (2007) : *An agent-based Route Choice Model*, <http://nexus.umn.edu/papers/ARC.pdf>.

Annexes

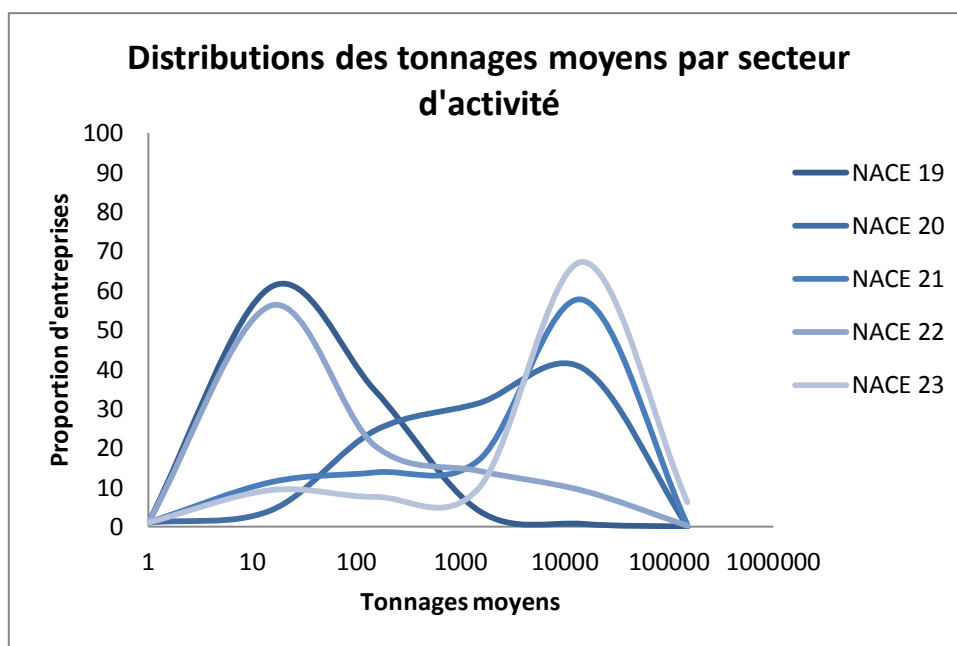
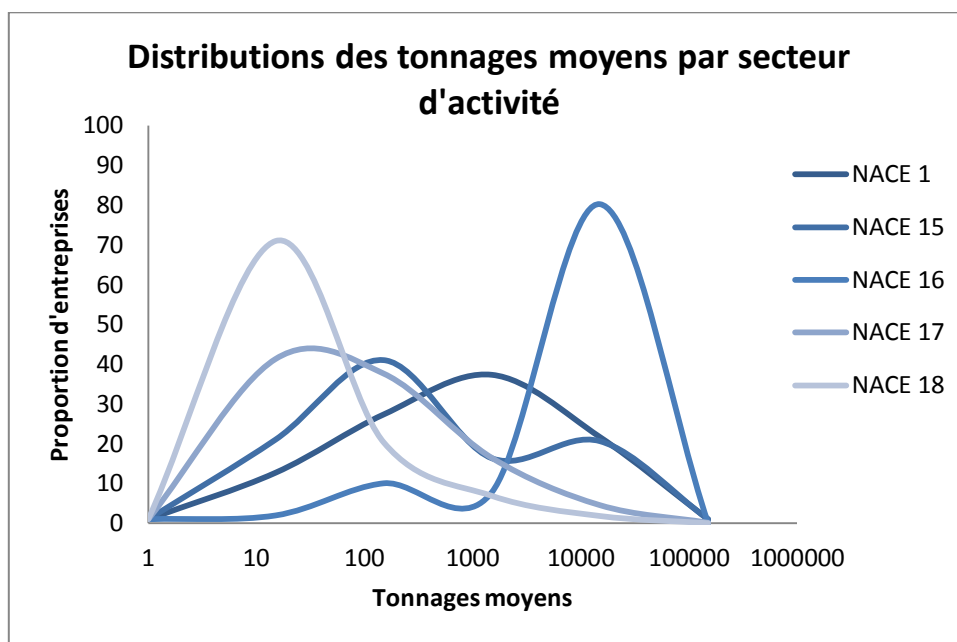
1 - Divisions NACE conservées (V) et négligées (X) dans le cas d'application de la simulation de génération de la demande

