

Étude dynamique intelligente du trafic

EDIT

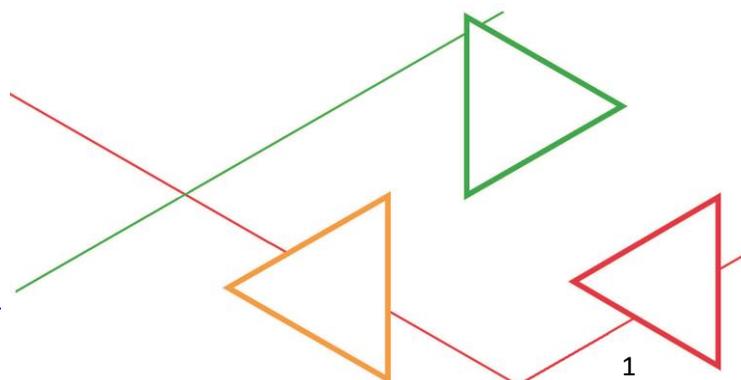
—

RAPPORT FINAL

Novembre 2023

Projet réalisé dans le cadre de la mise en œuvre du plan ENVieS (Action I-1-8) et du décret relatif à la lutte contre la pollution atmosphérique liée à la circulation des véhicules thermiques du 17 janvier 2019

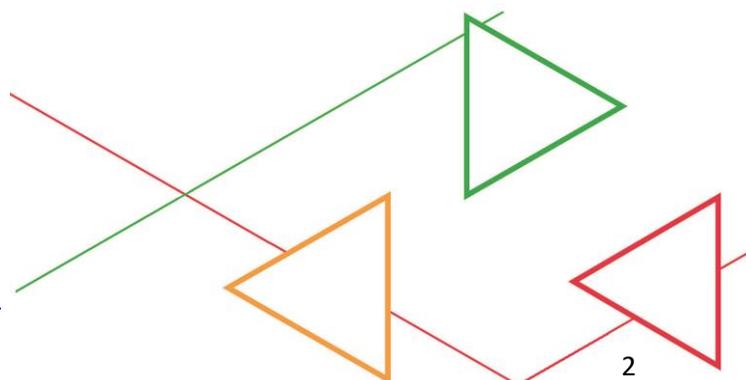
Rapport final n° 921/2024 – EDIT
Institut Scientifique de Service Public – www.issep.be



Étude dynamique intelligente du trafic

EDIT

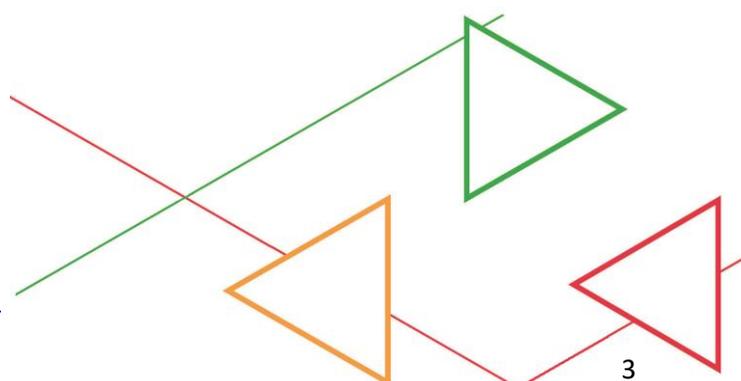
Durée du projet	Du 01/01/2021 au 30/06/2023
Auteur(s)	Marie Dury
Autres membres d'équipe du projet	Pierre Crespin (Cellule Qualité de l'Air) Nicolas Fernemont (Cellule Qualité de l'Air) Fabian Lenartz (Cellule Qualité de l'Air) Didier Muck (Cellule Qualité de l'Air) Paul Petit (Cellule Qualité de l'Air)
Personne de contact	Marie Dury – m.dury@issep.be
Vérificateur(s)	Benjamin Bergmans (Direction de l'Environnement)



PRÉAMBULE

Le présent document a été réalisé au titre de la mission d'appui aux pouvoirs publics confiée à l'ISSeP dans le cadre du plan ENVieS. La responsabilité de l'ISSeP ne peut pas être engagée, directement ou indirectement, du fait d'inexactitudes, d'omissions ou d'erreurs ou tous faits équivalents relatifs aux informations utilisées. L'exactitude de ce document doit être appréciée en fonction des connaissances disponibles et objectives et, le cas échéant, de la réglementation en vigueur à la date d'établissement du document. Par conséquent, l'ISSeP ne peut pas être tenu responsable en raison de l'évolution de ces éléments postérieurement à cette date. La mission ne comporte aucune obligation pour l'ISSeP d'actualiser ce document après cette date. Au vu des missions qui lui incombent, l'ISSeP n'est pas décideur. Les avis, recommandations, préconisations ou équivalents qui seraient proposés par l'ISSeP dans le cadre des missions qui lui sont confiées, ont uniquement pour objectif de conseiller le décideur dans sa prise de décision. Par conséquent, la responsabilité de l'ISSeP ne peut pas se substituer à celle du décideur qui est donc notamment seul responsable des interprétations qu'il pourrait réaliser sur la base de ce document. Ce rapport ne peut être reproduit sinon en entier. Toute exploitation de ce document donnant lieu à une publication scientifique est conditionnée à l'accord préalable de l'équipe du projet. Il en est de même pour toute autre modification qui y serait apportée. L'ISSeP dégage également toute responsabilité pour chaque utilisation du document en dehors de l'objet de la mission.

Référencement : ISSeP (2023), Rapport final de l'étude dynamique intelligente du trafic sur le territoire wallon pour le développement d'un modèle prédictif d'amélioration de la qualité de l'air en milieu urbain (EDIT), n° de rapport 921/2024



SYNTHESE DU PROJET

FINANCEMENT SPW-ARNE DANS LE CADRE DE LA MISE EN ŒUVRE DU PLAN ENVIES (2019-2023) – ACTION I-1-8

TITRE DU PROJET : ÉTUDE DYNAMIQUE INTELLIGENTE DU TRAFIC

BUDGET : 468.250 €

CHEF DE PROJET : Marie Dury

PARTENAIRES :

- AwAC (Agence wallonne de l’Air et du Climat)
- Transport & Mobility Leuven
- Les Villes de Namur et d’Eupen

LECTEURS EXTERNES : LES MEMBRES DU COMITÉ D’ACCOMPAGNEMENT

DURÉE DU PROJET : 30 MOIS

DATE DE DÉMARRAGE DU PROJET : 01/01/2021

REMERCIEMENTS : L’ISSEP REMERCIE LE SPW-ARNE POUR LEUR INTÉRÊT ET LEUR CONFIANCE POUR LA RÉALISATION DE L’ÉTUDE EDIT. NOUS EXPRIMONS ÉGALEMENT NOTRE GRATITUDE À TOUS LES MEMBRES DU COMITÉ D’ACCOMPAGNEMENT DU PROJET D’AVOIR ACCEPTÉ DE SUIVRE LE PROJET ET DE L’AVOIR ENRICHIS DE LEURS DISCUSSIONS. NOUS TENONS AUSSI À REMERCIER TOUT PARTICULIÈREMENT HANS HOOYBERGHS (VITO) POUR LA MISE À JOUR DU MODÈLE ATMO-STREET ET SA GRANDE DISPONIBILITÉ, AINSI QUE XAVIER FETTWEIS (ULIÈGE) POUR L’ENVOI DES SORTIES MÉTÉO DU MODÈLE MAR SUR LA BELGIQUE. ENFIN UN GRAND MERCI À MICHAËL PETIT (VILLE DE NAMUR) ET BENOÎT PESCH (VILLE D’EUPEN) POUR LEUR ASSISTANCE DANS LE DÉPLOIEMENT ET LA GESTION DES RÉSEAUX DE COMPTAGE TELRAAM.

Rapport final n° 921/2024 – EDIT
Institut Scientifique de Service Public – www.issep.be



Contenu

1	Introduction.....	14
2	Comptages du trafic	17
3	Modélisation du trafic	22
3.1	Introduction.....	22
3.2	Modèle de demande	24
3.2.1	Génération des déplacements.....	24
3.2.2	Distribution des déplacements.....	45
3.2.3	Choix du mode.....	48
3.3	Modèle d'approvisionnement.....	52
3.3.1	Modèle de réseau.....	52
3.3.2	Affectation du trafic.....	63
3.4	Calibrage.....	66
3.4.1	Données de comptage.....	66
3.4.2	Résultats	71
3.4.3	Validation du modèle	77
3.5	Scénarios	79
3.5.1	Namur	79
3.5.2	Eupen.....	89
3.6	Flux hebdomadaires	95
4	Modélisation de la qualité de l'air.....	97
4.1	ATMO-Street.....	97
4.1.1	Données d'entrée	98
4.1.2	Cartes de concentrations.....	99
4.1.3	Validation du modèle	99
4.2	Projections pour Namur	100
4.2.1	Conditions 2022.....	100
4.2.2	Scénario 1 : instauration d'une zone basses émissions communale.....	104
4.2.3	Scénario 2 : extension du piétonnier.....	110
4.2.4	Scénario 3 : mise en sens unique de la Petite Ceinture.....	114

4.3	Projections pour Eupen	116
4.3.1	Conditions 2022.....	116
4.3.2	Scénario 1 : mise en sens unique du ring interne pour les poids lourds.....	120
4.3.3	Scénario 2 : scénario 1 avec un centre interdit aux poids lourds.....	122
4.3.4	Scénario 3 : scénario 2 avec une interdiction aux poids lourds de descendre la Simarstrasse	124
4.3.5	Scénario 4 : mise en sens unique de l’Olengraben pour tous les véhicules.....	126
5	Discussion et conclusion.....	128
6	Coordination et communication	133
7	Bibliographie.....	135
8	Annexes	136
8.1	Annexe 1 – Inventaire d’émissions par secteur en Wallonie	136
8.2	Annexe 2 – Localisation des comptages Telraam à Namur et à Eupen.....	140
8.3	Annexe 3 - Propriétés du réseau	142
8.4	Annexe 4 – Comptages utilisés pour le calibrage du modèle de mobilité	145
8.5	Annexe 5 - Évolution de la flotte des villes de Namur, Charleroi et Liège de 2018 à 2030	149
8.6	Annexe 6 - Part estimée des émissions totales de NO _x et PM pour les véhicules M1 et N1 à Bruxelles en automne 2020.....	151

Liste des Figures

Figure 1. Évolution des concentrations moyennes annuelles en NO ₂ en Belgique sur base de la technique d'interpolation RIO.....	14
Figure 2. Contribution des différentes sources aux concentrations de fond urbain en NO ₂ à Namur.	16
Figure 3. Évolution des concentrations moyennes annuelles en PM _{2,5} en Belgique sur base de la technique d'interpolation RIO.....	15
Figure 4. Comptages trafic à Namur utilisés dans le projet 2ZBE	17
Figure 5. Comptages trafic à Eupen utilisés dans le projet 2ZBE	18
Figure 6. Dispositif Telraam pour le comptage du trafic.....	19
Figure 7. Nombre et localisation des citoyens compteurs du trafic à Namur.....	20
Figure 8. Nombre et localisation des citoyens compteurs du trafic à Eupen.....	20
Figure 9. Vue d'ensemble du modèle de trafic en quatre étapes développé pour l'étude.	23
Figure 10. Diagramme de flux du modèle de génération des déplacements.	24
Figure 11. POI résidentiels pour Namur.....	29
Figure 12. Les POI d'activités pour Namur.	29
Figure 13. Zonage utilisé pour l'ensemble des données d'entraînement, basé sur le zonage du RVM Leuven et du RVM Limburg.	32
Figure 14. Comparaison entre le RVM et le modèle de régression linéaire pour Louvain et le Limbourg (déplacements professionnels, production à l'heure de pointe du matin).	36
Figure 15. Comparaison entre le RVM et le modèle de régression linéaire pour Louvain et le Limbourg (déplacements professionnels, attraction à l'heure de pointe du matin).	38
Figure 16. Comparaison entre le RVM et le modèle de régression linéaire pour Louvain et le Limbourg pour les autres déplacements.....	39
Figure 17. Déplacements professionnels, production 8- 9h.	42
Figure 18. Déplacements professionnels, attraction 8-9h.	42
Figure 19. Déplacements non professionnels, production 17-18h.....	43
Figure 20. Déplacements non professionnels, attraction 17-18h.....	43
Figure 21. Production totale pour Namur 8-9h.....	44
Figure 22. Attraction totale pour Namur 8- 9h.	44
Figure 23. Production totale pour Eupen 8-9h.....	44
Figure 24. Attraction totale pour Eupen 8- 9h.	44
Figure 25. SchÉma de flux du modÈle de distribution.	45
Figure 26. Différents types de fonctions de distribution.	46
Figure 27. Organigramme du modèle de choix du mode de transport.	49
Figure 28. Probabilité de choisir un mode m en fonction des utilités de tous les modes.	50
Figure 29. Passage du réseau routier physique au modèle de réseau.....	53
Figure 30. Zone interne de Namur.	54
Figure 31. Zone interne d'Eupen.	54
Figure 32. Réseau automobile pour Namur.	56

Figure 33. Réseau automobile pour Eupen.	57
Figure 34. Réseau cyclable de Namur.	57
Figure 35. Réseau cyclable d'Eupen.	58
Figure 36. Arrêts du réseau de transport public de Namur.	59
Figure 37. Arrêts du réseau de transport public d'Eupen.	60
Figure 38. Arrêts parents de la SNCB et du TEC à Namur.	61
Figure 39. Arrêts parents de la SNCB et du TEC à Eupen.	62
Figure 40. Algorithme d'affectation du trafic.	63
Figure 41. Temps de parcours sur le tronçon en fonction du débit du tronçon.	64
Figure 42. Méthode traditionnelle pour les connecteurs.	65
Figure 43. Nouvelle méthode pour les connecteurs.	65
Figure 44. Profil du trafic journalier autoroutier dérivé des comptages en Flandre.	67
Figure 45. Localisation des comptages ISSeP et Telraam à Namur.	69
Figure 46. Emplacements des comptages ISSeP et Telraam à Eupen.	70
Figure 47. Résultats de l'étalonnage du trafic simulé à 8-9h à Namur pour le mode voiture.	71
Figure 48. Résultats de l'étalonnage du trafic simulé à 8-9h à Namur pour le mode poids lourds.	72
Figure 49. Résultats de l'étalonnage du trafic simulé à 8-9h à Namur pour les modes vélo et piéton.	72
Figure 50. Résultats de l'étalonnage du trafic simulé à 17-18h à Namur pour le mode voiture.	73
Figure 51. Résultats de l'étalonnage du trafic simulé à 17-18h à Namur pour le mode poids lourds.	73
Figure 52. Résultats de l'étalonnage du trafic simulé à 17-18h à Namur pour les modes vélo et piéton.	74
Figure 53. Résultats de l'étalonnage du trafic simulé à 8-9h à Eupen pour le mode voiture.	74
Figure 54. Résultats de l'étalonnage du trafic simulé à 8-9h à Eupen pour le mode poids lourds.	75
Figure 55. Résultats de l'étalonnage du trafic simulé à 8-9h à Eupen pour les modes vélo et piéton.	75
Figure 56. Résultats de l'étalonnage du trafic simulé à 17-18h à Eupen pour le mode voiture.	76
Figure 57. Résultats de l'étalonnage du trafic simulé à 17-18h à Eupen pour le mode poids lourds.	76
Figure 58. Résultats de l'étalonnage du trafic simulé à 17-18h à Eupen pour les modes vélo et piéton.	77
Figure 59. Validation des flux de voitures modélisés avant calibrage (8-9h).	78
Figure 60. Validation des flux de voitures modélisés avant calibrage (17-18h).	78
Figure 61. Flux de voitures à l'heure de pointe du matin (8-9h) dans le modèle de Namur.	79
Figure 62. Flux de poids lourds à l'heure de pointe du matin (8-9h) dans le modèle de Namur.	80
Figure 63. Plan de circulation de la première phase d'extension du piétonnier.	81
Figure 64. Plan de circulation avec limitations de vitesse.	82
Figure 65. Impact sur les flux de voitures du scénario d'extension de la zone piétonne (phase 1) par rapport au scénario de base (8-9h).	83
Figure 66. Impact sur les flux de voitures du scénario d'extension de la zone piétonne (Corbeille entière) par rapport au scénario de base (8-9h).	84
Figure 67. Impact sur les flux de voitures d'une extension de la zone piétonne (Corbeille entière) et d'une mise en sens unique de la Petite Ceinture par rapport au scénario de base (8-9h).	85

Figure 68. Temps de parcours en transports publics à partir du P+R Bouge (heure de pointe du matin).	87
Figure 69. Temps de parcours en transports publics vers le P+R Bouge (heure de pointe du soir).	87
Figure 70. Temps de parcours en transports publics depuis le P+R Erpent (heure de pointe du matin).	88
Figure 71. Temps de parcours en transports publics vers le P+R Erpent (heure de pointe du soir).	88
Figure 72. Flux de voitures à l'heure de pointe du matin (8-9h) dans le modèle d'Eupen.	89
Figure 73. Flux de poids lourds à l'heure de pointe du matin (8-9h) dans le modèle d'Eupen.	90
Figure 74. Impact sur les flux de camions d'une mise en sens unique du ring interne à Eupen (scénario 1) par rapport au scénario de base (8-9h).	91
Figure 75. Impact sur les flux de camions d'une mise en sens unique du ring interne et d'un centre interdit aux camions (scénario 2) par rapport au scénario de base (8-9h).	92
Figure 76. Impact sur les flux de camions du scénario 3 (scénario 2 avec une interdiction aux poids lourds de descendre la Simarstrasse) par rapport au scénario de base (8-9h).	93
Figure 77. Impact sur les flux de voitures d'une mise en sens unique de l'Olengraben à Eupen (scénario 4) par rapport au scénario de base (8-9h).	94
Figure 78. Impact sur les flux de camions d'une mise en sens unique de l'Olengraben à Eupen (scénario 4) par rapport au scénario de base (8-9h).	95
Figure 79. Structure, données d'entrée et sorties du modèle ATMO-Street.	97
Figure 80. Concentrations moyennes annuelles en NO ₂ en 2022.	100
Figure 81. Concentrations moyennes en NO ₂ à l'heure de pointe du matin (8h) en 2022.	101
Figure 82. Concentrations moyennes en NO ₂ en mai 2022.	102
Figure 83. Concentrations moyennes en NO ₂ à l'heure de pointe du matin (8h) en mai 2022.	103
Figure 84. Évolution des concentrations en NO ₂ projetée sous le scénario 1a.	106
Figure 85. Concentrations moyennes en NO ₂ dans le scénario 1a (conditions mai 2022).	107
Figure 86. Concentrations moyennes en NO ₂ à l'heure de pointe du matin (8h).	107
Figure 87. Évolution des concentrations en NO ₂ projetée sous le scénario 1b.	108
Figure 88. Concentrations moyennes en NO ₂ dans le scénario 1b (conditions mai 2022).	109
Figure 89. Concentrations moyennes en NO ₂ à l'heure de pointe du matin (8h).	109
Figure 90. Évolution des concentrations en NO ₂ projetée sous le scénario 2a.	110
Figure 91. Concentrations moyennes en NO ₂ dans le scénario 2a (conditions mai 2022).	111
Figure 92. Concentrations moyennes en NO ₂ à l'heure de pointe du matin (8h).	111
Figure 93. Évolution des concentrations en NO ₂ projetée sous le scénario 2b.	112
Figure 94. Concentrations moyennes en NO ₂ dans le scénario 2b (conditions mai 2022).	113
Figure 95. Concentrations moyennes en NO ₂ à l'heure de pointe du matin (8h).	113
Figure 96. Évolution des concentrations en NO ₂ projetée sous le scénario 3.	114
Figure 97. Concentrations moyennes en NO ₂ dans le scénario 3 (conditions mai 2022).	115
Figure 98. Concentrations moyennes en NO ₂ à l'heure de pointe du matin (8h).	115
Figure 99. Concentrations moyennes annuelles en NO ₂ en 2022.	116
Figure 100. Concentrations moyennes en NO ₂ à l'heure de pointe du matin (8h) en 2022.	117
Figure 101. Concentrations moyennes en NO ₂ en mai 2022.	118

Figure 102. Concentrations moyennes en NO ₂ à l'heure de pointe du matin (8h) en mai 2022.....	119
Figure 103. Évolution des concentrations en NO ₂ projetée sous le scénario 1.	120
Figure 104. Concentrations moyennes en NO ₂ dans le scénario 1 (conditions mai 2022).	121
Figure 105. Concentrations moyennes en NO ₂ à l'heure de pointe du matin (8h).....	121
Figure 106. Évolution des concentrations en NO ₂ projetée sous le scénario 2.	122
Figure 107. Concentrations moyennes en NO ₂ dans le scénario 2 (conditions mai 2022).	123
Figure 108. Concentrations moyennes en NO ₂ à l'heure de pointe du matin (8h).....	123
Figure 109. Évolution des concentrations en NO ₂ projetée sous le scénario 3.	124
Figure 110. Concentrations moyennes en NO ₂ dans le scénario 3 (conditions mai 2022).	125
Figure 111. Concentrations moyennes en NO ₂ à l'heure de pointe du matin (8h).....	125
Figure 112. Évolution des concentrations en NO ₂ projetée sous le scénario 4.	126
Figure 113. Concentrations moyennes en NO ₂ dans le scénario 4 (conditions mai 2022).	127
Figure 114. Concentrations moyennes en NO ₂ à l'heure de pointe du matin (8h).....	127
Figure 115. Évolution des émissions de NO _x par source d'émissions en Wallonie.	136
Figure 116. Évolution des émissions de PM ₁₀ par source d'émissions en Wallonie.	137
Figure 117. Évolution des émissions de PM _{2,5} par source d'émissions en Wallonie.....	138
Figure 118. Évolution des émissions de BC par source d'émissions en Wallonie.	139
Figure 119. Part estimée des émissions totales de NO _x et de PM pour les voitures particulières (catégorie M1) circulant à Bruxelles en automne 2020.	151
Figure 120. Part estimée des émissions totales de NO _x et de PM pour les véhicules utilitaires légers (catégorie N1) circulant à Bruxelles en automne 2020.	151

