

---

# NAVETTES A MOTO : ANALYSE D'INCIDENCE

Rapport final pour le compte de :

**Febiac asbl**

Bd de la Woluwe 46, bte 6

1200 BRUXELLES

21 septembre 2011

---



**TRANSPORT & MOBILITY LEUVEN**

DIESTSESTEENWEG 57

3010 KESSEL-LO (LEUVEN)

BELGIQUE

+32 (16) 31.77.30

<http://www.tmleuven.be>

*N° du rapport :*

10.69

*Auteur :*

I. Yperman (TML)



# Table des matières

<b>TABLE DES MATIERES .....</b>	<b>3</b>
<b>TABLEAUX .....</b>	<b>4</b>
<b>FIGURES .....</b>	<b>5</b>
<b>1 INTRODUCTION.....</b>	<b>6</b>
<b>2 EFFET SUR LA CIRCULATION ET LES ENCOMBREMENTS.....</b>	<b>7</b>
2.1 ÉTUDE DE CAS LOUVAIN-BRUXELLES .....	7
2.1.1 <i>Scénario de référence</i> .....	7
2.1.2 <i>Scénario avec transition modale</i> .....	19
2.1.3 <i>Effet de la transition modale sur l'écoulement du trafic</i> .....	27
2.2 EFFET GLOBAL SUR LE RESEAU PRINCIPAL.....	29
2.2.1 <i>Étude de cas : scénario de transition modale avec effet d'aspiration</i> .....	30
2.2.2 <i>Heures perdues dans les véhicules et bénéfices dans l'ensemble du réseau principal</i> .....	32
2.3 EFFET GLOBAL SUR LE RESEAU ROUTIER SECONDAIRE .....	32
<b>3 EFFET SUR LES EMISSIONS.....</b>	<b>34</b>
3.1 ÉMISSIONS DES MOTOS ET DES VOITURES PARTICULIERES .....	34
3.1.1 <i>Facteurs d'émission</i> .....	34
3.1.2 <i>Coût externe des émissions</i> .....	37
3.2 ÉTUDE DE CAS LOUVAIN-BRUXELLES : LES COÛTS DES EMISSIONS .....	39
<b>4 CONCLUSIONS .....</b>	<b>43</b>
4.1 EFFET SUR L'ÉCOULEMENT DU TRAFIC ET LES ENCOMBREMENTS .....	43
4.1.1 <i>Étude de cas Louvain-Bruxelles</i> .....	43
4.1.2 <i>Effet global sur le réseau principal</i> .....	43
4.1.3 <i>Effet global sur le réseau routier secondaire</i> .....	44
4.2 EFFET SUR LES EMISSIONS.....	44
<b>REFERENCES .....</b>	<b>45</b>
<b>ANNEXE A : DESCRIPTION DU LINK TRANSMISSION MODEL.....</b>	<b>47</b>

## Tableaux

*Tableau 1 : Valorisation des émissions 2010 en €/kg (CO2 en €/tonnes), valeurs en euros 2009 (source : De Nocker et al. (2010))*

38

## Figures

Figure 1 : La zone géographique de l'étude, entre Louvain et Bruxelles	7
Figure 2 : Implantation des détecteurs chargés du comptage dans la zone étudiée	8
Figure 3 : Intensités et vitesses de la circulation à Sterrebeek, direction Bruxelles, le mardi 18 mai 2010.	9
Figure 4 : Observations sur le R0 Zaventem : diagramme intensité-vitesse	11
Figure 5 : Observations sur le R0 Zaventem : diagramme densité-intensité	11
Figure 6 : Intensité sur l'autoroute à Sterrebeek en direction de Bruxelles (mesurée et simulée)	12
Figure 7 : Vitesse sur l'autoroute à Sterrebeek en direction de Bruxelles (mesurée et simulée)	13
Figure 8 : Développement des files à l'heure de pointe matinale dans le scénario de référence	17
Figure 9 : Durée du parcours sur l'E40 entre Louvain et Sint-Stevens-Woluwe, durant l'heure de pointe matinale, dans le scénario de référence	18
Figure 10 : Evp de la moto en fonction de la densité du trafic	20
Figure 11 : développement des files à l'heure de pointe matinale avec transition modale	26
Figure 12 : Durée du parcours sur l'E40 entre Louvain et Sint-Stevens-Woluwe, durant l'heure de pointe matinale, dans le scénario de transition modale	26
Figure 13 : Temps de parcours sur l'E40 entre Louvain et Sint-Stevens-Woluwe, à l'heure de pointe matinale, dans le scénario de référence et dans le scénario de transition modale	28
Figure 14 : Temps de parcours sur l'E40 entre Louvain et Sint-Stevens-Woluwe, à l'heure de pointe matinale, dans le scénario de référence et dans les scénarios de transition modale	29
Figure 15 : Temps de parcours sur l'E40 entre Louvain et Sint-Stevens-Woluwe, aux heures de pointe matinales, dans le scénario avec transition modale et effet d'aspiration, comparé aux autres scénarios	31
Figure 16 : Facteurs d'émission des motos et voitures sur autoroutes, en fonction de la vitesse moyenne	36
Figure 17 : Facteurs d'émission des différents polluants pour la moto et la voiture	37
Figure 18 : Coûts externes des émissions des motos et voitures en fonction de la vitesse moyenne	38
Figure 19 : Coûts externes des émissions de polluants des motos et voitures	39
Figure 20 : Coûts externes des émissions de toutes les catégories de véhicules, sur autoroute, en fonction de la vitesse moyenne	40
Figure 21 : Coût total des émissions par catégorie de véhicules sur le parcours Louvain-Bruxelles à l'heure de pointe matinale	41
Figure 22 : Coûts totaux des émissions par polluant sur le parcours Louvain-Bruxelles à l'heure de pointe matinale	42

# 1 Introduction

La lutte contre les encombrements et contre la pollution due à la circulation routière constitue un défi important sur le plan de notre mobilité.

Dans cette étude, nous allons tenter de savoir si le recours à la moto dans les navettes peut contribuer à la solution : la transition modale de la voiture particulière à la moto influencera-t-elle favorablement la fluidité du trafic et limitera-t-elle les embouteillages ? Nous étudierons aussi l'impact de cette transition modale sur les émissions des véhicules et sur la qualité de l'air.

En ce qui concerne la structure du rapport. Le chapitre 2 examine l'influence d'un changement de mode – de la voiture à la moto – sur la circulation et les encombrements. L'effet sur les émissions est décrit au chapitre 3. Le chapitre 4, enfin, récapitule les principales conclusions.

## 2 Effet sur la circulation et les encombrements

Dans ce chapitre, nous allons étudier l'effet qu'exercerait sur la circulation une transition modale de la voiture à la moto dans le trafic des navetteurs. Les deux-roues prenant moins de place sur la chaussée, on peut supposer que si des navetteurs en plus grand nombre délaissent leur voiture pour se rendre au travail à moto, la fluidité du trafic s'en ressentira positivement.

L'incidence sur la circulation est étudiée à l'aide d'un cas qui simule avec précision le trafic sur l'autoroute Louvain-Bruxelles (cf. section 2.1), d'abord dans un scénario de référence, ensuite dans une situation de transition modale entre la voiture particulière et la moto. À la section 2.2, nous considérons l'effet de la même transition modale sur l'ensemble du réseau principal belge. La section 2.3, enfin, évoque l'impact global sur l'infrastructure routière.

### 2.1 Étude de cas Louvain-Bruxelles

Le cas considéré est celui de la circulation sur le tronçon d'autoroute Louvain-Bruxelles, dans les conditions typiques de l'heure de pointe matinale. La Figure 1 représente le territoire géographique concerné : l'autoroute E40 entre Louvain et Bruxelles, avec à l'est la jonction entre l'E314 et l'E40 (à Louvain), et à l'ouest la jonction de l'E40 avec le ring R0 de Bruxelles (à Sint-Stevens-Woluwe).

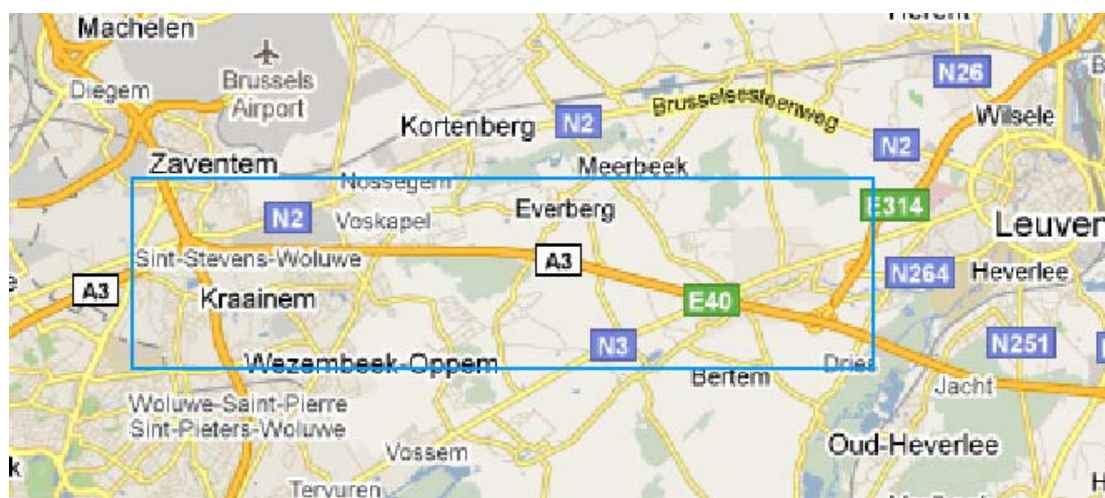


Figure 1 : La zone géographique de l'étude, entre Louvain et Bruxelles

Au premier stade, nous construisons le scénario de référence, qui décrit le trafic actuel (section 2.1.1). Ensuite, nous considérons un scénario dans lequel les navetteurs accomplissent la transition modale de la voiture à la moto (section 2.1.2). En comparant les deux situations, nous pourrions connaître l'effet du changement de moyen de transport sur la fluidité de la circulation (section 2.1.3).

#### 2.1.1 Scénario de référence

Le scénario de référence reflète la circulation actuelle. Avec l'aide de modèles de trafic routier, l'étude réalise des simulations réalistes des flux de véhicules dans la région considérée.

### 2.1.1.1 *Modèle de trafic routier*

Le modèle que nous utilisons, intitulé Link Transmission Model (LTM), a été mis au point à la KULeuven (Yperman (2007)). Le LTM simule avec réalisme les flux de véhicules sur les réseaux routiers. Ce modèle dynamique retrace l'évolution du trafic suivant des intervalles de temps paramétrables (p.ex. 5 minutes). Le processus de constitution et de disparition des embouteillages est modélisé en détail. Il s'agit d'un modèle de pointe qui se prête très bien à la simulation des files et à leur propagation dans les grands réseaux routiers. On trouvera à l'annexe A une description détaillée du modèle et de son fonctionnement.

Le modèle de trafic est alimenté par une demande de trafic et un réseau routier. Une fois ces éléments introduits, le modèle calcule comment les flux de véhicules se déplacent dans le réseau. Il produit ensuite une représentation graphique des intensités, vitesses et densités de la circulation au fil du temps, dans les différentes parties du réseau. La naissance et le développement des encombrements sont visualisés dans un film. L'évolution de la durée des déplacements dans le temps fait aussi partie des résultats du modèle.

### 2.1.1.2 *Demande de trafic*

On définit une demande de trafic pour alimenter le modèle. Dans le cas qui nous occupe, la demande de trafic est tirée des comptages de véhicules fournis par le Vlaams Verkeerscentrum. Nous disposons de comptages effectués en 7 endroits de la zone étudiée ; les chiffres sont recueillis en continu par des détecteurs installés dans le réseau routier. Ces endroits se situent à hauteur du complexe d'entrées et sorties de Louvain (E314), Haasrode (E40), Bertem (E40), Sterrebeek (E40), Kraainem (E40), Wezembeek-Oppem (R0) et Zaventem (R0).

La Figure 2 répertorie les 7 points d'acquisition de données de comptage :



**Figure 2 : Implantation des détecteurs chargés du comptage dans la zone étudiée**

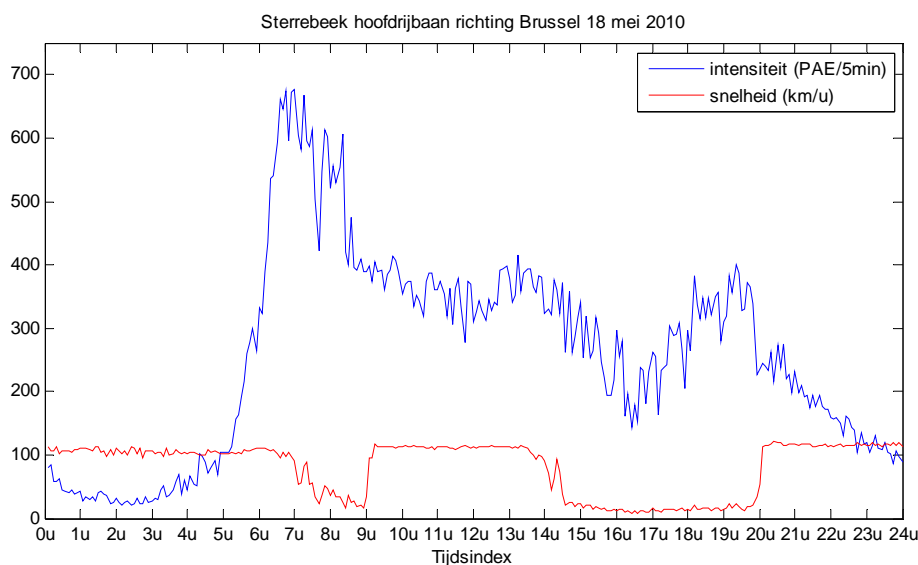
À chaque emplacement, 6 comptages sont disponibles : à l'entrée de l'autoroute, à la sortie et sur la chaussée entre l'entrée et la sortie, le tout dans les deux sens.



Les données de ces points de comptage nous ont été communiquées par le Vlaams Verkeerscentrum pour tout le mois de mai 2011, par tranches de 5 minutes. Pour Bertem, les statistiques de mai 2011 n'étaient pas disponibles ; nous avons donc utilisé les chiffres de mai 2010.

Pour reproduire les conditions d'une 'heure de pointe matinale typique', on a sélectionné le matin du jeudi 12 mai 2011. Ce jour-là, le volume total du trafic à l'heure de pointe matinale est égal à la médiane du volume de trafic à l'heure de pointe matinale de tous les jours ouvrables de mai 2011. L'heure de pointe matinale du 12 mai 2011 est considérée comme représentative d'une pointe matinale typique. À Bertem et à Sterrebeek, ce sont les données du mardi 18 mai 2010 qui ont été retenues à cet effet. À cette date, le volume de trafic à l'heure de pointe matinale à Sterrebeek correspond à peu près à celui du jeudi 12 mai 2011.

La Figure 3 illustre les intensités et vitesses mesurées à Sterrebeek, sur l'autoroute, en direction de Bruxelles, le mardi 18 mai 2010. La courbe bleue représente l'évolution de l'intensité (équivalent voiture particulière/5min) au fil de la journée ; la courbe rouge reflète la vitesse de la circulation (km/h).



**Figure 3 : Intensités et vitesses de la circulation à Sterrebeek, direction Bruxelles, le mardi 18 mai 2010.**

Entre 5h et 7h, on constate une forte augmentation de l'intensité du trafic. Vers 6h45, une file se forme, caractérisée par une vitesse réduite du flux de véhicules. La file subsiste jusqu'à 9h environ. Dans la suite de cette étude, la période de 6h30 à 9h30 sera considérée comme l'heure de pointe matinale.

Notons l'incident qui s'est produit le 18 mai 2010 vers 14h. Jusqu'à 20h environ, les intensités sont faibles et les vitesses très basses. Un jour 'normal', après midi, on ne relève plus d'encombres structurels à Sterrebeek en direction de Bruxelles.

Sur la base des recensements du 12 mai 2011 et du 18 mai 2010 aux divers points de comptage, on crée des matrices origine-destination pour chaque intervalle de 5 minutes entre 6h30 et 9h30. Par intervalle de temps, les matrices représentent le nombre de déplacements effectués entre les différentes origines et destinations. La demande de trafic est introduite dans le modèle sous la forme de matrices Origine-Destination. Les matrices sont élaborées suivant une méthode d'estimation 'OD' développée à la KULeuven (Frederix et al. (2010)).

Les comptages de véhicules renseignent aussi sur la composition des flux de trafic. En moyenne, dans la région étudiée et durant l'heure de pointe matinale, nous avons :

- 83,4% de véhicules de moins de 4,9 m de long (voitures particulières et motos)
- 7,5% de véhicules de 4,9 m à 6,9 m de long (camionnettes)
- 9,1% de véhicules de plus de 6,9 m de long (camions et autobus)

Nous pouvons subdiviser la première catégorie en voitures et motos suivant le rapport des véhicules-kilomètres parcourus sur le réseau principal belge. Nous nous basons pour cela sur les chiffres du Bureau fédéral du Plan (Bureau fédéral du Plan (2009)). La composition qui en résulte est la suivante :

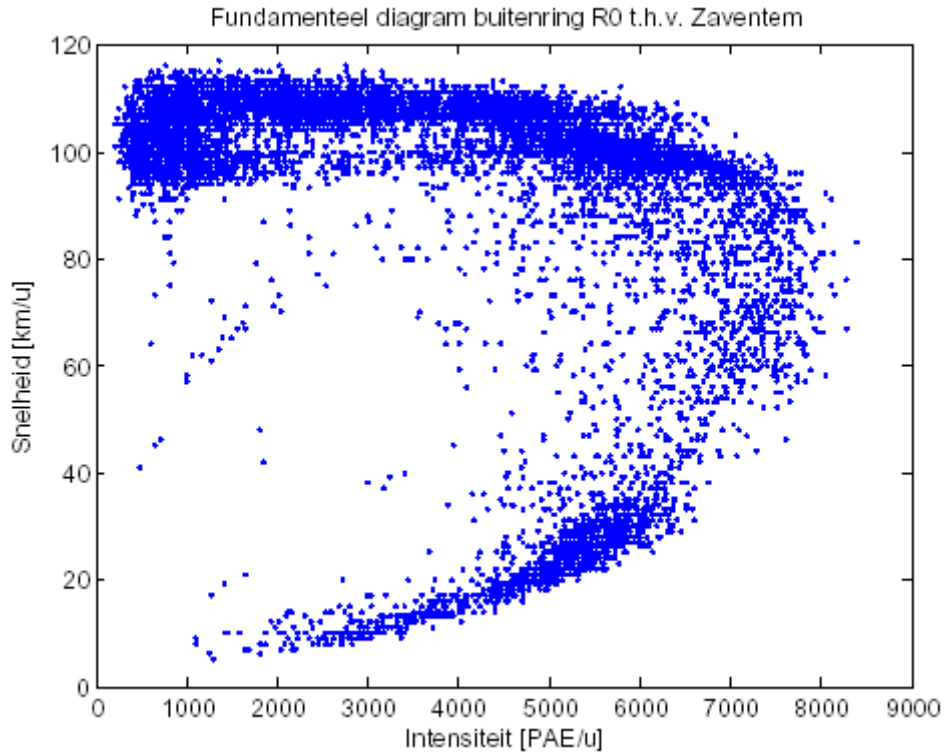
- 0,9% de motos
- 82,5% de voitures particulières (< 4,9 m)
- 7,5% de camionnettes (4,9m < X < 6,9 m)
- 9,1% de camions et autobus (> 6,9 m)

### 2.1.1.3 Réseau routier

Après la demande de trafic, il s'agit de constituer un réseau routier pour alimenter le modèle. À cette fin, la région étudiée est divisée en sections d'environ 1 km de long. Pour chaque section, on définit une vitesse maximale, une capacité (ou intensité maximale) et une densité maximale. Dans la mesure du possible, ces grandeurs sont tirées des comptages de véhicules.