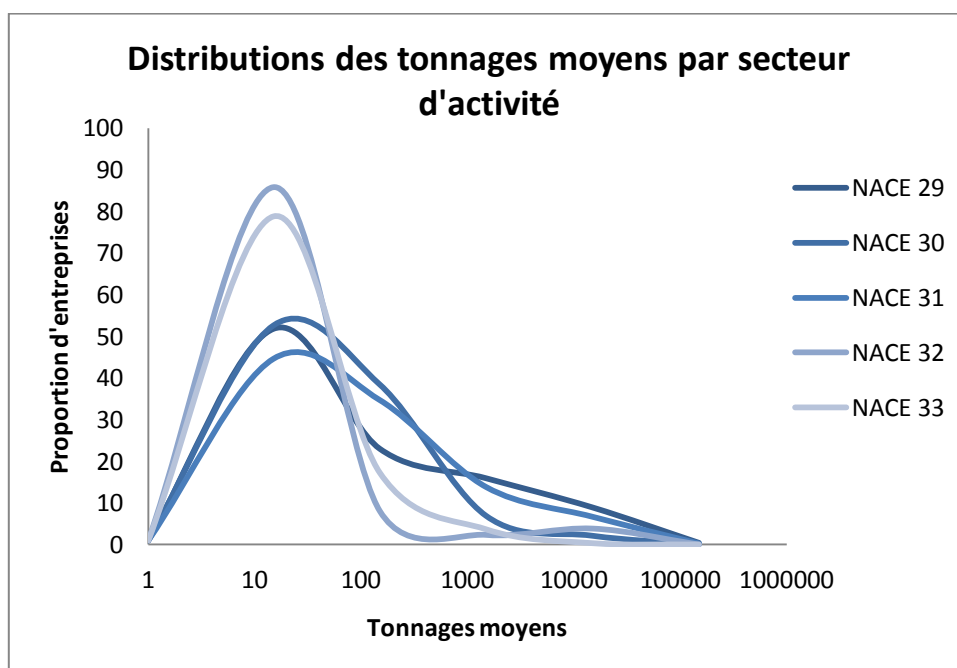
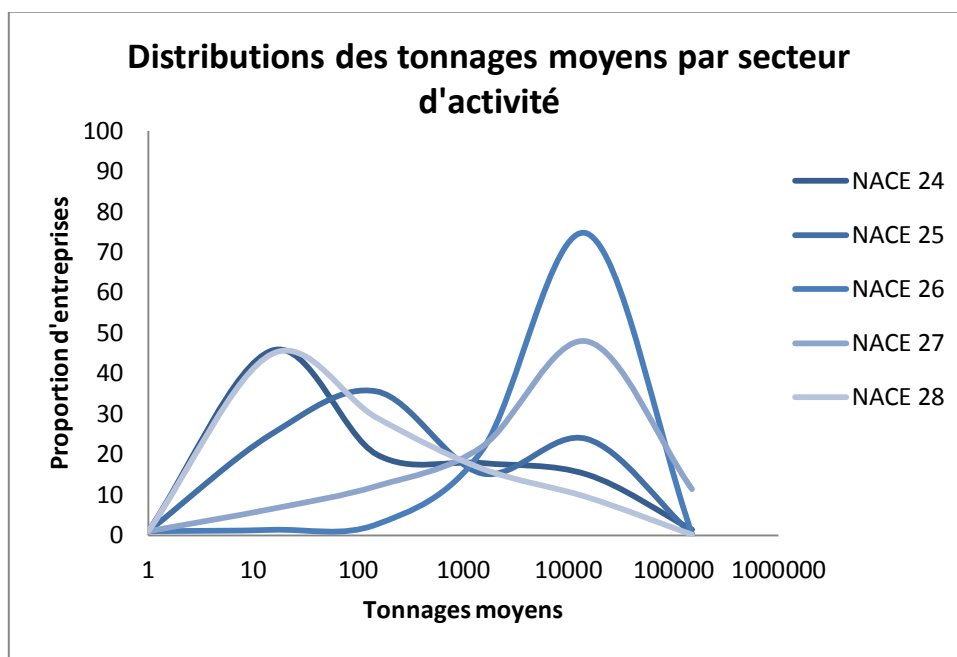
01	Culture et production animale, chasse et services annexes	V
02	Sylviculture et exploitation forestière	V
03	Pêche et aquaculture	V
05	Extraction de houille et de lignite	V
06	Extraction d'hydrocarbures	V
07	Extraction de minerais métalliques	V
08	Autres industries extractives	V
09	Services de soutien aux industries extractives	V
10	Industries alimentaires	V
11	Fabrication de boissons	V
12	Fabrication de produits à base de tabac	V
13	Fabrication de textiles	V
14	Industrie de l'habillement	V
15	Industrie du cuir et de la chaussure	V
16	Travail du bois et fabrication d'articles en bois et en liège, à l'exception des meubles; fabrication d'articles en vannerie et sparterie	V
17	Industrie du papier et du carton	V
18	Imprimerie et reproduction d'enregistrements	V
19	Cokéfaction et raffinage	V
20	Industrie chimique	V
21	Industrie pharmaceutique	V
22	Fabrication de produits en caoutchouc et en plastique	V
23	Fabrication d'autres produits minéraux non métalliques	V
24	Métallurgie	V
25	Fabrication de produits métalliques, à l'exception des machines et des équipements	V
26	Fabrication de produits informatiques, électroniques et optiques	V
27	Fabrication d'équipements électriques	V
28	Fabrication de machines et d'équipements n.c.a.	V
29	Construction et assemblage de véhicules automobiles, de remorques et de semi-remorques	V
30	Fabrication d'autres matériels de transport	V
31	Fabrication de meubles	V
32	Autres industries manufacturières	V
33	Réparation et installation de machines et d'équipements	V