Liste des Tableaux

Tableau 1. Sources des données utilisées dans le modèle de demande.	26
Tableau 2. Variables sélectionnées par motif de déplacement.	34
Tableau 3. Coefficients du modèle pour les déplacements professionnels en provenance ou en direction du lieu de résidence.	35
Tableau 4. Validation du modèle pour les déplacements professionnels en provenance ou en direction du lieu de résidence.	36
Tableau 5. Coefficients du modèle pour les déplacements professionnels en direction ou en provenance du lieu de travail.	37
Tableau 6. Validation du modèle pour les déplacements professionnels en direction ou en provenance du lieu de travail.	37
Tableau 7. Coefficients du modèle pour les déplacements non professionnels.	38
Tableau 8. Validation du modèle pour les déplacements non professionnels.	39
Tableau 9. Coefficients des modèles pour les camions.	40
Tableau 10. Validation des modèles pour les camions.	40
Tableau 11. Distances et durées moyennes des déplacements par motif.	47
Tableau 12. Paramètres du choix modal provenant des modèles stratégiques de trafic flamands.	51
Tableau 13. Parts modales pour les déplacements en Wallonie.	51
Tableau 14. Nombre de voitures utilisant les parkings-relais en fonction du temps de trajet en transports publics.	86
Tableau 15. Facteurs d'émissions (COPERT V) moyens pour la flotte de véhicules en Wallonie en 2021.	98
Tableau 16. Zone basses émissions communale - Calendrier des restrictions.	104
Tableau 17. Évolution projetée des émissions du transport routier avec l'instauration d'une zbe communale.	105
Tableau 18. Nombre de véhicules (et pourcentage par rapport à la flotte 2021 totale de 2 247 664 véhicules) ne répondant pas en Wallonie aux conditions d'accès à une zbe communale, initialement prévus en 2020, 2022 et 2025.	105
Tableau 19. Prévisions de la consommation budgétaire.	134
Tableau 20. Consommation budgétaire.	134
Tableau 21. Évolution des émissions de NO _x par source d'émissions en Wallonie.	136
Tableau 22. Évolution des émissions de PM ₁₀ par source d'émissions en Wallonie.	137
Tableau 23. Évolution des émissions de PM _{2,5} par source d'émissions en Wallonie.	138
Tableau 24. Rues dans lesquelles des comptages Telraam ont été réalisés à Namur.	140
Tableau 25. Rues dans lesquelles des comptages Telraam ont été réalisés à Eupen.	141
Tableau 26. Comptages radar ISSeP utilisés à Eupen.	145
Tableau 27. Comptages radar ISSeP utilisés à Namur.	146
Tableau 28. Comptages ANPR traité à Namur.	147
Tableau 29. Évolution de la flotte de véhicules à Namur, Charleroi et Liège de 2018 à 2030.	149

Tableau 30. Évolution de la flotte de véhicules diesel à Namur, Charleroi et Liège de 2018 à 2030.	149
Tableau 31. Évolution de la flotte de véhicules essence et CNG à Namur, Charleroi et Liège de 2018 à 2030.....	150

Liste des abréviations

ANPR : *automatic number plate recognition* (lecture automatique des plaques d'immatriculation)
AwAC : Agence wallonne de l'Air et du Climat
BC : carbone noir (*black carbon* en anglais)
CELINE (IRCEL) : Cellule Interrégionale de l'Environnement
DIV : Division Immatriculation des Véhicules
FCD : *floating car data* (données de véhicule flottant)
GPKG : *geopackage*
GTFS : *General Transit Feed Specification* (spécification générale pour les flux relatifs aux transports en commun)
GMNS : *General Modelling Network Specification* (spécification générale pour la modélisation des réseaux)
HEPL : Haute École de la Province de Liège
IBGE : Institut bruxellois pour la Gestion de l'Environnement
ISSEP : Institut Scientifique de Service Public
LEZ : *low emission zone*
NACE : Nomenclature statistique des activités économiques dans la Communauté européenne
NO_x : oxydes d'azote
NO₂ : dioxyde d'azote
OMS: Organisation Mondiale de la Santé
OSM : *OpenStreetMap*¹
OD : Origine-Destination
PCU : *passenger car units* (unités de voitures particulières)
PM₁₀ : particules dont le diamètre est < 10 micromètres (*particulate matter* en anglais)
PM_{2.5} : particules dont le diamètre est < 2,5 micromètres (*particulate matter* en anglais)
POI : *point of interest* (point d'intérêt)
RVM : *Regionaal VerkeersModel* (Modèle de trafic régional)
SDD : *socio-demographic data* (données socio-démographiques)
SEE : *socio-economische enquête 2001* (enquête socio-économique générale 2001)²
Statbel : Office belge de statistique
VITO : Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek
VMM : Vlaamse Milieumaatschappij
ZBE : zone basses émissions

¹ <https://www.openstreetmap.org/#map=8/50.510/4.475>

² <https://statbel.fgov.be/fr/propos-de-statbel/que-faisons-nous/recensement-census/census-publications>

1 Introduction

La pollution atmosphérique³ et ses effets néfastes sur la santé⁴ restent un problème pour la plupart des villes européennes. En 2021, un peu plus de 50 %, 30 % et 80 % de la population wallonne, dont la majorité de la population urbaine, a été exposée à des concentrations supérieures aux seuils recommandés par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) pour respectivement le NO₂, les PM₁₀ et les PM_{2.5} (ISSeP, 2021). Une cartographie précise des concentrations en polluants atmosphériques et des stratégies politiques pour réduire ces niveaux de pollution sont donc primordiaux pour limiter les impacts sur la santé humaine.

Au cours de la dernière décennie, les émissions (annexe 1) et les concentrations (figures 1 et 2) des principaux polluants atmosphériques (dioxyde d'azote NO₂, particules fines PM₁₀ et PM_{2.5} et carbone noir BC) ont cependant toutes deux diminué de manière significative à l'échelle de la Belgique et de ses trois régions, avec une année 2020 anormale durant laquelle les concentrations en polluants ont fortement diminuées en raison des mesures COVID. Les causes de ces diminutions sont multiples, notamment le renouvellement et la verdurisation de la flotte de véhicules mais aussi, la crise sanitaire avec le développement du télétravail en 2020 et la crise énergétique en 2022.

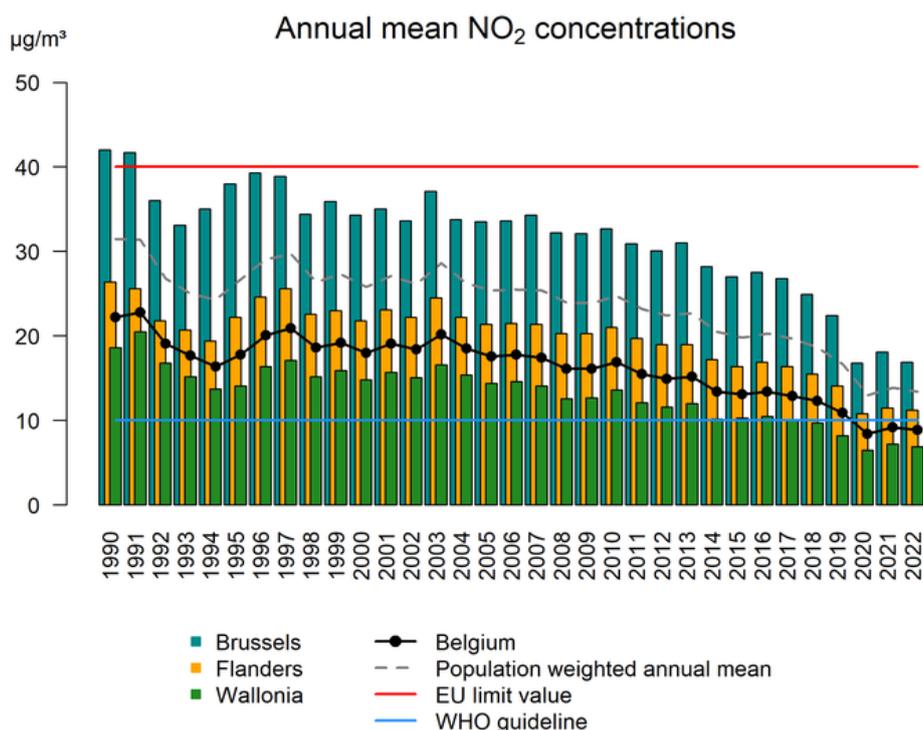


FIGURE 1. ÉVOLUTION DES CONCENTRATIONS MOYENNES ANNUELLES EN NO₂ EN BELGIQUE SUR BASE DE LA TECHNIQUE D'INTERPOLATION RIO (CELINE, 2023).

³ <https://www.eea.europa.eu/publications/europes-air-quality-status-2023>

⁴ <https://www.who.int/europe/health-topics/air-pollution>

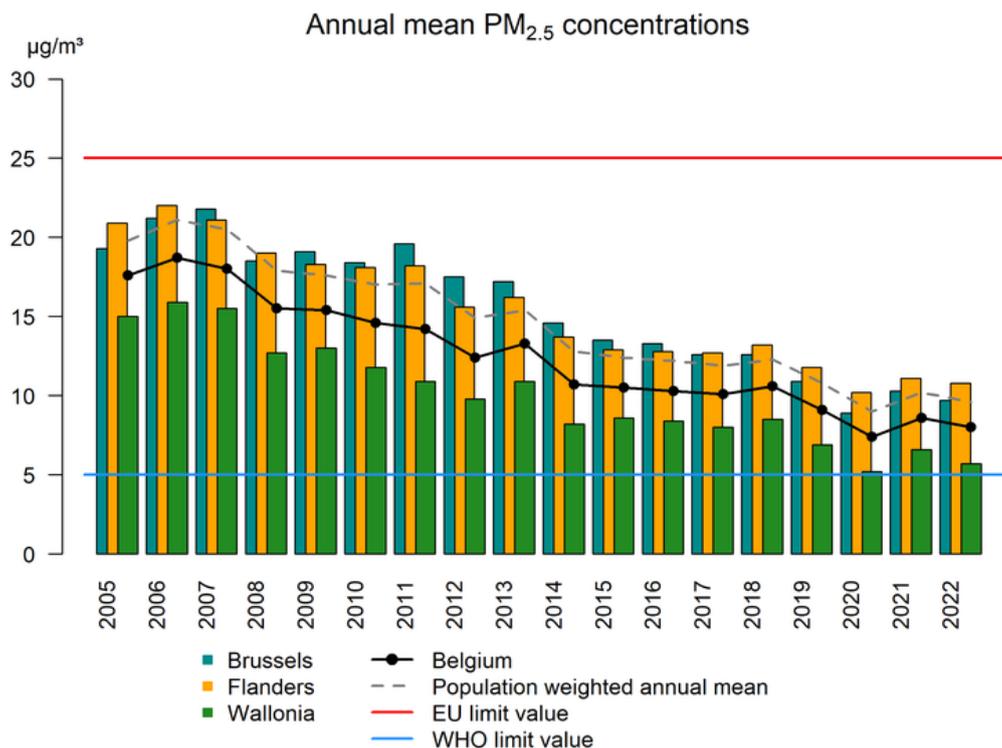


FIGURE 2. ÉVOLUTION DES CONCENTRATIONS MOYENNES ANNUELLES EN PM_{2.5} EN BELGIQUE SUR BASE DE LA TECHNIQUE D'INTERPOLATION RIO (CELINE, 2023).

En 2021, l'OMS a mis à jour ses lignes directrices relatives à la qualité de l'air ambiant en abaissant les valeurs seuils des principaux polluants atmosphériques. En septembre dernier, le Parlement européen a approuvé la révision de la Directive sur la qualité de l'air ambiant. Si ce projet est adopté par le Conseil européen, les États membres devront respecter des valeurs limites qui s'alignent sur les recommandations OMS d'ici 2035. Dans ce contexte, des mesures politiques doivent continuer à être prises pour diminuer les niveaux de pollution et respecter les valeurs limites actuelles et futures de la Directive européenne.

Dans le cadre du Plan Environnement-Santé de la Wallonie (Plan ENVieS), une première étude a été réalisée en 2019 (projet 2ZBE; ISSeP, 2020) sur deux villes wallonnes, Eupen et Namur, afin d'objectiver l'intérêt de l'instauration d'une zone basses émissions communale (ZBE) pour l'amélioration de la qualité de l'air dans ces entités et de déterminer, ensuite, la zone géographique d'implantation la plus adaptée. Cette étude a permis de produire, à l'aide du modèle de dispersion atmosphérique ATMO-Street, des cartes à très haute résolution des concentrations en polluants liés au trafic et d'évaluer l'impact, sur ces niveaux de pollution, de l'interdiction progressive des véhicules les plus anciens et les plus polluants. Les résultats de l'étude ont montré que l'adoption d'une ZBE pouvait être pertinente à Namur mais pas à Eupen.

Les projections réalisées dans le projet 2ZBE étaient cependant « statiques », ne prenant en compte que la configuration actuelle des villes de Namur et d'Eupen. Or, lorsqu'une route est fermée ou

qu'un périmètre devient une zone basses émissions interdite à certains véhicules, par exemple, les automobilistes vont emprunter un itinéraire alternatif. L'impact de telles mesures peut ainsi avoir une influence sur les rues et les zones environnantes. Disposer d'un outil incluant une modélisation dynamique des flux du trafic routier apparaissait donc nécessaire.

En 2021, grâce encore au Plan ENVleS, l'ISSEP a pu mener une nouvelle étude, intitulée Étude Dynamique Intelligente du Trafic, visant cette fois à évaluer l'impact d'autres mesures de mobilité et d'aménagements urbains (extension d'un piétonnier, installation de parkings de délestage, ...), complémentaires ou non à une ZBE, à Namur et à Eupen. L'objectif de l'étude est de mettre à la disposition des villes un outil d'aide à la décision pour orienter leurs choix en matière de mobilité avec pour finalité première une amélioration de la qualité de l'air. L'étude EDIT se concentre sur le NO₂ car 38 % des concentrations en NO₂ proviennent du transport routier alors que ce dernier est responsable de moins de 10 % des concentrations en PM_{2.5} (figure 3).

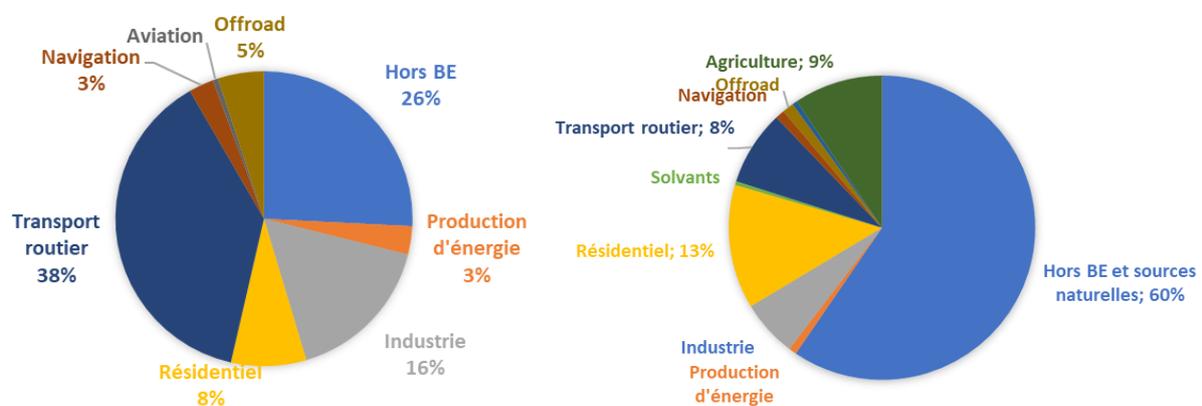
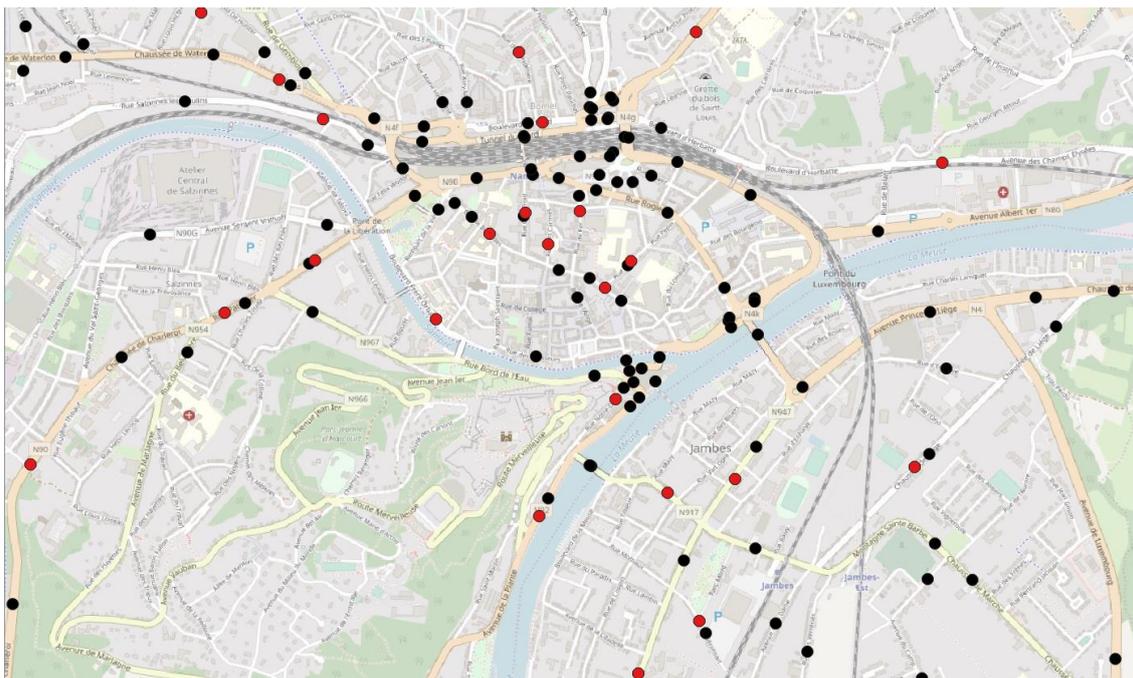


FIGURE 3. CONTRIBUTION DES DIFFÉRENTES SOURCES AUX CONCENTRATIONS DE FOND URBAIN EN NO₂ (À GAUCHE) ET EN PM_{2.5} À NAMUR (À DROITE; AWAC, 2023).

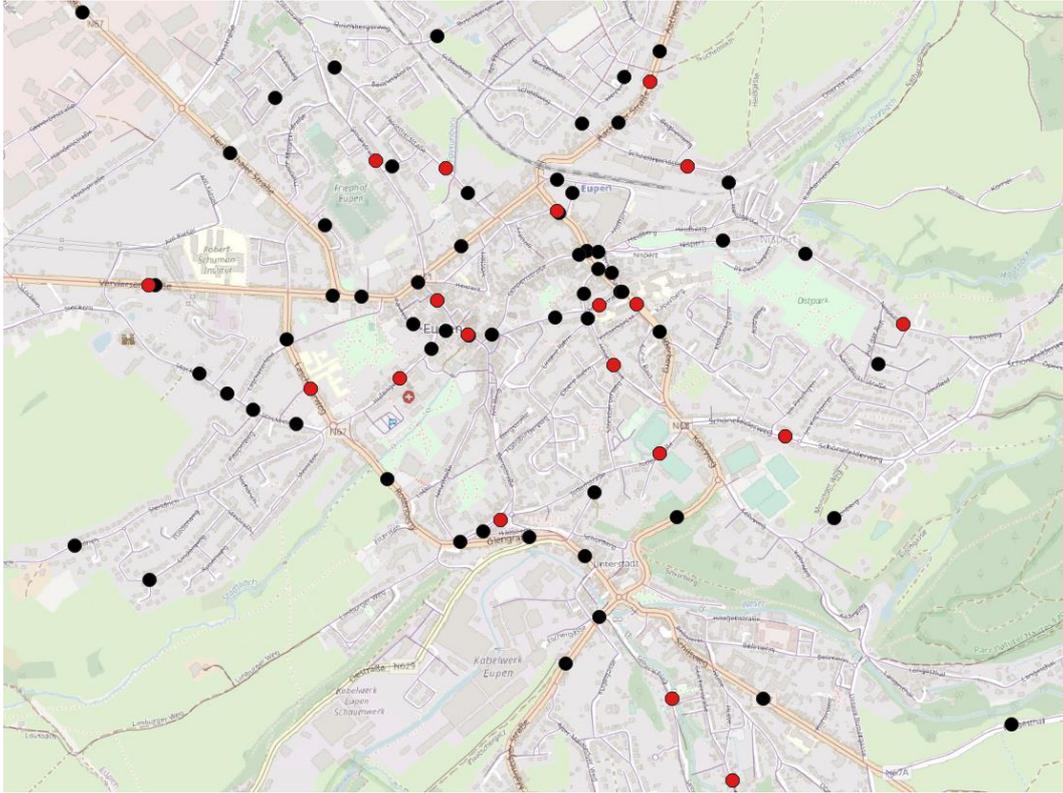
Dans l'étude EDIT, la modélisation des flux du trafic routier à Namur et à Eupen a été développée par la société Transport & Mobility Leuven (chapitre 3). Les flux estimés par le modèle, ont été calibrés et validés par des comptages du trafic, notamment réalisés grâce à des citoyens de Namur et d'Eupen à l'aide de dispositifs de comptage Telraam (chapitre 2). La chaîne de modélisation ATMO-street, utilisée dans la première étude ZZBE, est alimentée par les flux de trafic simulés pour les conditions de trafic actuelles et pour différents scénarios de mobilité (chapitre 4).

2 Comptages du trafic

Dans le cadre de l'étude d'impact de l'instauration d'une zone basses émissions communale sur la qualité de l'air à Namur et à Eupen (projet ENVieS 2ZBE), l'ISSeP a réalisé en 2019 des comptages dans les deux communes qui sont venus compléter et actualiser les données communales et régionales existantes (ISSeP, 2020; figures 4 et 5).



**FIGURE 4. COMPTAGES TRAFIC À NAMUR UTILISÉS DANS LE PROJET 2ZBE
(COMPTAGES COMMUNAUX OU RÉGIONAUX EN NOIR, COMPTAGES ISSEP 2019 EN ROUGE).**



**FIGURE 5. COMPTAGES TRAFIC À EUPEN UTILISÉS DANS LE PROJET 2ZBE
(COMPTAGES COMMUNAUX OU RÉGIONAUX EN NOIR, COMPTAGES ISSEP 2019 EN ROUGE).**

Pour le projet EDIT, l'ISSEP a souhaité, pour permettre notamment de développer un modèle de mobilité robuste, actualiser et densifier les comptages du trafic à Namur et à Eupen en acquérant 120 dispositifs de comptage du trafic Telraam (<https://telraam.net/>).

Le dispositif Telraam est un système léger d'observation de la circulation. Il se compose d'un micro-ordinateur Raspberry Pi, de capteurs et d'une caméra à très faible résolution. Il permet de mesurer le trafic et sa vitesse ainsi que de connaître la répartition entre les piétons, les deux-roues, les voitures et les véhicules lourds (camions, bus, ...). Le dispositif doit être fixé sur la face intérieure d'une fenêtre située au premier étage d'un bâtiment avec une vue dégagée sur la rue à observer (figure 6).



FIGURE 6. DISPOSITIF TELRAAM (MICRO-ORDINATEUR RASPBERRY PI ET CAMÉRA) POUR LE COMPTAGE DU TRAFIC.