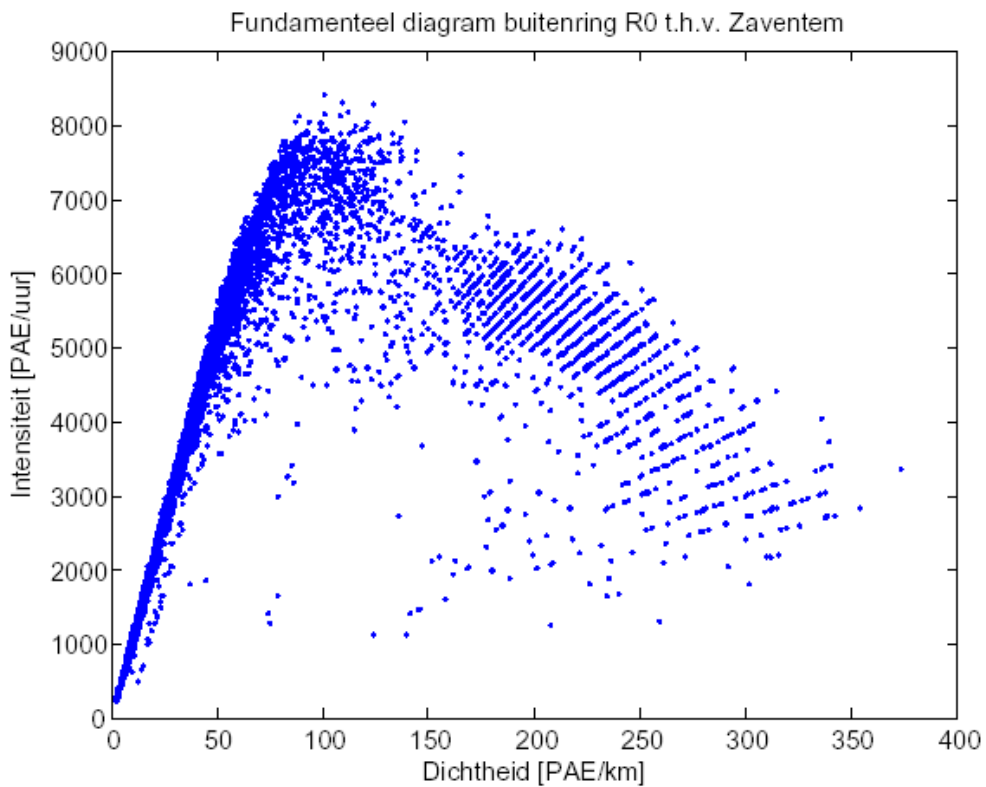
En guise d'illustration, prenons la section qui correspond à la chaussée du ring extérieur R0 à hauteur de Zaventem.

La Figure 4 représente sous la forme d'un nuage de points toutes les observations (comptages de véhicules) effectuée au mois de mai 2011 sur le ring extérieur R0 à Zaventem. Chaque point reflète une observation (intensité et vitesse moyenne) dans un intervalle de 5 minutes.



**Figure 4 : Observations sur le R0 Zaventem : diagramme intensité-vitesse**

La densité du trafic est le quotient de l'intensité et de la vitesse moyenne. À la Figure 5, les points d'observation sont représentés dans un diagramme densité-intensité.



**Figure 5 : Observations sur le R0 Zaventem : diagramme densité-intensité**

De ces observations, nous pouvons extraire les valeurs suivantes et les appliquer à la section concernée du ring extérieur R0 à Zaventem :

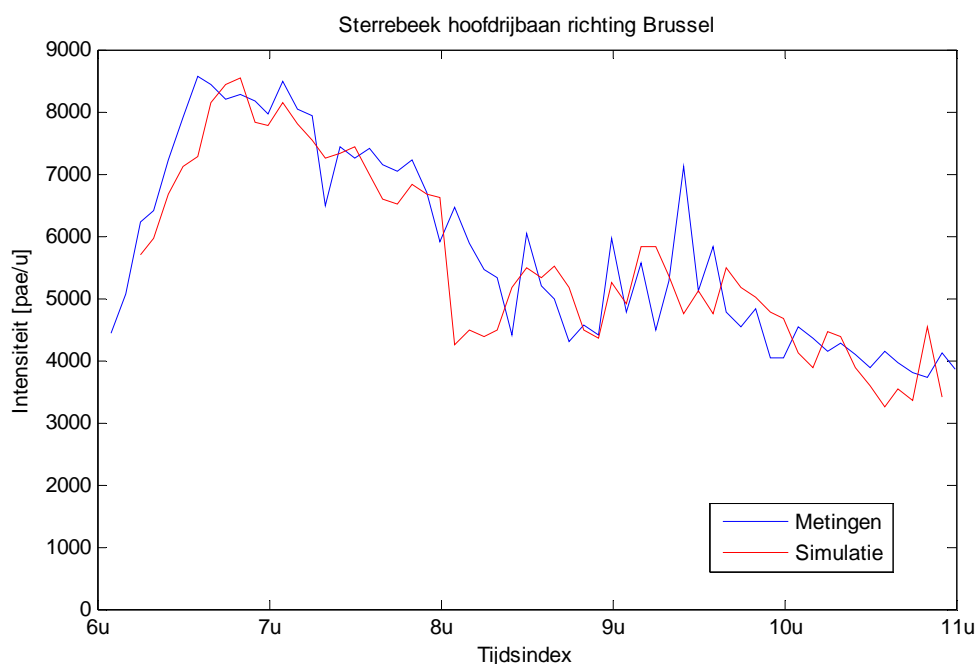
- vitesse maximale = 120 km/h
- capacité = intensité maximale = 8000 véh/h
- densité maximale = 400 véh/km

La vitesse maximale, la capacité et la densité maximale des autres sections du réseau routier seront déterminées de la même façon.

#### 2.1.1.4 Résultats

Après l'introduction de la demande de trafic et du réseau routier dans le modèle de circulation, les calculs peuvent commencer. Pour chaque section de route, le modèle calcule les intensités, densités et vitesses par tranche de 5 minutes. Cela permet de simuler les flux de véhicules dans la zone étudiée, le 12 mai 2011, entre 6h30 et 9h30.

Après la simulation, on vérifie si les intensités et vitesses résultantes correspondent aux données de comptage. Pour tous les endroits et tous les intervalles de temps, les résultats de la simulation semblent bien correspondre aux recensements. La Figure 6 et la Figure 7 représentent à titre d'illustration les intensités et vitesses simulées et mesurées à Sterrebeek.



**Figure 6 : Intensité sur l'autoroute à Sterrebeek en direction de Bruxelles (mesurée et simulée)**

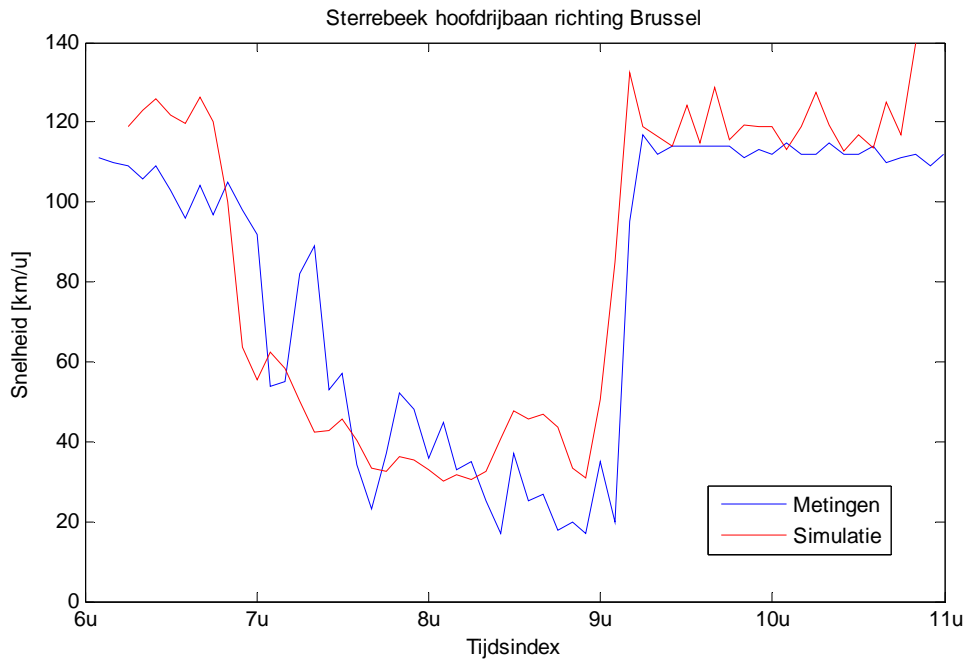
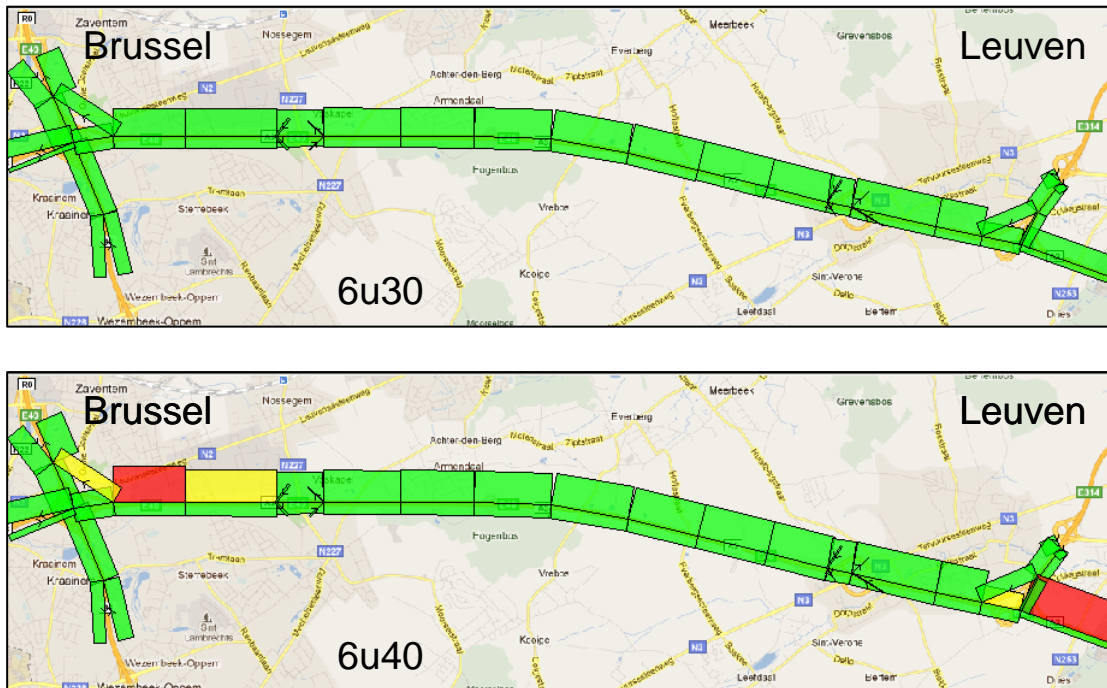
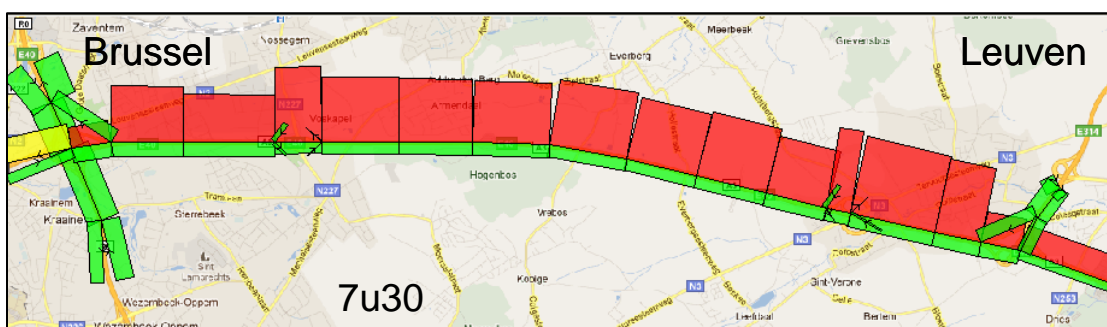
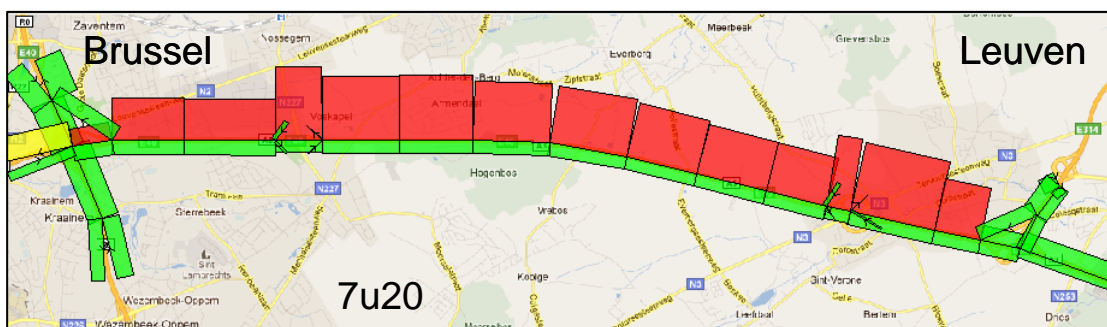
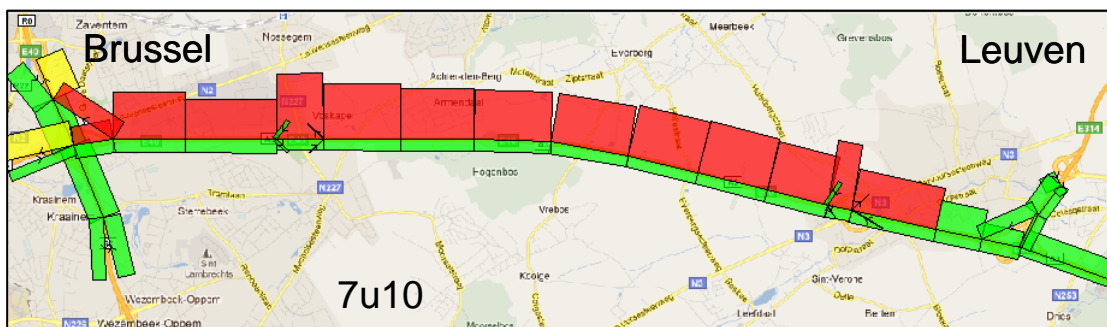
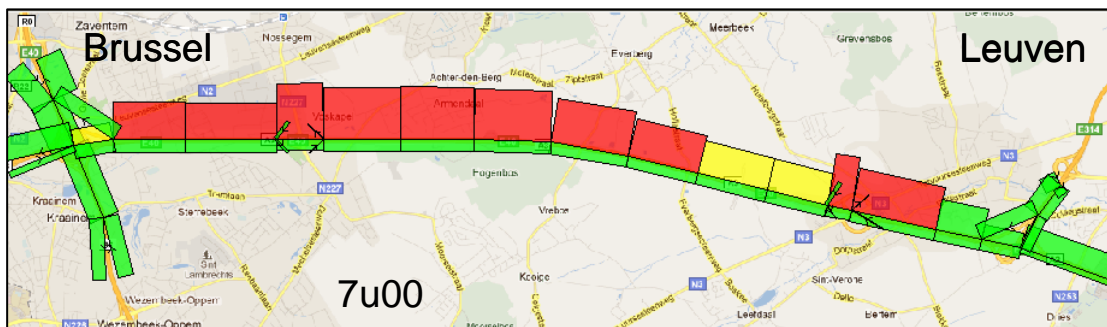
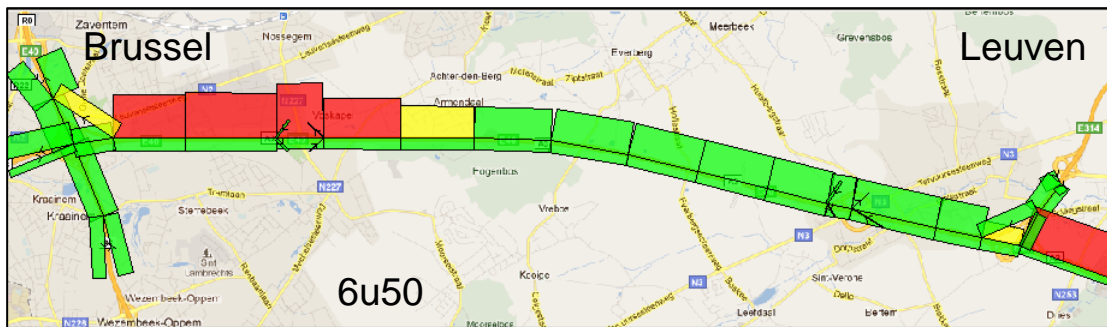


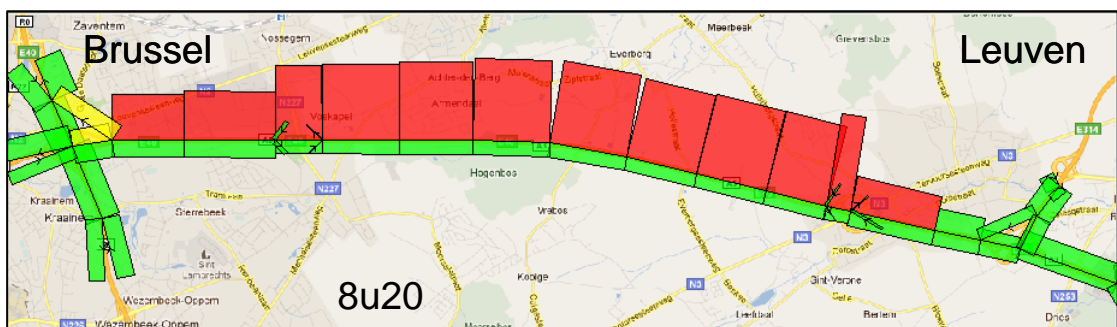
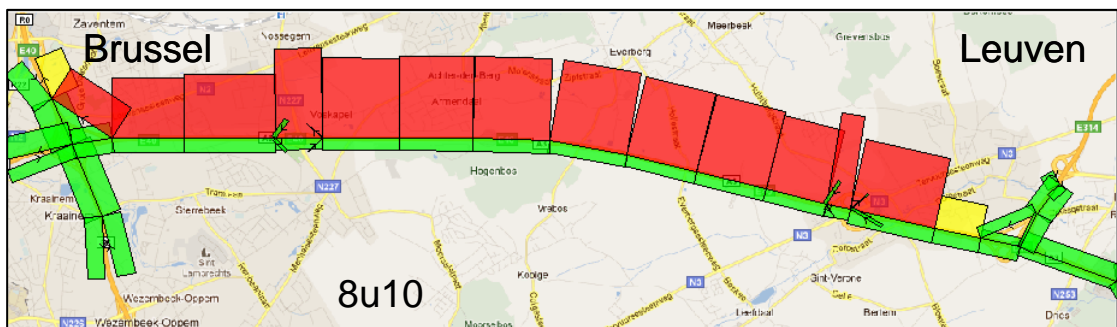
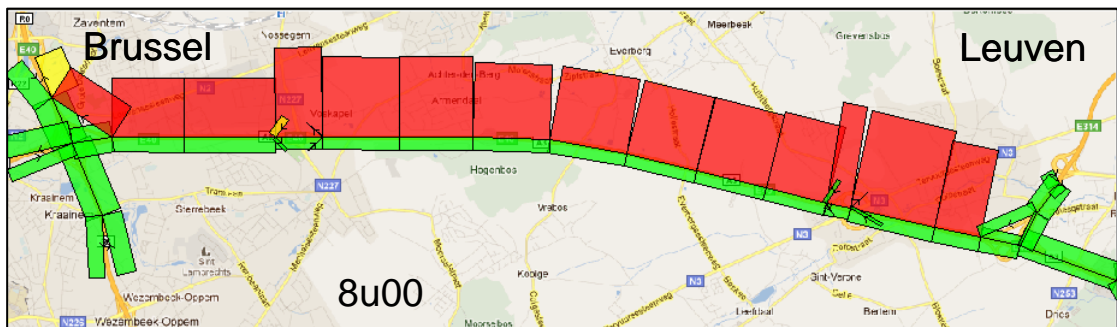
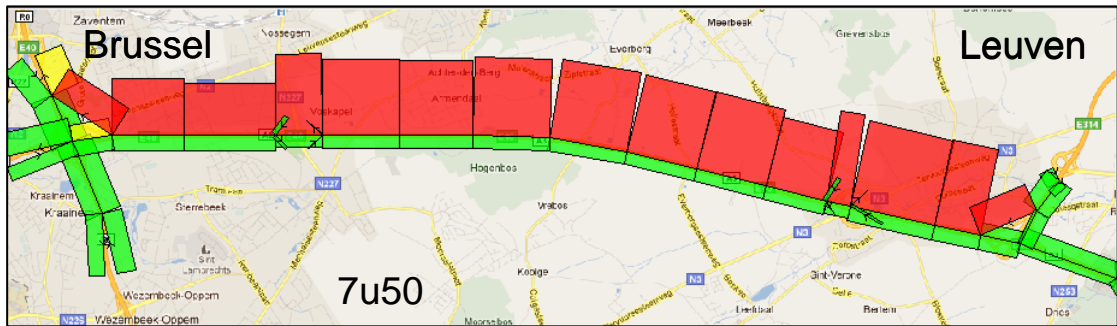
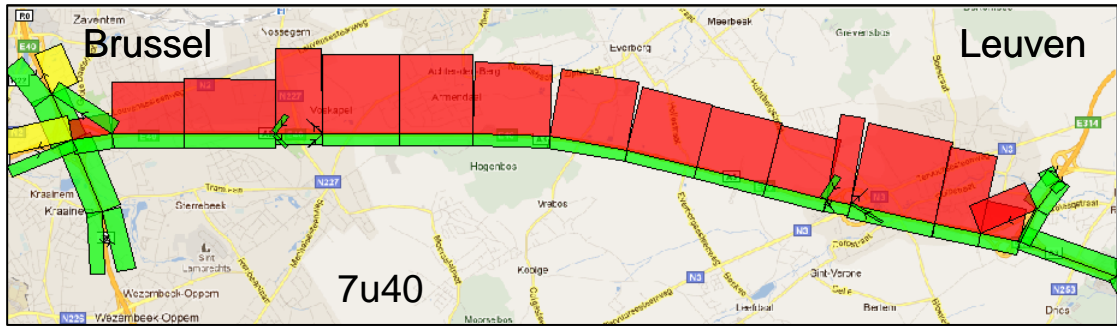
Figure 7 : Vitesse sur l'autoroute à Sterrebeek en direction de Bruxelles (mesurée et simulée)

