

UNIVERSITÉ 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. Laurent TASKIN (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)

Novembre 2012

Table des matières

Abréviations	3
Liste des figures	4
Liste des tableaux	6
I. Introduction.....	8
II. Modèle de génération de la demande - Revue de littérature...	12
II.1. Modèles de génération classiques	12
II.2. Systèmes multi-agents	17
II.3. Les problèmes de tournées	26
III. Modèle de génération de la demande	42
III.1. Méthodologie.....	42
III.2. Modélisation de la demande.....	46
III.3. Modélisation de l'offre.....	56
III.3.a. Transport pour compte propre	60
III.3.b. Fonctions de coûts temporelles	64
III.3.c. Intégration des tournées.....	68
III.4. Conclusion	83
IV. Affectation – Revue de littérature des modèles existants	88
V. Affectation – Algorithme semi-dynamique	99
VI. Validation	110
VII. Conclusion, limites de la recherche et perspectives	121
Bibliographie	125
Annexes	140

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 24. 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.

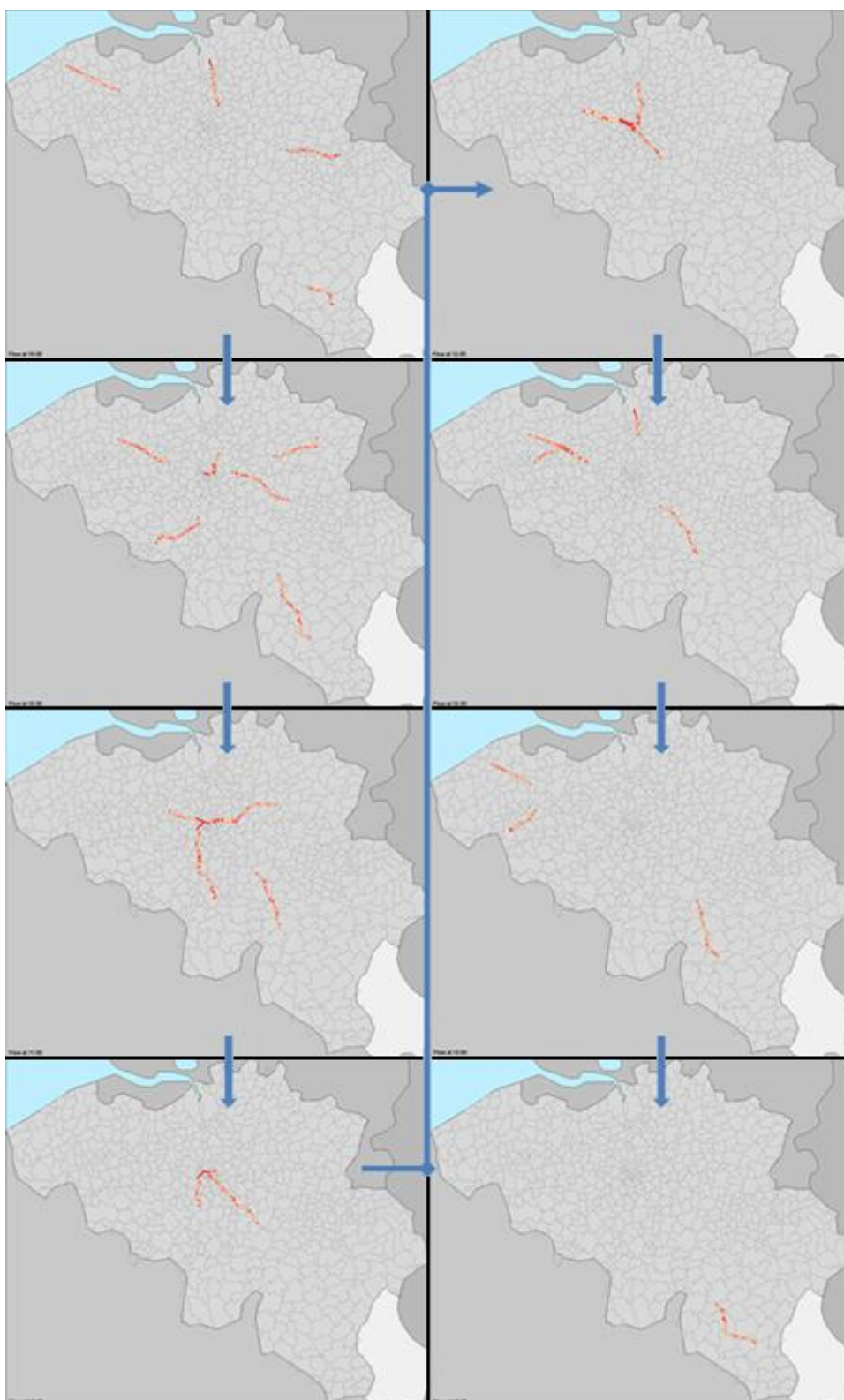


Figure 24 : Affection ToR-t, exemple

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 25. 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.

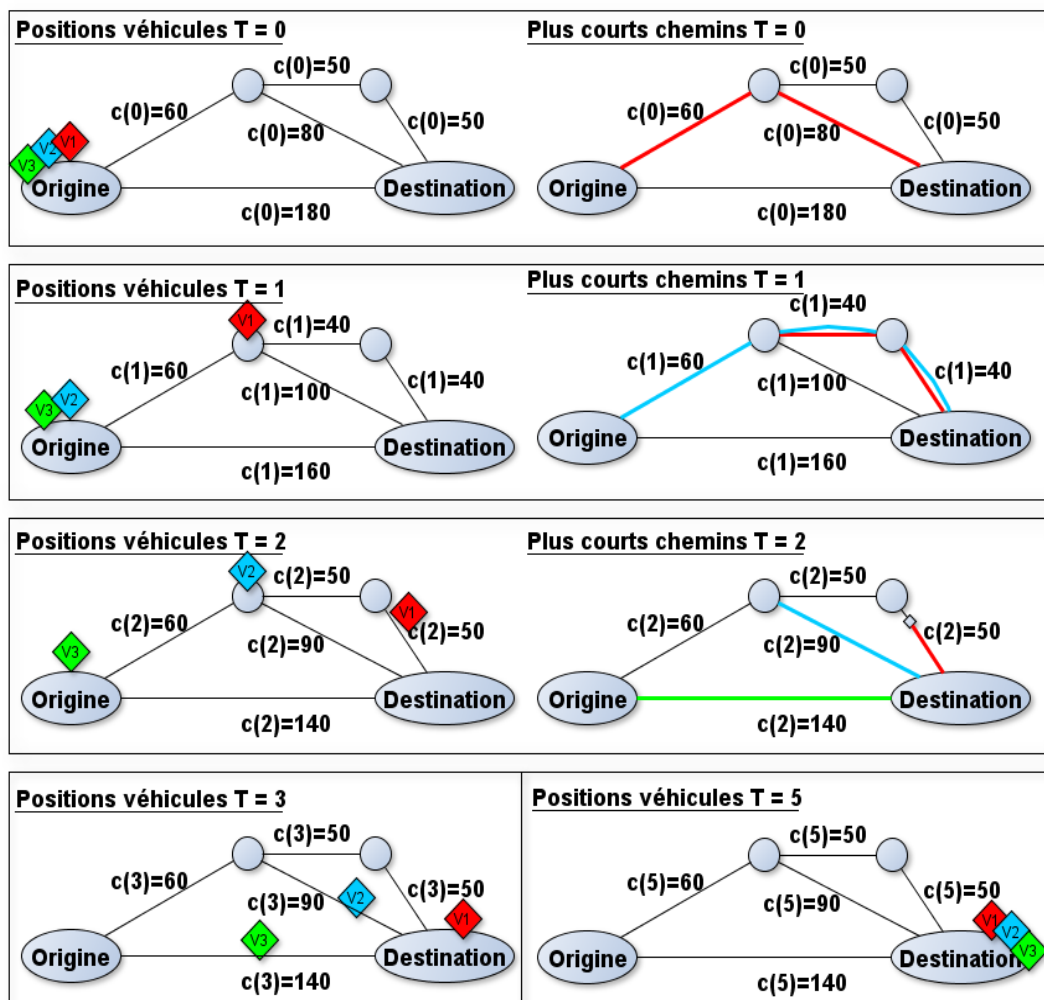


Figure 25 : Exemple d'évolution des positions de véhicules sur un réseau dont les coûts varient au fil des périodes

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 stricte 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-agrégier 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).