Les images filmées ne sont ni stockées sur l'appareil ni envoyées sur un serveur. Elles sont directement traitées pour la détection des différents usagers et seul le comptage des usagers est envoyé par wifi à un serveur Telraam. Ces données de comptage sont mises à disposition des autorités, des chercheurs, mais aussi de tous les citoyens ou acteurs intéressés sur telraam.net. Le système répond au Règlement général sur la protection des données. Les données récoltées sont donc 100 % anonymes (rien ne permet de reconnaître un véhicule ou une personne) et ne peuvent donc servir à aucune autre utilisation que le comptage de la circulation.

En novembre 2021, un appel à participants a été lancé à Namur et à Eupen. Cet appel a porté ses fruits avec 117 et 33 candidatures respectivement à Namur et à Eupen (figures 7 et 8). Le système Telraam exige de bonnes conditions de comptage avec une habitation adaptée (fenêtre au premier étage, absence d'obstacles visuels, distance de maximum 15 mètres entre la fenêtre et la voirie observée) et une bonne connexion wifi. Tous les candidats ne remplissaient pas ces conditions et, finalement, 77 citoyens (62 à Namur et 15 à Eupen) ont pu accueillir un dispositif de comptage. La localisation et la période de ces comptages sont listés à l'annexe 2. En février et mars 2022, plusieurs séances d'information sur le projet EDIT et sur l'utilisation des dispositifs Telraam ont été organisées pour les citoyens namurois et eupenois participants.

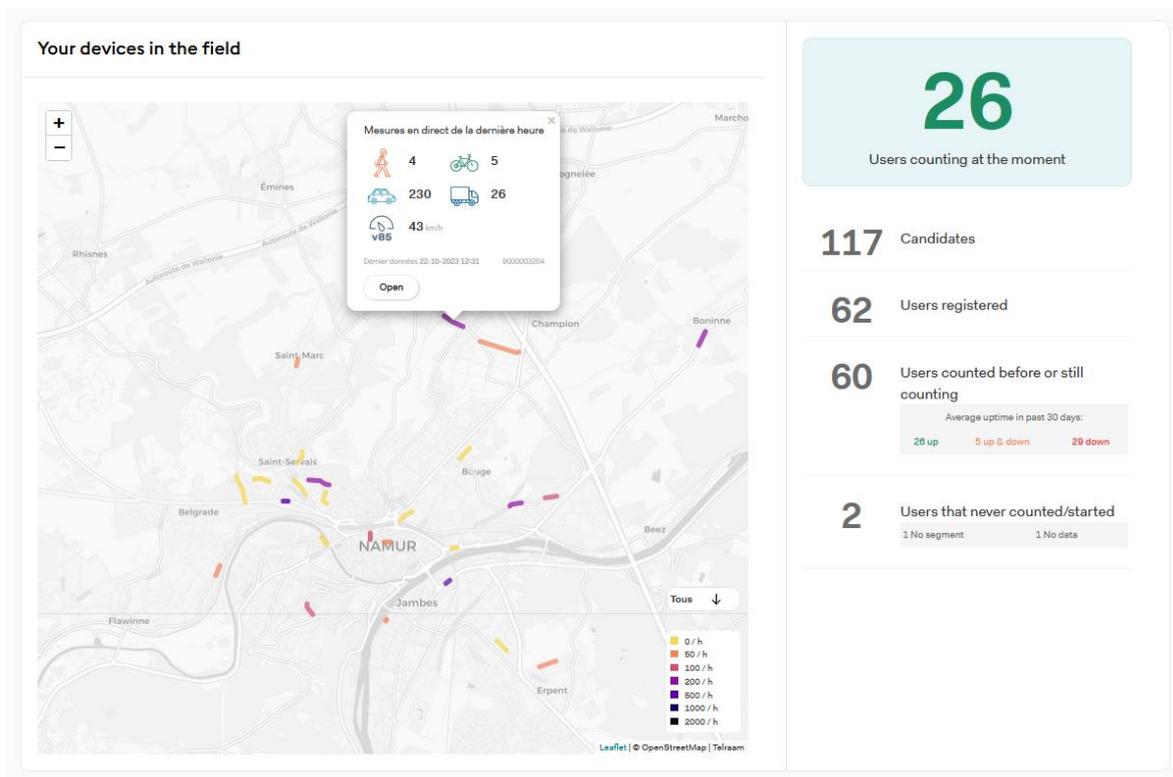


FIGURE 7. NOMBRE ET LOCALISATION DES CITOYENS COMPTEURS DU TRAFIC À NAMUR (SITUATION EN OCTOBRE 2023).

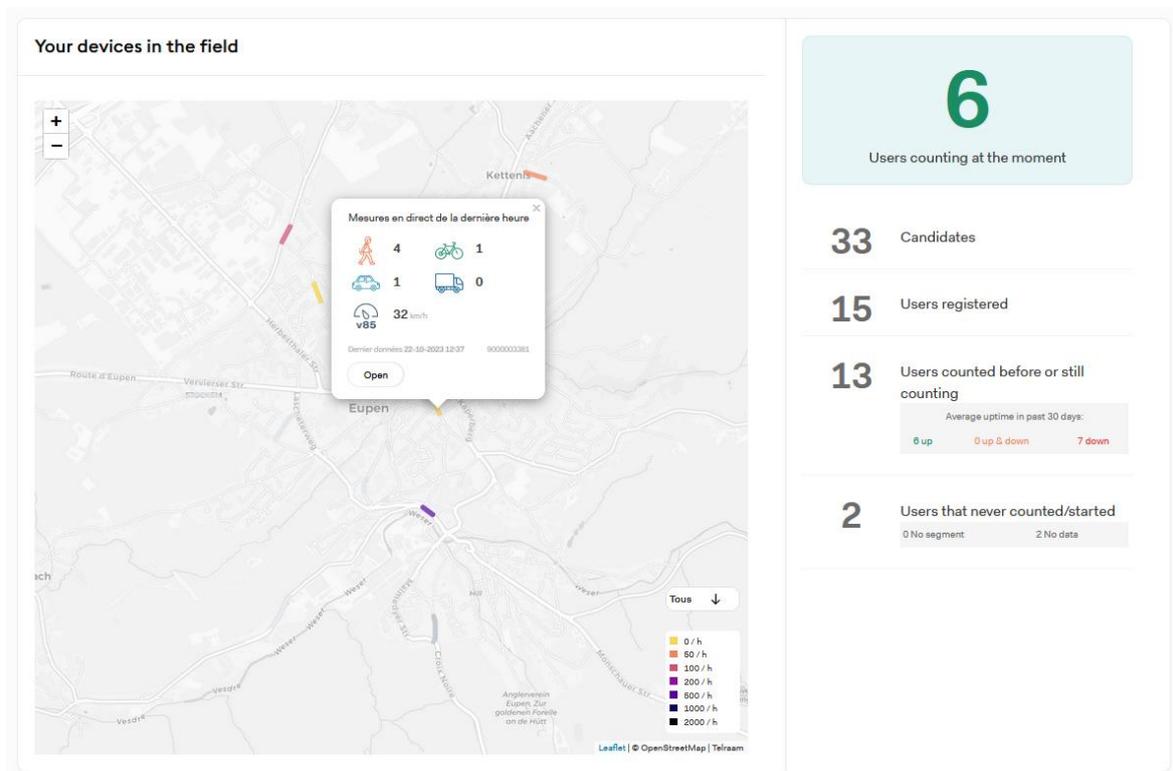


FIGURE 8. NOMBRE ET LOCALISATION DES CITOYENS COMPTEURS DU TRAFIC À EUPEN (SITUATION EN OCTOBRE 2023).

La liste des est présentée à l'Annexe 2. Ces comptages sont disponibles via l'API Telraam mais aussi sur WalOnMap (<https://geoportail.wallonie.be/walonmap>).

En 2023, des radars de référence ont été placés dans des rues hébergeant un capteur Telraam. Les résultats de cette validation seront prochainement annexés à ce rapport.

Pour le calibrage et la validation du modèle de mobilité, le projet a également pu compter, à Namur, sur les comptages de la quarantaine de caméras ANPR installées et sur les compteurs de piétons et de cyclistes.

3 Modélisation du trafic

3.1 Introduction

Afin de déterminer les flux de trafic sur l'ensemble d'un réseau et d'évaluer l'impact de mesures envisagées par les villes, un modèle de mobilité a été développé pour Namur et Eupen par Transport & Mobility Leuven (TML). Cet outil permet aux planificateurs de développer des scénarios futurs pour un réseau de transport, d'évaluer l'impact de ces changements et de suggérer des actions appropriées pour la prise de décision. C'est ce qu'on appelle l'analyse "what-if" ou l'analyse de scénarios.

Le modèle de mobilité développé est un modèle de trafic en quatre étapes. Une vue d'ensemble de la structure du modèle est présentée dans la figure 9. Il se compose des quatre sous-modèles suivants :

1. Un modèle de **génération des déplacements**: il calcule le nombre de déplacements en provenance ou à destination d'une zone géographique, au cours d'une période de temps spécifique. Les zones géographiques correspondent aux secteurs statistiques belges et la période correspond à une heure de pointe. Les données d'entrée sont des données zonales (provenant de Stabel et d'OpenStreetMap (OSM)) et des statistiques de déplacements.
2. Un modèle de **distribution des déplacements**: il fait correspondre les extrémités (= origines et destinations) des déplacements prévus par le modèle de génération des déplacements, ce qui donne une matrice origine-destination. Chaque déplacement a désormais une zone d'origine et une zone de destination. Les modèles de distribution sont calculés sur la base de la distribution des déplacements observée (SEE, 2001), des longueurs de trajet observées (MONITOR, 2017) et des distances entre les zones du modèle.
3. Un modèle de **choix modal**: la matrice origine-destination est divisée en plusieurs matrices origine-destination, une pour chaque mode de transport. Pour ce faire, on utilise un modèle logit basé sur les temps de parcours et les coûts de chaque mode de transport, ainsi que sur les préférences de la population modélisée. Ces préférences sont calibrées pour correspondre à la répartition modale observée dans l'enquête MONITOR (2017).
4. Un modèle d'**affectation du trafic**: les matrices origine-destination avec les déplacements par mode sont affectées au réseau de transport. Le réseau est dérivé d'OSM et enrichi de paramètres de trafic tels que les capacités et les retards aux feux de circulation. L'affectation du trafic se traduit par des flux de trafic horaires par mode.

Les trois premiers modèles font partie du modèle de demande de déplacement, tandis que le modèle d'affectation représente le modèle d'approvisionnement du réseau. Chaque modèle est décrit plus en détail dans les sections suivantes.

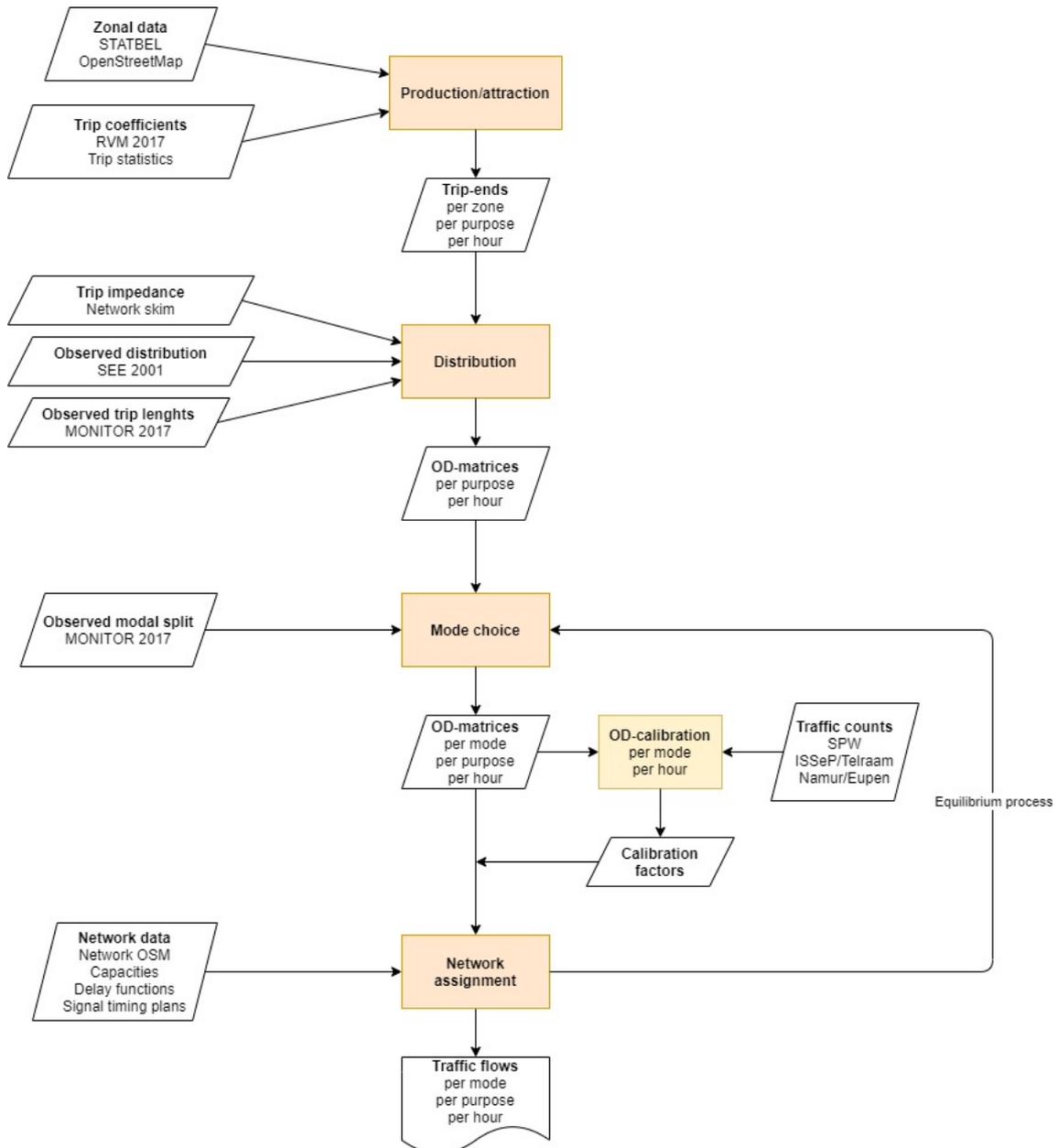


FIGURE 9. VUE D'ENSEMBLE DU MODÈLE DE TRAFIC EN QUATRE ÉTAPES DÉVELOPPÉ POUR L'ÉTUDE.

3.2 Modèle de demande

3.2.1 Génération des déplacements

L'objectif du modèle de génération des déplacements est d'estimer le nombre de déplacements produits et attirés par chaque zone au cours d'une certaine période. Les zones correspondent aux secteurs statistiques. Ils sont définis par l'Institut géographique national (IGN) comme la plus petite unité territoriale dans le voisinage des villes étudiées.

La production et l'attraction des zones sont estimées pour différents motifs de déplacement, tels que les déplacements liés au travail ou à l'école. Les périodes pour lesquelles la génération des déplacements est estimée correspondent aux heures de pointe du matin et du soir d'un jour ouvrable typique sans vacances scolaires. Les heures de pointe choisies sont 8-9h et 17-18h.

La partie principale de ce modèle consiste en un modèle de régression linéaire (figure 10). Les variables dépendantes sont la production (P_{hpk}) et l'attraction (A_{hpk}) d'une zone k pour une certaine heure (h) et un certain motif de déplacement (p). Les variables indépendantes sont des informations spécifiques sur cette zone, telles que les caractéristiques de la population et le nombre de points d'intérêt (POI).

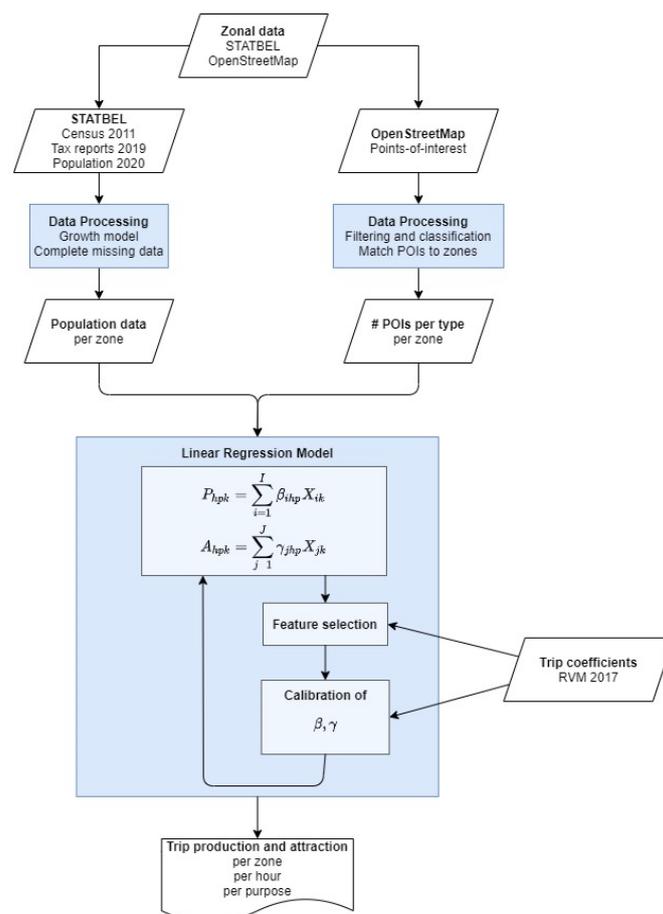


FIGURE 10. DIAGRAMME DE FLUX DU MODÈLE DE GÉNÉRATION DES DÉPLACEMENTS.

Pour calibrer le modèle de régression linéaire, les valeurs de production et d'attraction des déplacements de deux modèles de trafic régionaux flamands sont utilisées: le RVM Leuven et le RVM Limburg. Ces modèles décrivent des villes similaires à celles qui font l'objet de ce projet.

3.2.1.1 Traitement des données

La première étape du processus consiste à rassembler et à traiter les données de manière à ce qu'elles puissent être utilisées pour les variables indépendantes dans le modèle de régression linéaire. Deux sources de données sont utilisées :

1. Données socio-démographiques des habitants d'une zone ;
2. Données OpenStreetMap (OSM) des points d'intérêt (POI) d'une zone, avec les bâtiments et leur type.

3.2.1.1.1 Données socio-démographiques

a) Source

La principale source de ces données est l'enquête socio-économique (SEE, 2001) ou le recensement réalisé par le gouvernement belge en 2011 (census, 2011). Elle comprend des informations sur le nombre et la taille des ménages, les taux d'emploi et la répartition par âge des habitants de chaque secteur statistique en Belgique.

Des informations plus récentes sur les revenus des habitants et la détention de voitures peuvent être obtenues auprès des autorités fiscales belges. Ces données sont collectées au niveau des secteurs statistiques par ménage. Les données publiées les plus récentes datent de 2019.

Une vue d'ensemble des données disponibles et de leurs étapes de traitement est présentée dans le tableau 1. Après ces étapes, les résultats sont stockés en tant qu'attributs du secteur statistique correspondant dans une base de données.

TABLEAU 1. SOURCES DES DONNÉES UTILISÉES DANS LE MODÈLE DE DEMANDE.

Nom	Source	Année	Description	Attributs dans le modèle
Secteurs statistiques	https://statbel.fgov.be/nl/over-statbel/methodologie/classificaties/statistische-sectoren	2021	Shapefile avec tous les secteurs statistiques en Belgique	
Revenu	https://statbel.fgov.be/en/themes/households/taxable-income#figures	2019	Fichier Excel avec les revenus par ménage et par secteur statistique. Il contient le nombre de ménages ayant un revenu non nul, leur revenu imposable total, le revenu moyen et médian, etc.	Revenu net imposable moyen
Âge et sexe	https://www.geo.be/catalog/details/0202b8dd-1c7e-4331-8ba7-35e1fef4037a?l=en	2011	Fichier de forme avec la population, son âge et son sexe par secteur statistique. L'âge est divisé en trois groupes : (1) 0 - 14 ans, (2) 15 - 64 ans, et (3) plus de 65 ans.	Nombre d'habitants (population) Nombre de personnes dans chaque groupe d'âge Nombre de personnes de chaque sexe
Disponibilité des voitures	https://statbel.fgov.be/nl/open-data/aantal-wagens-statistische-sector	2019	Fichier Excel avec le nombre de ménages et le nombre de voitures dans chaque secteur statistique.	Nombre de voitures
Ménages	https://www.census2011.be/download/statsect_nl.html	2011	Fichier Excel contenant des informations sur les ménages par secteur statistique et par communauté, telles que la taille des ménages (1,2,3,..., >11), la structure familiale (couple avec enfants,...), le nombre de personnes par ménage, etc.	Nombre de ménages Taille des ménages (1, 2, 3, ..., >11)
Emploi	https://www.census2011.be/download/statsect_nl.html	2011	Fichier Excel contenant des informations sur la situation professionnelle de la population par secteur statistique, telles que le nombre de personnes actives (autorisées à travailler) et inactives (étudiants, retraités), le lieu, le type et le secteur de leur emploi, l'âge des personnes à la recherche d'un emploi, etc.	Nombre total de personnes actives Nombre de personnes actives qui travaillent Nombre de personnes actives qui ne travaillent pas Nombre total de personnes inactives Nombre de personnes âgées de moins de 15 ans Nombre de retraités Nombre d'étudiants Nombre de mères ou de pères au foyer
Population	https://statbel.fgov.be/nl/open-data/bevolking-statistische-sector-8	2020	Fichier Excel avec les données les plus récentes sur le nombre d'habitants par secteur statistique	Utilisé pour mettre à jour les attributs pour l'année 2020

b) Traitement

Comme il y a un décalage dans le temps entre les différents ensembles de données, les données de recensement sont transformées en nombres relatifs plutôt qu'en nombres absolus. Par exemple, le nombre de personnes actives dans un secteur est donné comme un nombre entier dans les données de recensement, mais transformé en pourcentage de la population qui travaille. Par conséquent, on suppose que cette distribution est constante au fil des ans.

En outre, les données du recensement indiquent l'âge de la population de manière très approximative. Elles ne considèrent que trois catégories: moins de 14 ans, 15 à 64 ans et 65 ans et plus. Pour certains motifs de déplacement comme les trajets scolaires, la catégorie 15-64 ans est trop grossière. Par conséquent, cette catégorie est divisée en trois sous-catégories :

1. 15 à 18 ans
2. 19 à 25 ans
3. 26 à 64 ans

Pour ce faire, nous avons utilisé des données plus récentes sur les âges au niveau de la ville, où la distribution de cet ensemble de données est appliquée à tous les secteurs de la ville.

Enfin, certains secteurs manquaient de données dans le recensement. Les raisons peuvent être multiples. Certains secteurs ont été créés ou adaptés depuis 2011, tandis que d'autres secteurs peuvent avoir été incorrectement introduits dans la base de données. Pour résoudre ce problème, une interpolation a été effectuée entre les secteurs adjacents. En l'absence de données, la valeur moyenne du recensement des secteurs adjacents a été utilisée. Si les secteurs adjacents n'ont pas de valeur non plus, une valeur moyenne sur tous les secteurs de la même municipalité a été utilisée comme meilleure estimation.