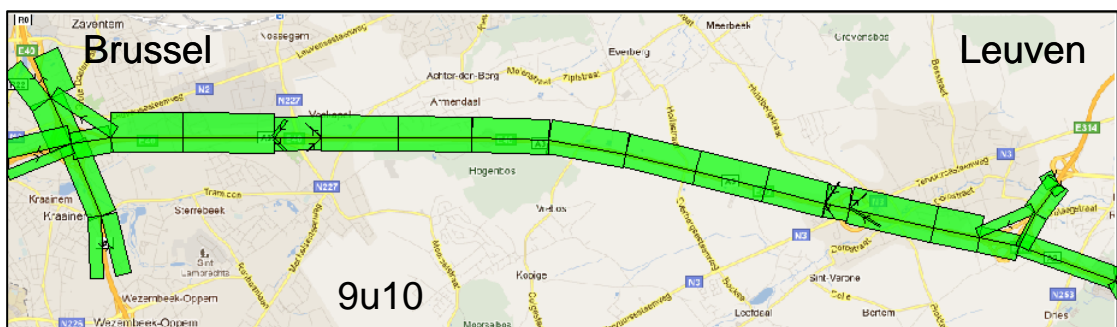
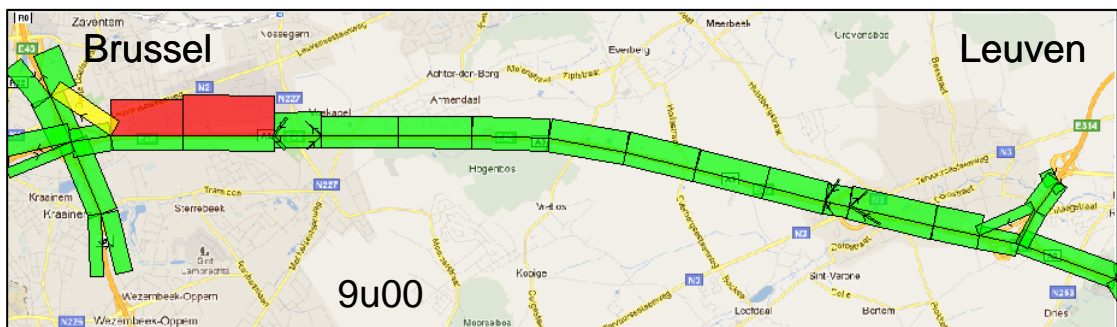
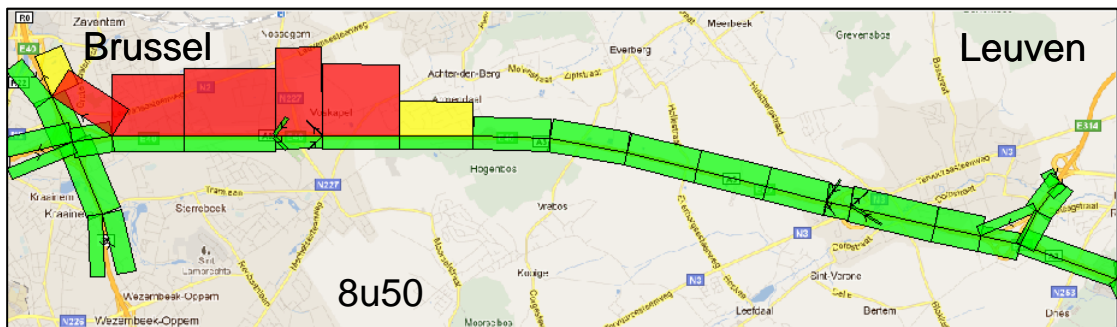
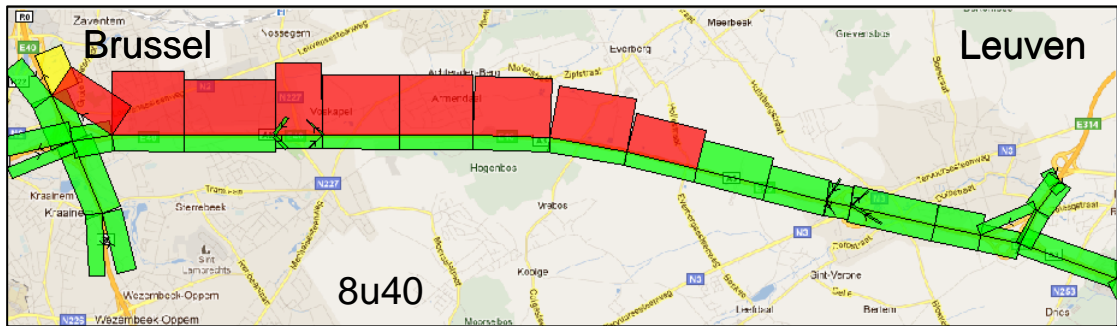
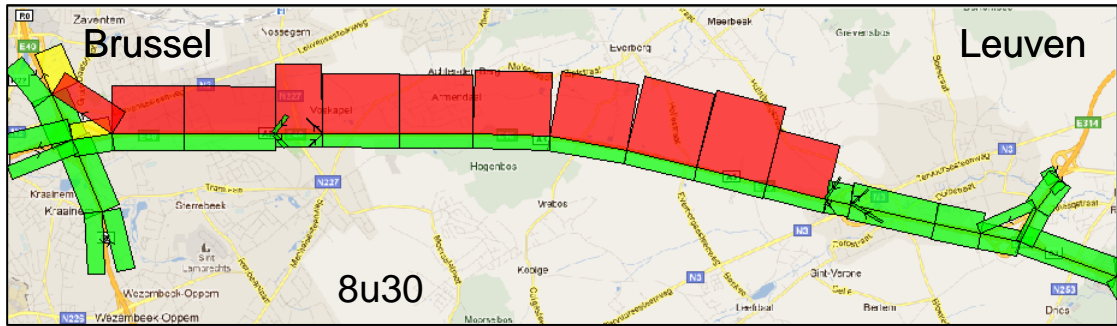
### Développement des files

La Figure 8 illustre le développement des files durant l'heure de pointe matinale. Un instantané est pris toutes les 10 minutes. Les barres situées sur les sections successives représentent l'intensité du trafic. Plus une barre est épaisse et sombre, plus la densité est importante.











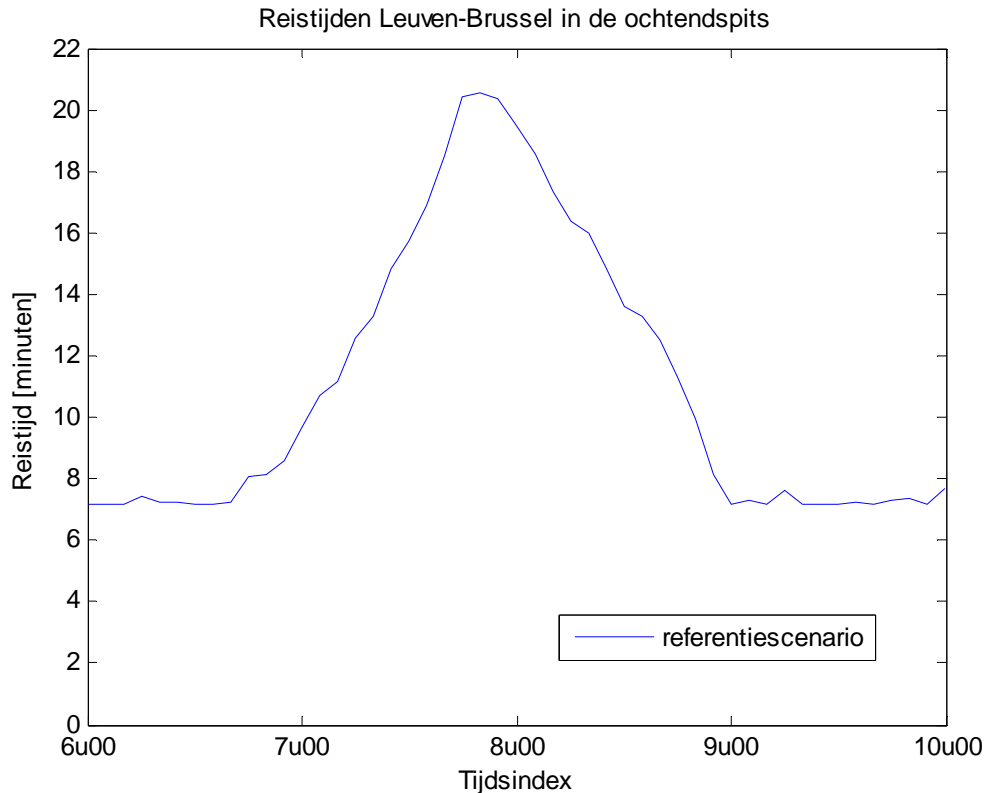


**Figure 8 : Développement des files à l'heure de pointe matinale dans le scénario de référence**

À 6h40, une file naît à hauteur de la jonction entre E40 et R0. La chaussée du ring extérieur R0 à Zaventem présente une capacité insuffisante pour absorber à la fois les flux i) venant de l'E40 à l'est et ii) venant du R0 au sud. Cette section du ring extérieur R0 constitue un goulet d'étranglement. Derrière ce goulet, une file se forme sur l'E40 en direction de Louvain. À partir de 6h40, cette file en direction de Louvain s'allonge et se densifie. À 7h30, la file se développe jusqu'à Haasrode, et à 7h40 jusqu'à Louvain. À partir de 8h, la file commence à se résorber en direction de Bruxelles. À 9h10, la file a disparu.

### Temps de parcours

Les encombrements augmentent aussi la durée des déplacements. La Figure 9 représente la durée du voyage sur l'E40 à partir de la jonction E40-E314 (Louvain) jusqu'à la séparation E40-R0 (Sint-Stevens-Woluwe), en fonction du temps. A partir de 6h40, la durée du parcours commence à augmenter. À 7h50, le trajet sur l'E40 entre Louvain et Sint-Stevens-Woluwe prend 14 minutes de plus qu'à 6h40. Après 7h50, la durée du déplacement recule graduellement, pour revenir vers 9h au niveau de 6h40.



**Figure 9 : Durée du parcours sur l'E40 entre Louvain et Sint-Stevens-Woluwe, durant l'heure de pointe matinale, dans le scénario de référence**

### Heures perdues dans les véhicules

Pour le scénario de référence, nous déterminons aussi le nombre total d'heures perdues dans les véhicules. Cette grandeur représente le temps perdu conjointement par tous les véhicules. Elle donne une bonne indication de la gravité des encombrements.

Dans un premier stade, nous calculons le temps perdu en fonction de l'heure, sur l'E40, à partir de la jonction E40-E314 (Louvain) jusqu'à la séparation E40-R0 (Sint-Stevens-Woluwe). Le temps perdu est la différence entre la durée réelle du parcours et sa durée dans un réseau sans files, à trafic fluide.

Ensuite, nous déterminons les heures perdues dans les véhicules en multipliant les pertes de temps par le volume de trafic exposé à ces pertes. Les heures perdues dans les véhicules reflètent le temps perdu collectivement par tous les véhicules :

$$VVU = \int_{t=6u30}^{t=9u30} qVdt$$

où  $VVU$  = heures perdues dans les véhicules à l'heure de pointe matinale (véhicules)

$q$  = volume de trafic (véhicules/unité de temps)

$V$  = temps perdu (h)

Dans le scénario de référence, on arrive à un total de **1925** heures perdues dans les véhicules.

## 2.1.2 Scénario avec transition modale

Dans ce scénario, nous examinons les effets d'une transition modale de la voiture particulière à la moto, dans l'hypothèse où 10% des voitures sont remplacées. Nous examinons d'abord comment il convient d'adapter les paramètres de simulation pour pouvoir modéliser la transition modale (section 2.1.2.1). Ensuite, nous effectuons une simulation avec ces nouveaux paramètres et nous analysons les résultats (section 2.1.2.2).

### 2.1.2.1 Modification des paramètres de simulation

#### Équivalent voiture particulière (evp) de la moto

On peut comparer la place qu'occupe une moto sur la chaussée avec celle que prend une voiture. Le résultat s'exprime en 'équivalent voiture particulière' (evp). L'evp de la moto est le nombre de voitures qui exerceraient le même effet sur l'écoulement du trafic et sur la capacité de la route.

Lorsque le trafic est rare, on peut admettre que la moto occupe autant de place sur la route qu'une voiture particulière. Autrement dit, la moto présente un evp égal à 1. Mais à mesure que la circulation se densifie et que la vitesse baisse, la moto prend moins de place. Des motards se tiennent plus près de la voiture qui précède ou se glissent entre deux bandes de circulation. L'équivalent voiture particulière baisse. Quand le trafic est tout à fait à l'arrêt, on peut considérer que tous les motocyclistes roulent entre les files de voitures. Dans cette situation, la moto affiche un evp de 0.

La valeur evp de la moto dépend donc de la vitesse et du trafic. Elle est également influencée par le type de route (autoroute, route régionale, carrefour...) et par la part des motos dans le flux de véhicules.

Dans la littérature, on trouve différentes valeurs pour l'evp de la moto. En 1963, Holroyd fixait l'evp à 0,6, se fiant à des données empiriques étudiées au UK Transport and Road Research Laboratory (Holroyd (1963)). Son chiffre ne tient pas compte du type de route ni de l'intensité du trafic. Ajoutons que les caractéristiques des véhicules et de la circulation ne sont plus ce qu'elles étaient en 1963.

En 2007, Lee constatait que l'evp dépendait de la part des motos dans le trafic et de la vitesse de celui-ci. Lee a donc développé un modèle pour déterminer l'evp de la moto en fonction de circonstances différentes. Selon la situation, Lee relève des valeurs de 0,4 evp à 0,75 evp (Lee (2007)).

D'autres chercheurs arrivent à des valeurs de 0 à 0,33 evp dans le cadre urbain à proximité des feux de circulation (Ellis (2005), UK Department for Transport (2004), Powell (2000), Holroyd (1963)). Ces valeurs ne sont cependant pas applicables aux autoroutes.

Minh trouve un evp de 0,28 (Minh (2005)). Powell situe l'evp entre 0 et 0,65 (Powell (2000)), mais ses chiffres sont le fruit d'essais menés en Indonésie, Malaisie et Thaïlande, avec une très forte proportion de motos. Ils ne sont pas transposables à l'Europe.

Passant en revue la littérature existante, Wigan conclut que la meilleure valeur disponible se monte à 0,5 evp sur autoroute.

Dans le cas qui nous occupe, nous retenons cette valeur de 0,5 evp pour caractériser l'état du trafic dans une situation d'intensité maximale (capacité). À l'intensité maximale ( $q_M$ ) correspond une densité de  $k_M$ . En présence d'un trafic fluide à basse densité ( $k \approx 0$ ), la valeur approche 1 evp. Dans ce cas, la distance entre les véhicules est à peu près identique qu'il s'agisse de voitures ou de motos. Les situations intermédiaires ( $0 < k_M < k_{MAX}$ ) se caractérisent par une valeur intermédiaire ( $1 > evp > 0,5$ ). Dans un trafic fortement congestionné, à haute densité ( $k \approx k_{MAX}$ ), la valeur approche de 0 evp : les motos roulent entre les bandes et dépassent les voitures sans les gêner. Ici encore, les régimes intermédiaires ( $k_M < k < k_{MAX}$ ) se caractérisent par une valeur intermédiaire ( $0,5 > evp > 0$ ).