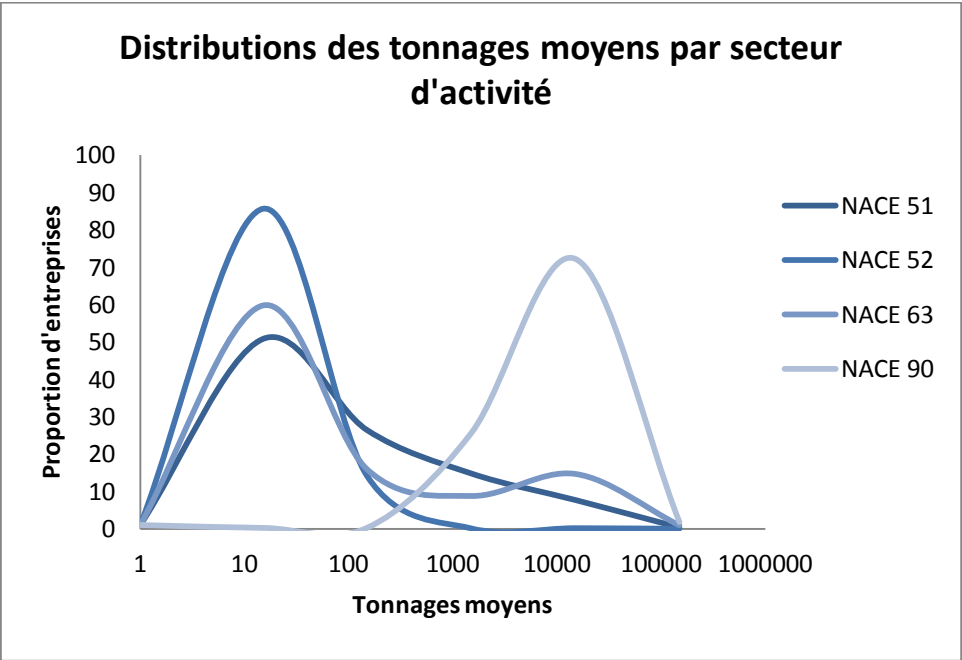
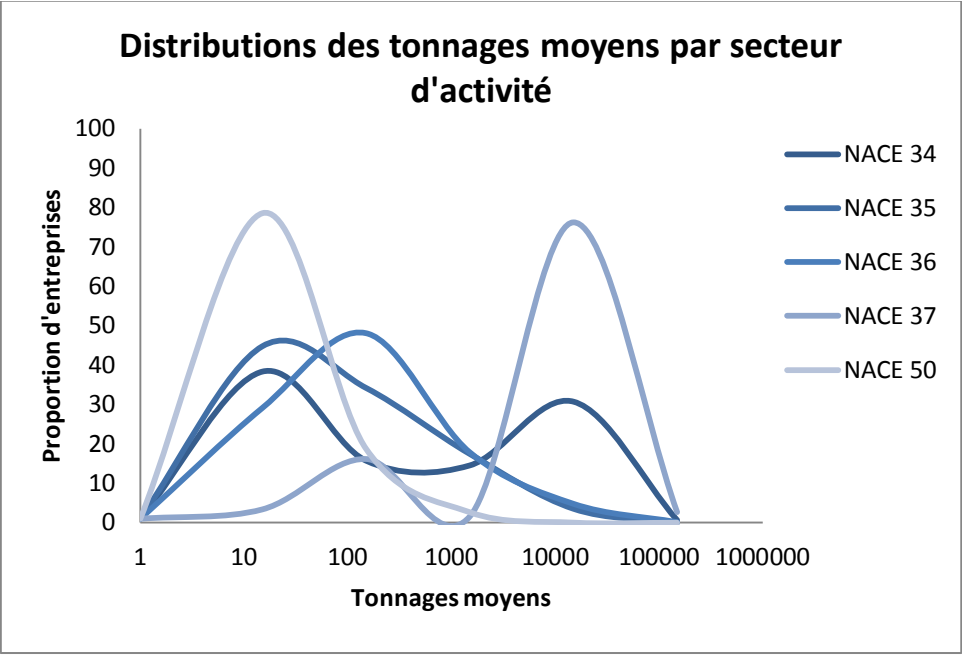
35	Production et distribution d'électricité, de gaz, de vapeur et d'air conditionné	V
36	Captage, traitement et distribution d'eau	V
37	Collecte et traitement des eaux usées	V
38	Collecte, traitement et élimination des déchets; récupération	V
39	Dépollution et autres services de gestion des déchets	V
41	Construction de bâtiments; promotion immobilière	V
42	Génie civil	V
43	Travaux de construction spécialisés	V
45	Commerce de gros et de détail et réparation véhicules automobiles et de motos	V
46	Commerce de gros, à l'exception des véhicules automobiles et des motocycles	V
47	Commerce de détail, à l'exception des véhicules automobiles et des motocycles	V
49	Transports terrestres et transport par conduites	X
50	Transports par eau	X
51	Transports aériens	X
52	Entreposage et services auxiliaires des transports	X
53	Activités de poste et de courrier	V
55	Hébergement	X
56	Restauration	V
58	Édition	V
59	Production de films cinématographiques, de vidéo et de programmes de télévision; enregistrement sonore et édition musicale	X
60	Programmation et diffusion de programmes de radio et de télévision	X
61	Télécommunications	V
62	Programmation, conseil et autres activités informatiques	X
63	Services d'information	X
64	Activités des services financiers, hors assurance et caisses de retraite	X
65	Assurance, réassurance et caisses de retraite, à l'exclusion des assurances sociales obligatoires	X
66	Activités auxiliaires de services financiers et d'assurance	X
68	Activités immobilières	X
69	Activités juridiques et comptables	X
70	Activités des sièges sociaux; conseil de gestion	X
71	Activités d'architecture et d'ingénierie; activités de contrôle et analyses techniques	X
72	Recherche-développement scientifique	X
73	Publicité et études de marché	X
74	Autres activités spécialisées, scientifiques et techniques	X
75	Activités vétérinaires	X
77	Activités de location et location-bail	X