3.2.1.1.2 OpenStreetMap

a) Source

OpenStreetMap (OSM) est une base de données géographiques gratuite, entièrement constituée et entretenue par la communauté des utilisateurs⁵. Dans le modèle de production et d'attraction, les données interrogées sont les POI de chaque secteur. Ces POI représentent tous les bâtiments et toutes les géométries, et fournissent des informations supplémentaires sur le POI, telles que le type de bâtiment et son utilisation actuelle (appartement, hôpital, école primaire, restaurant, etc.), sa superficie et le type d'utilisation du sol à l'emplacement du POI (zone industrielle, zone commerciale, etc.).

⁵ <https://www.openstreetmap.org/about>

Les données ont été téléchargées à partir de la base de données en ligne pour l'ensemble du territoire belge et une partie de l'Allemagne. Elles ont ensuite été traitées et filtrées en Python.

b) Filtrage

Afin de réduire la complexité multidimensionnelle et d'extrapoler les données manquantes, plusieurs étapes de filtrage ont été effectuées sur les données brutes. Ces étapes sont les suivantes:

- Certains POI ont des attributs contradictoires. Les règles de priorité imposent de choisir l'information la plus détaillée (par exemple, magasin de vêtements) plutôt que l'information la plus grossière (par exemple, bâtiment).
- Les données contiennent des POI qui se chevauchent. Certains POI sont définis deux fois, ou plusieurs magasins sont présents dans un même bâtiment. Ils sont simplifiés en un seul point d'intérêt. Cela signifie que les utilisations mixtes, telles que les bâtiments où le rez-de-chaussée est un magasin et les niveaux supérieurs sont des appartements, ne sont pas incluses séparément dans le modèle.

En outre, la construction d'un modèle de régression basé sur toutes les caractéristiques présentes dans OSM n'est pas réalisable, car un grand nombre de prédicteurs rendrait le modèle difficile à interpréter. C'est pourquoi les POI ont été classés en un nombre limité de classes.

Une distinction a été faite entre les bâtiments "résidentiels" et les bâtiments "d'activité". Les POI résidentiels comprennent les résidences individuelles, les grandes résidences (immeubles d'appartements) et les POI avec une utilisation résidentielle et un numéro de maison (figure 11). Les POI d'activité sont liés aux magasins, aux lieux de travail, aux services, aux activités de loisirs et aux bâtiments publics (figure 12).

Une autre subdivision en trois parties a été effectuée dans la classe résidentielle sur la base des étiquettes d'OSM: grandes résidences (par exemple, immeubles à appartements), résidences d'étudiants et résidences individuelles (maisons en terrasse, manoirs, etc.). Les POI pour lesquels cette étiquette détaillée était manquante ont été inclus dans quatre catégories distinctes, selon qu'ils possèdent ou non un numéro de maison et qu'ils soient ou non situés dans des zones résidentielles. Ces catégories impliquent une série de présomptions, que le bâtiment soit résidentiel ou non. Enfin, pour exclure les abris de jardin et autres petits bâtiments non résidentiels, les POI sont filtrés de manière à exclure les 5 % de maisons les plus petites en termes de surface au sol.



FIGURE 11. POI RÉSIDENTIELS POUR NAMUR.

La couche d'activité est beaucoup plus élaborée et subdivisée en plus de 20 classes. Elles suivent principalement la classification NACE, qui regroupe 21 groupes industriels définis par l'Union européenne. Des détails supplémentaires sont nécessaires pour certains groupes, comme une subdivision en petits et grands bâtiments de soins de santé, et en petites et grandes instances éducatives, sur la base de leurs balises dans OSM. Sans cette subdivision, une pharmacie, par exemple, serait considérée comme aussi attrayante qu'un grand hôpital dans le modèle de régression.

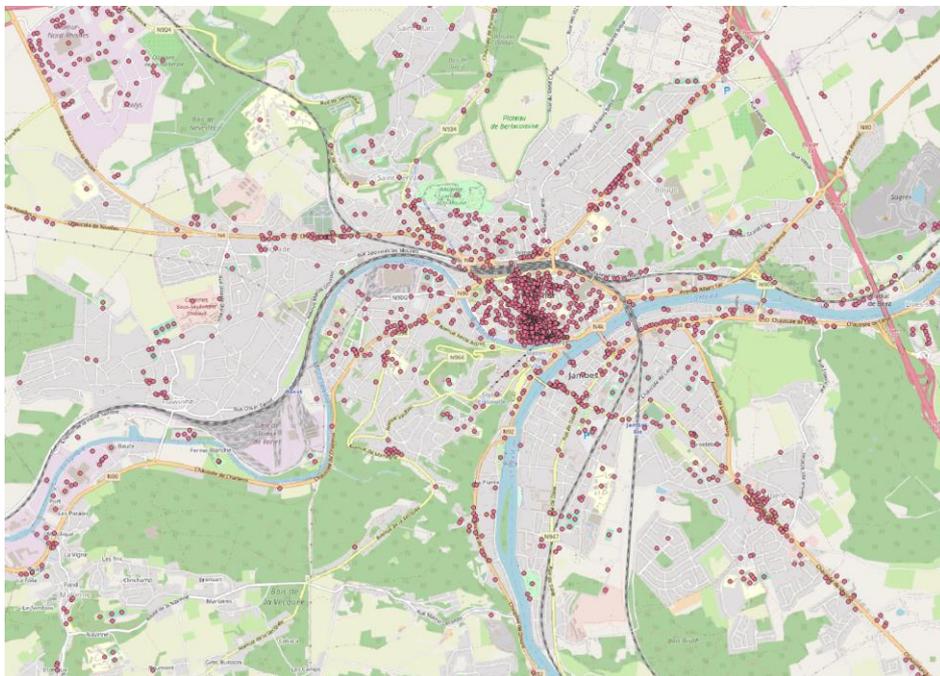


FIGURE 12. LES POI D'ACTIVITÉS POUR NAMUR.

c) Limites

Les limites de cette approche sont les suivantes :

- La qualité de la classification dépend du taux d'achèvement et de la cohérence des données OSM. Ceci est lié au nombre de volontaires actifs d'OSM dans la région étudiée.
- Le nombre de niveaux des bâtiments n'est souvent pas indiqué. Seule la surface au sol peut être utilisée comme indicateur de la taille totale du bâtiment.
- Parfois, les grands bâtiments sont inclus dans un seul POI, alors que dans des cas similaires, plusieurs POI représentent ce type de bâtiment. Cela est dû à des différences dans l'agencement des installations ou à des rapports différents de la part des utilisateurs d'OSM. Par exemple, un grand hôpital composé de trois grands bâtiments principaux est compté comme trois POI, alors qu'un petit hôpital régional peut être composé d'un bâtiment principal et de six bâtiments annexes et est donc compté comme sept POI.

Bien qu'elle ne soit pas parfaite, OSM semble être la source de données la plus cohérente, la plus complète et la plus pratique actuellement disponible. Les recherches ultérieures pourraient inclure l'ajout d'autres sources de données, telles que les bases de données des entreprises, les cartes altimétriques, etc.

3.2.1.1.3 RVM Leuven et RVM Limburg

Pour estimer les coefficients, il faut disposer de données de référence, c'est-à-dire de zones pour lesquelles il existe des valeurs pour les différentes caractéristiques (variables) et de véritables valeurs de production et d'attraction. Ces données de référence sont basées sur les matrices OD pour les régions flamandes de Leuven et de Limburg. Ces régions abritent des villes de taille similaire aux villes cibles de Namur et d'Eupen, ainsi que des zones rurales situées en dehors du centre-ville.

Les matrices OD des RVM sont développées et partagées pour ce projet par le gouvernement flamand.

a) Motifs des déplacements

Les RVM répartissent les déplacements en fonction de leur motif. Dix motifs de déplacement ont été identifiés:

1. Travail
2. Affaires
3. Éducation : enseignement supérieur
4. Achats : pour les besoins quotidiens tels que la nourriture et les boissons

5. Shopping : pour les vêtements, l'électronique, etc.
6. Loisirs : sports, visites sociales, etc.
7. Autres
8. Enfants - École
9. Enfants - Loisirs
10. Enfants - Autres

Dans le modèle de génération de déplacements pour Namur et Eupen, les motifs sont reclassés en quatre catégories, afin de garder les résultats tangibles et de réduire la complexité. Ces quatre motifs sont les suivants :

1. Travail : déplacements de travail et d'affaires
2. École : déplacements scolaires (primaire et secondaire)
3. Éducation : déplacements pour les universités ou d'autres établissements d'enseignement supérieur
4. Autres : achats, loisirs et autres déplacements

Le RVM inclut également les matrices OD des camions. Cependant, notre expérience nous apprend que le modèle de fret d'où proviennent ces OD-matrices n'est pas toujours très précis. Cependant, en raison du manque d'autres données, ces OD-matrices sont utilisées pour entraîner le modèle de régression linéaire.

b) Période

Les matrices OD fournissent des données sur les déplacements pour chaque heure de la journée. Pour ce projet, l'accent est mis sur les deux heures de pointe: 8-9h et 17-18h. Une fois encore, comme les coefficients du modèle de régression diffèrent dans le temps, l'ajustement d'un modèle pour chaque heure de la journée prend trop de temps. Les profils journaliers seront déduits des comptages de trafic comme expliqué à la section 3.6.

c) Zonage

Les matrices OD suivent le zonage des modèles. Dans les centres-villes, le zonage des RVM suit plus ou moins le zonage des secteurs statistiques. Toutefois, dans les zones plus rurales, les zones du RVM peuvent inclure plusieurs secteurs statistiques ou des parties de ceux-ci. Dans ce cas, les données socio-démographiques pour les zones RVM sont dérivées de celles des secteurs statistiques coïncidant, moyennées sur les zones de chevauchement.

Comme dans de nombreux modèles de trafic, il existe une zone d'étude et des zones externes. Dans cette étude, seules les zones situées à l'intérieur de la zone d'étude sont incluses dans les données d'entraînement, car les zones externes sont généralement beaucoup plus grandes et ne sont pas modélisées de manière aussi détaillée. Le nombre total de déplacements générés par une zone dans le RVM inclut cependant les déplacements à destination ou en provenance de zones externes.

L'ensemble des données d'entraînement pour le modèle comprend donc les données de 1829 zones dans les zones d'étude des RVM, comme le montre la figure 13.

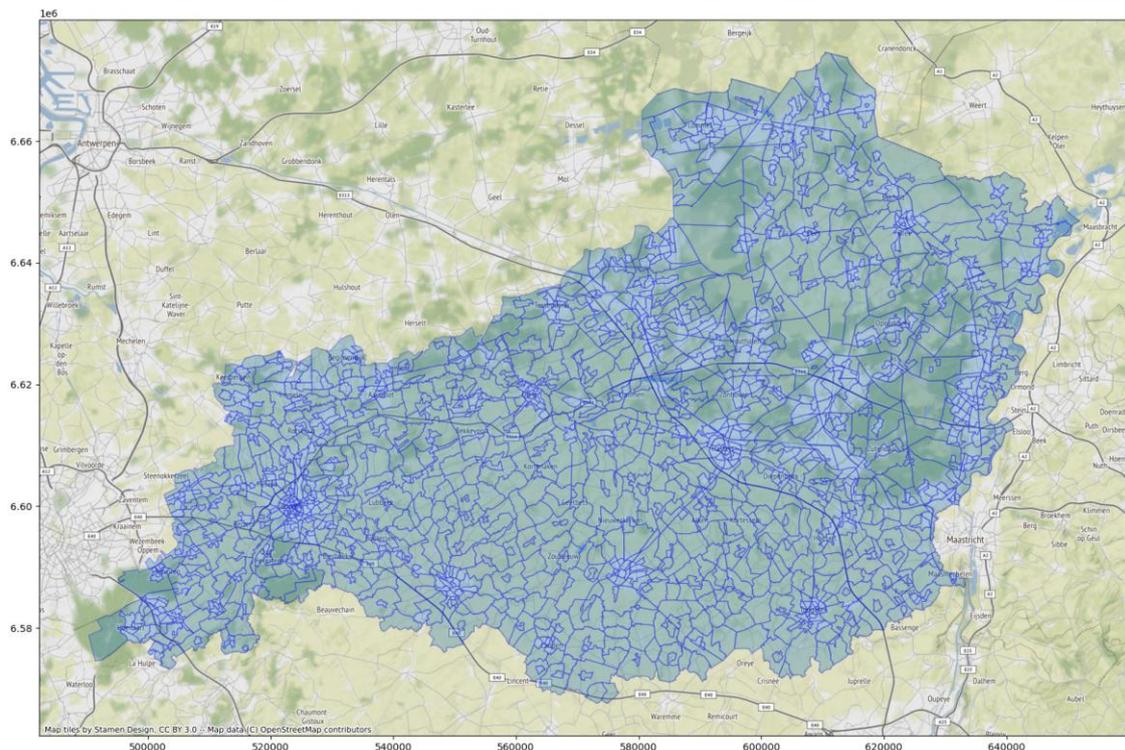


FIGURE 13. ZONAGE UTILISÉ POUR L'ENSEMBLE DES DONNÉES D'ENTRAÎNEMENT, BASÉ SUR LE ZONAGE DU RVM LEUVEN ET DU RVM LIMBURG.

d) Valeurs aberrantes

Dans le RVM, certaines zones périphériques ont été identifiées. Il s'agit de zones où le RVM sous-estime ou surestime clairement la génération de trafic pour une zone. Un exemple d'une telle zone est l'hôpital universitaire de Louvain (Gasthuisberg), où très peu de déplacements liés au travail sont signalés durant l'heure de pointe du matin, bien qu'il s'agisse de l'une des principales attractions de la région de Louvain. Au total, quatre zones de ce type ont été trouvées et exclues de l'ensemble des données d'entraînement.

3.2.1.2 Modèle de régression linéaire

À la suite des étapes précédentes, on dispose maintenant d'une base de données contenant, pour chaque secteur, des informations sur la population et l'environnement spatial. Ces informations sont utilisées pour prédire la production et l'attraction des zones à l'aide d'un modèle de régression linéaire. La formule générale de ce modèle est la suivante:

$$P_{hpk} = \sum_{i=0}^I \beta_{ihp} X_{ik}$$

$$A_{hpk} = \sum_{i=0}^I \gamma_{ihp} X_{ik}$$

où P et A représentent respectivement la production et l'attraction. Les indices représentent les heures (h), le but du voyage (p) et la zone (k). Il y a I variables X, liées à la fois aux données démographiques et au cadre spatial. Elles sont pondérées à l'aide des coefficients β et γ , qui sont déterminés lors de l'étalonnage du modèle.

3.2.1.2.1 Construction de modèles

a) Sélection des variables

Lors de la prévision des taux de déplacement pour différents motifs à différents moments, différentes variables joueront un rôle important. Par exemple, pour estimer l'attraction des déplacements liés au travail pendant la période de pointe du matin, le nombre de points d'intérêt liés aux soins de santé, aux bureaux et à l'industrie jouera un rôle important. En ce qui concerne l'école et l'éducation, il a été décidé de ne pas tenir compte du modèle car des données plus précises étaient disponibles. Cette question est abordée plus en détail ci-dessous.

La sélection des variables pour chaque objectif et chaque période a été effectuée sur la base des relations logiques et observées entre l'ensemble des données et le modèle (tableau 2). Le modèle de régression linéaire a été ajusté à l'aide des données de production et d'attraction de deux RVM. Différentes combinaisons de variables ont été réalisées pour obtenir les meilleurs résultats.

TABEAU 2. VARIABLES SÉLECTIONNÉES PAR MOTIF DE DÉPLACEMENT.

Travail (retour au domicile)	Travail (arrivée au travail)	Autres
Population active	#POIs total résidentiels	Population totale
#POIs résidentiels - simples	Activité #POIs - industriels	#POIs activité totale
#POIs résidentiels - grands	Activité #POIs - horeca	
#POIs résidentiels - autres	Activité #POIs - magasins	
#POIs - numéro de maison - utilisation du sol : résidentiel	#Activité des IOP - services	
	#Activité des IOP - services de santé	
	Activité #POIs - écoles	
	Activité #POIs - transport	
	Activité #POIs - autres	

Les modèles qui en résultent sont examinés et détaillés ci-dessous.

b) Ajustement du modèle

Pour déterminer les coefficients des modèles, de nombreux outils python sont disponibles gratuitement. Dans ce projet, les packages statsmodels et sklearn ont été utilisés. Généralement, l'ajustement est exécuté sur la base de la méthode des moindres carrés ordinaires, où l'erreur quadratique entre la valeur prédite et la valeur réelle pour toutes les valeurs du set d'entraînement est minimisée.

Ensuite, l'adéquation du modèle à un ensemble de variables est évaluée à l'aide de la validation croisée. Il s'agit d'une technique dans laquelle l'ensemble de données est divisé en plusieurs paniers, et le modèle est ajusté de manière itérative sur une partie des paniers et testé sur les paniers restants. Le modèle pour chacune de ces itérations est ensuite évalué sur la base de deux mesures: le coefficient de détermination (r^2) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE). Le r^2 indique la quantité de variance de la variable dépendante expliquée par le modèle. Un r^2 de 1 indique un ajustement parfait, tandis qu'un r^2 de 0 indique que le modèle est une estimation aussi bonne que si le modèle utilisait la moyenne des données d'apprentissage comme prédiction. Le RMSE représente le nombre moyen de trajets surestimés ou sous-estimés en termes absolus.

Une fois que les variables qui obtiennent la meilleure adéquation sont déterminées, le modèle est entraîné une dernière fois avec l'ensemble des données.

3.2.1.2.2 Les modèles qui en résultent

Dans les sections ci-dessous, les variables sélectionnées, les coefficients déterminés et les mesures d'évaluation sont énumérés. En général, le modèle de production de l'heure de pointe du matin utilise les mêmes variables dépendantes que le modèle d'attraction de l'heure de pointe du soir.

Lors de l'interprétation des coefficients et des mesures, il est important de noter que l'échelle des variables dépendantes et indépendantes n'est souvent pas comparable.

a) Motif : travail

La production pour le travail du matin est, avec l'école et l'éducation, le principal motif de déplacement.

La production à l'heure de pointe du matin et l'attraction à l'heure de pointe du soir sont largement déterminées par le lieu de résidence. Il en résulte un modèle dont les coefficients sont présentés dans le tableau 3.

TABLEAU 3. COEFFICIENTS DU MODÈLE POUR LES DÉPLACEMENTS PROFESSIONNELS EN PROVENANCE OU EN DIRECTION DU LIEU DE RÉSIDENCE.

	$X_{workers}$	$X_{single\ res}$	$X_{large\ res}$	$X_{hn\ \&\ LU}$	$X_{other\ res}$
$\beta_{morning}$	0.1088	0.0813	0.8194	0.0874	0.1002
$\gamma_{evening}$	0.1133	0.0772	0.9491	0.0825	0.0924

Il n'est pas surprenant que ces deux modèles correspondent relativement bien aux données réelles (tableau 4 et figure 14). En effet, le nombre de personnes actives dans un secteur donné est estimé avec précision.

TABLEAU 4. VALIDATION DU MODÈLE POUR LES DÉPLACEMENTS PROFESSIONNELS EN PROVENANCE OU EN DIRECTION DU LIEU DE RÉSIDENCE.

	r^2	RMSE
$P_{morning, work}$	0.809	23.332
$A_{evening, work}$	0.723	30.778

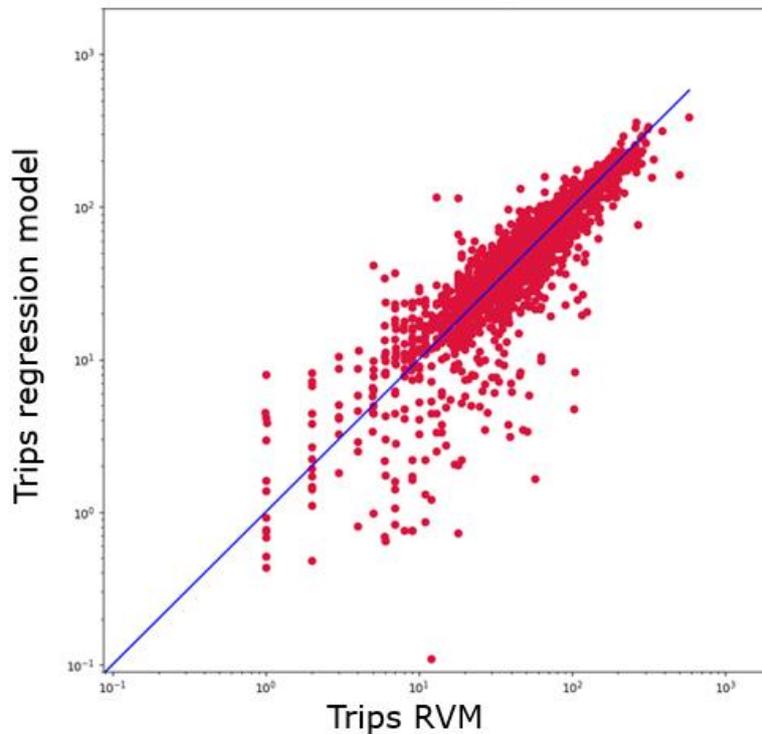


FIGURE 14. COMPARAISON ENTRE LE RVM ET LE MODÈLE DE RÉGRESSION LINÉAIRE POUR LOUVAIN ET LE LIMBOURG (DÉPLACEMENTS PROFESSIONNELS, PRODUCTION À L'HEURE DE POINTE DU MATIN).

D'autre part, le lieu de travail n'apparaît pas clairement dans les données (tableau 5). Le nombre de POI pour un certain secteur industriel donne une indication de l'attraction. Cependant, tous les POI ne sont pas bien définis dans OSM: souvent, seule la surface du rez-de-chaussée d'un POI est disponible, et la classification doit être assez grossière pour que le modèle soit facilement interprétable.

TABLEAU 5. COEFFICIENTS DU MODÈLE POUR LES DÉPLACEMENTS PROFESSIONNELS EN DIRECTION OU EN PROVENANCE DU LIEU DE TRAVAIL.

	$X_{total\ residential}$	$X_{industry}$	X_{horeca}	X_{shops}	$X_{services}$	X_{health}	$X_{schools}$	$X_{transport}$	X_{others}
$\gamma_{morning}$	0.1023	0.0069	1.3114	0.0823	0.1427	0.1091	0.1621	0.0922	-0.4657
$\beta_{evening}$	0.1062	0.0069	1.3100	0.0834	0.1390	0.1208	0.1608	0.0941	-0.4733

Ces modèles permettent d'obtenir une correspondance plus grossière avec les taux de déplacement du RVM (tableau 6 et figure 15).