Compte tenu de ce qui précède, nous pouvons établir le lien suivant entre evp et densité du trafic :

$$evp_{moto} = \left(1 - 0.5 \frac{k}{k_M}\right) \text{ pour } k \leq k_M$$

$$evp_{moto} = 0.5 \left(1 - \frac{k - k_M}{k_{max} - k_M}\right) \text{ pour } k \geq k_M$$

où :

$k$  = densité du trafic (evp/km)

$k_M$  = densité du trafic en régime de capacité (evp/km)

$k_{MAX}$  = densité maximale du trafic (evp/km)

Ce lien fait l'objet d'une représentation graphique à la Figure 10 :

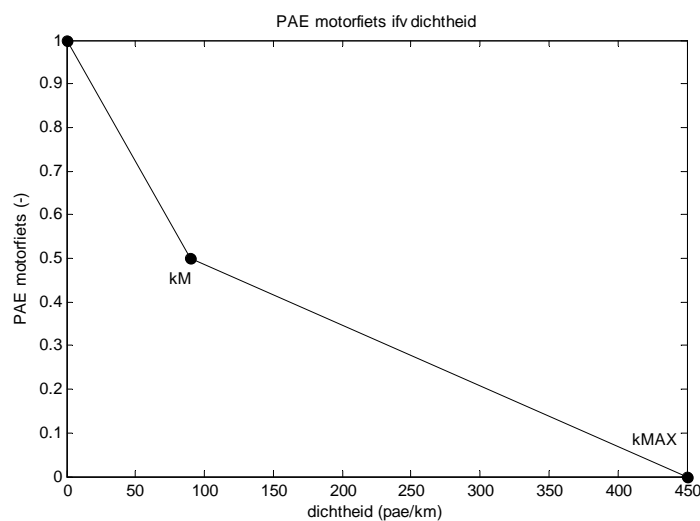


Figure 10 : Evp de la moto en fonction de la densité du trafic

### Paramètres de simulation

Pour simuler le scénario de la transition modale, on adapte les flux de trafic à partir des points d'origine ainsi que la capacité des points de friction. Voici comment :

$$Q = Q^* (1 - f \cdot p_{pw} \cdot pae_{pw} + f \cdot p_{pw} \frac{BG_{pw}}{BG_{moto}} pae_{moto}^c)$$

$$C = C^* - (pae_{moto}^k - pae_{moto}^c) \cdot f \cdot p_{pw} \cdot Q^*$$

où :

$Q$  = demande de trafic adaptée à partir de l'origine (evp/h)

$Q^*$  = demande de trafic originale à partir de l'origine (evp/h)

$f$  = proportion de voitures particulières remplacées (-)

$p_{pw}$  = pourcentage original de voitures particulières dans le trafic (-)

$pae_{pw}$  = evp de la voiture particulière (-)

$BG_{pw}$  = taux d'occupation de la voiture particulière (-)

$BG_{moto}$  = taux d'occupation de la moto (-)

$pae_{moto}^c$  = evp de la moto dans les encombrements ( $k_M < k$ ) (-)

$C$  = capacité adaptée des points de friction (evp/h)

$C^*$  = capacité originale des points de friction (evp/h)

$pae_{moto}^k$  = evp de la moto en régime de capacité ( $k = k_M$ ) (-)

L'application de ces formules permet de modéliser la transition modale. On suppose qu'une certaine fraction  $f$  (en l'occurrence 10%) des automobilistes délaissent leur véhicule pour une moto. Le taux d'occupation de la voiture par rapport à la moto est également pris en compte. Une voiture embarque généralement plus de personnes qu'une moto. En Flandre, dans le trafic des navetteurs, on observe un taux d'occupation de 1,1 personne par voiture (OVG Vlaanderen (2010)). À moto, le taux d'occupation est égal à 1 personne par véhicule. En d'autres termes, 10 voitures particulières seront remplacées par 11 motos. Le nombre de camionnettes et de camions reste inchangé. Voici les paramètres de simulation retenus :

$$f = 10\%$$

$$p_{pw} = 83,4\%$$

$$pae_{pw} = 1$$

$$BG_{pw} = 1.1$$

$$BG_{moto} = 1$$

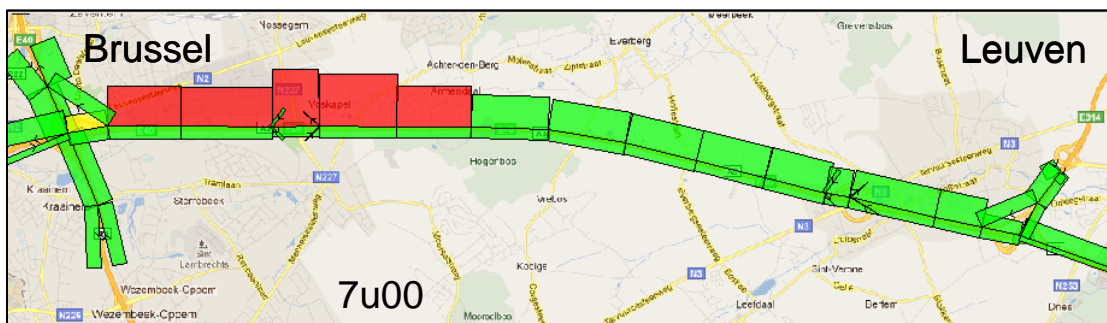
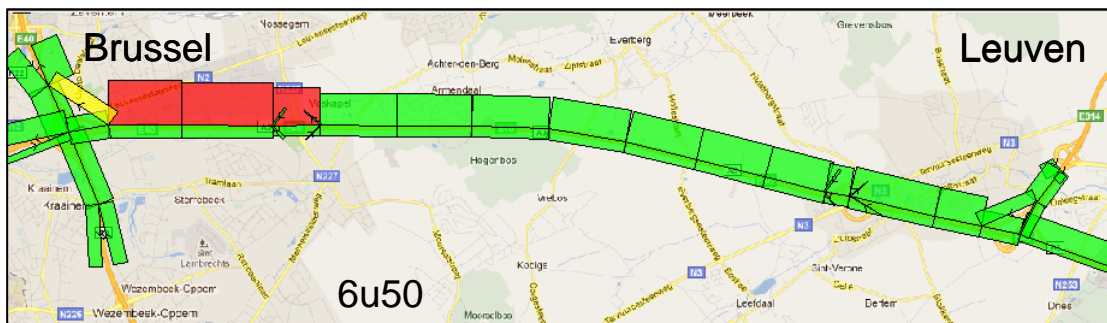
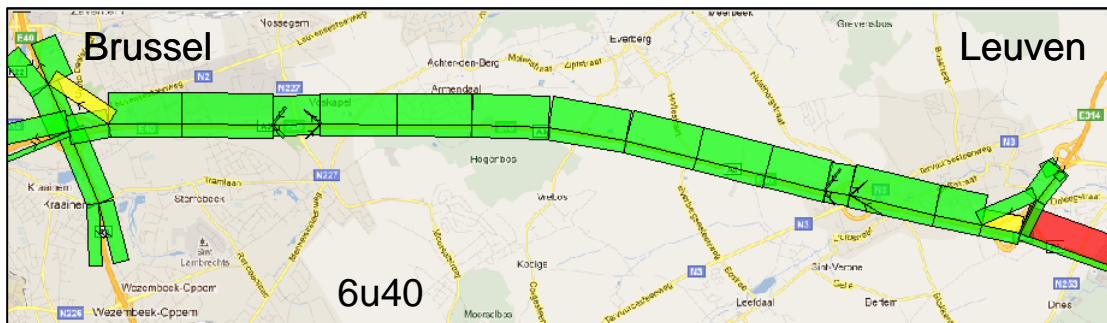
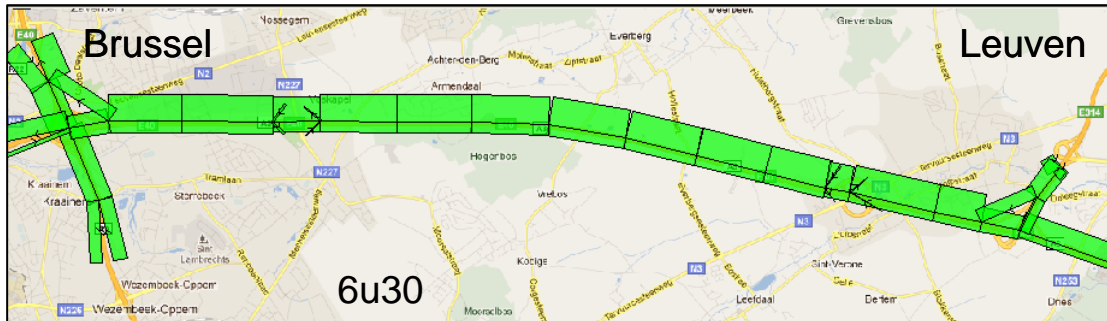
$$pae_{moto}^k = 0.5$$

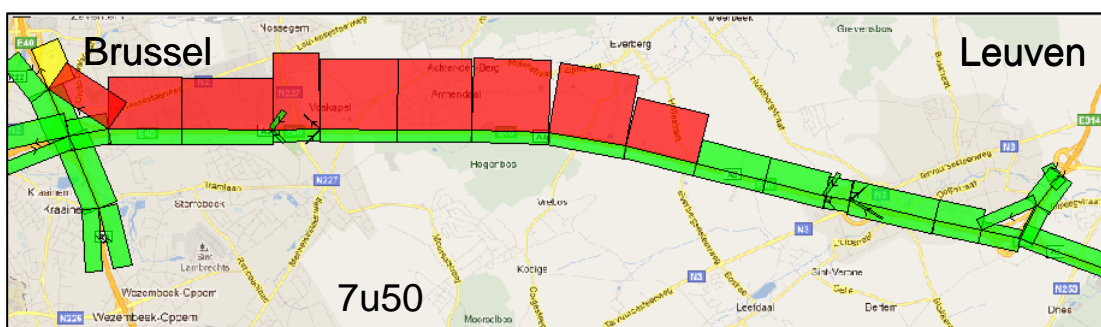
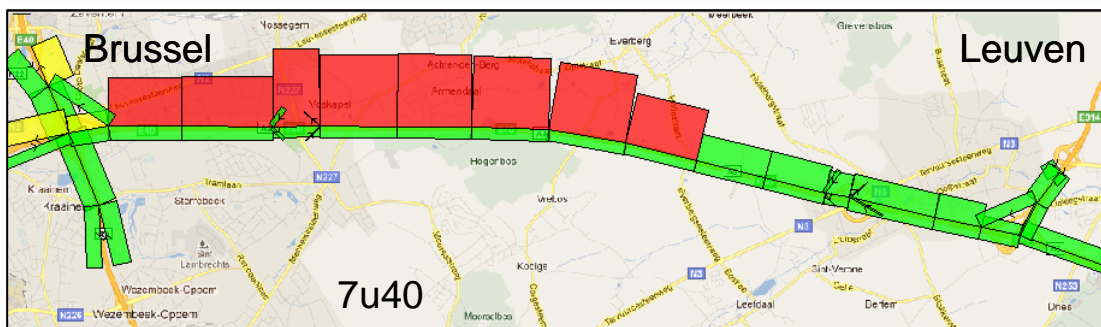
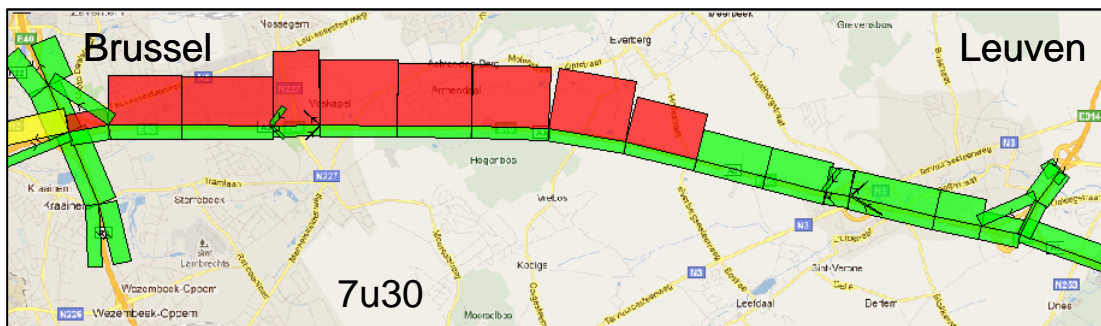
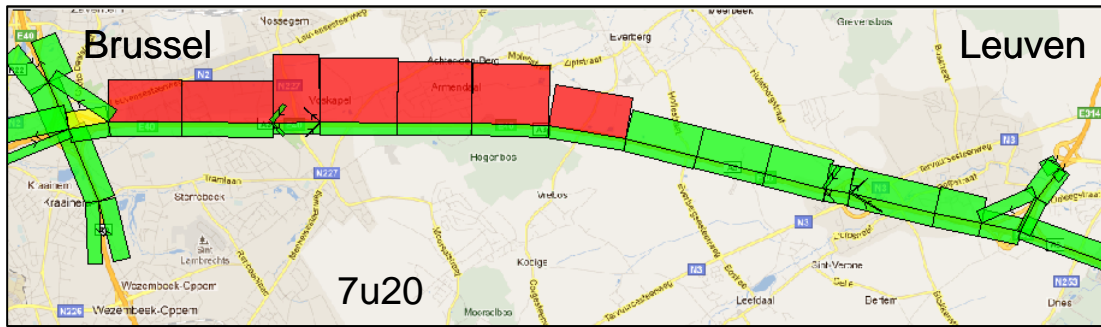
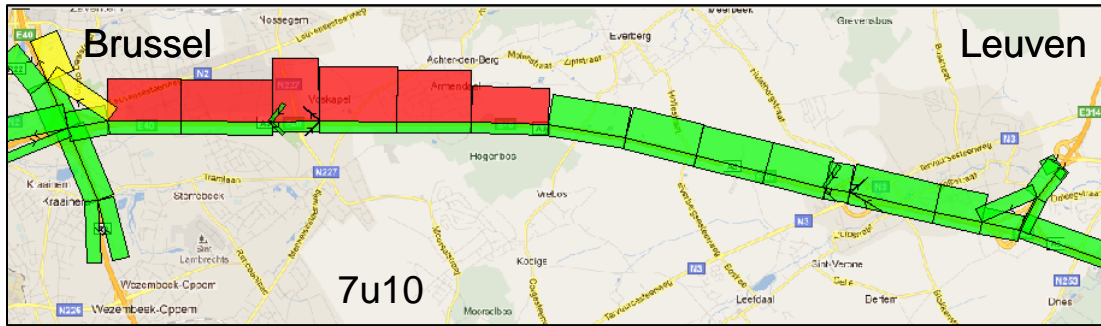
#### 2.1.2.2 Résultats

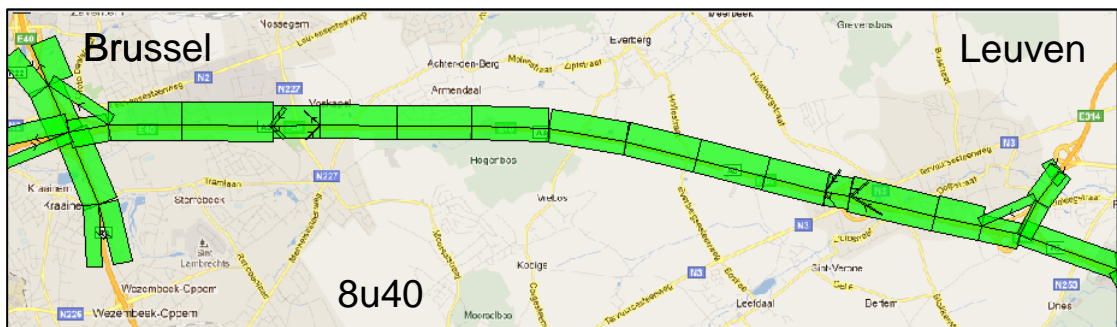
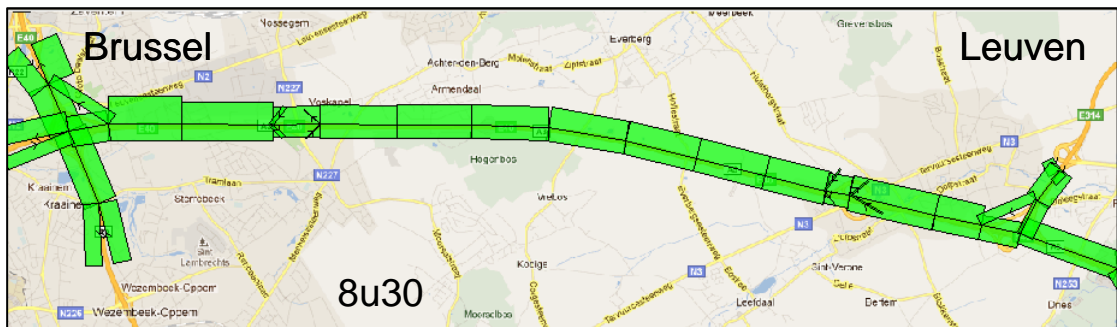
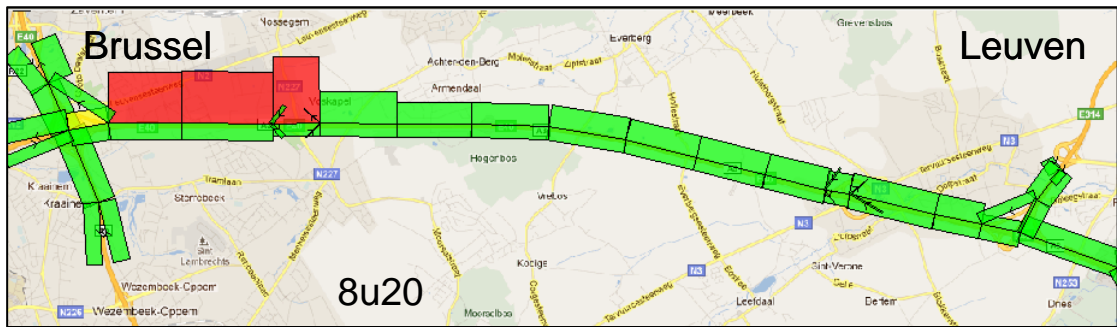
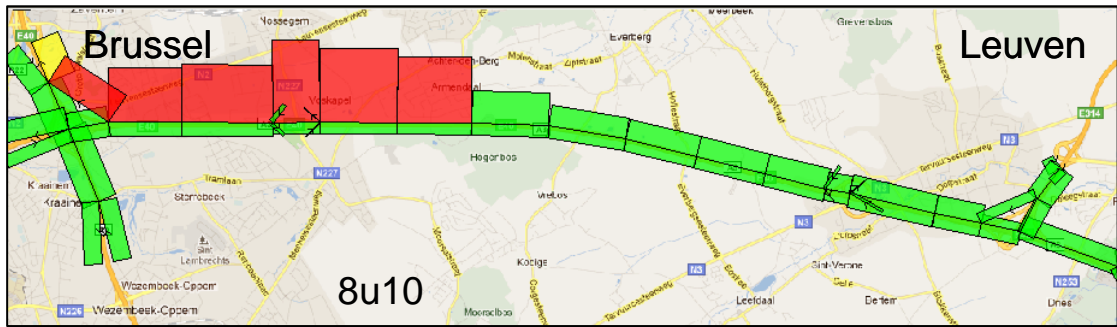
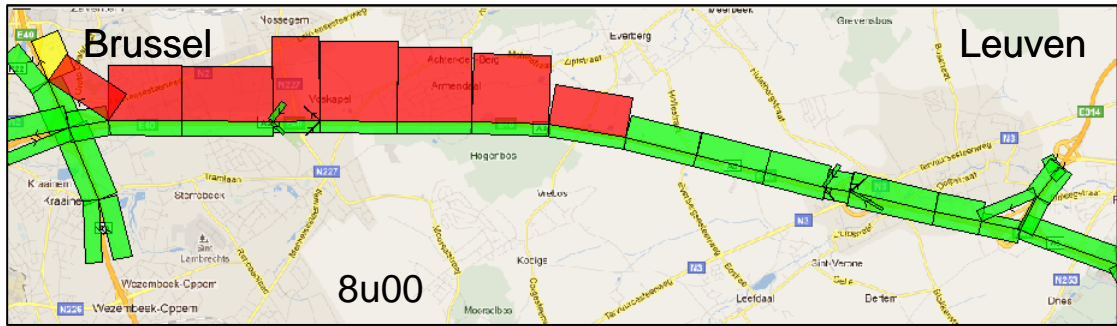
Après avoir adapté les paramètres de simulation, nous pouvons nous servir du modèle de trafic pour calculer un scénario de transition modale. Les résultats sont les suivants.