78	Activités liées à l'emploi	X
79	Activités des agences de voyage, voyagistes, services de réservation et activités connexes	X
80	Enquêtes et sécurité	X
81	Services relatifs aux bâtiments; aménagement paysager	X
82	Services administratifs de bureau et autres activités de soutien aux entreprises	X
84	Administration publique et défense; sécurité sociale obligatoire	X
85	Enseignement	X
86	Activités pour la santé humaine	X
87	Activités médico-sociales et sociales avec hébergement	X
88	Action sociale sans hébergement	X
90	Activités créatives, artistiques et de spectacle	X
91	Bibliothèques, archives, musées et autres activités culturelles	X
92	Organisation de jeux de hasard et d'argent	X
93	Activités sportives, récréatives et de loisirs	X
94	Activités des organisations associatives	X
95	Réparation d'ordinateurs et de biens personnels et domestiques	X
96	Autres services personnels	X
97	Activités des ménages en tant qu'employeurs de personnel domestique	X
98	Activités indifférenciées des ménages en tant que producteurs de biens et services pour usage propre	X
99	Activités des organisations et organismes extraterritoriaux	X

2 – Distributions des tonnages moyens par secteur d'activités pour chacun des secteurs représenté dans l'enquête ECHO







3 – Algorithme insert&shake utilisé par les transporteurs dans la planification de leurs tournées

Type Camion : = {Double capacité}

Type Sommet : = {Double heure, Entier lieu, Double quantité, String type, Entier référenceContrat}

Type Tournée : = {Liste de Sommets tournée, Entier référence}

Fonction testCapacité(Tournée tournée) **renvoyant un objet de type** Booléen

Renvoie Vrai si la contrainte de capacité dans la tournée est respectée

Renvoie Faux sinon

Fonction indiceSommetAssocié(Sommet sommet, Tournée tournée) **renvoyant un objet de type** Entier

Si Sommet est de type origine, renvoie la position du sommet destination associé dans la tournée

Si Sommet est de type destination, renvoie la position du sommet origine associé dans la tournée

Fonction cout(Tournée tournée) **renvoyant un objet de type** Double

Renvoie le coût total de la tournée passée en argument

Renvoie -1 si l'objet tournée est vide (NULL)

Fonction taille(Liste liste) **renvoyant un objet de type** Entier

Renvoie la taille de la liste passée en argument.

Fonction insérerSommet(Tournée tournée, Sommet sommet, Entier position) **renvoyant un objet de type** Tournée

Renvoie une copie de la tournée originale dans laquelle le sommet passé en argument a été inséré à la position demandée

Cette fonction met à jour les quantités chargées ainsi que les horaires de passage du camion en chaque sommet

Fonction retirerSommet(Tournée tournée, Entier position) **renvoyant un objet de type** Tournée

Renvoie une copie de la tournée originale dans laquelle le sommet correspondant à la position passée en argument a été retiré

Cette fonction met à jour les quantités chargées ainsi que les horaires de passage du camion en chaque sommet

Fonction modifierAttributionCamions(Tournée tournée) **renvoyant un objet de type** Booléen

Cette fonction attribue, si nécessaire et si possible, un camion plus adapté à une tournée

Elle peut être utilisée lorsqu'une tournée requiert un camion de plus grand lors de l'insertion de sommets

Elle peut aussi être utilisée lorsqu'une tournée ne requiert plus autant de capacité lors de la suppression de sommets

Elle renvoie Vrai si elle a procédé à un changement, False sinon

Fonction ajouterTournée(Tournée tournée)

Cette fonction ajoute la tournée à la liste des tournées

Elle ne renvoie rien

Fonction remplacerTournée(Tournée tournéeARemplacer, Tournée nouvelleTournée)

Cette fonction remplace la première tournée passée en argument par la seconde, dans la liste des tournées

Elle ne renvoie rien

Fonction créationNouvelleTournée(Sommet origine, Sommet destination, Double heureLivraison, Double quantité) **renvoyant un objet de type** Tournée

Cette fonction crée et renvoie une tournée Dépôt-Origin-Destination-Dépôt respectant l'heure de livraison

Pré-initialisé flotteCamions **comme un objet de type** Liste **contenant des objets de type** Camions

Pré-initialisé tempsDeParcours **comme un objet de type** Matrice **contenant des objets de type** Double

Pré-initialisé localisationDepot **comme un objet de type** Entier

Pré-initialisé nPermutationsShake **comme un objet de type** Entier

Pré-initialisé duréeMaxAutorisée **comme un objet de type** Double

Pré-initialisé gamma **comme un objet de type** Double

Initialiser listeTournées **comme un objet de type** Liste **contenant des objets de type** Tournée

Fonction planificationTournées(Sommet origine, Sommet destination, Double heureLivraison, Double quantité) **renvoyant un objet de type** Booléen

Si taille(listeTournées)>0 **alors**

Initialiser tournéeOptimale **comme un objet de type** Tournée

Initialiser tournéeARemplacer **comme un objet de type** Tournée

Initialiser coutAddMin **comme un objet de type** Double

 coutAddMin:=-1

Pour i allant de 1 à taille(listeTournées)