TABLEAU 6. VALIDATION DU MODÈLE POUR LES DÉPLACEMENTS PROFESSIONNELS EN DIRECTION OU EN PROVENANCE DU LIEU DE TRAVAIL.

	r^2	RMSE
$A_{morning, work}$	0.515	52.149
$P_{evening, work}$	0.521	52.809

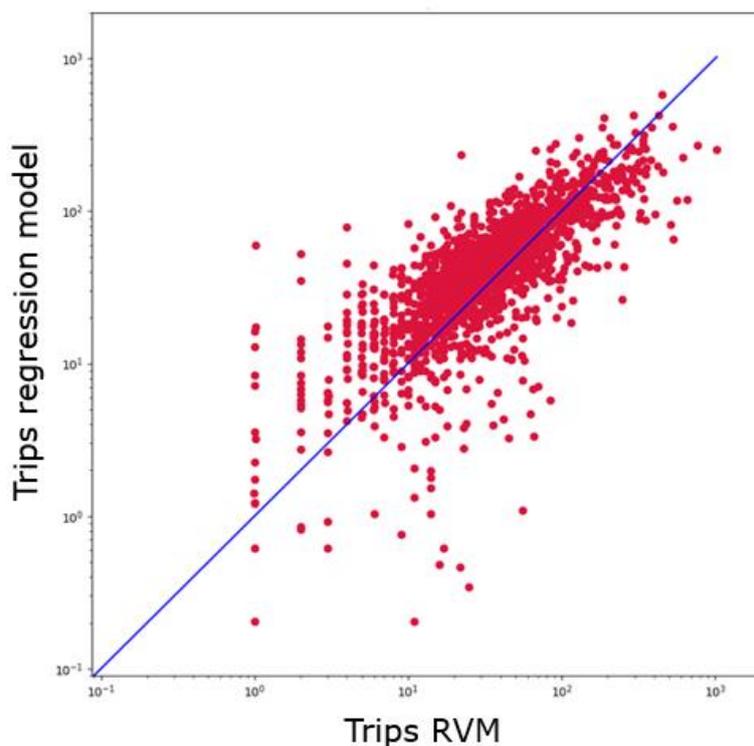


FIGURE 15. COMPARAISON ENTRE LE RVM ET LE MODÈLE DE RÉGRESSION LINÉAIRE POUR LOUVAIN ET LE LIMBOURG (DÉPLACEMENTS PROFESSIONNELS, ATTRACTION À L'HEURE DE POINTE DU MATIN).

b) Motif : autres

Le dernier motif comprend tous les autres déplacements spécifiés dans les RVM. Comme cette catégorie est assez grossière et comprend les déplacements vers les magasins, les résidences, les lieux de loisirs, etc., les mêmes variables générales sont utilisées comme variables prédictives pour tous les modèles. Il s'agit du total des POI d'activité, des POI résidentiels et de la population (tableau 7). La qualité du modèle est évaluée statistiquement aux tableau 8 et figure 16.

TABEAU 7. COEFFICIENTS DU MODÈLE POUR LES DÉPLACEMENTS NON PROFESSIONNELS.

	$X_{activity\ POIs}$	$X_{residential\ POIs}$	$X_{population}$
$\beta_{morning}$	0.6458	0.0815	0.0734
$\gamma_{evening}$	0.9497	0.0782	0.0889
$\gamma_{morning}$	1.0366	0.0345	0.0838
$\beta_{evening}$	1.2971	0.0422	0.0946

TABEAU 8. VALIDATION DU MODÈLE POUR LES DÉPLACEMENTS NON PROFESSIONNELS.

	r^2	RMSE
$P_{\text{morning, others}}$	0.782	39.649
$A_{\text{evening, others}}$	0.724	55.293
$A_{\text{morning, others}}$	0.675	56.371
$P_{\text{evening, others}}$	0.611	75.469

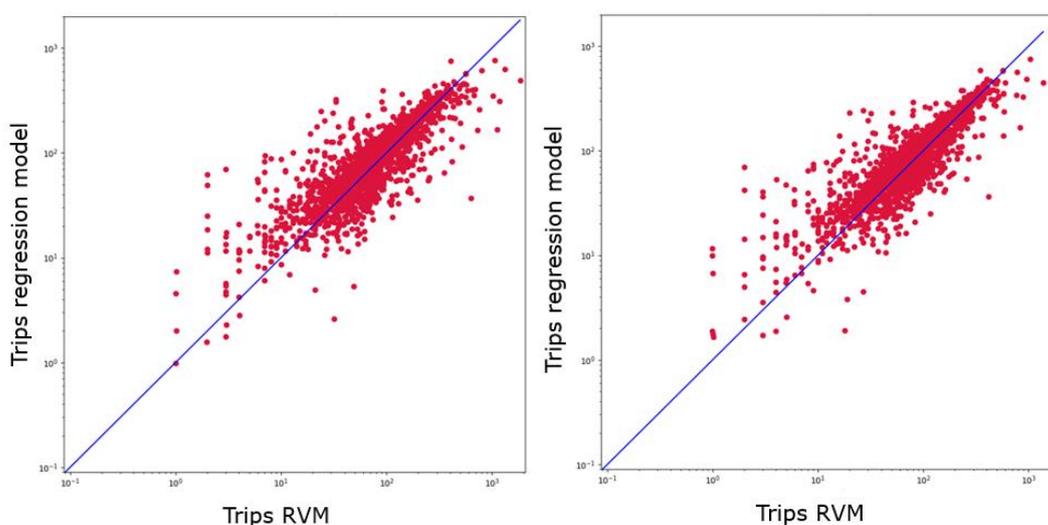


FIGURE 16. COMPARAISON ENTRE LE RVM ET LE MODÈLE DE RÉGRESSION LINÉAIRE POUR LOUVAIN ET LE LIMBOURG POUR LES AUTRES DÉPLACEMENTS (À GAUCHE : HEURE DE POINTE DU SOIR POUR LA PRODUCTION, À DROITE : HEURE DE POINTE DU SOIR POUR L'ATTRACTION).

c) Camions

Le dernier type de transport pour lequel les chiffres de production et d'attraction doivent être estimés est celui des camions. Là encore, les taux de déplacement des camions sont disponibles dans les RVM, même s'ils sont moins fiables que le transport de personnes. Notre modèle estime les taux de déplacement sur la base d'une sélection limitée de POI: les POI industriels, les grands magasins et les POI liés à la logistique. De plus, l'inclusion de la surface au sol des POI industriels semble produire un meilleur modèle. Après tout, le nombre d'étages d'une usine est généralement assez limité.

Les caractéristiques prises en compte sont les mêmes pour les quatre modèles, car les mouvements de fret se produisent normalement de manière symétrique entre les points d'intérêt basés sur l'activité (tableau 9). La qualité du modèle est évaluée statistiquement au tableau 10.

TABEAU 9. COEFFICIENTS DES MODÈLES POUR LES CAMIONS.

	$X_{\text{industrial POIs}}$	$X_{\text{industrial area}}$	$X_{\text{large shops}}$	$X_{\text{logistics POIs}}$
β_{morning}	0.0778	0.0001	0.3695	0.4997
γ_{evening}	0.0766	0.0001	0.2883	0.3290
γ_{morning}	0.0448	0.0001	0.4277	0.4208
β_{evening}	0.0404	0.0001	0.3408	0.2806

TABEAU 10. VALIDATION DES MODÈLES POUR LES CAMIONS.

	r^2	RMSE
$P_{\text{morning, Freight}}$	0.305	7.393
$A_{\text{evening, Freight}}$	0.404	4.841
$A_{\text{morning, Freight}}$	0.378	7.427
$P_{\text{evening, Freight}}$	0.344	5.649

3.2.1.3 Calcul du taux de déplacement

a) Motifs : école et éducation

L'application du modèle de régression linéaire pour les déplacements scolaires ou universitaires a donné des résultats insuffisamment précis. Pour le motif scolaire (déplacements des enfants entre le domicile et le jardin d'enfants, l'école primaire ou l'école secondaire), cela est principalement dû à l'incertitude concernant la taille des écoles. Les bâtiments scolaires sont généralement des bâtiments à plusieurs niveaux et une école est souvent composée de plusieurs bâtiments, ce qui constitue des caractéristiques difficiles à extraire d'OSM. En ce qui concerne l'éducation, qui comprend l'enseignement supérieur, la production et l'attraction sont toutes deux problématiques avec l'approche ci-dessus. Alors que pour l'attraction la raison est similaire à celle décrite ci-dessus, la simulation de la production est plus problématique en raison des étudiants qui vivent en kot. La plupart d'entre eux sont inclus dans les statistiques de population via la résidence de leurs parents, mais en réalité (et dans les RVM), leurs voyages commencent et se terminent à proximité de l'université.

L'utilisation de données locales sur le nombre d'élèves permet une approche plus précise des déplacements scolaires. Pour Namur et Eupen, le nombre d'élèves inscrits dans chaque école -

primaire ou secondaire - est disponible. En faisant correspondre les adresses des écoles aux secteurs statistiques, il est possible de faire une estimation plus précise de l'attraction pour les secteurs concernés. Pour le reste de la Wallonie, seul le nombre d'élèves à l'échelle de la ville est disponible. Une distribution à l'échelle du secteur est effectuée sur la base des POI liés aux écoles et de leur surface au sol, obtenus à partir d'OSM.

En ce qui concerne l'enseignement supérieur, des données sont disponibles pour Namur et ont été affectées aux secteurs de la même manière que celle décrite ci-dessus. Pour les autres régions, aucune information n'est disponible, mais cela n'a pas été considéré comme crucial pour la précision du modèle à Namur et Eupen, car le nombre d'étudiants qui vivent dans ces villes mais qui poursuivent des études supérieures en dehors de ces deux villes est plutôt limité par rapport aux autres motifs de déplacement.

Le nombre de voyages scolaires ou liés à l'éducation n'est pas égal au nombre d'élèves inscrits. Cela s'explique principalement par le fait que tous les étudiants ne sont pas censés arriver à l'école à la même heure le matin ou la quitter à la même heure le soir. En outre, dans l'enseignement supérieur en particulier, le taux de présence des étudiants est réduit. La distribution des heures d'arrivée et de départ a été obtenue auprès du département de la mobilité de Flandre, qui a déterminé ces moyennes pour la Flandre dans le cadre d'une vaste enquête⁶.

3.2.1.4 Application à la Belgique

Les modèles décrits précédemment sont appliqués à tous les secteurs statistiques de Belgique (figures 17 à 20) et, spécifiquement pour le modèle d'Eupen, à une partie de l'Allemagne proche de la frontière belge. En utilisant les coefficients estimés, la production et l'attraction pour chaque zone, heure et motif sont déterminées sur la base des POI d'OSM et des données socio-démographiques des secteurs statistiques. Pour les déplacements professionnels et autres, on suppose que le comportement des déplacements observé dans le set d'entraînement est représentatif et peut être étendu à la zone d'étude.

⁶ 'Richtlijnenboek : Mobiliteitseffectenstudies, Mobiliteitstoets en MOBER' - Departement MOW, mei 2018

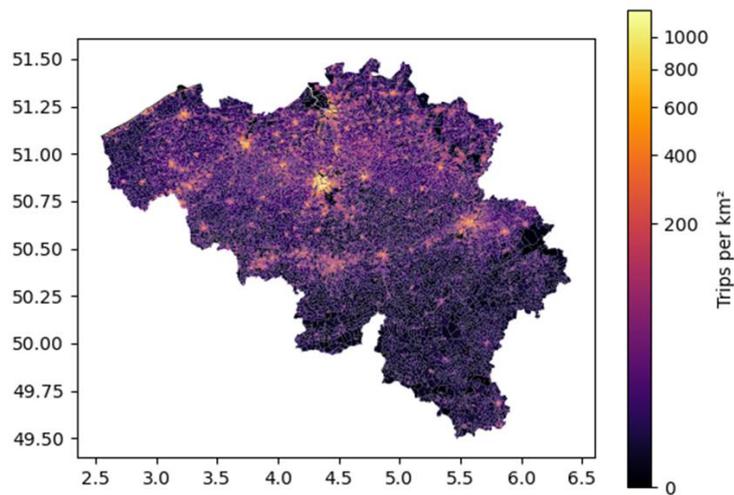


FIGURE 17. DÉPLACEMENTS PROFESSIONNELS, PRODUCTION 8- 9H.

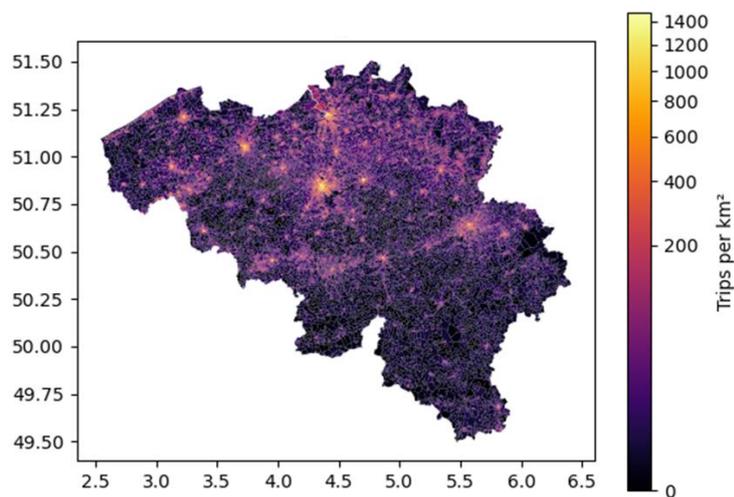


FIGURE 18. DÉPLACEMENTS PROFESSIONNELS, ATTRACTION 8-9H.

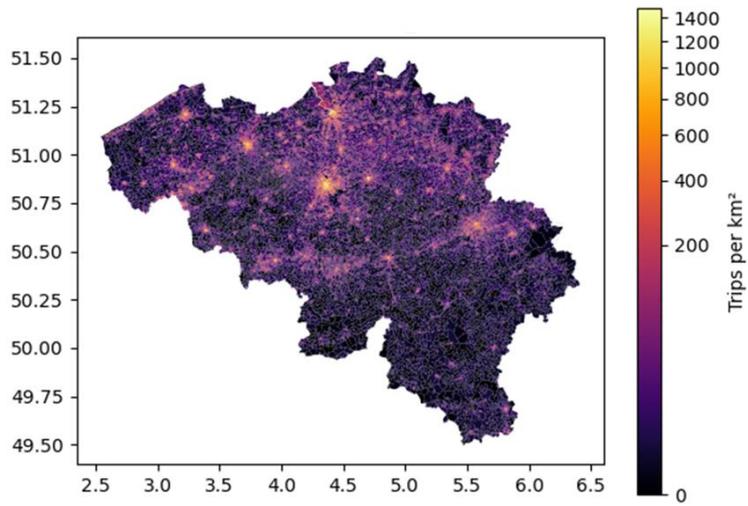


FIGURE 19. DÉPLACEMENTS NON PROFESSIONNELS, PRODUCTION 17- 18H.

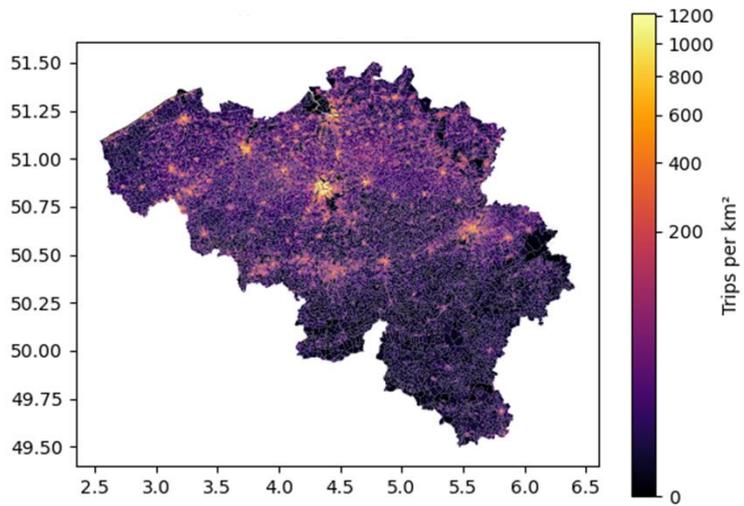


FIGURE 20. DÉPLACEMENTS NON PROFESSIONNELS, ATTRACTION 17-18H.

Un exemple des résultats pour les villes de Namur et d'Eupen est présenté aux figures 21 à 24. Ici, la production et l'attraction totales au cours de la période de pointe du matin sont indiquées.

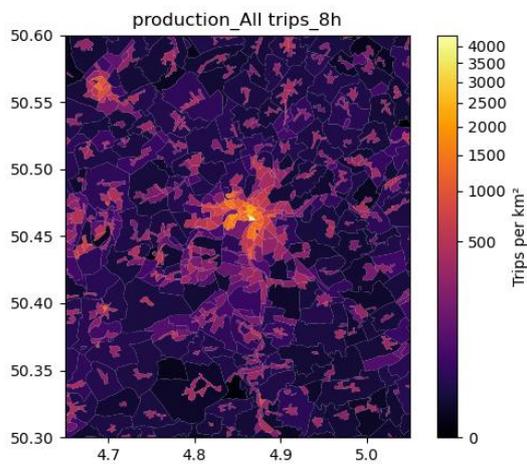


FIGURE 21. PRODUCTION TOTALE POUR NAMUR 8-9H.

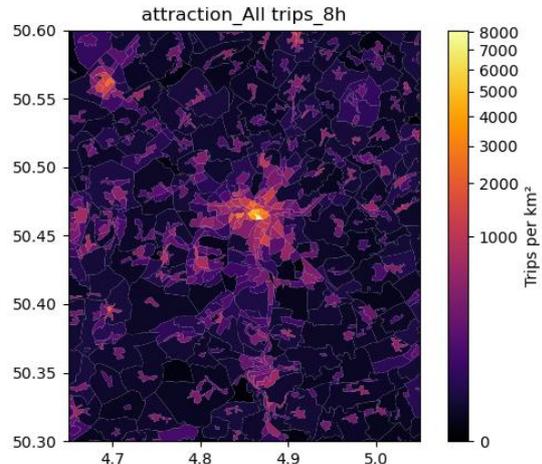


FIGURE 22. ATTRACTION TOTALE POUR NAMUR 8- 9H.

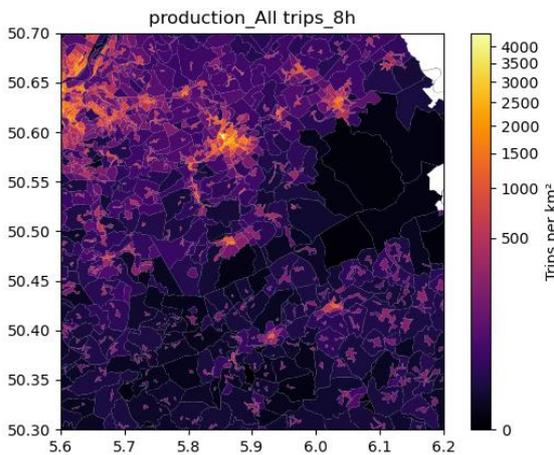


FIGURE 23. PRODUCTION TOTALE POUR EUPEN 8-9H.

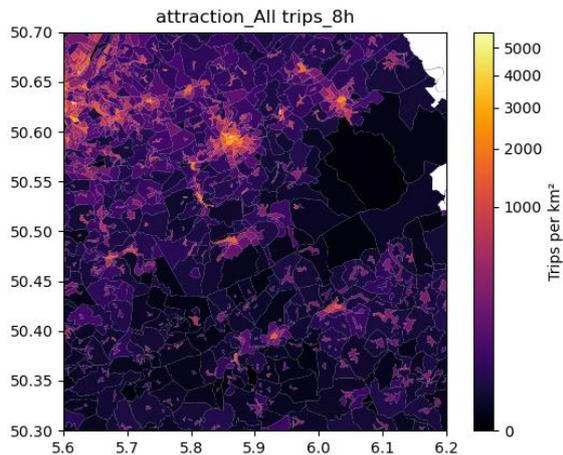


FIGURE 24. ATTRACTION TOTALE POUR EUPEN 8- 9H.

3.2.2 Distribution des déplacements

Étant donné les productions et les attractions pour chaque zone (c'est-à-dire les départs et les arrivées), le modèle de distribution des déplacements détermine le nombre de déplacements entre toutes les zones individuelles (c'est-à-dire qu'il remplit la matrice OD). Deux méthodes sont utilisées pour le calcul de la distribution: le modèle avec facteur de croissance et le modèle gravitaire. Une vue d'ensemble schématique du modèle de distribution des déplacements est présentée à la figure 25.

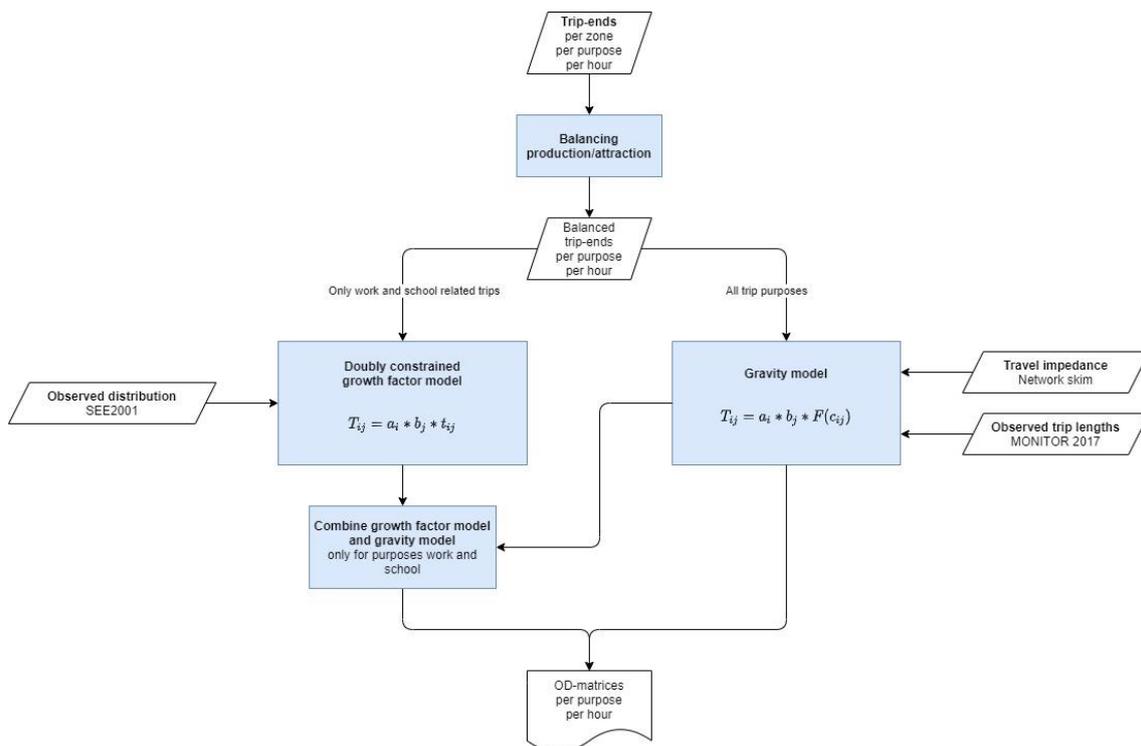


FIGURE 25. SCHÉMA DE FLUX DU MODÈLE DE DISTRIBUTION.