## Développement des files

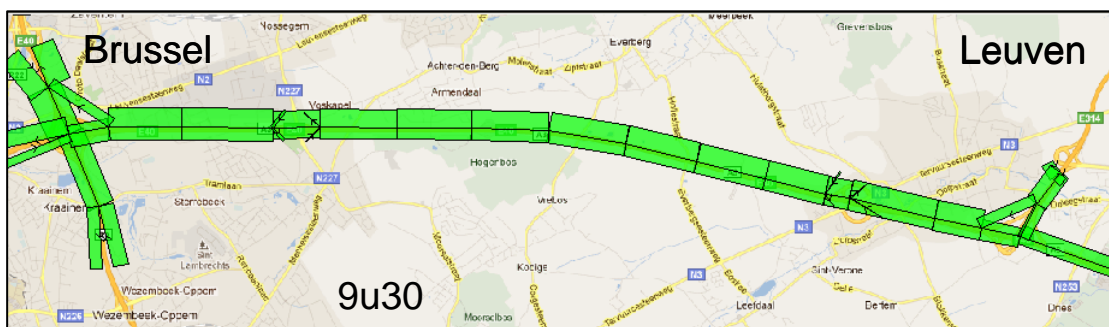
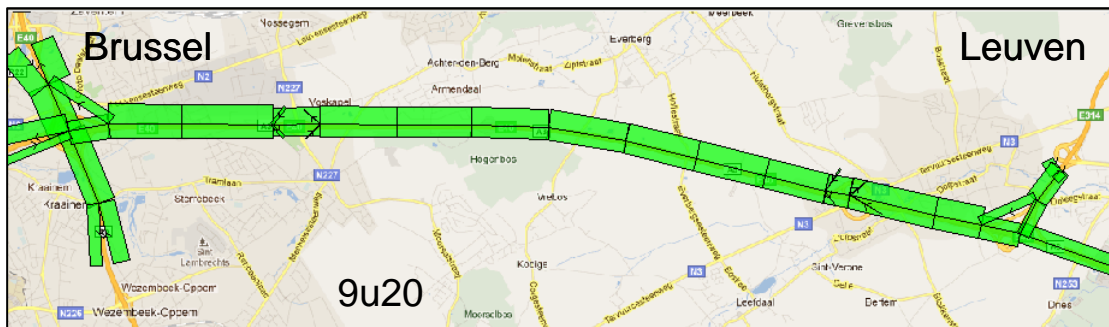
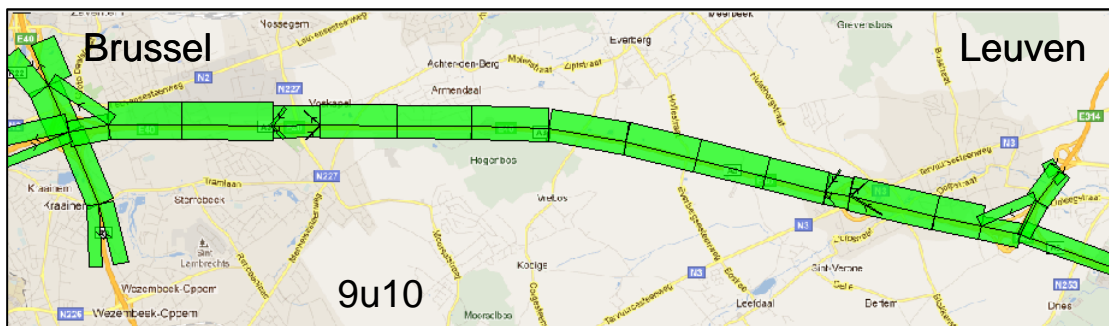
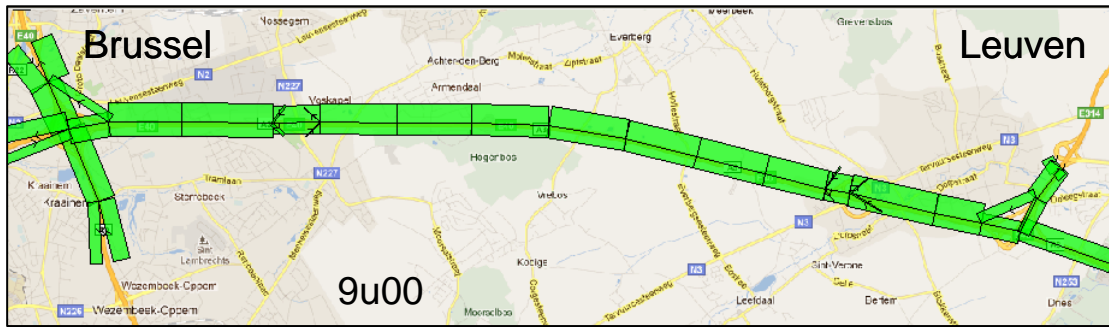
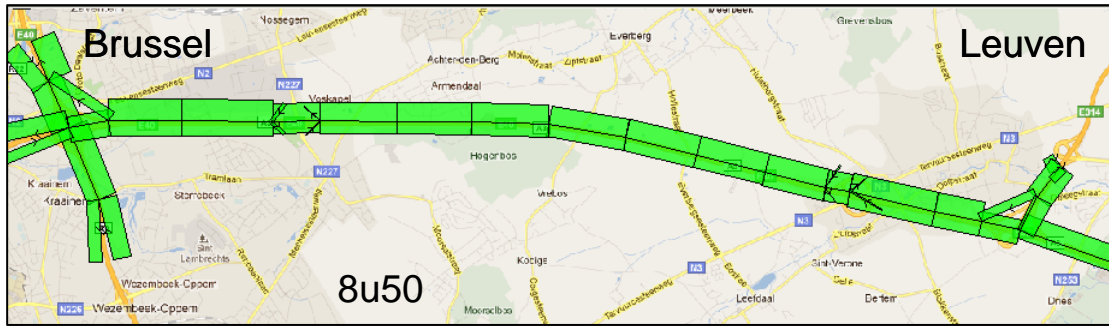
La Figure 11 illustre le développement des files durant l'heure de pointe matinale. Un instantané est pris toutes les 10 minutes. Les barres situées sur les sections successives représentent l'intensité du trafic. Plus une barre est épaisse et sombre, plus la densité est importante.









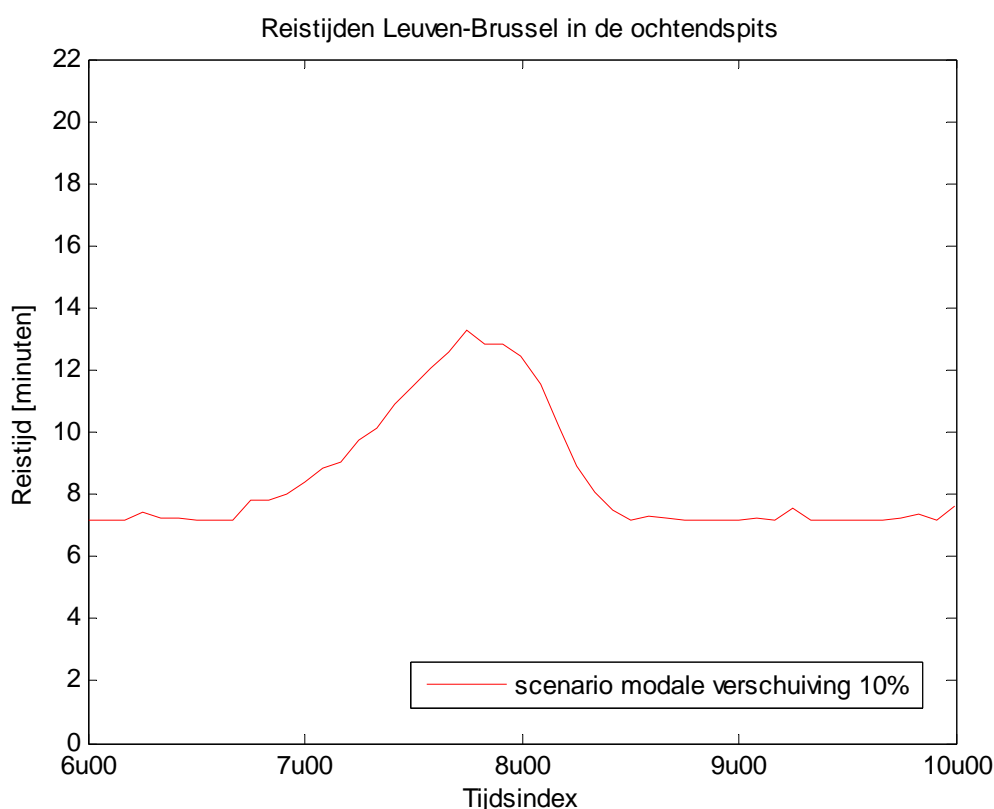


**Figure 11 : développement des files à l'heure de pointe matinale avec transition modale**

À 6h40, une file naît à hauteur de la jonction de l'E40 et du R0. La chaussée du ring extérieur R0 à Zaventem présente une capacité insuffisante pour absorber à la fois les flux i) venant de l'E40 à l'est et ii) venant du R0 au sud. Cette section du ring extérieur R0 constitue un goulet d'étranglement. Derrière ce goulet, une file se développe sur l'E40 en direction de Louvain. À partir de 6h40, cette file en direction de Louvain s'allonge et se densifie. Elle atteint son point culminant à 7h50. À ce stade, elle commence entre Sterrebeek et Bertem. À partir de 8h, la file commence à se résorber vers Bruxelles. À 8h30, la file a disparu.

### Temps de parcours

Les encombrements augmentent aussi la durée des déplacements. La Figure 12 représente la durée de voyage sur l'E40 à partir de la jonction E40-E314 (Louvain) jusqu'à la séparation E40-R0 (Sint-Stevens-Woluwe) en fonction du temps. A partir de 6h40, la durée de parcours commence à augmenter. À 7h50, le trajet sur l'E40 entre Louvain et Sint-Stevens-Woluwe prend 6 minutes de plus qu'à 6h40. Après 7h50, la durée du parcours recule graduellement, pour revenir vers 8h30 au niveau de 6h40.



**Figure 12 : Durée du parcours sur l'E40 entre Louvain et Sint-Stevens-Woluwe, durant l'heure de pointe matinale, dans le scénario de transition modale**

Remarquons qu'il s'agit ici de temps de parcours à bord d'un véhicule 'moyen'. On admet que les motos se déplacent à la même vitesse que les voitures.

### Heures perdues dans les véhicules

Les heures perdues conjointement par tous les véhicules sont calculées de la même façon qu'à la section 2.1.1.4.

Dans le scénario de transition modale, le nombre d'heures perdues s'élève à **706** au total.

### **2.1.3 Effet de la transition modale sur l'écoulement du trafic**

En comparant le scénario de la transition modale avec le scénario de référence, nous pouvons quantifier l'effet de la transition sur l'écoulement du trafic.

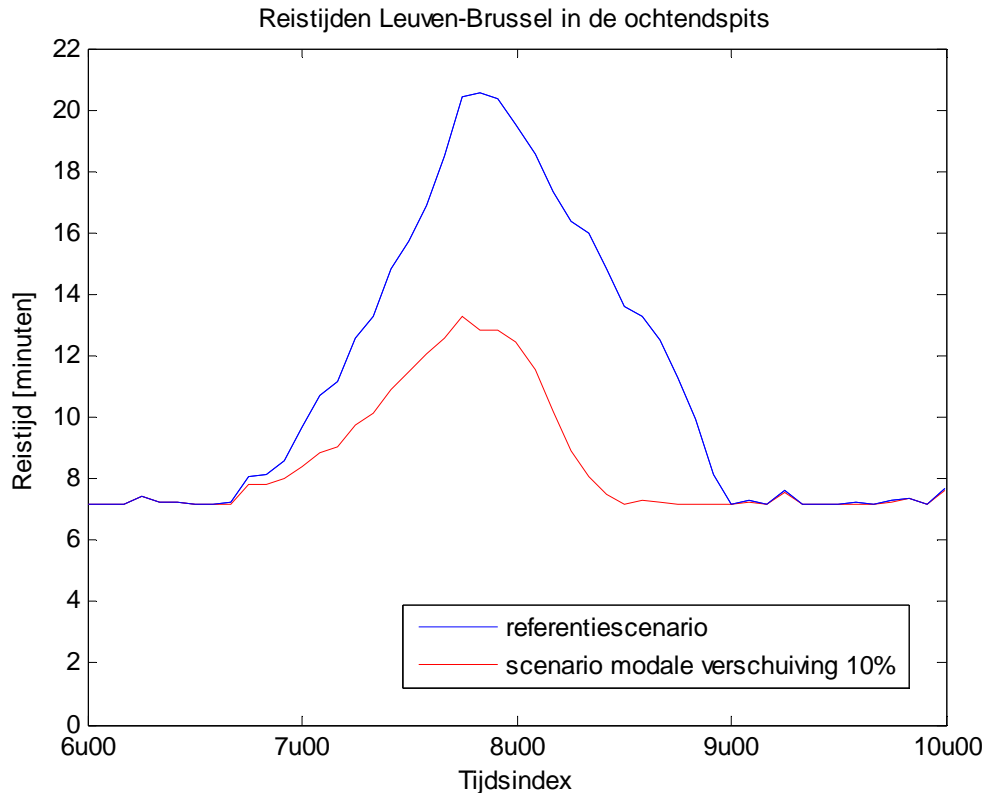
#### *2.1.3.1 Développement des files*

Dans les deux scénarios, une file naît au même moment (6h40) et pour la même raison sur l'E40 à hauteur de la jonction avec le R0. La file s'allonge en direction de Louvain. Mais dans le scénario de référence, elle se développe plus vite et plus loin. À 7h40/7h50, la file atteint son point culminant. Le scénario de référence voit la file commencer dès Louvain (cf. Figure 8), tandis que dans le scénario de transition modale, son début se situe à peu près à mi-chemin entre Sterrebeek et Bertem (cf. Figure 11). À partir de 8h, la file commence à se résorber vers Bruxelles. La disparition de la file intervient à 9h10 dans le scénario de référence et à 8h30 dans le scénario de transition modale.

Nous pouvons en conclure que la transition modale raccourcit la file et accélère sa disparition.

#### *2.1.3.2 Temps de parcours*

Ces constatations sont confirmées par la comparaison des temps de parcours entre les deux scénarios. La Figure 13 reflète la durée du déplacement sur l'E40 entre la jonction E40-E314 (Louvain) et la séparation E40-R0 (Sint-Stevens-Woluwe), en fonction de l'heure.



**Figure 13 : Temps de parcours sur l'E40 entre Louvain et Sint-Stevens-Woluwe, à l'heure de pointe matinale, dans le scénario de référence et dans le scénario de transition modale**

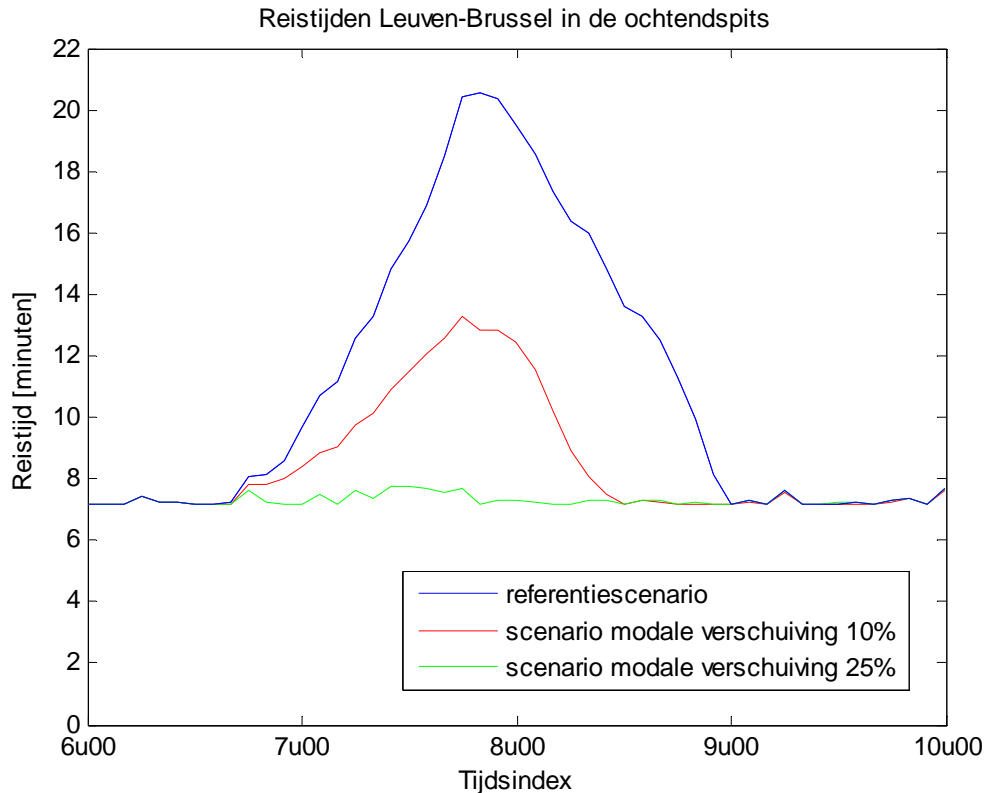
À partir de 6h40, le temps de parcours commence à augmenter. Il grimpe plus vite dans le scénario de référence. À 7h50, la perte de temps dans ce scénario est presque deux fois plus importante que dans le scénario de transition modale, où la file est nettement plus courte et disparaît plus rapidement. A 8h30, les temps de parcours sont revenus au niveau initial. Celui-ci n'est rétabli qu'à 9h10 dans le scénario de référence.

#### 2.1.3.3 Heures perdues dans les véhicules

Sous l'effet de la transition modale, les heures perdues dans les véhicules (le total du temps perdu collectivement par tous les véhicules) baissent de **1925 h à 706 h**. Cela représente une réduction de **63%**. Notons qu'il n'est pas tenu compte d'éventuels effets d'aspiration.

#### 2.1.3.4 Scénario sans encombrements

Parallèlement au scénario où 10% des voitures particulières sont remplacées par des motos, nous nous demandons quelle serait l'importance de la transition modale nécessaire pour éliminer entièrement les embouteillages. À cette fin, nous adaptons systématiquement le paramètre de simulation  $f$  (proportion de voitures remplacées) et nous examinons ensuite l'écoulement du trafic après calcul dans le modèle. Il apparaît ainsi qu'il faut une transition modale de **25%** pour supprimer tout à fait les files. La Figure 14 illustre les temps de parcours correspondants, comparés aux autres scénarios.



**Figure 14 : Temps de parcours sur l'E40 entre Louvain et Sint-Stevens-Woluwe, à l'heure de pointe matinale, dans le scénario de référence et dans les scénarios de transition modale**

## 2.2 Effet global sur le réseau principal

Cette section examine l'impact exercé sur les heures perdues dans le cas d'une transition modale couvrant l'ensemble du réseau des grands axes belges. Nous tentons de déterminer ce qui se passerait à l'échelle du réseau national des grands axes, aux heures de pointe, si 10% des voitures cédaient la place à des motos. À cette fin, les effets de la transition modale observés dans l'étude de cas sont extrapolés au réseau complet.

Il est clair, cependant, que les effets d'une transition modale dépendent aussi de l'état local du trafic. Chaque goulet d'étranglement génère une file avec ses caractéristiques propres, en fonction des conditions locales, notamment la demande de trafic, la capacité des rétrécissements et les sections routières dirigées vers l'amont. Le rapport entre la transition modale d'une part, et d'autre part l'écoulement du trafic, la réduction des temps de parcours et la baisse des heures perdues dans les véhicules diffère selon l'endroit.

Autrement dit, le calcul appliqué à l'ensemble du réseau sur la base d'une extrapolation des résultats de l'étude de cas ne peut déboucher que sur un ordre de grandeur indicatif de l'impact d'une transition modale générale. Pour quantifier les effets avec plus de précision, on devrait réaliser la simulation sur tout le réseau principal belge. Mais l'opération dépasserait le cadre de la présente étude.

Dans les pages qui suivent, nous commençons par déterminer pour le cas Louvain-Bruxelles l'effet d'une transition modale (voiture vers moto) de 10% sur les temps de parcours et les heures perdues dans les véhicules, compte tenu d'un effet d'aspiration (section 2.2.1). Ensuite, les résultats sont extrapolés à tout le réseau des grands axes (section 2.2.2). Le bénéfice total en temps est également calculé.

### 2.2.1 Étude de cas : scénario de transition modale avec effet d'aspiration

Dans le cas Louvain-Bruxelles, suite à la transition modale, on assiste à une réduction de 63% du nombre d'heures perdues dans les véhicules. Mais ce chiffre ne tient pas compte d'éventuels effets d'aspiration. En effet, quand un moyen de transport apparaît comme plus attrayant, l'option attire un trafic supplémentaire. L'amélioration de la situation et la réduction des temps de parcours sur les grands axes séduisent d'autres conducteurs. Ce nouveau trafic est à la fois le fait de déplacements qui n'étaient pas effectués auparavant, et de déplacements qui empruntaient des voies alternatives, p.ex. le réseau secondaire ou un autre moyen de transport (transports publics, vélo...).

L'«élasticité» est la quantité de trafic supplémentaire ainsi attirée lorsque la situation s'améliore, c'est-à-dire quand le coût du transport baisse. Dans la littérature, le trafic des navettes (les «déplacements indispensables effectués aux heures de pointe») se voit attribuer une **élasticité-prix** (par rapport au prix du transport généralisé) de **-0,2** (Mayeres (1999)). Cela signifie que la demande de transport augmente de 0,2% quand le prix total d'un déplacement baisse de 1%, ou, à l'inverse, que la demande de transport recule de 0,2% quand le coût total du déplacement progresse de 1%.

Dans le cas considéré (Louvain-Bruxelles), nous allons à présent déterminer l'importance de l'effet d'aspiration et son impact sur les heures perdues dans les véhicules.

Le raisonnement s'appuie sur un déplacement «typique». Admettons qu'un parcours entre Louvain et Bruxelles sur l'E40, entre la jonction E40-E314 (Louvain) et la séparation E40-R0 (Sint-Stevens-Woluwe), sur une distance de 14 km, passe pour un déplacement «typique». Dans le coût, il faut tenir compte des frais du véhicule (achat, entretien, carburant, taxe de circulation, assurance...) mais aussi du temps.

Les frais du véhicule se retrouvent dans l'indemnité kilométrique officielle accordée pour les déplacements de service en véhicule privé. Actuellement, cette indemnité s'élève à 0,33 €/km (Agentschap voor binnenlands bestuur (2011)). Pour un trajet de 14 km, les frais de véhicule se montent donc à 4,7 €.