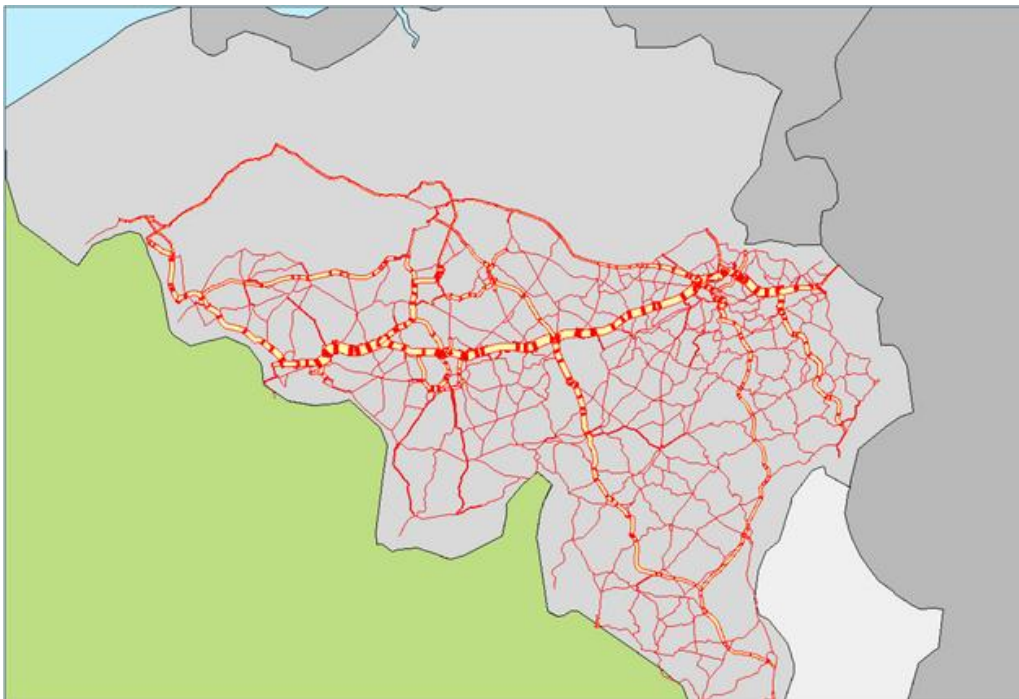


Figure 26 : Affectation ToR-t de la matrice OD(t)

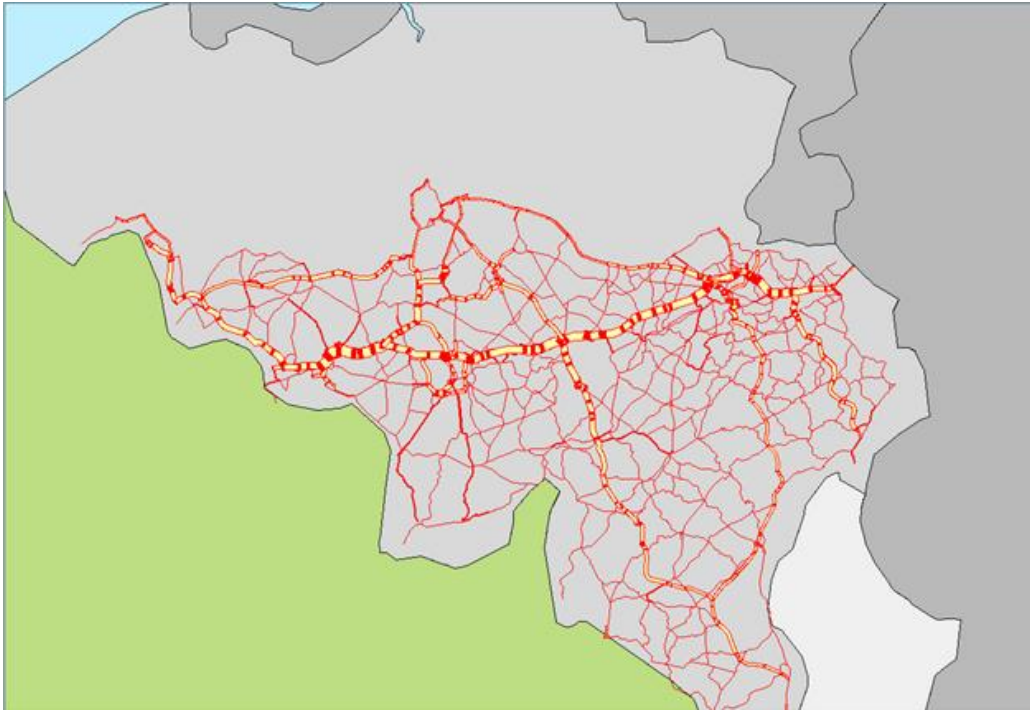


Figure 27 : Affectation SD-fct de la matrice OD(t)

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.