3.2.2.1 Équilibrer la production et l'attraction

Des modèles distincts sont utilisés pour calculer les productions et les attractions. Par conséquent, le nombre total de productions et d'attractions diffère légèrement. Pour calculer la répartition des déplacements, le nombre total de départs dans toutes les zones doit être égal au nombre total d'arrivées dans toutes les zones. La concordance des résultats, afin que les totaux soient égaux, s'appelle l'équilibrage de la production et de l'attraction. Si les chiffres de la production sont jugés plus fiables, les chiffres de l'attraction sont corrigés, et vice versa.

3.2.2.2 Modèle avec facteur de croissance

Dans cette méthode, nous utilisons les données sur les déplacements d'un tableau OD existant pour une année de base comme ligne directrice afin de distribuer les productions et attractions calculées (déterminées dans le modèle de production et d'attraction) sur le nouveau tableau OD. Étant donné

que les anciennes données sur les déplacements seront en fait augmentées d'un facteur de croissance, ce modèle est appelé modèle avec facteur de croissance. Pour les déplacements liés au travail et à l'école, les données des tableaux OD existants (distribution observée dans la SEE 2001) sont utilisées. Elles ont été fournies pour ce projet par STATBEL. Pour tous les autres motifs de déplacement, le modèle gravitaire est utilisé.

3.2.2.3 Modèle gravitaire

Cette méthode n'utilise pas les flux existants entre les zones, mais le niveau de résistance au déplacement ou d'impédance entre les zones comme mesure permettant de répartir les trajets dans les cellules d'un tableau OD. Comme les formules qui en résultent ressemblent quelque peu à la loi de la gravitation de Newton, le nom de modèle de gravité est souvent utilisé.

Le modèle gravitaire suppose que le nombre de déplacements entre une zone d'origine et une zone de destination est proportionnel à :

- un facteur de capacité de production pour la zone d'origine
- un facteur d'attractivité pour la zone de destination
- un facteur dépendant des coûts de déplacement entre les zones

Les deux principes clés de la répartition des déplacements sont les suivants: les grandes entreprises produisent/attirent davantage et les entreprises proches attirent davantage que les entreprises éloignées.

La fonction de distribution décrit la volonté relative d'effectuer un voyage en fonction des coûts de déplacement. La figure 26 présente différents types de fonctions de distribution: une fonction puissance (noir), une fonction exponentielle (orange) et une fonction combinée puissance-exponentielle (bleu).

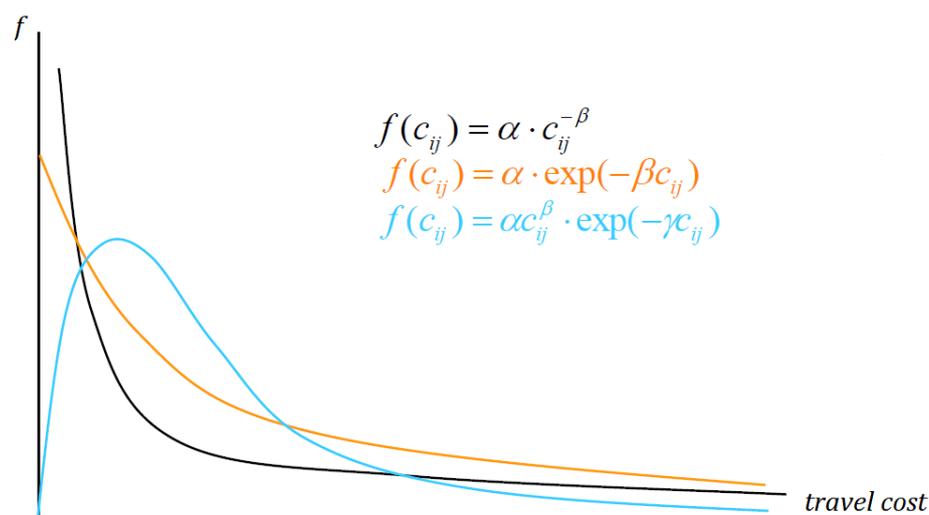


FIGURE 26. DIFFÉRENTS TYPES DE FONCTIONS DE DISTRIBUTION (TUDELFT).

La méthode de Hyman est utilisée pour l'étalonnage des fonctions de distribution sans distribution observée. Elle suppose une fonction de distribution exponentielle:

$$F(c_{ij}) = \exp(-\alpha c_{ij})$$

Compte tenu d'une production de déplacements observée, d'une attraction de déplacements observée, d'une matrice de coûts c_{ij} et d'une longueur moyenne de déplacement observée (en anglais, *mean trip length* MTL), il calcule la matrice OD et la fonction de distribution qui s'adapte à la MTL. Pour le calibrage de la fonction de distribution, les longueurs moyennes des trajets de l'enquête MONITOR (2017) ont été utilisées (tableau 11).

TABEAU 11. DISTANCES ET DURÉES MOYENNES DES DÉPLACEMENTS PAR MOTIF (MONITOR, 2017).

Objectif	Distance (km)	Durée (min)
Déplacement professionnel	27	31
Déplacement domicile-travail	21	29
Voyage d'agrément	18	31
Courses, shopping	10	19
Déplacement domicile-école	8	20

Pour la distribution des déplacements par camion, une fonction de distribution combinée puissance-exponentielle a été utilisée, parce que les déplacements très courts par camion sont pratiquement inexistantes et parce que le nombre de déplacements ne diminue pas de façon monotone en fonction de la distance parcourue.

3.2.2.4 Combinaison du modèle des facteurs de croissance et du modèle de gravité

Pour les déplacements liés au travail et à l'école, le modèle avec facteur de croissance et le modèle gravitaire ont été combinés. Pour certaines zones, il n'y a pas de distribution observée pour les déplacements liés au travail ou à l'école. Soit parce que le secteur statistique correspondant n'existait pas en 2001, soit parce qu'il n'y a pas d'enregistrements pour le secteur. Dans ce cas, la distribution est calculée sur la base du modèle de gravité. Pour s'assurer que la production totale et l'attraction des zones restent inchangées, une méthode Furness est utilisée.

Pour tous les autres motifs de déplacement, la répartition a été calculée selon le modèle de gravitaire.

3.2.3 Choix du mode

Le modèle de choix modal divise la demande de déplacement en une demande distincte pour les choix modaux possibles:

- Voiture (conducteur)
- Passagers (voiture)
- Vélo
- Piéton
- Transports publics

Une vue d'ensemble schématique du modèle de distribution des déplacements est présentée à la figure 27.

Chaque personne effectuant un déplacement doit faire un choix rationnel entre un ensemble fini de modes de transport. Un tel modèle de choix discret est généralement modélisé à l'aide d'un modèle logit multinomial. Il s'agit d'une extension du modèle logit binomial, dans lequel une personne doit choisir entre deux options. Les gens font un choix basé sur l'utilité d'un choix (= coût négatif). Le résultat est une probabilité de faire un certain choix, étant donné qu'un terme d'erreur sur l'utilité est inconnu. Cette section explique les détails. À ce stade, il existe également un lien étroit avec le modèle d'approvisionnement du réseau, puisqu'il est utilisé pour calculer les temps de trajet.

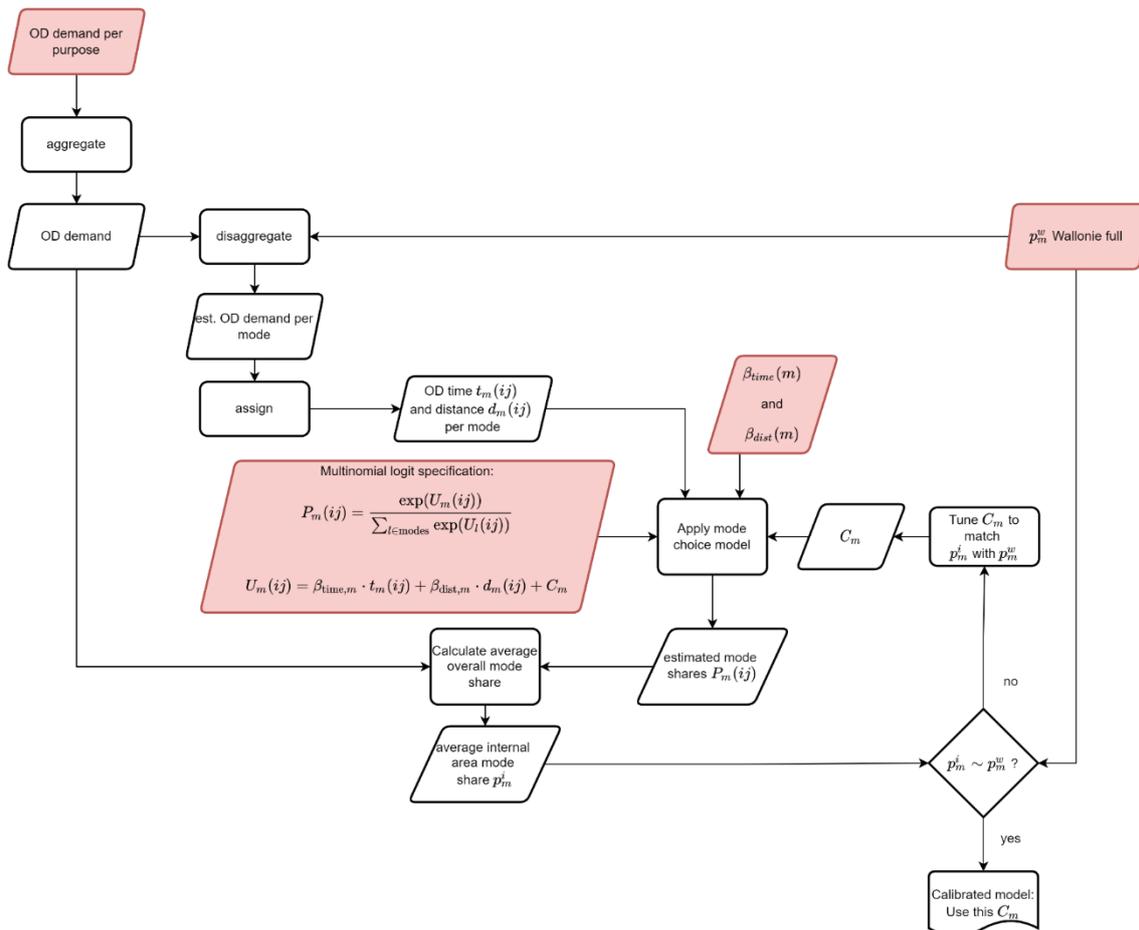


FIGURE 27. ORGANIGRAMME DU MODÈLE DE CHOIX DU MODE DE TRANSPORT.

Après avoir calculé le choix du mode de transport sur la demande totale pour chaque OD, on obtient des matrices OD spécifiques à chaque mode.

Ces matrices OD spécifiques à chaque mode sont calibrées sur la base des comptages de trafic.

Les facteurs d'étalonnage sont déterminés de manière à ce que le modèle de choix du mode de transport puisse être appliqué dans les scénarios. Les matrices OD spécifiques aux modes de transport obtenues dans les scénarios peuvent ensuite être calibrées à l'aide des facteurs de calibrage.

3.2.3.1 Modèle logit

Un modèle logit consiste en un ensemble de modes possibles M . La probabilité (P_m , figure 28) de choisir un mode m est:

$$P_m = \frac{e^{U_m}}{\sum_{k \in M} e^{U_k}}$$

Où U_k est l'utilité de choisir le mode k .

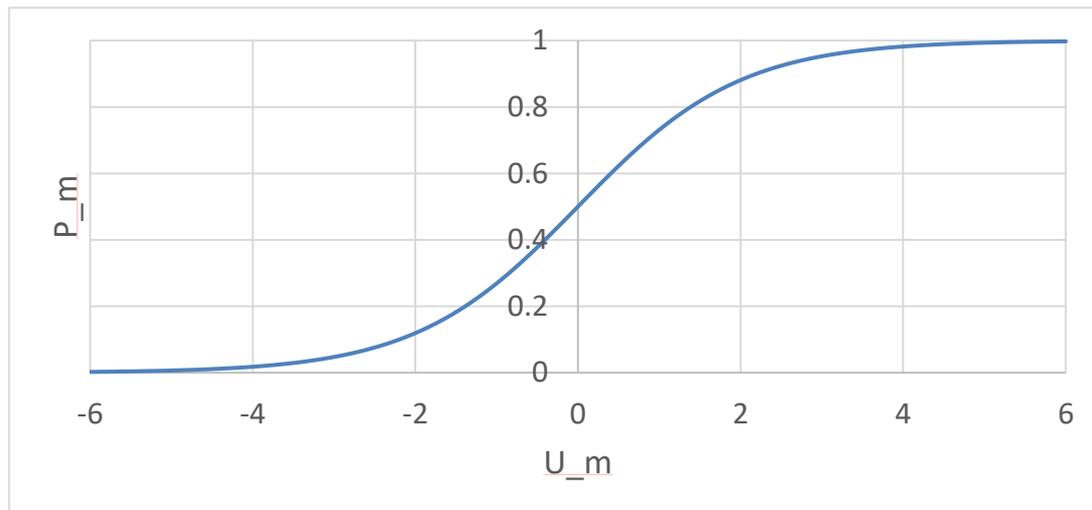


FIGURE 28. PROBABILITÉ DE CHOISIR UN MODE M EN FONCTION DES UTILITÉS DE TOUS LES MODES.

3.2.3.2 Paramètres de choix de mode

L'utilité du mode m est égale:

$$U_m(ij) = \beta_{time, m} \cdot t_m(ij) + \beta_{dist, m} \cdot d_m(ij) + C_m$$

Les utilités sont spécifiques à chaque OD, le choix du mode est donc aussi spécifique aux OD. Il dépend du temps de trajet d'un mode (t_m), de la distance d'un mode (d_m) et d'un facteur d'étalonnage (C_m). Le poids du temps de trajet ($\beta_{time, m}$) et de la distance ($\beta_{dist, m}$) est déterminé par les paramètres ci-dessous (tableau 12). Ils sont tirés des modèles stratégiques de trafic flamands, étant donné qu'il n'existe pas de données qui établissent une corrélation entre les temps de parcours et les distances observés et les choix modaux observés, afin de calibrer de nouveaux paramètres pour Namur et Eupen. Il n'est pas nécessaire de viser une grande précision s'il n'y a aucun moyen de la vérifier. Le facteur de calibrage C_m est utilisé pour équilibrer les parts modales relatives par rapport aux parts modales observées en Wallonie (MONITOR, 2017; tableau 13).

TABLEAU 12. PARAMÈTRES DU CHOIX MODAL PROVENANT DES MODÈLES STRATÉGIQUES DE TRAFIC FLAMANDS.

Mode	$\beta_{\text{time}, m}$	$\beta_{\text{dist}, m}$
Voiture (conducteur)	-0.018	-0.039
Passagers (voiture)	-0.065	0.0
Vélo	-0.13	0.0
Piéton	-0.225	0.0
Transports publics	-0.019	0.0

TABLEAU 13. PARTS MODALES POUR LES DÉPLACEMENTS EN WALLONIE (MONITOR, 2017).

Mode	P_m
Voiture (conducteur)	0.54
Passagers (voiture)	0.21
Vélo	0.04
Piéton	0.13
Transports publics	0.08

L'objectif du facteur de calibrage est de faire correspondre la somme pondérée de P_m (ij) aussi près que possible des résultats de l'enquête MONITOR (2017).

3.3 Modèle d'approvisionnement

3.3.1 Modèle de réseau

3.3.1.1 Représentation du réseau routier

Afin de modéliser le trafic sur un réseau routier, une représentation abstraite du réseau routier est nécessaire. Cette représentation abstraite se compose de trois éléments: les liens, les nœuds et les zones.

Chaque segment de route physique (et chaque direction) est représenté par un lien, qui commence et se termine à un nœud. Les véhicules peuvent se déplacer d'un nœud à l'autre en utilisant ces liaisons. Le coût et la durée du trajet dépendent des propriétés de la liaison, telles que la vitesse maximale autorisée, le nombre de voies, l'accessibilité pour un certain type de véhicule, etc. Une nouvelle liaison est introduite chaque fois que l'une des propriétés de liaison susmentionnées change ou que plusieurs segments de route se croisent. L'interconnectivité entre les liens est assurée par les nœuds auxquels ils s'attachent. Il est important de noter que chaque sens de circulation dispose d'un lien distinct, de sorte qu'ils peuvent avoir des propriétés de lien différentes.

Le lien entre le modèle de l'offre et de la demande est assuré par les zones. Chaque nœud se voit attribuer une zone en fonction de son emplacement physique dans cette zone. Le trafic dont l'origine (la destination) se situe dans une certaine zone commencera (finira) par un nœud de cette zone. En d'autres termes, la demande de déplacement d'une zone d'origine vers une autre zone de destination est injectée dans le réseau aux nœuds situés dans la zone d'origine et retirée du réseau aux nœuds situés dans la zone de destination.

Les zones en Belgique sont les secteurs statistiques de Statbel. Les zones en Allemagne sont des grilles de 1 km par 1 km de l'Agence européenne pour l'Environnement (AEE). Ces zones sont compatibles (voire identiques) aux zones utilisées précédemment dans le modèle de demande.

Le passage d'un réseau routier physique au modèle de réseau est représenté à la Figure 29.



FIGURE 29. PASSAGE DU RÉSEAU ROUTIER PHYSIQUE AU MODÈLE DE RÉSEAU.

3.3.1.2 Construction des modèles de réseaux des deux villes

Les informations pour le modèle de réseau sont obtenues à partir d'OSM. Les informations brutes pour les liens et les nœuds sont téléchargées directement et correspondent aux dernières mises à jour disponibles. Ces informations brutes sont ensuite traitées, étendues et améliorées. Les zones, quant à elles, restent cohérentes avec les zones du modèle de demande.

Comme il n'est pas opportun de disposer d'un modèle de trafic pour une zone physique trop vaste (la qualité ne peut être garantie, les temps de calcul deviennent longs et la grande zone n'entre pas dans le cadre du présent projet), un modèle de réseau détaillé n'est construit que pour la zone d'intérêt (cœur) et une zone tampon autour d'elle. La zone tampon est nécessaire pour garantir que le trafic dans la zone centrale est correctement réparti. La zone centrale et la zone tampon qui l'entoure sont appelées ensemble la zone interne. Les zones centrale et tampon choisies pour Namur et Eupen sont illustrées par les Figure 30 et Figure 31. La zone située en dehors de la zone interne, qui est néanmoins étudiée dans le modèle de demande, est appelée zone externe.

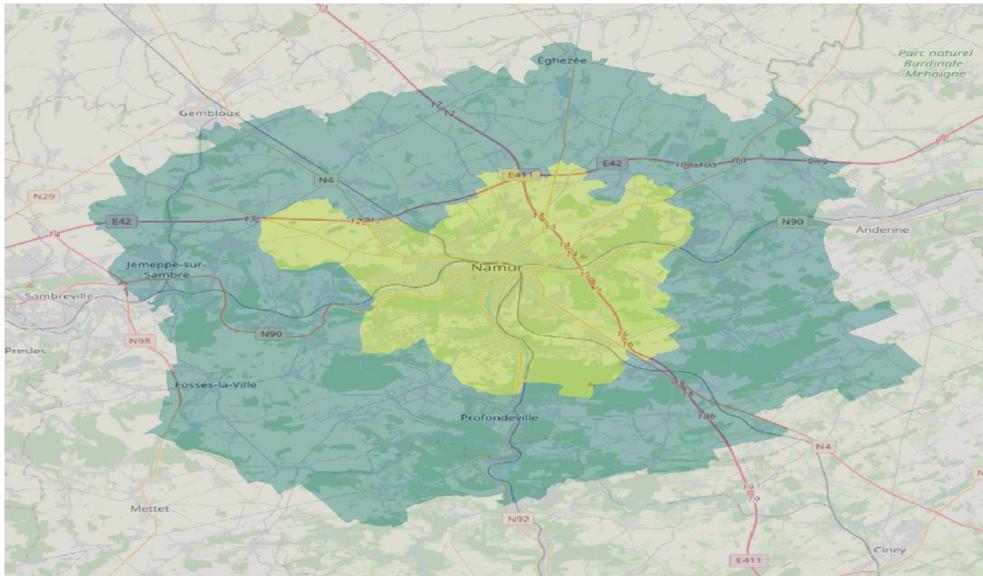


FIGURE 30. ZONE INTERNE DE NAMUR (ZONE CENTRALE EN VERT CLAIR, ZONE TAMPON EN VERT FONCÉ).

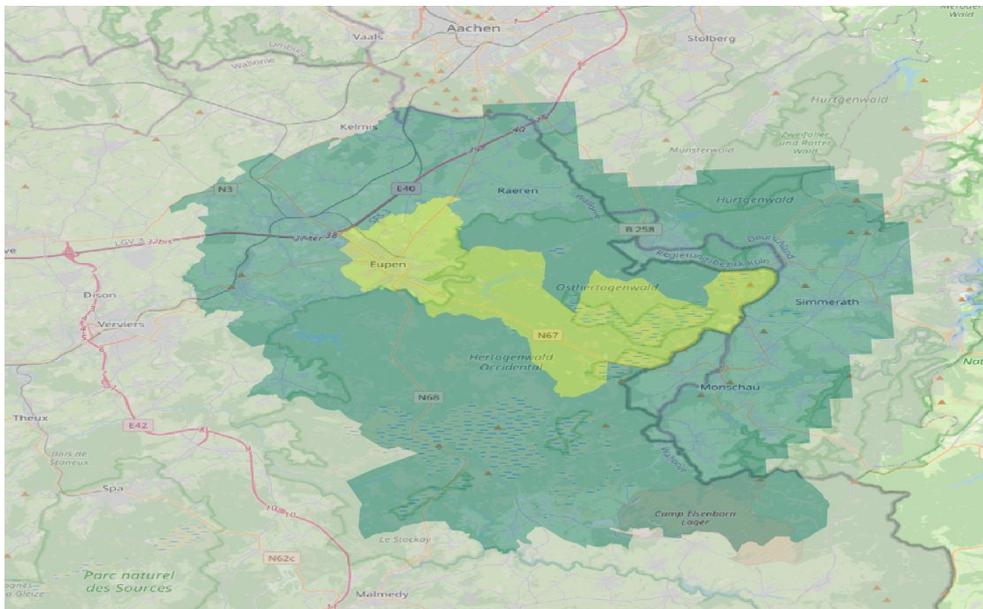


FIGURE 31. ZONE INTERNE D'EUPEN (ZONE CENTRALE EN VERT CLAIR, ZONE TAMPON EN VERT FONCÉ).