Initialiser tournéeTemp **comme un objet de type** Tournée

 tournéeTemp := insertionOD(origine, destination, listeTournées(i), Vrai)

Si tournéeTemp != NULL **alors**

Si cout(tournéeTemp)-cout(listeTournées(i))< coutAddMin **ou** coutAddMin =-1 **alors**

 tournéeOptimale := tournéeTemp

 coutAddMin:= cout(tournéeTemp)-cout(listeTournées(i))

 tournéeARemplacer := listeTournées(i)

Fin de condition

Fin de condition

Fin de boucle

Initialiser nouvelleTournée **comme un objet de type** Tournée

Si taille(flotteCamions)>0 **alors**

 nouvelleTournée := créationNouvelleTournée(origine, destination, heureLivraison, quantité)

Fin de condition

Si nouvelleTournée != NULL **alors**

Si coutAddMin < gamma*cout(nouvelleTournée) **alors**

 remplacerTournée(tournéeARemplacer, tournéeOptimale)

Renvoyer Vrai

Sinon

 ajouterTournée(nouvelleTournée)

Renvoyer Vrai

Fin de condition

Sinon

Si tournéeOptimale !=NULL **alors**

 remplacerTournée(tournéeARemplacer, tournéeOptimale)

Renvoyer Vrai

Sinon

Renvoyer Faux

Fin de condition

Fin de condition

Sinon

Si taille(flotteCamions)>0 **alors**

Initialiser nouvelleTournée **comme un objet de type** Tournée

 nouvelleTournée := créationNouvelleTournée(origine, destination, heureLivraison, quantité)

Si nouvelleTournée != NULL **alors**

 ajouterTournée(nouvelleTournée)

Renvoyer Vrai

Sinon

Renvoyer Faux

Fin de condition

Sinon

Renvoyer Faux

Fin de condition

Fin de fonction

Fonction insertionOD(Sommet origine, Sommet destination, Tournée tournée, Booléen shakePossible)
renvoyant un objet de type Tournée

Initialiser tournéeOptimale **comme un objet de type** Tournée

Initialiser coutAddMin **comme un objet de type** Double

coutAddMin:= -1

Pour i allant de 2 à taille(tournée)-1

Pour j allant de i+1 à taille(tournée)-1

Initialiser tournéeTemp **comme un objet de type** Tournée

tournéeTemp := insérerSommet(tournée, origine, i)

tournéeTemp := insérerSommet(tournéeTemp, sommet, j)

Si cout(tournéeTemp)-cout(tournée)< coutAddMin **ou** coutAddMin =-1 **alors**

coutAddMin:= cout(tournéeTemp)-cout(tournée)

tournéeOptimale := tournéeTemp

Fin de condition

Fin de boucle

Fin de boucle

Si durée(tournéeOptimale)>duréeMaxAutorisée **et** shakePossible **alors**

shake(tournéeOptimale)

Fin de condition

Si durée(tournéeOptimale)>duréeMaxAutorisée **alors**

Renvoyer NULL

Sinon

Si testCapacité(tournéeOptimale) **alors**

Renvoyer tournéeOptimale

Sinon

Si(modifierAttributionCamion(tournéeOptimale)) **alors**

Renvoyer tournéeOptimale

Sinon

Renvoyer NULL

Fin de condition

Fin de condition

Fin de condition

Fin de fonction

Fonction shake(tournée)

Pour i allant de 1 à nPermutationsShake

Initialiser random **comme un objet de type** Entier

random := nombreAléatoire $\in \{0,1\}$

Si random=0 **alors**

shakeIntraTournée(tournée)

Sinon

shakeInterTournée(tournée)

Fin de condition

Fin de boucle

Fin de fonction

Fonction shakeIntraTournée(Tournée tournée) **renvoyant un objet de type** Tournée

Initialiser random **comme un objet de type** Entier
random : = nombreAléatoire $\in \{2, \dots, \text{taille}(\text{tournée}) - 1\}$

Initialiser sommet **comme un objet de type** Sommet
sommet : = tournée(random)

Initialiser jBorne **comme un objet de type** Entier
jBorne : = indiceSommetAssocié(sommet, tournée)
tournée : = retirerSommet(tournée, random)