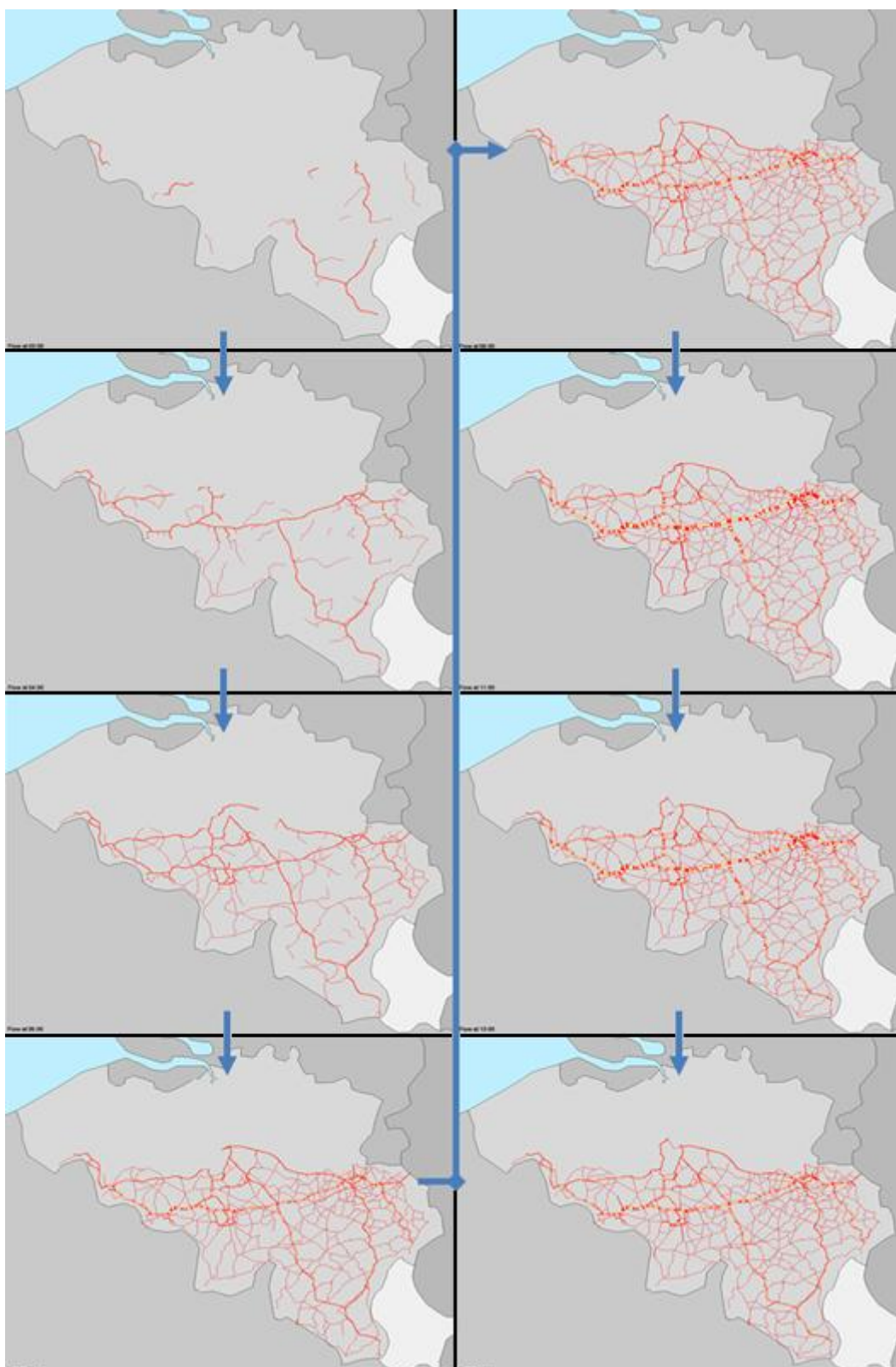


Figure 28 : Affectation SD-fct de la matrice OD(t) période
par période (1)