L'espace intérieur n'est évidemment pas isolé du reste du monde. Il peut y avoir une demande de déplacement d'une origine externe vers une destination interne, ou vice versa. En outre, le trafic d'une origine externe vers une autre destination externe peut très bien passer par le réseau interne au cours de son déplacement. C'est pourquoi nous avons créé également un réseau "zoomout" à gros grain qui modélise une zone physique beaucoup plus vaste. Ce modèle est moins détaillé et permet de décider quelles paires OD passent par des zones internes au cours de leur déplacement et où elles entrent ou sortent respectivement des zones internes. Cela nous permet de cartographier la demande des OD vers des origines/destinations virtuelles aux frontières du réseau interne détaillé.

Enfin, les transports publics sont modélisés séparément, car leur dynamique est très différente de celle des autres modes. En particulier, ils dépendent fortement des horaires des bus et des trains, et de la possibilité d'avoir une bonne connexion entre les différentes lignes (ne pas avoir à attendre trop longtemps entre les deux).

Dans les sections suivantes, nous décrivons plus en détail le réseau zoomé, le réseau détaillé et le réseau de transports publics.

3.3.1.2.1 Réseau zoomout

Le réseau zoomout est construit en combinant toutes les routes accessibles en voiture dans la zone interne avec toutes les routes d'ordre supérieur dans la région externe. Une route est considérée comme étant d'ordre supérieur lorsque son type sur OSM est "secondaire" ou supérieur. Cela inclut toutes les autoroutes, Nx⁷ et Nxx⁸ routes. Cela inclut également la plupart des complexes de bretelles d'accès et de sortie.

Pour Namur et Eupen, la Belgique dans son ensemble est considérée comme la région externe (moins la partie qui a été sélectionnée comme région interne pour chaque ville, bien sûr). En outre, la région externe d'Eupen a été élargie pour inclure une partie de l'Allemagne.

Pour déterminer quelles paires d'OD passent par la région interne, il a été décidé d'utiliser une affectation déterministe du trafic non congestionné avec des connecteurs. Ce choix a été fait parce que seul un résultat d'affectation à gros grain est nécessaire et que le calcul ne devrait pas être trop lourd. En outre, de nombreuses zones ne contiennent pas de liens/nœuds par défaut, car seules les routes d'ordre supérieur sont incluses. De ce fait, l'affectation sans connecteurs est infaisable.

Chaque centroïde d'une zone a été ajouté en tant que nœud au réseau. Le trafic ayant la zone concernée comme origine (destination) quittera (atteindra) la zone à partir de ce centroïde. Les centroïdes sont reliés au réseau par des liens spéciaux appelés connecteurs. Les connecteurs sont spécifiquement attachés aux nœuds du réseau qui ne sont pas situés sur des autoroutes et à partir desquels la ville d'intérêt peut être atteinte en tant qu'origine (destination). Enfin, nous veillons à ce que les centroïdes des zones internes se connectent aux nœuds du réseau interne et que les centroïdes des zones externes se connectent aux nœuds du réseau externe. De cette manière, nous nous assurons que les zones internes (externes) commencent (finissent) effectivement à l'intérieur (à l'extérieur).

Une fois le réseau terminé, le chemin le plus court sur le réseau zoomout est déterminé pour chaque paire OD. Pour ce chemin le plus court, nous déterminons s'il passe par la zone interne. Si c'est le cas, nous gardons une trace de son lien d'entrée et/ou de sortie. Pour chaque lien d'entrée et/ou de sortie utilisé, nous construisons une zone virtuelle avec une demande d'origine (de destination). Ces zones virtuelles injecteront leur demande dans le réseau détaillé par le biais de centroïdes virtuels

⁷ Routes numérotées entre N1 et N9 (limites incluses).

⁸ Routes numérotées entre N10 et N99 (limites incluses).

que nous connectons aux nœuds appropriés. De cette manière, nous pouvons passer d'une matrice OD très large de toutes les zones internes/externes à une matrice OD beaucoup plus petite qui contient toutes les zones internes, complétées par un nombre limité de zones externes virtuelles.

Le trafic cycliste n'est pas pris en compte dans le réseau zoomout, car les distances parcourues par les vélos sont généralement beaucoup plus faibles.

3.3.1.2.2 Détail du réseau

Le réseau détaillé est le réseau utilisé dans la région interne. Il se compose de toutes les routes accessibles en voiture. Ce réseau est ensuite complété par toutes les routes qui ne sont accessibles qu'aux cyclistes. En outre, les centroïdes des zones externes virtuelles (qui ont été construits par affectation sur le réseau zoomout) sont connectés aux points d'entrée/sortie corrects du réseau. Il convient de noter que, d'une manière générale, le trafic de camions utilise le réseau automobile et les piétons le réseau cyclable.

Dans une étape manuelle, des délais et des limitations de capacité sont ajoutés aux liaisons correctes en étudiant les schémas de contrôle des feux de circulation disponibles. Les délais correspondent au temps d'attente moyen, qui est défini par le temps de cycle et le temps au rouge. La capacité des liaisons entrantes à un feu de circulation est multipliée par la fraction verte pour obtenir une nouvelle limitation de capacité, utilisée dans l'affectation.

Les réseaux automobiles qui en résultent sont affichés à la Figure 32 pour Namur et à la Figure 33 pour Eupen. Dans ces figures, les grands points à l'extérieur sont les centroïdes externes virtuels, par lesquels le trafic externe entre dans le réseau.

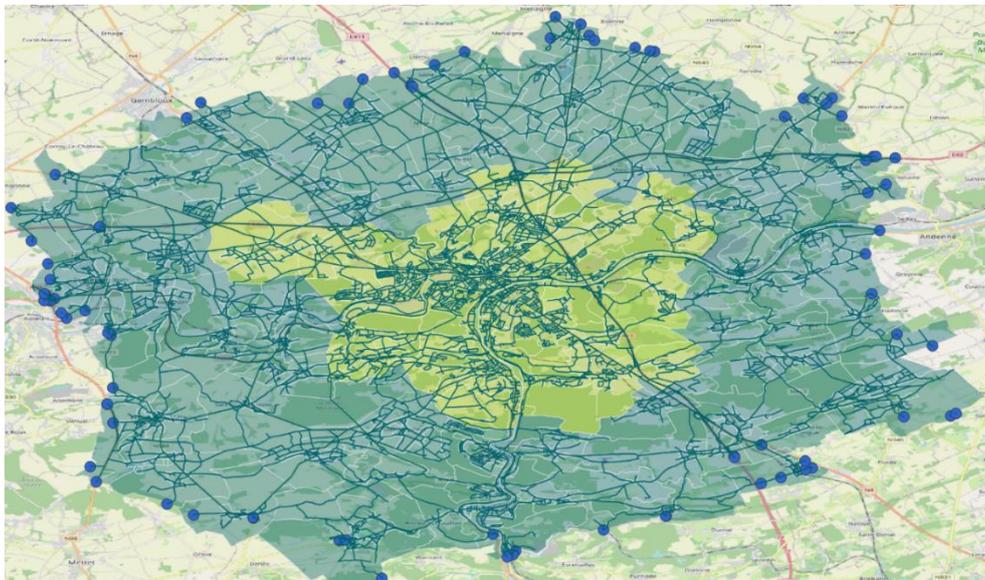


FIGURE 32. RÉSEAU AUTOMOBILE POUR NAMUR.

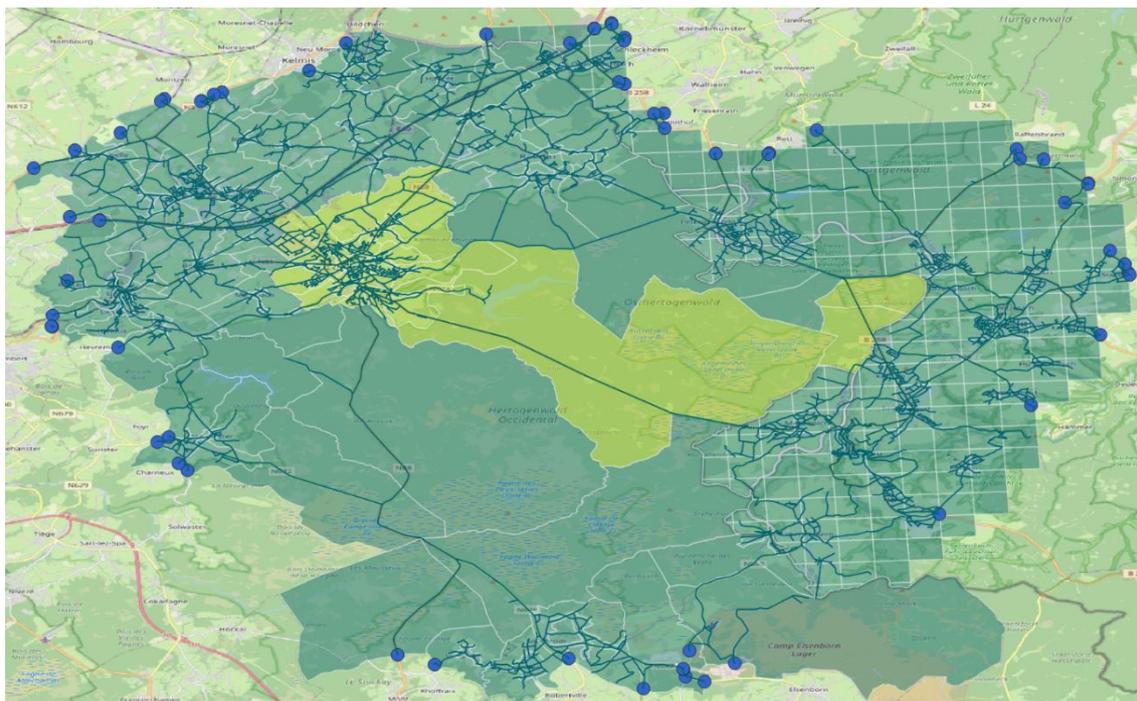


FIGURE 33. RÉSEAU AUTOMOBILE POUR EUPEN.

Les réseaux cyclables, qui contiennent beaucoup plus de liens que les réseaux automobiles, sont présentés aux figures 34 et 35.

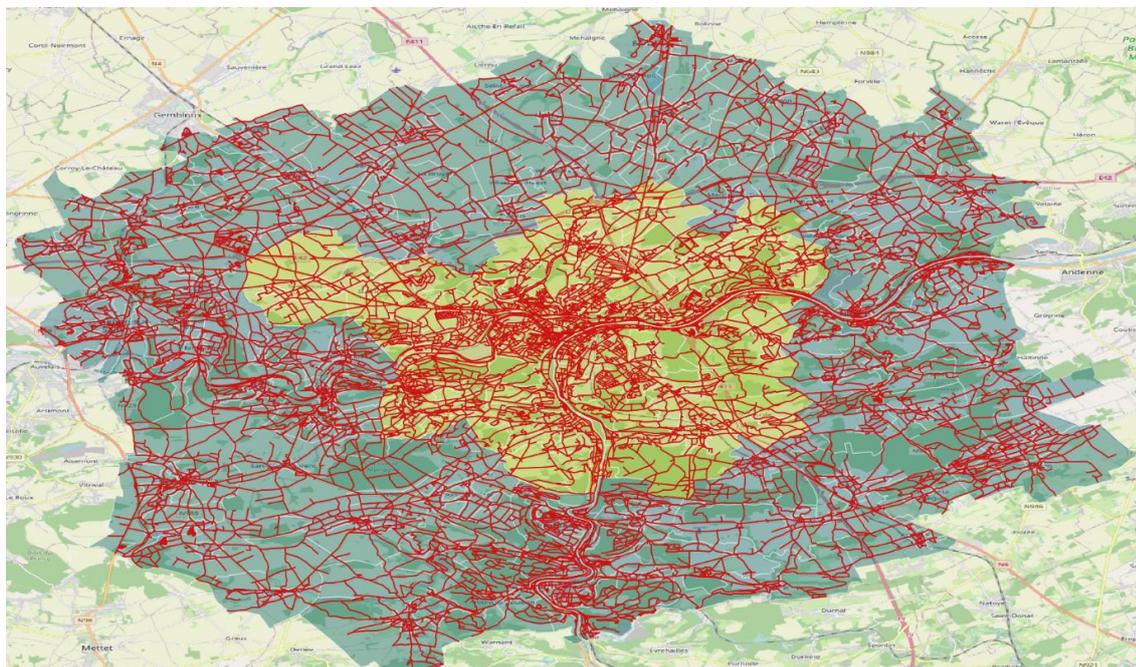


FIGURE 34. RÉSEAU CYCLABLE DE NAMUR.

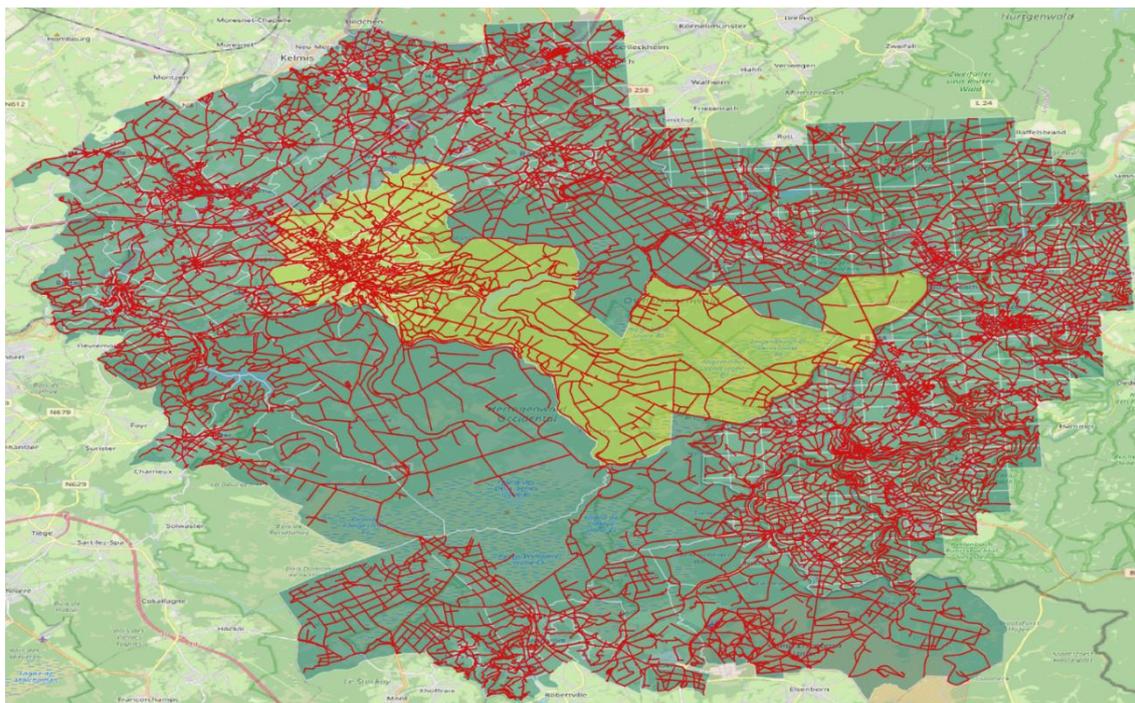


FIGURE 35. RÉSEAU CYCLABLE D'EUPEN.

3.3.1.2.3 Réseau de transport public

Les transports publics utilisent un réseau fondamentalement différent de celui des autres modes de transport. En effet, les transports publics utilisent des horaires fixes et des arrêts fixes où les passagers peuvent entrer/sortir du réseau. Étant donné que la nature du réseau est si fondamentalement différente, il a été choisi de traiter les transports publics séparément des autres modes de transport dans une étape de prétraitement. Le résultat de ce prétraitement est le temps de parcours des transports publics, qui peut ensuite être utilisé pour le modèle de choix du modal. Dans cette section, nous examinons brièvement le fonctionnement de ce prétraitement.

Le réseau de transport public est construit sur base des fichiers standardisés GTFS (General Transit Feed Specification)⁹. Le GTFS contient pour chaque opérateur de transport public (dans ce cas la SNCB et le TEC) toutes les informations sur les itinéraires, les trajets, les arrêts, les temps d'arrêt, etc. Les fichiers GTFS des différents opérateurs sont combinés et les informations pertinentes sont extraites.

⁹ voir <https://gtfs.org/> en général et <https://hello.irail.be/gtfs/> pour la Belgique

Les données GTFS ne sont traitées que pour une date représentative, qui a été choisie comme étant le jeudi 28 octobre 2021. À cette date, seuls les itinéraires dont les trajets s'arrêtent dans la région interne de la ville sont conservés. A partir de ces itinéraires, tous les arrêts et trajets sont pris en compte. Les arrêts conservés sont affichés aux figures 36 et 37 respectivement pour Namur et Eupen.

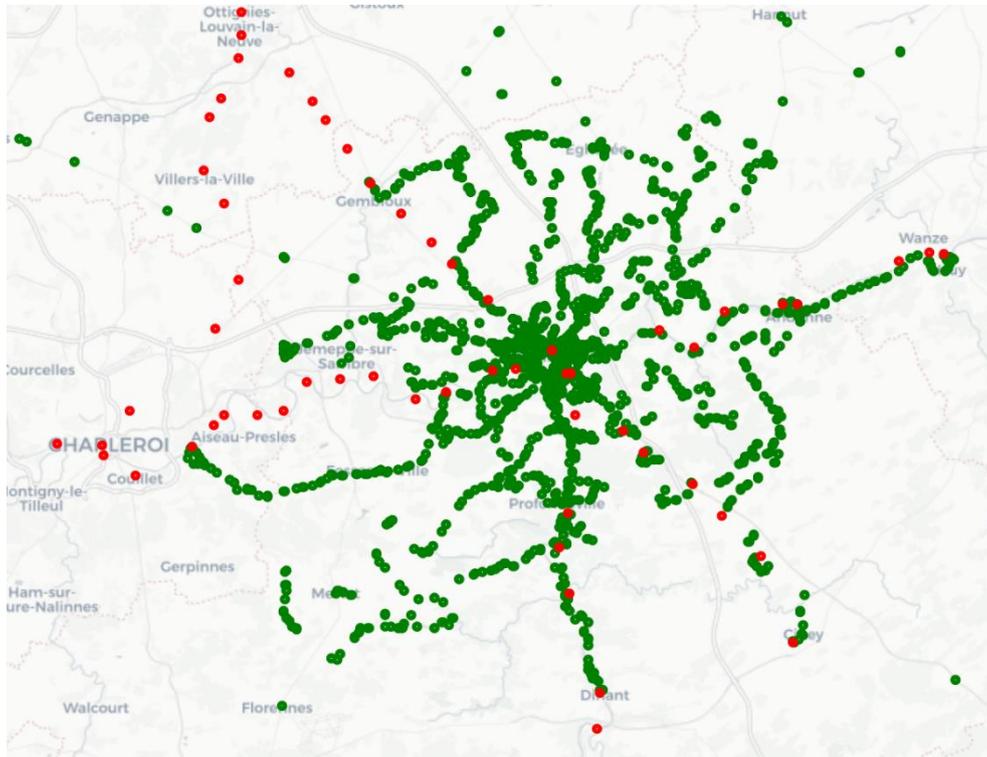


FIGURE 36. ARRÊTS DU RÉSEAU DE TRANSPORT PUBLIC DE NAMUR (ROUGE=SNCB, VERT=TEC). CERTAINS ARRÊTS SONT HORS DE PORTÉE DE LA FIGURE.

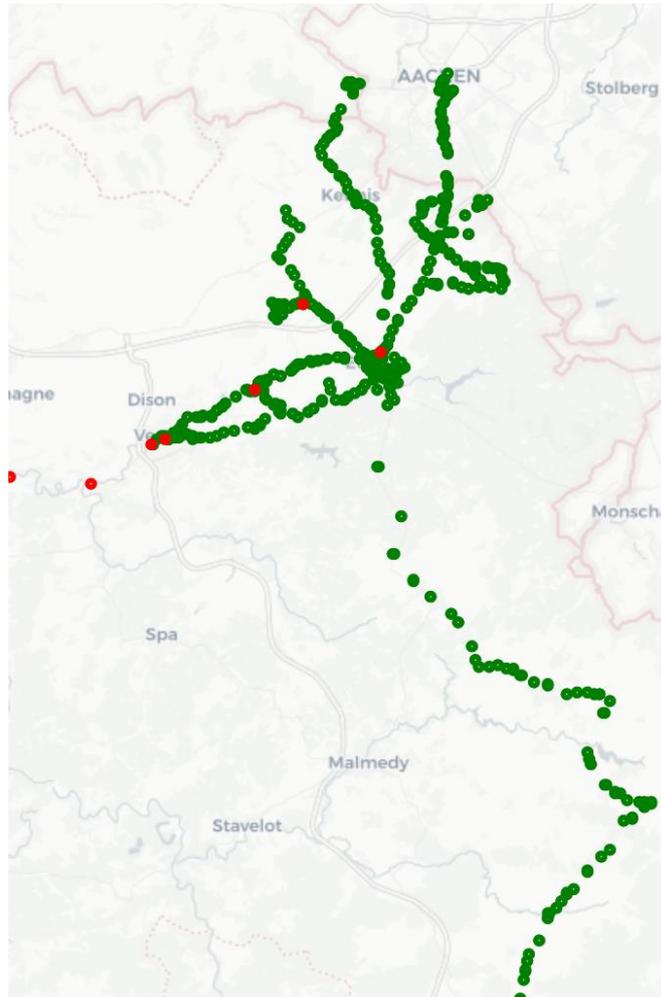


FIGURE 37. ARRÊTS DU RÉSEAU DE TRANSPORT PUBLIC D'EUPEN (ROUGE=SNCB, VERT=TEC). CERTAINS ARRÊTS SONT HORS DE PORTÉE DE LA FIGURE.

Ensuite, ce que nous considérons intuitivement comme un seul arrêt est représenté dans le GTFS comme des lieux d'arrêt physiques distincts. Il s'agit, par exemple, d'arrêts de bus situés de part et d'autre de la route ou d'arrêts d'opérateurs de transport public distincts permettant le transfert de passagers. Ces types d'arrêts sont tous mis en correspondance les uns avec les autres, de sorte que chaque arrêt GTFS est associé à un arrêt "parent" unique. Par exemple, tous les quais d'une gare routière et tous les quais d'une gare ferroviaire associée peuvent être reliés à un seul arrêt parent. Quelques arrêts parents dans les centres-villes de Namur et d'Eupen sont reportés aux figures 38 et 39.