Pour quantifier le coût du temps de déplacement, la durée de celui-ci est monétisée. Nous supposons que le temps consacré aux navettes revient à 21,6 €/h par voyageur (source : De Ceuster (2010)). Autrement dit, le navetteur qui économise une heure de trajet aux heures de pointe gagne 21,6 €. Compte tenu du taux d'occupation de 1,1 personne par véhicule, nous obtenons le chiffre de 23,76 €/h par véhicule dans le trafic des navettes.

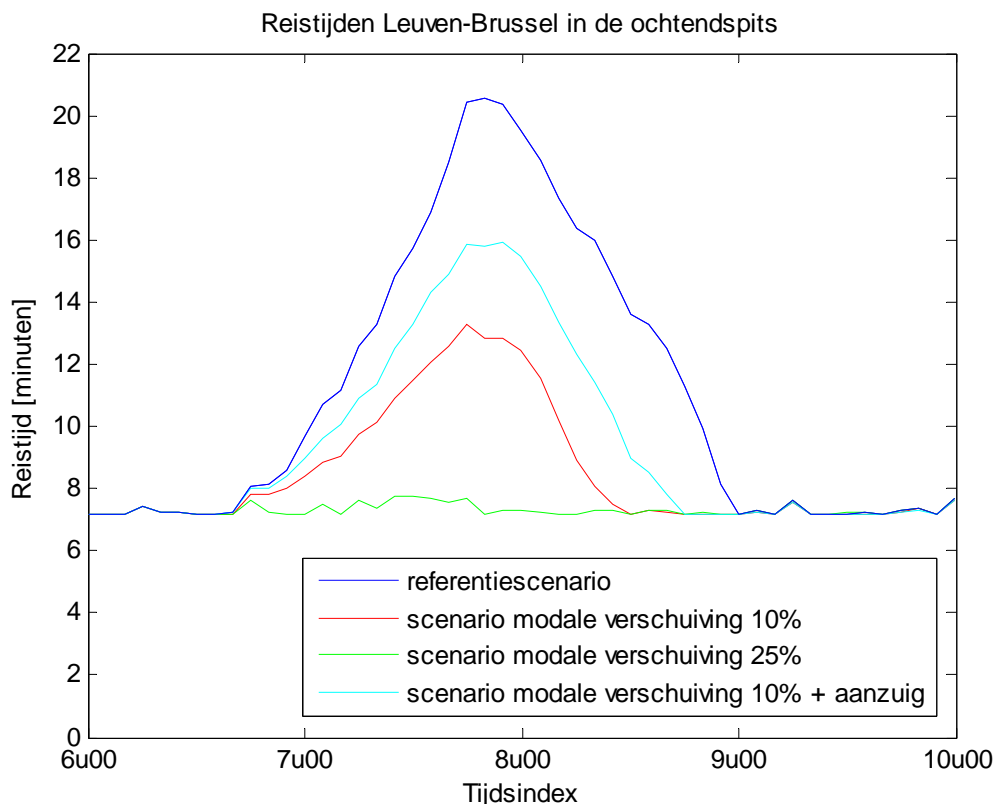
Dans le scénario de référence, le coût du temps pour le parcours de 14 km se situe entre 2,8 € (pour les déplacements avant 6h40 et après 9h00) et 8,3 € (pour un déplacement à 7h50). Le même coût varie de 2,8 € à 5,5 € dans le scénario de transition modale.

Pour un déplacement effectué à 7h50 (au plus fort de l'embouteillage), le coût total du déplacement (frais du véhicule + coût du temps) baisse de 21% sous l'effet de la transition modale (le total des frais de déplacement est de 10,2 € dans le scénario de transition modale et de 13,0 € dans le scénario de référence). Cela a pour effet d'attirer environ 4% de trafic supplémentaire. Pour les déplacements avant 6h40 et après 9h00, le coût du transport reste inchangé et n'attire pas de nouveau trafic. Entre 6h40 et 9h00, le supplément de trafic se situe à environ 2%.

Si nous utilisons le modèle pour calculer un scénario dans lequel la demande supplémentaire est prise en compte, les résultats sont les suivants.

### Temps de parcours

La Figure 15 compare les temps de parcours du scénario avec transition modale et effet d'aspiration aux temps de parcours des autres scénarios considérés. Les temps de parcours augmentent plus vite (file plus longue) que dans le scénario avec transition modale sans effet d'aspiration, et le retour au niveau initial (disparition de la file) est plus tardif.



**Figure 15 : Temps de parcours sur l'E40 entre Louvain et Sint-Stevens-Woluwe, aux heures de pointe matinales, dans le scénario avec transition modale et effet d'aspiration, comparé aux autres scénarios**

### Heures perdues dans les véhicules

En raison de l'effet d'aspiration, le nombre d'heures perdues dans les véhicules passe de **706 h** (dans le scénario avec transition modale sans effet d'aspiration) à **1158 h**. Par rapport au scénario de référence, le scénario avec transition modale et effet d'aspiration génère une baisse de **40%** des heures perdues dans les véhicules.

Dans le scénario de transition modale sans effet d'aspiration, la réduction des heures perdues atteignait **63%**. Pourtant, l'effet d'aspiration ne représente (en moyenne) que 2% de trafic supplémentaire. Concluons-en que les résultats de l'étude de cas sont très sensibles aux petites fluctuations de la demande de trafic.

### **2.2.2 Heures perdues dans les véhicules et bénéfices dans l'ensemble du réseau principal**

Nous allons à présent nous pencher sur la réduction des heures perdues dans les véhicules et sur les gains de temps qui en résultent si les 10% de transition modale (de la voiture à la moto) concernent tout le réseau belge des grands axes. Comme nous le disions plus haut, le résultat de l'étude de cas est extrapolé au réseau complet. Compte tenu de l'effet d'aspiration, nous supposons donc que les heures perdues reculent de 40% sous l'effet d'une transition modale affectant 10% des voitures. Répétons également que ce chiffre de 40% n'a qu'une valeur indicative.

L'étude 'Analyse van de congestie in België' (Maerivoet S. & I. Yperman (2008)) observe que dans l'ensemble des grands axes belges, les véhicules perdent conjointement quelque 37.000 heures par jour. Si la transition modale fait baisser ce chiffre de 40%, cela revient à économiser quotidiennement **15.000 heures perdues**. Multiplions ce chiffre par la valorisation du temps, soit 23,76 €/h par véhicule, et nous obtenons un bénéfice d'environ **350.000 €** par jour en raison de la transition modale de la voiture à la moto.

### **2.3 Effet global sur le réseau routier secondaire**

L'effet d'une transition modale sur le réseau routier secondaire est difficile à déterminer sans une enquête complémentaire, de nouvelles études de cas et d'autres simulations de trafic. Le réseau routier secondaire présente en effet des caractéristiques différentes des grands axes. La composition du trafic n'est pas la même. Le rapport est différent entre l'équivalent voiture particulière de la moto et la densité du trafic. Les navetteurs sont moins nombreux sur les routes secondaires. Nous ne disposons pas de chiffres précis à cet égard. Cependant, si nous admettons que sur les grands axes, le trafic de personnes à l'heure de pointe matinal se compose exclusivement de navetteurs, il faut supposer (en vertu de l'arithmétique) que les navetteurs représentent 30% des personnes circulant sur le réseau secondaire (sur la base de la proportion moyenne de navetteurs à l'heure de pointe matinale en Flandre (55%) (OVG Vlaanderen (2010))



et sur la base des volumes de trafic connus sur les grands axes et les routes secondaires (réseau principal  $34,86 \times 10^9$  véhkm/an ; réseau secondaire  $61,15 \times 10^9$  véhkm/an) (Maerivoet S. & I. Yperman (2008))).

Vu les différences de nature entre le réseau des grands axes et le réseau secondaire, on constatera généralement un autre rapport entre la transition modale d'une part, d'autre part le changement dans l'écoulement du trafic, la réduction des temps de parcours et le recul des heures perdues dans les véhicules. Le cas Louvain-Bruxelles étudié ici ne permet pas de tirer des conclusions quantitatives quant au réseau routier secondaire.

Cela n'interdit pas les considérations suivantes :

- Dans la littérature, l'evp de la moto est en général inférieur à sa valeur sur le réseau principal (cf. section 2.1.2.1 **Error! Reference source not found.**).
- D'un côté, le réseau principal, devenu plus attrayant, attire une partie des déplacements qui avaient auparavant sur le réseau secondaire. Notons que ce phénomène est de nature à réduire l'engorgement des routes secondaires qui se manifeste lorsque la capacité des autoroutes incite les conducteurs à s'y replier (trafic de contournement). D'autre part, le réseau secondaire deviendra lui aussi plus attrayant (temps de parcours réduits), exerçant son propre effet d'aspiration.
- Si la transition modale ne concerne que les navettes, l'évolution relative totale sera plus de 3 fois moins importante si le trafic ne compte que 30% de navetteurs, par rapport à la situation des autoroutes où l'on ne rencontre que des navetteurs.
- Face à cela, le nombre d'heures perdues quotidiennement par les véhicules sur le réseau secondaire est plus de 5 fois supérieur à ce qu'il est sur le réseau principal (Maerivoet S. & I. Yperman (2008)).

Vu ces considérations, on peut s'attendre à première vue à un bénéfice temporel du même ordre de grandeur que sur le réseau des grands axes. Il faudra cependant d'autres études pour confirmer cette position et l'appuyer sur des chiffres plus concrets.

### 3 Effet sur les émissions

Dans ce chapitre, nous examinons les effets d'une transition modale de la voiture à la moto sur les émissions. Le premier effet résulte de la différence entre les émissions d'une moto et celles d'une voiture. La section 3.1 approfondit cet aspect. L'autre effet est dû au changement dans l'écoulement du trafic. L'incidence totale sur les émissions (c.-à-d. la somme des deux effets) est étudiée à la section 3.2, dans le cadre du cas Louvain-Bruxelles.

#### 3.1 *Émissions des motos et des voitures particulières*

##### 3.1.1 Facteurs d'émission

Un facteur d'émission reflète la quantité d'un certain polluant libérée par véhicule-kilomètre parcouru (unité : g/km). Dans la présente étude, nous identifions les facteurs d'émission de 7 polluants (CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NO<sub>2</sub>, PM<sub>2,5</sub>\_émissions\_échappement, EC, PM<sub>2,5</sub>\_émissions\_non\_échappement, VOC) dans 4 catégories de véhicules :

- Moto de ≤ 250 cc, catégorie d'émissions Euro 3
- Voiture particulière 'moyenne'
- Camionnette 'moyenne'
- Camion 'moyen'

Ensemble, les polluants cités sont responsables de la quasi-totalité du coût externe des émissions dans le secteur des transports (cf. section 3.1.2). La contribution des autres polluants, minime, n'est pas prise en compte dans cette étude. Notons que le NO<sub>2</sub> fait partie des NO<sub>x</sub>. Les PM<sub>2,5</sub> sont les particules fines d'un diamètre inférieur à 2,5 micromètre. Une distinction est faite entre les PM<sub>2,5</sub>\_émissions\_échappement, qui sortent directement de l'échappement, et les PM<sub>2,5</sub>\_émissions\_non\_échappement, occasionnées par l'usure des freins, des pneus et du revêtement routier. EC ('Elemental Carbon' ou 'suie') fait partie des PM<sub>2,5</sub>\_émissions\_échappement. VOC signifie 'Volatile Organic Compounds' ou 'composés organiques volatils' (COV).

Le facteur d'émission d'une voiture particulière 'moyenne' est déterminé à partir des chiffres d'émission disponibles par type de carburant, par cylindrée et par catégorie d'émissions (Euro1, Euro2...). Ces chiffres sont pondérés suivant le nombre de kilomètres parcourus sur le réseau autoroutier belge par les véhicules de la sous-catégorie considérée (carburant, cylindrée et catégorie d'émissions).

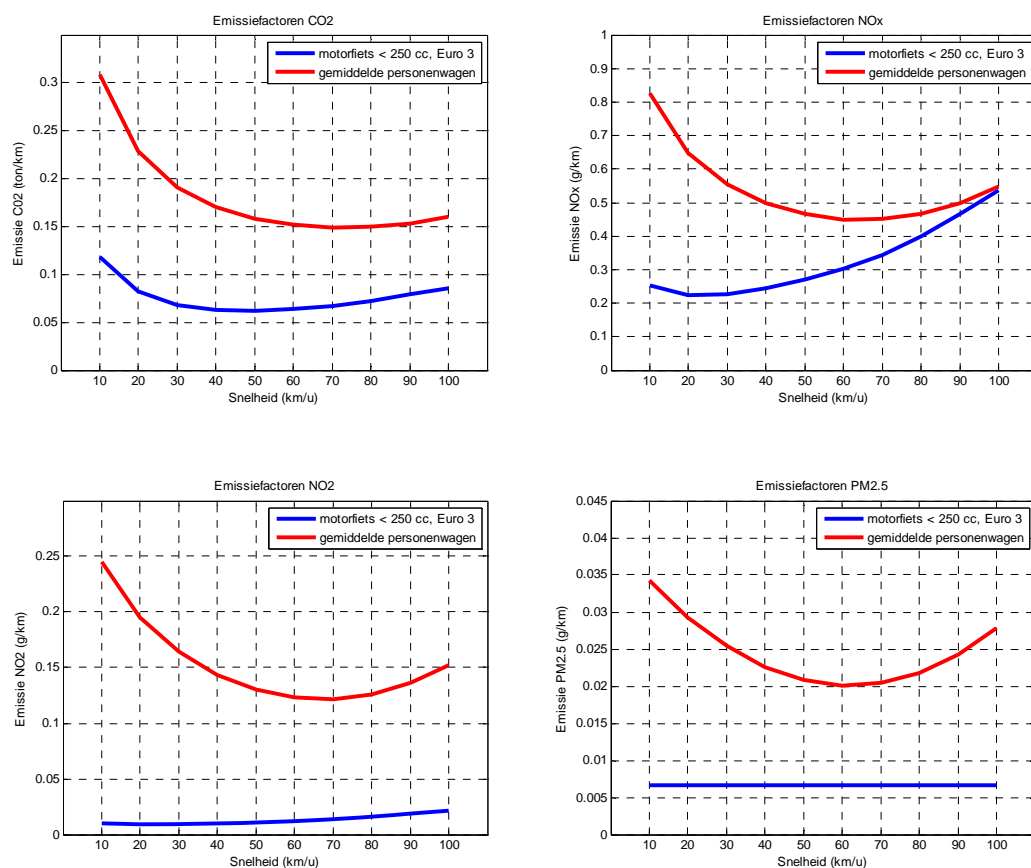
Les chiffres d'émissions que nous avons retenus sont ceux des fonctions COPERT IV les plus récentes (Ntziachristos et al., (2010)). La base de données COPERT IV repose en grande partie sur les mesures d'émissions effectués dans les cycles de test au banc d'essai, en liaison avec des modèles d'émissions. Ces cycles de conduite sont (dans la mesure du possible) représentatifs de

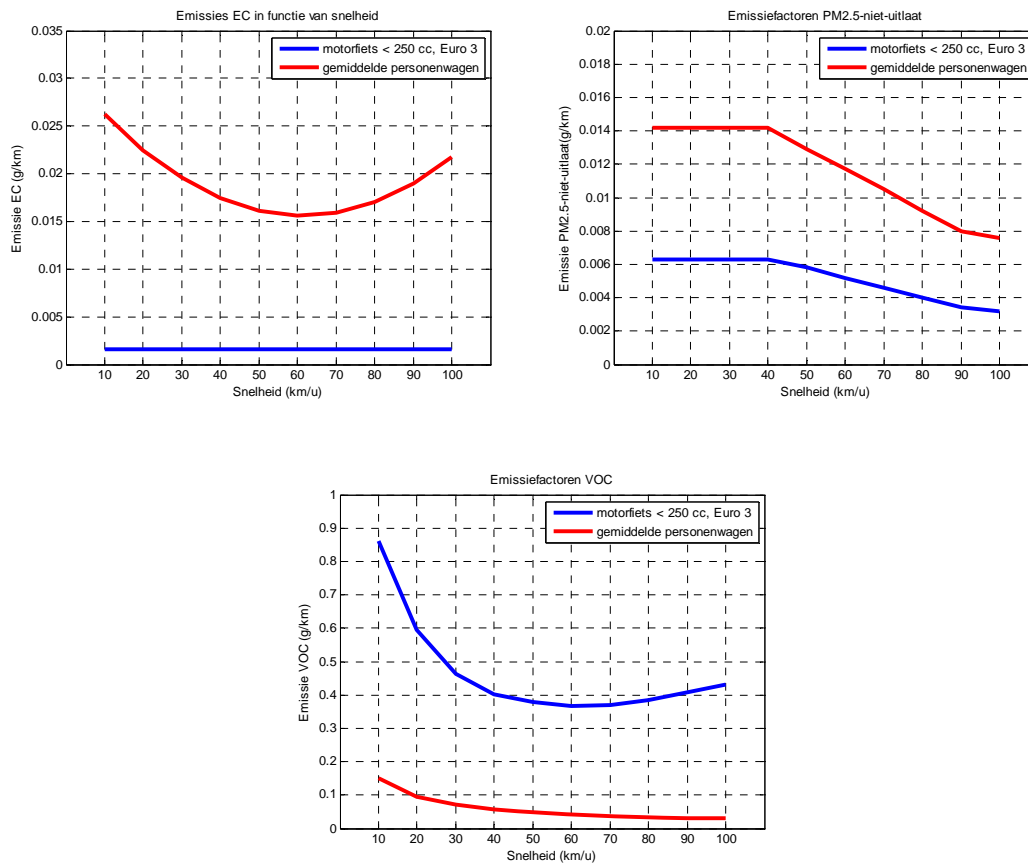
déplacements déterminés, en ville, sur autoroute et ailleurs. Dans cette étude, nous utilisons les fonctions d'émissions élaborées pour les autoroutes.

Le nombre de kilomètres parcourus sur le réseau autoroutier belge par les véhicules des différentes sous-catégories (carburant, cylindrée, catégorie d'émissions) du parc belge est extrait du modèle de transport TREMOVE v3.3 (De Ceuster et al. (2010)).

Dans la suite de la présente section 3.1.1 **Error! Reference source not found.**, nous comparons le facteur d'émission d'une voiture particulière 'moyenne' avec celui d'une moto 4 temps,  $\leq 250$  cc, catégorie d'émissions Euro 3. En effet, le scénario de la transition modale suppose que les voitures moyennes sont remplacées par des motos 4 temps,  $\leq 250$  cc, catégorie d'émissions Euro 3.

Les facteurs d'émission dépendent de la vitesse moyenne du véhicule. La Figure 16 représente les facteurs d'émission des différents polluants pour les motos et les voitures, en fonction de leur vitesse moyenne sur autoroute :





**Figure 16 : Facteurs d'émission des motos et voitures sur autoroutes, en fonction de la vitesse moyenne**

La plupart des polluants connaissent un facteur d'émission minimal à une vitesse moyenne de 60 à 70 km/h. A toutes les vitesses, les facteurs d'émission des polluants  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{PM}_{2.5}$  et EC sont plus élevés pour une voiture particulière moyenne que sur une moto (4 temps,  $\leq 250$  cc, catégorie d'émissions Euro 3). Seul le facteur d'émission des COV est plus important sur la moto. La Figure 17 met en regard les facteurs d'émission des différents polluants côté moto et côté voiture. Ici, les facteurs d'émission concernent une vitesse moyenne sur autoroute de 90 km/h.