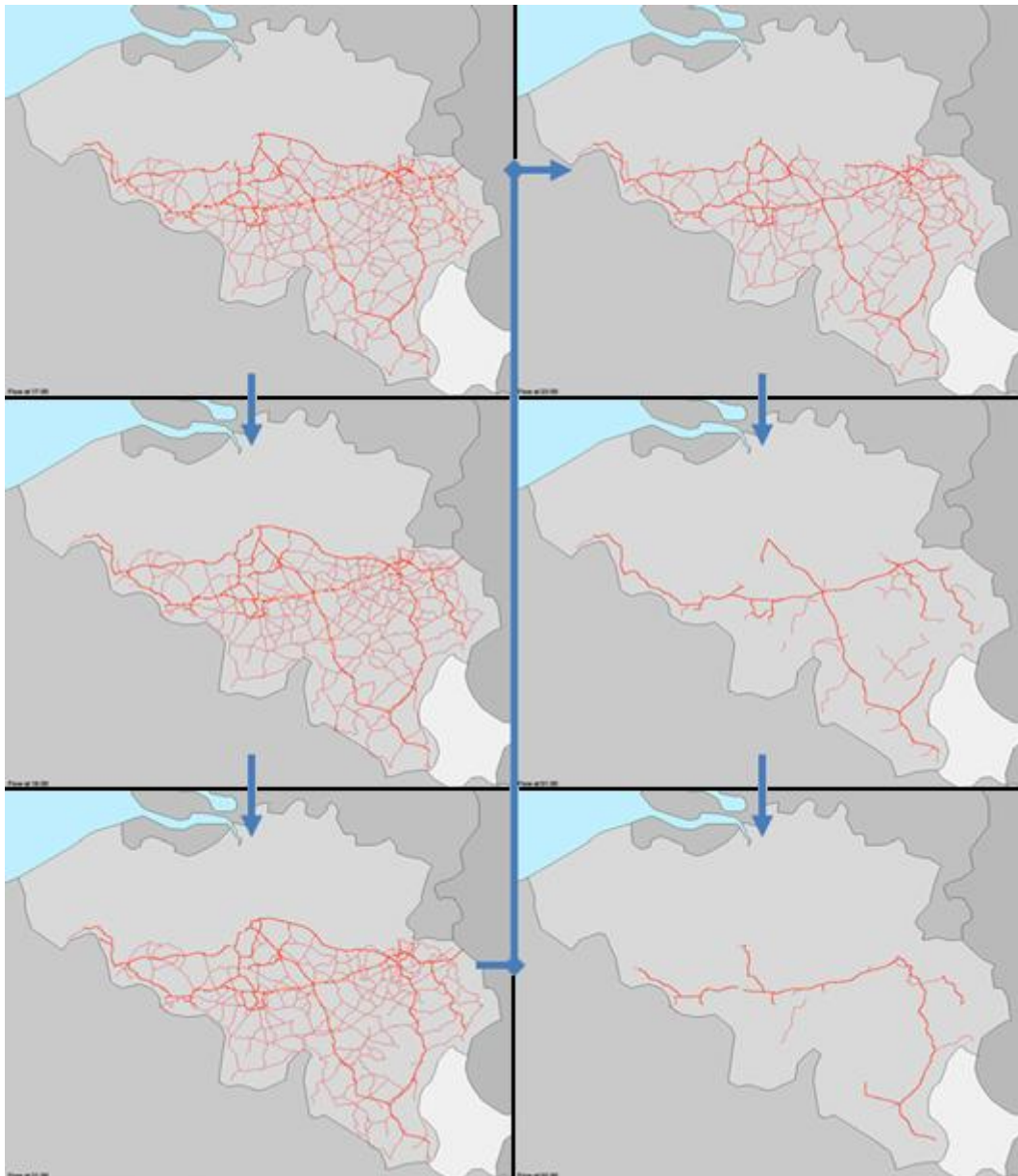


Figure 29 : Affectation SD-fct de la matrice OD(t) période
par période (2)