Initialiser tournéeOptimale **comme un objet de type** Tournée

Initialiser coutMin **comme un objet de type** Double
coutMin : = -1

Si sommet.type= 'origine' **alors**

Pour j allant de 2 à jBorne

Initialiser tournéeTemp **comme un objet de type** Tournée
tournéeTemp : = insérerSommet(tournée, sommet, j)

Si durée(tournéeTemp) < duréeMaxAutorisée **et** (coutMin = -1 **ou** cout(tournéeTemp) < coutMin) **alors**

Si testCapacité(tournéeTemp) **alors**
tournéeOptimale : = tournéeTemp

Sinon
 Si (modifierAttributionCamion(tournéeTemp)) **alors**
tournéeOptimale : = tournéeTemp

Fin de condition

Fin de condition

Fin de boucle

Sinon

Pour j allant de jBorne à taille(tournée)-1

Initialiser tournéeTemp **comme un objet de type** Tournée
tournéeTemp : = insérerSommet(tournée, sommet, j)

Si durée(tournéeTemp) < duréeMaxAutorisée **et** (coutMin = -1 **ou** cout(tournéeTemp) < coutMin) **alors**

Si testCapacité(tournéeTemp) **alors**
tournéeOptimale : = tournéeTemp

Sinon
 Si (modifierAttributionCamion(tournéeTemp)) **alors**
tournéeOptimale : = tournéeTemp

Fin de condition

Fin de condition

Fin de boucle

Fin de condition

Renvoyer tournéeOptimale

Fin de fonction

Fonction shakeInterTournée(Tournée tournée) **renvoyant un objet de type** Booléen

Initialiser random **comme un objet de type** Entier
random:=1

Tant que tournée(random).type != 'origine'
 random := nombreAléatoire $\in \{2, \dots, \text{taille}(\text{tournée})-1\}$

Fin de boucle

Initialiser origine **comme un objet de type** Sommet
origine := tournée(random)

Initialiser destination **comme un objet de type** Sommet
destination:= tournée(indiceSommetAssocié(origine,tournée))
tournée := retirerSommet(tournée,random)
tournée := retirerSommet(tournée, indiceSommetAssocié(sommet,tournée))
modifierAttributionCamions(tournée)

Initialiser tournéeOptimale **comme un objet de type** Tournée

Initialiser coutAddMin **comme un objet de type** Double
coutAddMin:=-1

Initialiser indiceTournéeAREmplacer **comme un objet de type** Entier

Pour i **allant de** 1 **à** taille(listeTournées)
 Initialiser tournéeTemp **comme un objet de type** Tournée
 tournéeTemp := insertionOD(origine , destination, listeTournées(i),Faux)

Si tournéeTemp != NULL **alors**
 Si cout(tournéeTemp)-cout(listeTournées(i))< coutAddMin **ou** coutAddMin =-1 **alors**
 coutAddMin:=cout(tournéeTemp)-cout(listeTournées(i))
 tournéeOptimale := tournéeTemp
 indiceTournéeAREmplacer := i

Fin de condition

Fin de condition

Fin de boucle

remplacerTournée(listeTournées(indiceTournéeAREmplacer),tournéeOptimale)

Si tournéeOptimale.référence=tournée.référence **alors**
 Renvoyer Faux

Sinon
 Renvoyer Vrai

Fin de condition

Fin de fonction

Louvain School of Management

Doctoral Thesis



Modélisation des flux routiers de marchandises, de la génération de la demande par une approche multi-agents à l'affectation temporelle

Jérémie PIOTTE

Cette thèse a pour but de proposer un modèle de simulation visant à générer la demande de transport de marchandises sur un réseau routier. Celui-ci est basé sur le paradigme des systèmes multi-agents, ce qui permet de mettre l'accent sur l'évolution temporelle des flux ainsi que sur leur origine. Ce modèle est ensuite illustré à travers un cas pratique concernant la région Wallonne. Finalement, la demande générée dans la simulation est affectée sur le réseau routier Wallon. Le modèle d'affectation doit pouvoir tenir compte de l'aspect temporel de la demande de transport mais aussi être applicable sur des réseaux relativement importants. Il est donc à la frontière entre deux familles de modèles d'affectations : les méthodes d'affectation statiques et les méthodes dynamiques.

Jérémie Piotte est né à La Louvière, le 21 avril 1986. Il a obtenu le diplôme de licencié en Sciences Physiques à l' Université Mons-Hainaut en juin 2007.