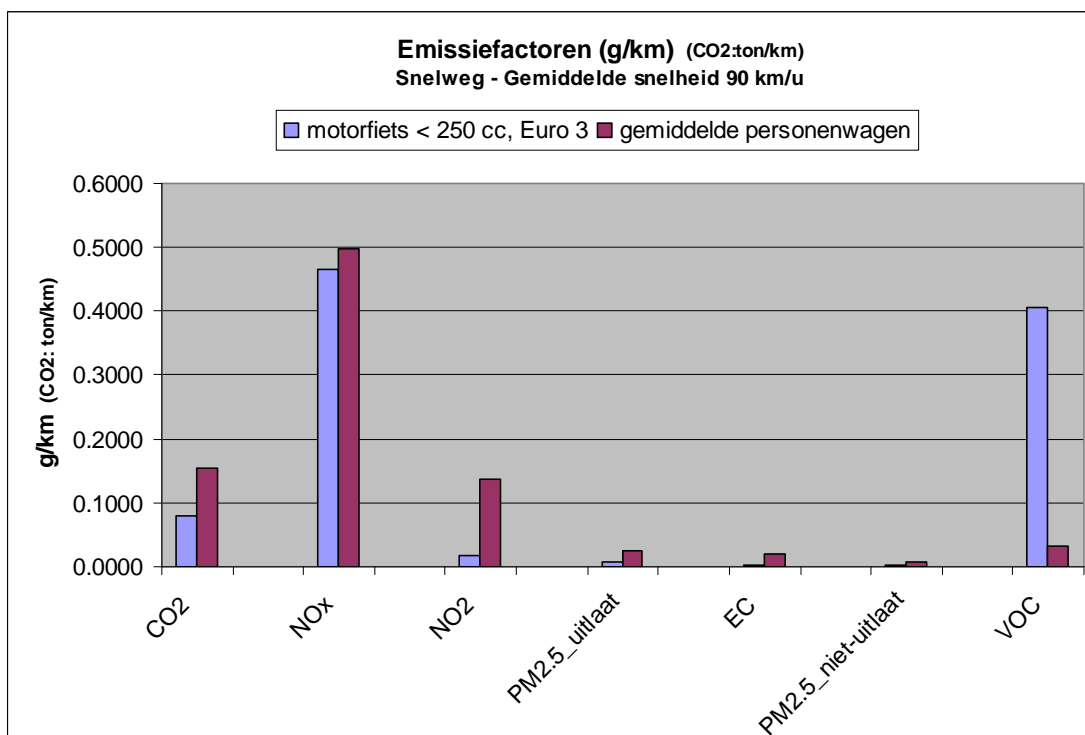


Figure 17 : Facteurs d'émission des différents polluants pour la moto et la voiture

### 3.1.2 Coût externe des émissions

Les émissions exercent un effet négatif sur la santé, le climat, les écosystèmes et plus généralement l'environnement. La prise en compte de ces dommages environnementaux permet de monétiser les émissions ou de leur attribuer un 'coût externe'. Le coût externe est le coût occasionné par un déplacement sans que l'utilisateur en tienne compte lui-même.

Le lien entre émissions et coût externe repose sur la valorisation monétaire des émissions. Dans le présent rapport, la valorisation monétaire des émissions est basée sur les résultats de l'étude 'Actualisering van de externe milieuschadetekosten' du VITO (De Nocker et al. (2010)). Le document quantifie le coût des dommages encourus en Flandre suivant la méthode ExternE. Celle-ci considère toutes les étapes de l'émission, à partir de sa production jusqu'à son impact sur l'environnement. La méthode tient compte de la diffusion des émissions, ainsi que des effets sur l'homme et la nature (augmentation des maladies, dégradation des rendements agricoles, usure des matériaux de construction, contribution à l'effet de serre...). Ces effets sont monétisés suivant le principe 'willingness-to-pay' (la somme que l'intéressé est disposé à payer pour éviter un effet environnemental).

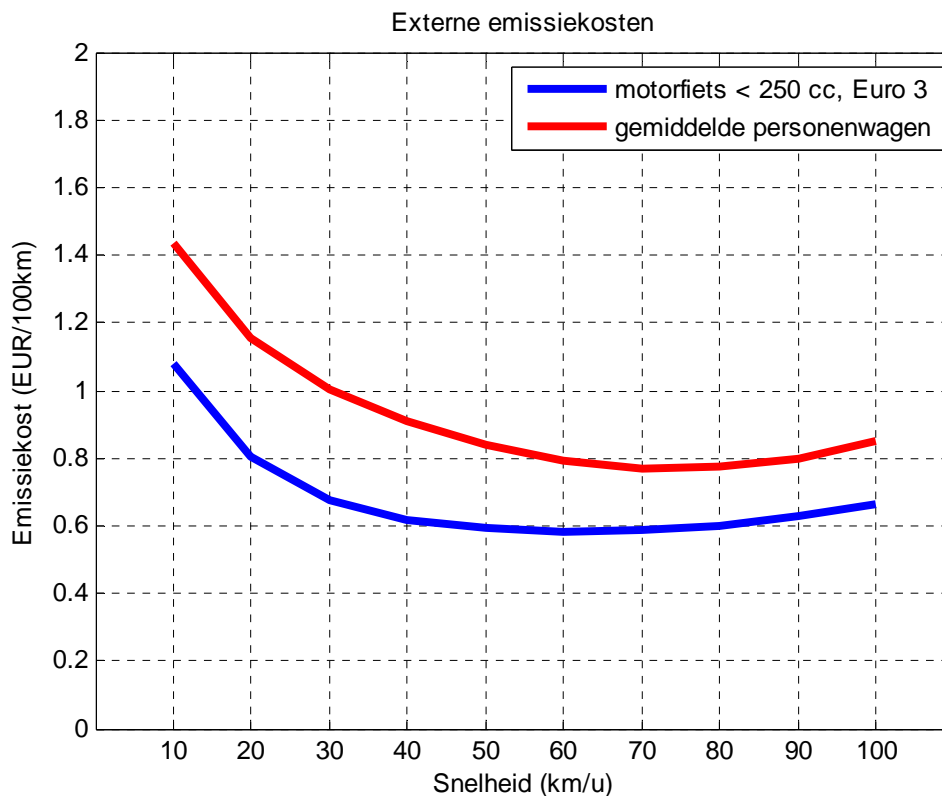
Le Tableau 1 récapitule les émissions des différents polluants dans le transport autoroutier :

**Tableau 1 : Valorisation des émissions 2010 en €/kg (CO2 en €/tonnes), valeurs en euros 2009 (source : De Nocker et al. (2010))**

NOx (€/kg)	PM2.5 (€/kg)	VOC (€/kg)	CO2 (€/ton)
0.577	135.503	7.535	20.000

Remarquez que les valorisations sont disponibles pour NO<sub>x</sub> et PM<sub>2.5</sub>, mais non pour les sous-catégories NO<sub>2</sub> et EC.

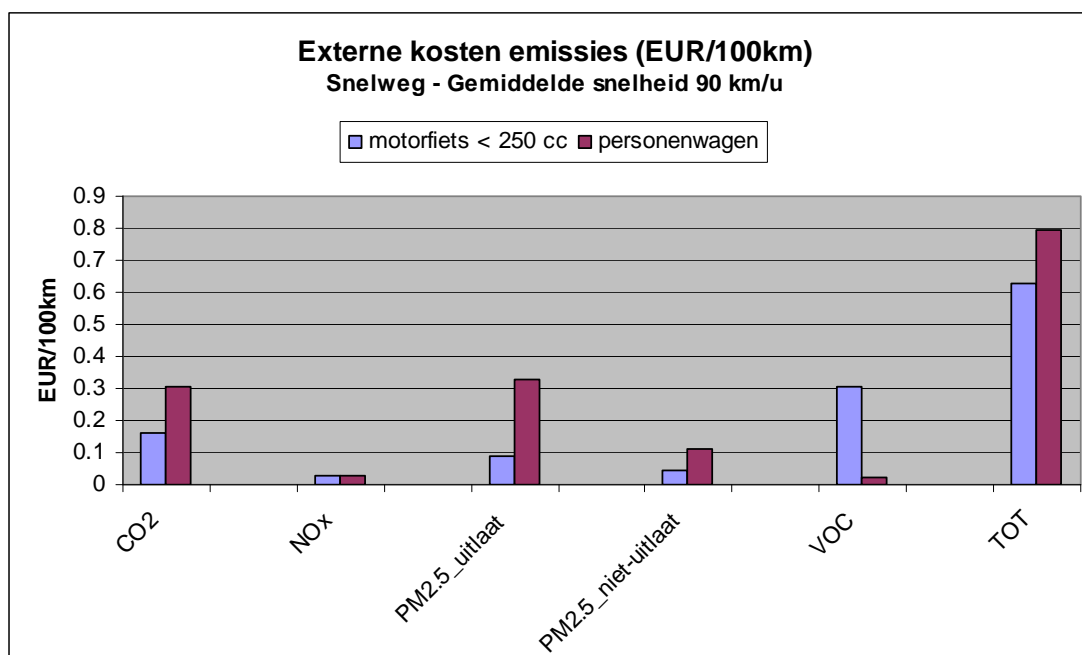
Si nous combinons les valeurs d'émission ci-dessus avec les facteurs d'émission des motos et voitures, nous pouvons calculer pour ces deux catégories de véhicules le total des coûts externes des émissions (tous polluants confondus) en fonction de la vitesse moyenne. Le résultat se trouve à la Figure 18.



**Figure 18 : Coûts externes des émissions des motos et voitures en fonction de la vitesse moyenne**

À toutes les vitesses, les coûts externes des émissions des motos (4 temps, ≤ 250 cc, catégorie d'émissions Euro 3) sont inférieurs à ceux d'une voiture moyenne. De part et d'autre, les coûts externes sont minimaux à une vitesse moyenne de 60 à 70 km/h.

Figure 19 compare les coûts externes des émissions de polluants pour les motos et les voitures. Ici, les facteurs d'émission concernent une vitesse moyenne sur autoroute de 90 km/h.



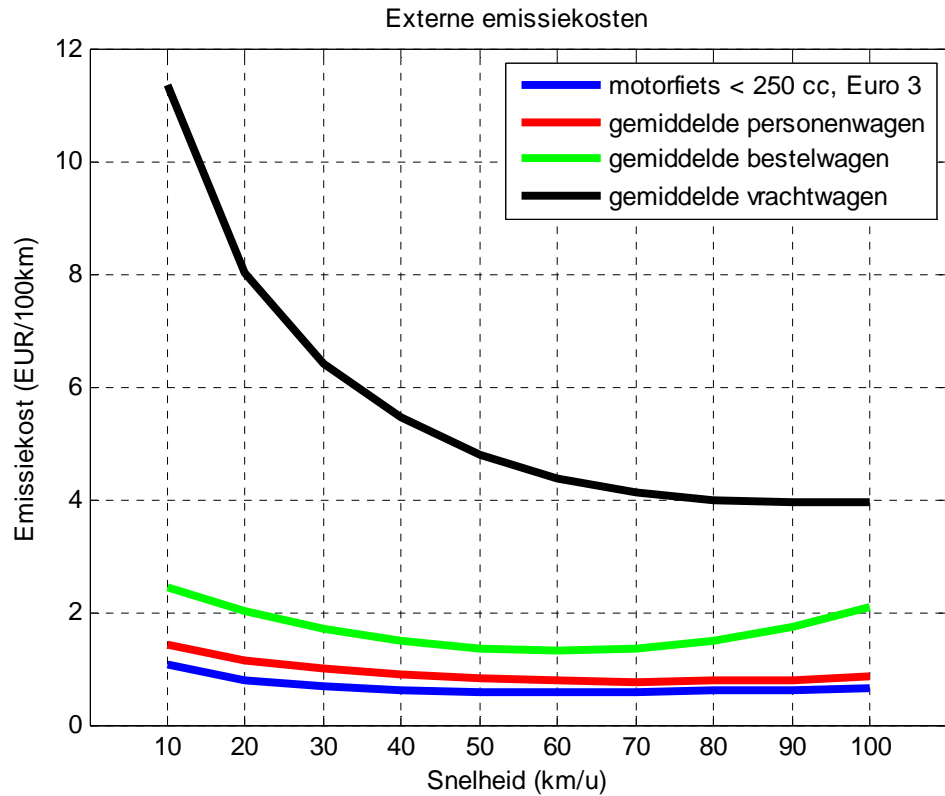
**Figure 19 : Coûts externes des émissions de polluants des motos et voitures**

Les coûts externes des émissions de CO<sub>2</sub>, PM<sub>2.5</sub> et COV sont particulièrement significatifs. Par rapport à la moto, la voiture génère davantage de coûts en termes de CO<sub>2</sub> et de particules fines, mais moins en termes de COV. Le total des coûts externes des émissions de la moto (4 temps, ≤ 250 cc, catégorie d'émissions Euro 3) se situe **21%** plus bas que celui d'une voiture moyenne.

### **3.2 Étude de cas Louvain-Bruxelles : les coûts des émissions**

Dans l'étude du cas Louvain-Bruxelles (cf. section 2.1), nous calculons les coûts des émissions dans le scénario de référence et dans le scénario de transition modale. La comparaison des deux scénarios permet ensuite de déterminer l'effet de la transition modale sur les coûts externes des émissions.

Nous commençons par déterminer dans les deux scénarios les coûts externes des émissions pour chaque véhicule individuel, compte tenu de sa vitesse moyenne sur le parcours de Louvain à Bruxelles. Les coûts externes des émissions s'obtiennent en combinant la valorisation des émissions avec les facteurs d'émission (cf. section 3.1.2). La Figure 20 reflète le total des coûts externes des émissions en fonction de la vitesse moyenne pour toutes les catégories de véhicules.

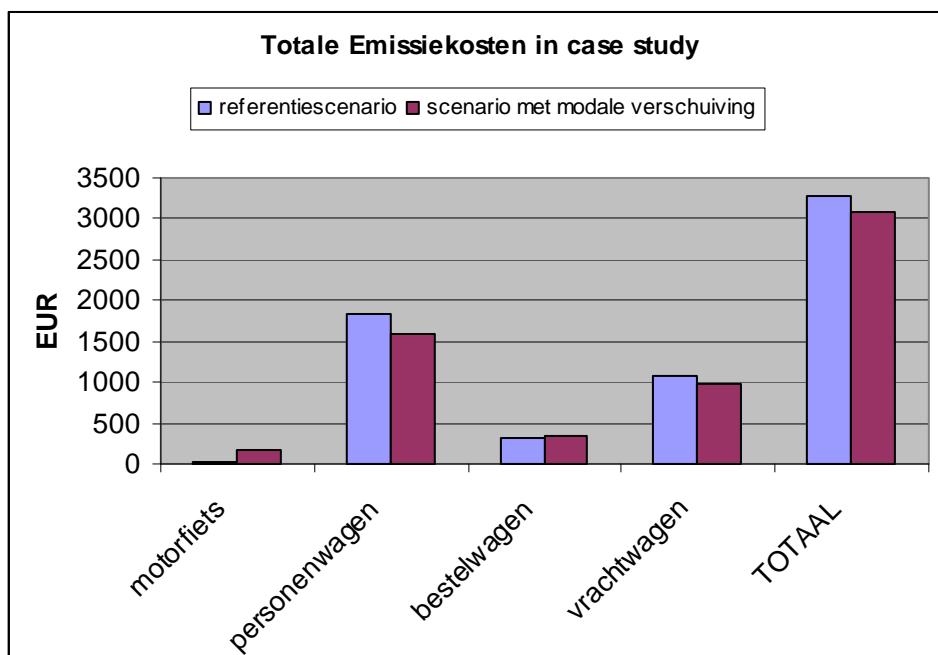


**Figure 20 : Coûts externes des émissions de toutes les catégories de véhicules, sur autoroute, en fonction de la vitesse moyenne**

Une fois le coût des émissions connu pour chaque véhicule, nous faisons la somme de ces coûts pour tous les véhicules qui accomplissent le parcours Louvain-Bruxelles à l'heure de pointe matinale (6h30 – 9h30). Nous obtenons ainsi le total des coûts des émissions pour tous les véhicules dans le sens Louvain-Bruxelles. À présent, nous allons faire ce calcul dans le scénario de référence comme dans le scénario avec transition modale.

Figure 21 compare le coût total des émissions par catégorie de véhicules dans les deux scénarios :





**Figure 21 : Coût total des émissions par catégorie de véhicules sur le parcours Louvain-Bruxelles à l'heure de pointe matinale**

Dans le scénario de transition modale, le total des coûts des émissions est inférieur de 6% (ou 180 €) à ce qu'il est dans le scénario de référence. Cela s'explique par deux raisons. D'abord, dans le scénario de transition modale, des voitures cèdent la place à des motos, qui génèrent moins de coûts en termes d'émissions. Ensuite, le scénario de transition modale favorise un meilleur écoulement du trafic, avec une vitesse moyenne plus élevée dans les encombrements.

Examinons ces effets de plus près.

L'augmentation du nombre de motocyclistes dans le scénario de transition modale ajoute 150 € au coût des émissions des motos par rapport au scénario de référence.

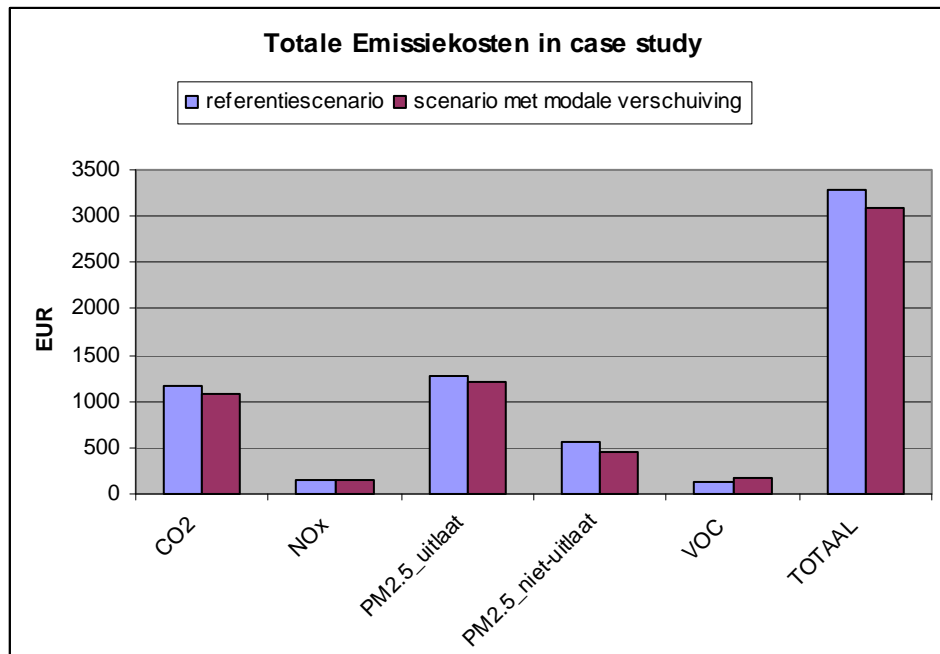
En même temps, dans le scénario de transition modale, le coût des émissions des voitures recule de 240 € : 180 € sous l'effet de la diminution du nombre de voitures, 60 € grâce à l'amélioration de la vitesse moyenne des voitures restantes dans les encombrements. Le remplacement des voitures par les motos génère donc un bénéfice de 30 € ( $180 \text{ €} - 150 \text{ €} = 30 \text{ €}$ ).

Dans le scénario de transition modale, le coût des émissions des camions baisse de 90 € (ou 10%) par rapport au scénario de référence. Le nombre de camions reste identique, mais dans le scénario de transition modale, les camions roulent en moyenne plus vite en présence d'encombrements, ce qui réduit le coût de leurs émissions. L'accélération de l'écoulement du trafic par une meilleure vitesse moyenne donne au total un gain de 150 € ( $60 \text{ €} + 90 \text{ €} = 150 \text{ €}$ ).

Sur la réduction totale des coûts des émissions (6% ou 180 €) dans le scénario de transition modale, 1% (ou 30 EUR) s'explique par le changement dans la composition du trafic et 5% (150 €) par un meilleur écoulement grâce à la vitesse moyenne relevée.

Notons que dans le cas étudié, les gains en termes d'émissions se situent 2 ordres de grandeur plus bas que les gains temporels. D'une part, le coût total des émissions est inférieur d'un ordre de grandeur au coût total des embouteillages ; d'autre part, la réduction du coût des émissions (scénario de transition modale par rapport au scénario de référence) est inférieure d'un ordre de grandeur à la réduction du coût des encombrements.

Figure 22 montre la répartition du coût des émissions entre les différents polluants.



**Figure 22 : Coûts totaux des émissions par polluant sur le parcours Louvain-Bruxelles à l'heure de pointe matinale**

L'augmentation du nombre de motos dans le scénario de transition modale relève de 36% le coût des émissions de COV par rapport au scénario de référence. Le coût des émissions de tous les autres polluants baisse dans le scénario de transition modale, d'abord parce que les motos génèrent moins d'émissions externes, ensuite parce que la meilleure vitesse moyenne accélère l'écoulement du trafic :

- CO2 : -7,5%
- NO<sub>x</sub> : -5,5%
- PM<sub>2.5</sub>\_échappement : -4%
- PM<sub>2.5</sub>\_non\_échappement : -16%

## **4 Conclusions**

### **4.1 Effet sur l'écoulement du trafic et les encombrements**

#### **4.1.1 Étude de cas Louvain-Bruxelles**

L'incidence d'une transition modale sur l'écoulement du trafic et les encombrements de circulation est étudiée à l'aide d'un cas concret. On simule le trafic de l'autoroute Louvain-Bruxelles avec précision, d'abord dans un scénario de référence, ensuite dans un scénario où intervient une transition modale de la voiture à la moto. La comparaison des deux scénarios permet de déterminer l'effet de la transition modale sur l'écoulement du trafic et les encombrements.

Le scénario de référence reflète la circulation dans la situation actuelle. À l'aide d'un modèle de trafic dynamique, on procède à des simulations réalistes des flux de véhicules dans la zone étudiée. Ces simulations font apparaître la formation d'une file à Sterrebeek à 6h40. La file s'allonge, de même que le temps de parcours Louvain-Bruxelles. À 7h50, la file commence déjà à Louvain. À ce stade, le trajet Louvain-Bruxelles dure 14 minutes de plus qu'aux heures creuses. À 8h, la file commence à se résorber vers Bruxelles. À 9h10, elle a disparu.

Dans le scénario de référence, la perte de temps dans les encombrements atteint au total 1925 heures. C'est le temps perdu collectivement par tous les véhicules. Cette grandeur donne une bonne indication de la gravité des embouteillages.

Dans le scénario avec transition modale, nous supposons que 10% des voitures particulières sont remplacées par des deux-roues motorisés. Les simulations de ce scénario révèlent de même la naissance d'une file à 6h40 à Sterrebeek. Mais la file grandit moins vite et, au plus fort de la congestion, elle s'étend moins loin (à peu près à mi-chemin entre Sterrebeek et Bertem). La perte de temps maximale se monte à 6 minutes. La file se résorbe aussi plus rapidement que dans le scénario de référence : elle a disparu à 8h30. Le scénario de transition modale représente une perte de temps de 706 heures au total, soit 63% de moins que dans la situation de référence.

#### **4.1.2 Effet global sur le réseau principal**

L'incidence d'une transition modale sur les encombrements est également étudiée à l'échelle de tout le réseau routier principal du pays. À cette fin, les résultats de l'étude de cas Louvain-Bruxelles sont extrapolés à l'ensemble du réseau des grands axes. Le lien entre la transition modale d'une part, et d'autre part le changement dans l'écoulement du trafic, la réduction des temps de parcours et la baisse des heures perdues, est fortement lié aux conditions locales ; aussi le résultat d'un calcul global à l'échelle de tout le réseau routier principal par extrapolation de l'étude de cas ne peut-il être qu'indicatif.

La détermination de l'incidence tient compte d'un effet d'aspiration vers le réseau principal. Les déplacements sur les grands axes devenant moins chers et donc plus attrayants, ce réseau attire en moyenne environ 2% de trafic supplémentaire. L'effet d'aspiration pris en compte, le trajet Louvain-Bruxelles connaît une réduction des heures perdues de 40% par rapport au scénario de référence. Si nous extrapolons ce chiffre à l'ensemble du réseau principal, nous constatons que la

Belgique peut économiser chaque jour 15.000 heures d'attente dans les files, ce qui correspond à environ 350.000 € par jour. Répétons qu'il s'agit là de chiffres indicatifs.

#### **4.1.3 Effet global sur le réseau routier secondaire**

Les données manquent pour une analyse quantitative de l'incidence d'une transition modale générale sur le réseau routier secondaire. À partir d'une série de considérations partielles, on peut s'attendre à un gain de temps du même ordre de grandeur que sur le réseau principal, mais il faudra des études complémentaires pour s'en assurer.

#### **4.2 Effet sur les émissions**

L'incidence d'une transition modale sur les émissions et leur coût est étudiée à l'aide du cas Louvain-Bruxelles. On calcule le coût des émissions dans le scénario de référence puis dans le scénario de transition modale. La comparaison des deux situations permet de quantifier l'effet de la transition modale sur le coût des émissions.

Le coût des émissions est déterminé par catégorie de véhicules. Le coût des polluants CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NO<sub>2</sub>, PM<sub>2,5</sub> et EC (suie) est plus lourd pour une voiture que pour une moto (4 temps, ≤ 250 cc, catégorie d'émissions Euro 3). Seules les émissions de COV sont plus sur la moto. Le coût externe total des émissions de la moto (tous polluants confondus) est inférieur de 21% à celui de la voiture particulière moyenne.

Dans le scénario de transition modale, le coût total des émissions est 6% moins élevé que dans le scénario de référence. Sur ce total, 1% est imputable au remplacement des voitures par des motos, dont le coût externe des émissions est inférieur, et 5% à l'écoulement plus rapide de la circulation grâce à une meilleure vitesse moyenne dans les encombrements.

## Références

Yperman, I. (2007), *The Link Transmission Model for Dynamic Network Loading*. PhD Thesis, Katholieke Universiteit Leuven, Louvain, Belgique.

Frederix, R., C.M.J. Tampère, F. Viti et L.H. Immers (2010), *The effect of dynamic network loading models on DTA-based OD estimation*. In : Tampère C.M.J., Viti F. & Immers L.H. (eds) : *New Developments in Transport Planning : Advances in Dynamic Traffic Assignment*. Edward Elgar, Cheltenham, UK - Northampton, MA, Etats-Unis.

Bureau fédéral du plan (2009) : Recensement de la circulation du Bureau fédéral du plan 2009, [http://www.plan.be/databases/PVar.php?VC=TRAF001&D1\[\]=ZZTOT&D2\[\]=W40MOTO&D2\[\]=W50PRIVATE&D2\[\]=W60LDV&D2\[\]=W70HDV&D2\[\]=W80BC&D2\[\]=W90SPEC&D3\[\]=WW10SNEI&DB=TRANSP&lang=nl&XT=0](http://www.plan.be/databases/PVar.php?VC=TRAF001&D1[]=ZZTOT&D2[]=W40MOTO&D2[]=W50PRIVATE&D2[]=W60LDV&D2[]=W70HDV&D2[]=W80BC&D2[]=W90SPEC&D3[]=WW10SNEI&DB=TRANSP&lang=nl&XT=0), consulté en août 2011

Ntziachristos, Samaras, et al., (2010) *EMEP EEA Emission Inventory Guidebook, Exhaust Emissions from Road Transport, Chapters 1.A.3.b.i, 1.A.3.b.ii, 1.A.3.b.iii, 1.A.3.b.iv*, 2009 (version juin 2010)

De Nocker L. et al. (2010) *Actualisering van de externe milieuschadetekosten (algemeen voor Vlaanderen) met betrekking tot luchtverontreiniging en klimaatverandering*, étude réalisée pour le compte de la Vlaamse Milieumaatschappij, MIRA, VITO.

Lee Tzu-Chang (2007), *An Agent-Based Model to Simulate Motorcycle Behaviour in Mixed Traffic Flow*, PhD thesis, Imperial College London

Ellis T. (2005), *Inquiry into managing transport congestion Victoria*, Motorcycle Riders' Association (MRA) Submission, décembre 2005.

UK Department for Transport (2004), *Motorcycles and Congestion : The Effect of Modal Split* ; Londres, Royaume-Uni, 2004

Minh C. (2005), *The Speed, Flow and headway analyses of motorcycle traffic*, Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, vol. 6, pp. 1496-1508.

Holroyd, E. M. (1963) *Effect of Motorcycles and Pedal Cycles on Saturation Flow at Traffic Signals*. Roads and Road Construction, oct., 315 – 316.

Powell, M. (2000) *A model to represent motorcycle behaviour at signalized intersections incorporating an amended first order macroscopic approach*, Transportation Research Part A, No. 34, 497 - 514.

Wigan, M. R. (2000) *Motorcycles as Transport* : Vol. 1 – Powered Two Wheelers in Victoria. VicRoads, Melbourne, Australie

OVG Vlaanderen (2010) *Onderzoek Verplaatsingsgedrag Vlaanderen, sept. 2009 – sept. 2010*, Instituut voor Mobiliteit, Hasselt, 2010

Agentschap voor binnenlands bestuur (2011) *Kilometervergoeding bij dienstverplaatsingen*, <http://binnenland.vlaanderen.be/kilometervergoeding>, consulté en septembre 2011

De Ceuster, G. et al. (2010) *TREMOVE v2.3 Model and Baseline Description*, rapport pour la Commission européenne, DG Environnement, 2005 ; mise à jour vers *TREMOVE v3.3*, 2010

Mayeres, I. (1999) *The control of transport externalities : A general equilibrium analysis*. PhD Thesis, Katholieke Universiteit Leuven, Louvain, Belgique.

Maerivoet S. en I. Yperman (2008) *Analyse van de congestie in België*, rapport final pour le Service Public Fédéral Mobilité et Transport, octobre 2008.

## Annexe A : Description du Link Transmission Model

Le Link Transmission Model est un modèle dynamique de simulation du trafic routier. Les modèles de ce type déterminent les temps de parcours et les coûts de déplacement dans un réseau routier après qu'on y a introduit les itinéraires suivis par les voyageurs.

### Caractéristiques du Link Transmission Model

Le Link Transmission Model (LTM) est un modèle de simulation macroscopique : les véhicules s'y déplacent sous la forme d'un continuum. La circulation fait l'objet d'une modélisation réaliste dans de grands réseaux concrets composés à la fois de voies rapides et de zones urbaines. Voici les caractéristiques du LTM :

- Les flux de véhicules se déplacent de maillon en maillon comme dans la théorie des ondes cinématiques de premier ordre. Dans LTM, la formation et la résorption des files correspondent plus étroitement à la réalité que dans les derniers modèles macroscopiques de distribution du trafic.
- L'algorithme de résolution de LTM calcule efficacement : les flux de véhicules dans les grands réseaux sont simulés rapidement.
- Les véhicules sont désagrégés en chemin. Durant leur passage sur le réseau, les véhicules voient leur itinéraire constamment remis à jour, afin que l'information du modèle de choix d'itinéraire puisse être véritablement exploitée.

### Algorithme de résolution

Les réseaux routiers sont constitués de maillons homogènes  $a$ , délimités par un point de départ  $x_a^0$  et un point d'arrivée  $x_a^L$ . Les maillons présentent une longueur arbitraire  $L_a$  et sont interconnectés par des nœuds  $n$ . Un nœud n'a pas de longueur physique ; son rôle se limite aux échanges entre les entités de circulation. Chaque nœud compte un ensemble de maillons entrants  $i$  et un ensemble de maillons sortants  $j$ .

Le nombre cumulé de véhicules  $N(x,t)$  est le nombre total de véhicules qui sont passés par le point  $x$  au moment  $t$ . A chaque moment, LTM calcule le nombre cumulé de véhicules qui sont passés par le point de départ et le point d'arrivée ( $x_a^0$  et  $x_a^L$ ) de chaque maillon  $a$ . Le temps de parcours n'est déterminé qu'après le moment où le véhicule quitte le maillon.

Le flux émetteur  $S_i(t)$  du maillon  $i$  au moment  $t$  est le nombre maximal de véhicules qui pourraient quitter le maillon durant l'intervalle de temps  $[t, t+\Delta t]$  si le maillon débouchait sur un réservoir de capacité illimitée.

Le flux récepteur  $R_j(t)$  du maillon  $j$  au moment  $t$  est le nombre maximal de véhicules qui pourraient entrer dans le maillon durant l'intervalle de temps  $[t, t+\Delta t]$  si le maillon connaissait une demande de trafic infinie.

Le flux transitoire  $G_{ij}(t)$  est le nombre de véhicules qui peuvent effectivement passer du maillon  $i$  au maillon  $j$  durant l'intervalle de temps  $[t, t+\Delta t]$ . L'algorithme de résolution LTM répartit toute

la période de simulation en intervalles de temps  $\Delta t$ . Pour chaque intervalle  $\Delta t$ , l'algorithme compte trois étapes :

Pour chaque intervalle de temps  $\Delta t$ ,

Pour chaque nœud  $n$ ,

**Étape 1 :** Déterminer le flux émetteur  $S_i$  à l'extrémité aval ( $x_i^L$ ) de chaque maillon entrant  $i \in I_n$  et déterminer le flux récepteur  $R_j$  à l'extrémité amont ( $x_j^0$ ) de chaque maillon sortant  $j \in J_n$ .

$I_n$  ( $J_n$ ) est l'ensemble des maillons entrants (sortants) du nœud  $n$ .

**Étape 2 :** Déterminer les flux transitoires  $G_{ij}(t)$  des maillons entrants  $i \in I_n$  vers les maillons sortants  $j \in J_n$ : autrement dit, déterminer la part des flux entrants et sortants qui est effectivement émise et reçue.

**Étape 3 :** Actualiser le nombre cumulé de véhicules  $N(x,t)$  pour l'extrémité aval ( $x_i^L$ ) de chaque maillon entrant  $i \in I_n$  et pour l'extrémité amont ( $x_j^0$ ) de chaque maillon sortant  $j \in J_n$ :

$$N(x_i^L, t + \Delta t) = N(x_i^L, t) + \sum_{j \in J_n} G_{ij}(t) \quad \text{pour tous les } i \in I_n$$

$$N(x_j^0, t + \Delta t) = N(x_j^0, t) + \sum_{i \in I_n} G_{ij}(t) \quad \text{pour tous les } j \in J_n$$

### Modèle en maillons

Dans LTM, les flux de véhicules se déplacent de maillon en maillon comme dans la théorie des ondes cinématiques. Le trafic se caractérise par trois variables macroscopiques : l'intensité  $q$ , la densité  $k$  et la vitesse moyenne  $v$ . Les trois variables entretiennent le rapport suivant :

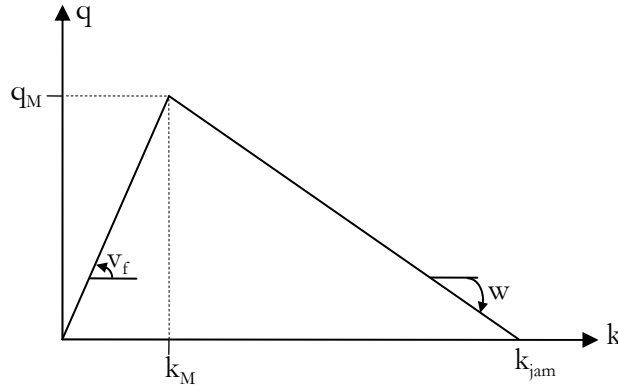
$$v = q/k$$

L'intensité  $q$  est le nombre de véhicules qui passent par un endroit déterminé durant l'intervalle de temps  $dt$ .

La densité  $k$  est le nombre de véhicules observés à un moment donné sur une distance  $dx$ .

Dans la théorie des ondes cinématiques, on admet qu'il existe une relation fonctionnelle entre l'intensité  $q$  et la densité  $k$ , relation aussi appelée diagramme fonctionnel. Par analogie avec Newell (1993), LTM utilise un diagramme fonctionnel triangulaire (voir Figure S.1).





**Figure S.1 : Diagramme fonctionnel triangulaire**

L'intensité  $q$  est nulle pour une densité nulle et pour la densité maximale  $k_{jam}$ . Entre les deux, la fonction atteint une intensité maximale  $q_M$ , que l'on appelle aussi capacité. La branche ascendante du diagramme fonctionnel représente les états de 'trafic fluide' ; la branche descendante reflète les états de 'congestion'.

La théorie des ondes cinématiques s'appuie à la fois sur ce diagramme fondamental et sur la loi de conservation des véhicules. La loi de conservation décrit l'évolution d'un état de circulation dans le temps et dans l'espace :

$$\frac{\partial k(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial q(x,t)}{\partial x} = 0$$

Les états de trafic fluide se déplacent à la vitesse  $v_f$  tandis que les états de congestion se déplacent à la vitesse négative  $w$  (cf. Figure S.2).

De la théorie des ondes cinématiques, on peut tirer le nombre cumulé de véhicules. Newell (1993) a développé une méthode pour obtenir le nombre cumulé de véhicules dans les maillons directement à partir des conditions initiales et périphériques. Sur la base de la théorie de Newell, une méthode efficace a été mise au point pour déterminer les flux émetteurs et récepteurs, première étape de l'algorithme de résolution de LTM :

$$S_i(t) = \min\left(\left(N(x_i^0, t + \Delta t - \frac{L_i}{v_{f,i}}) - N(x_i^L, t)\right), q_{M,i} \Delta t\right)$$

$$R_j(t) = \min\left(\left(N(x_j^L, t + \Delta t + \frac{L_j}{w_j}) + k_{jam} L_j - N(x_j^0, t)\right), q_{M,j} \Delta t\right)$$

En déterminant de cette façon les flux émetteurs et récepteurs, nous obtenons un trafic routier qui évolue de maillon en maillon conformément à la théorie des ondes cinématiques.

Comparé au Cell Transmission Model (CTM), LTM calcule plus efficacement. CTM est un modèle de trafic largement utilisé, avec un autre schéma de résolution numérique pour le même modèle d'ondes cinématiques. Pour obtenir la même précision, CTM a besoin d'un temps de calcul sensiblement supérieur.

### Modèles de nœuds

Les modèles de nœuds déterminent les flux transitoires  $G_{ij}(t)$  des maillons entrants  $i$  vers les maillons sortants  $j$  au niveau d'un nœud  $n$ , deuxième étape de l'algorithme de résolution LTM. Les modèles de nœuds respectent la loi de conservation du trafic. Chaque modèle de nœud possède ses règles de priorité et de comportement, qui imposent des limitations aux flux transitoires et conditionnent en fin de compte la part des flux émetteurs et récepteurs effectivement émise et reçue.

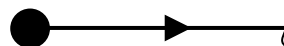
Les modèles de nœuds suivants servent à modéliser les réseaux autoroutiers :

- Nœud hétérogène  
Les nœuds hétérogènes permettent de modéliser un changement de capacité ou de limite de vitesse. Ces nœuds relient un maillon entrant à un maillon sortant (cf. Figure S.3).



**Figure S.2 : Nœud hétérogène**

- Nœud d'origine  
Au niveau d'un nœud d'origine, le trafic entre dans le réseau. Ces nœuds sont les points d'alimentation du réseau. Un maillon part de chaque nœud d'origine (cf. Figure S.4).



**Figure S.3 : Nœud d'origine**

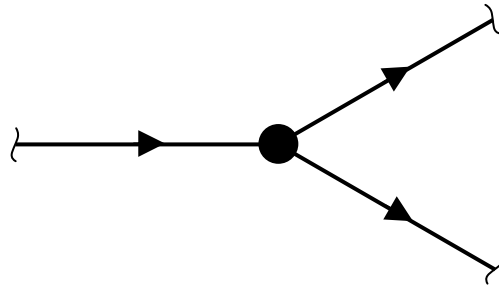
- Nœud de destination  
Le trafic quitte le réseau au niveau d'un nœud de destination. Un maillon débouche sur chaque nœud de destination (cf. Figure S.5).



**Figure S.4 : Nœud de destination**

- Nœud de séparation

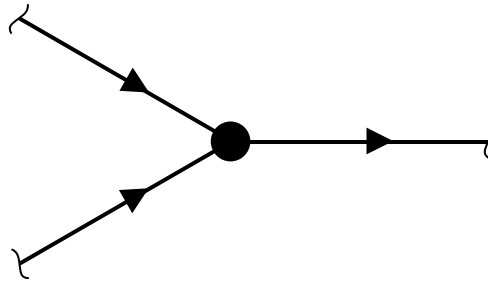
Les nœuds de séparation modélisent les sorties d'autoroute. Un maillon arrive au nœud de séparation et exactement deux maillons en repartent (cf. Figure S.6).



**Figure S.5 : Nœud de séparation**

- Nœud de jonction

Les nœuds de jonction modélisent les entrées d'autoroute. Deux maillons arrivent au nœud de jonction et un maillon en repart (cf. Figure S.7).



**Figure S.6 : Nœud de jonction**