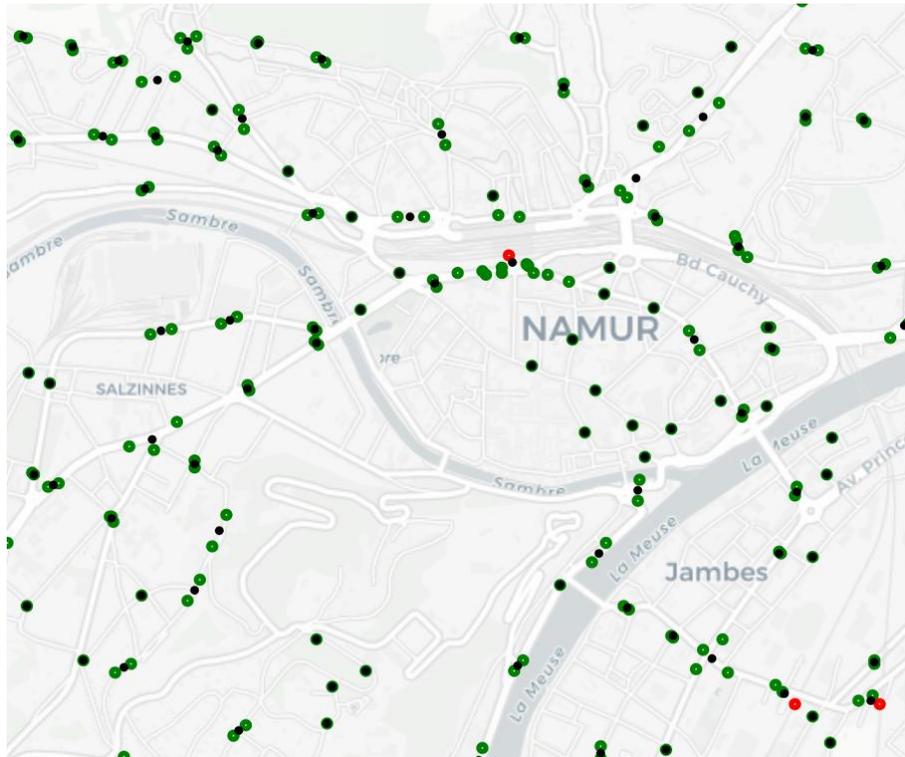


FIGURE 38. LES POINTS NOIRS REPRÉSENTENT LES ARRÊTS PARENTS QUI ONT ÉTÉ CRÉÉS ET QUI SONT RELIÉS À PLUSIEURS ARRÊTS ENFANTS DE LA SNCB (ROUGE) ET DU TEC (VERT) À NAMUR.

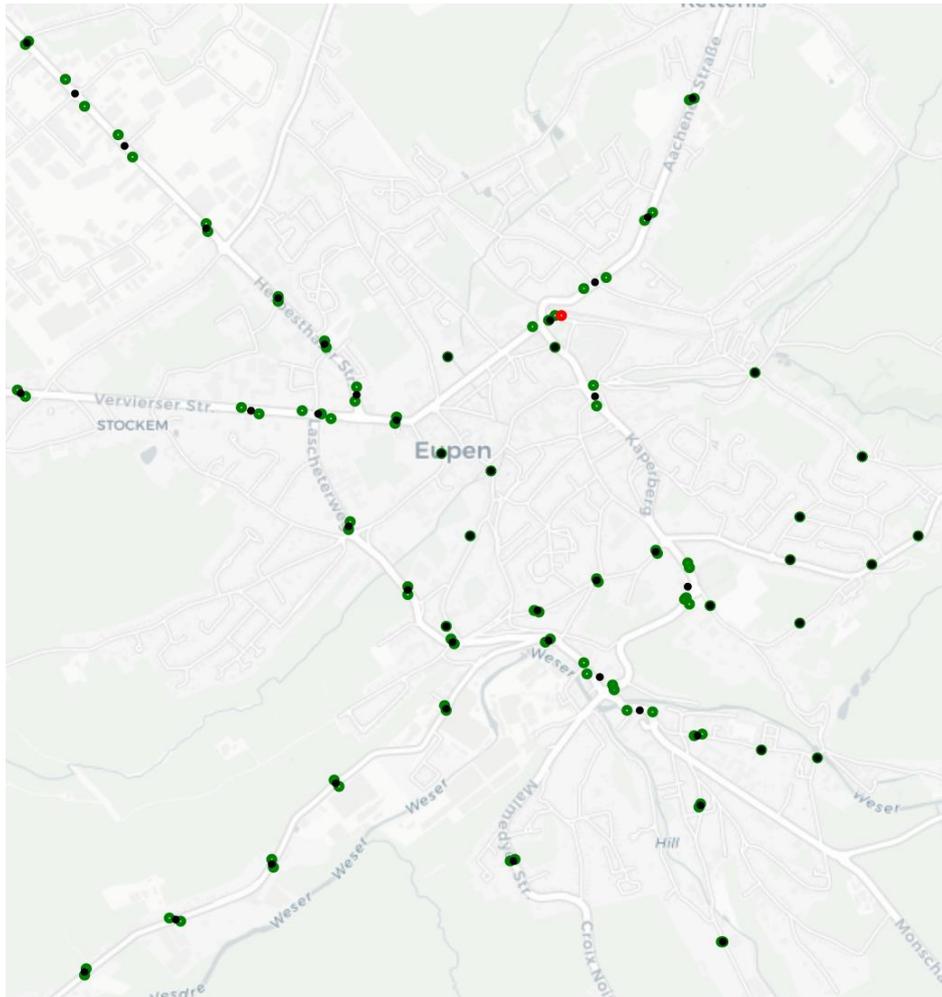


FIGURE 39. LES POINTS NOIRS REPRÉSENTENT LES ARRÊTS PARENTS QUI ONT ÉTÉ CRÉÉS ET QUI SONT LIÉS À PLUSIEURS ARRÊTS ENFANTS DE LA SNCB (ROUGE) ET DU TEC (VERT) À EUPEN.

Le réseau de transport public construit est utilisé pour calculer le temps de trajet le plus court entre chaque paire de zones, en tenant compte des tableaux de temps de trajet et des emplacements des arrêts. Ce processus est divisé en deux étapes:

1. Tout d'abord, le temps de trajet le plus court entre toutes les paires d'arrêts parents est calculé, en tenant compte des horaires des transports publics et du fait que le voyageur souhaite partir à une certaine heure.
2. Deuxièmement, le temps de trajet le plus court entre toutes les paires de zones est calculé. Pour ce faire, tous les arrêts situés dans un rayon de 500 m du point de départ et du point d'arrivée sont pris en compte et les arrêts de départ et d'arrivée ayant le temps de trajet le plus court sont choisis. En outre, le temps de marche avant et après l'utilisation des transports publics est ajouté.

Le résultat du module de transport public est une matrice avec les temps de trajet de chaque origine à chaque destination, en utilisant le mode transports publics.

3.3.2 Affectation du trafic

L'affectation du trafic attribue la demande de trafic de chaque zone d'origine à chaque zone de destination sur le réseau (figure 40). Cela permet de déterminer les chemins sur le réseau et leur probabilité, afin de déterminer les flux de trafic sur chaque tronçon. Les propriétés du réseau sont listées et détaillées à l'annexe 3.

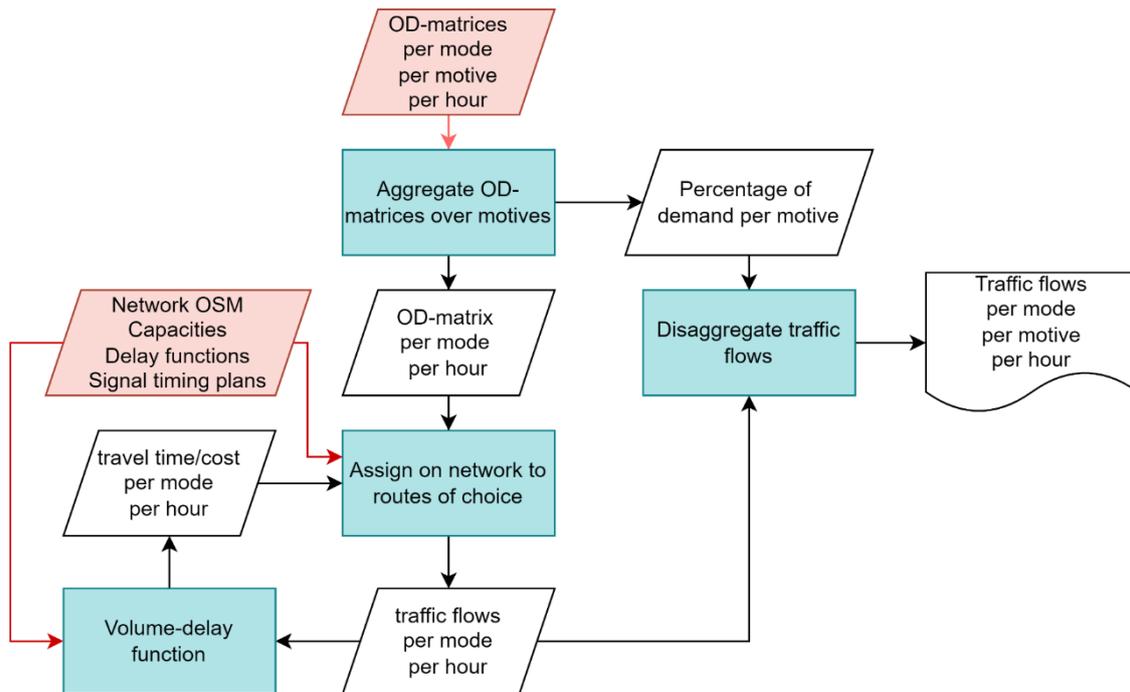


FIGURE 40. ALGORITHME D'AFFECTION DU TRAFIC.

3.3.2.1 Propriétés des tronçons

L'affectation du trafic est un problème d'autoconsistance: le temps de parcours sur chaque tronçon (figure 41) est une fonction du flux de trafic sur le tronçon et des propriétés du tronçon. Les propriétés du tronçon sont par exemple la vitesse de circulation (limite de vitesse), le nombre de voies, la capacité (véhicules par heure).

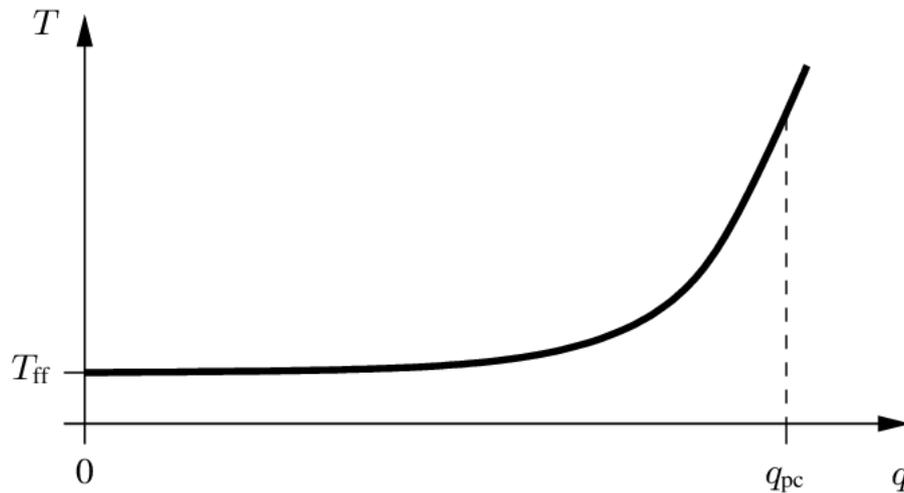


FIGURE 41. TEMPS DE PARCOURS SUR LE TRONÇON (T) EN FONCTION DU DÉBIT DU TRONÇON (q).

3.3.2.2 Propriétés des nœuds

Les nœuds du réseau (intersections) peuvent imposer des contraintes de capacité et des retards supplémentaires, par exemple à cause des feux de circulation. Dans ce cas, la capacité du tronçon est limitée sur la base de la fraction verte moyenne.

$$\text{capacity}_{\text{new}} = \text{capacity}_{\text{old}} \cdot f_g$$

Un délai supplémentaire est également imposé sur le tronçon, en supposant que les heures d'arrivée sont uniformes au cours du cycle.

$$\Delta t_{\text{wait}} = f_r^2 \cdot T / 2$$

f_g = fraction moyenne du feu vert

f_r = fraction moyenne du feu rouge

T = durée du cycle des feux de circulation

3.3.2.3 Connecteurs de zone

Les connecteurs sont utilisés dans le réseau pour charger le trafic sur le réseau en provenance d'une zone spécifique, ou pour décharger le réseau afin d'arriver à une zone spécifique. La méthode traditionnelle consiste à charger/décharger tout le trafic zonal vers/depuis un seul endroit du réseau. Il en résulte des variations de volume irréalistes, sans aucune répartition locale (certaines routes restent vides, figure 42).

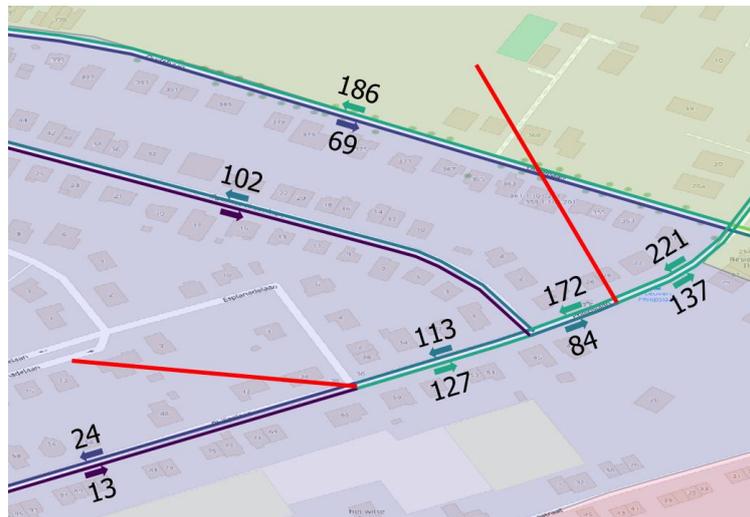


FIGURE 42. MÉTHODE TRADITIONNELLE POUR LES CONNECTEURS.

C'est pourquoi nous avons utilisé une nouvelle méthode plus sophistiquée, qui répartit le trafic d'origine et de destination sur toutes les rues d'une zone. Il en résulte des variations de volume lissées et des déplacements de flux réalistes lors de l'application de scénarios (figure 43).



FIGURE 43. NOUVELLE MÉTHODE POUR LES CONNECTEURS.

3.4 Calibrage

L'objectif du processus de calibrage est de faire correspondre plus étroitement les résultats du modèle avec les comptages de trafic disponibles. Cela peut se faire en modifiant les caractéristiques du réseau et en calibrant les matrices OD.

Les comptages de trafic sur les réseaux autoroutiers et secondaires sont nécessaires pour effectuer l'étape de calibrage. Pour le réseau autoroutier, on dispose du trafic pour un jour moyen (comptages d'une année moyennés fournis par le SPW Mobilité et infrastructures, SPW-MI), ainsi que de données flottantes sur les voitures (FCD), qui contiennent les trajets des véhicules et leur vitesse de conduite. Ces dernières ont agrégées au niveau horaire et mises en correspondance avec les tronçons du réseau routier, ce qui permet d'obtenir le nombre de véhicules sondes¹⁰ par heure sur un tronçon donné, ainsi que la vitesse moyenne au cours de cette heure sur cette liaison. Sur le réseau secondaire, les données proviennent de deux sources: les comptages Telraam et les comptages effectués par l'ISSeP à l'aide de mesures radar (ISSeP, 2020).

3.4.1 Données de comptage

3.4.1.1 Réseau autoroutier

Sur les autoroutes, les comptages de trafic sont collectés par PEREX à l'aide de détecteurs à boucle inductive. Idéalement, ces données devraient être disponibles à un niveau d'agrégation de 15 minutes ou d'une heure. Cependant, les données fournies ne contiennent que les intensités annuelles totales de 2019, pour les deux directions ensemble. À l'aide d'hypothèses et d'estimations, les données doivent être transformées en comptages horaires par direction afin d'être utilisées dans le processus d'étalonnage.

a) Comptage horaire

Le flux journalier sur le réseau autoroutier fluctue évidemment, avec un pic le matin et le soir. Ce profil journalier ne pouvant pas être extrait des données disponibles, nous avons utilisé les "verkeersindicatoren", c'est-à-dire les comptages de trafic en libre accès du gouvernement flamand. Plus précisément, le profil quotidien observé dans trois postes de comptage aux frontières du réseau flamand, les plus proches de Namur et d'Eupen, a été considéré comme représentatif des profils à proximité de ces deux villes. Les postes de comptage utilisés sont les suivants :

- E40 Bruxelles - Liège : entre Walshoutem et Berloz dans les deux sens
- E411 Namur - Bruxelles : Entre Rosières et Overijse dans les deux sens
- E313 Anvers - Liège : Entre Tongres et Boirs dans les deux sens

¹⁰ Un véhicule sonde est un véhicule qui transmet sa trajectoire au fournisseur de FCD. Cela permet d'obtenir un échantillon des usagers de la route, tous les véhicules du réseau ne le faisant pas.

Le modèle obtenu est présenté à la figure 44.

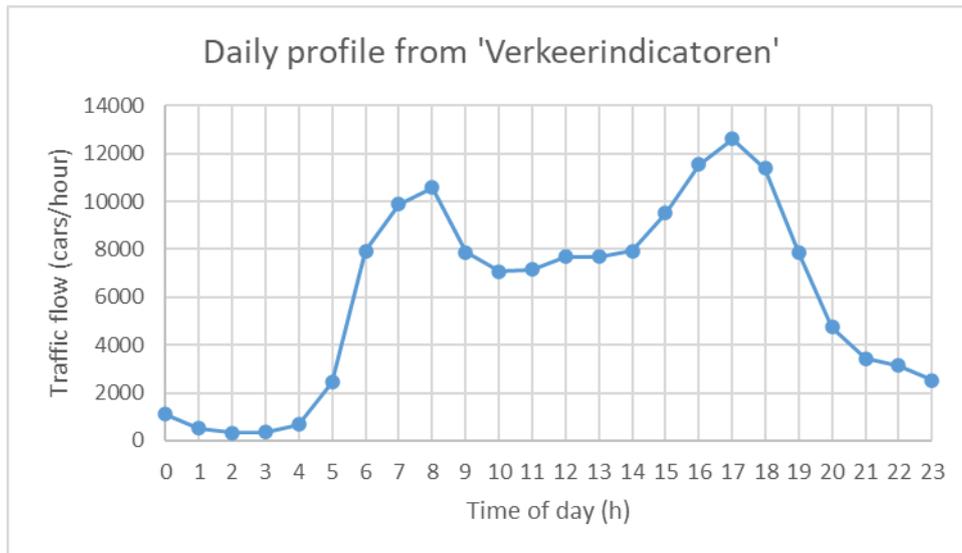


FIGURE 44. PROFIL DU TRAFIC JOURNALIER AUTOROUTIER DÉRIVÉ DES COMPTAGES EN FLANDRE.

b) Directions

Comme les flux dans les deux directions étaient totalisés dans les comptages de trafic fournis par le SPW-MI, les directions ont également dû être obtenues à partir d'une autre source de données: les *Floating Car Data* (FCD) de HERE, déjà utilisées dans le projet Z2BE. Cet ensemble de données contient des informations sur le nombre de voitures dans chaque direction pour chaque segment de route, à la fois sur les réseaux primaire et secondaire, pour chaque heure de la journée.

La première difficulté quand on utilise des FCD est que ces données n'atteignent qu'un taux de pénétration limité. Seule une petite fraction des véhicules partage sa trajectoire avec le service API. Par conséquent, le nombre absolu de véhicules comptés n'est pas pertinent, et la proportion de véhicules circulant dans chaque direction doit être évaluée pour déterminer la direction moyenne du trafic. Cela suppose également que le flux dans les deux directions a un taux de pénétration similaire.

La deuxième difficulté avec les FCD est que le taux d'échantillonnage des appareils joue un rôle important: il varie entre une transmission par seconde et une transmission par minute, en fonction de l'appareil utilisé. Dans le premier cas, les véhicules peuvent envoyer leur position plusieurs fois sur un segment. Ces transmissions sont préalablement filtrées par HERE. Le second cas est plus problématique. Certains véhicules ne seront pas comptés alors qu'ils circulent sur un certain segment de route, car la plupart des segments de route du réseau autoroutier ne font que 500 à 1000 m de long. Pour résoudre ce problème, pour chaque tronçon d'autoroute entre les bretelles d'entrée et de sortie, le tronçon disponible le plus long est considéré comme le plus représentatif, et des tronçons de longueur similaire sont pris pour les deux directions. On obtient ainsi le résultat le plus probable, en supposant que le nombre de véhicules oubliés est similaire pour des segments de même longueur.

3.4.1.2 Réseau secondaire

Pour le réseau routier secondaire, deux sources principales ont été utilisées: les comptages de trafic de l'ISSeP et les données Telraam (figures 45 et 46). Pour Namur, des comptages ANPR ont également été utilisés.

Pour Namur et Eupen, des comptages de trafic fournis par les deux villes ont également été utilisés pour calibrer ou valider les flux modélisés. Ils ont été traités manuellement car le format des données était très différent. Malheureusement, la plupart de ces données n'étaient pas utiles pour l'étalonnage pour diverses raisons: données imprécises, pas de date ou d'unités, uniquement des flux quotidiens ou annuels, données anciennes, chevauchement avec des données de comptage plus récentes ou seule la somme des deux directions était disponible.

a) Comptages de trafic de l'ISSeP

La première source de données est constituée par les comptages de l'ISSeP dans les villes de Namur et d'Eupen. Il s'agit de comptages utilisant la technologie radar, où les voitures et les camions sont comptés séparément pour les deux directions, et agrégés à une résolution horaire. Les comptages sont en heure GMT (*Greenwich Mean Time*) et l'agrégation des données se fait à rebours (8h00 correspond au trafic entre 7h00 et 8h00). Les comptages ont eu lieu à des endroits stratégiques, pendant une période d'environ deux semaines. À Eupen, un total de 41 routes, réparties par direction, ont été utilisées (annexe 4, tableau 26) tandis que pour Namur, 21 routes ont été exploitées (annexe 4, tableau 27).

Pour l'étape d'étalonnage, il faut déterminer l'intensité du trafic pour les heures de pointe du matin et du soir. Pour ce faire, un jour représentatif a été choisi. Il s'agit idéalement d'un jour d'école et de travail, donc, si possible, d'un jour en dehors des périodes de vacances, et plus précisément d'un mardi ou d'un jeudi. Le lundi et le vendredi, une partie de la population prend un week-end prolongé, tandis que l'école se termine à midi le mercredi. Il est dangereux de faire la moyenne des comptages d'une période de comptage, car les moyennes peuvent être fortement influencées par les vacances ou les événements inhabituels. Pour les évaluations de la mobilité, il est préférable de modéliser les heures de pointe d'un jour de travail et d'un jour d'école représentatifs. Après avoir choisi le jour représentatif, les comptages à 8h00 et 17h00 sont utilisés comme intensités représentatives sur le lieu des comptages.

b) Comptages routiers Telraam

Dans les villes de Namur et d'Eupen, des dispositifs Telraam ont été installés par l'ISSeP pour compter le trafic local. Les figures 45 et 46 reprennent les différents lieux de comptage (comptages ISSEP et Telraam).

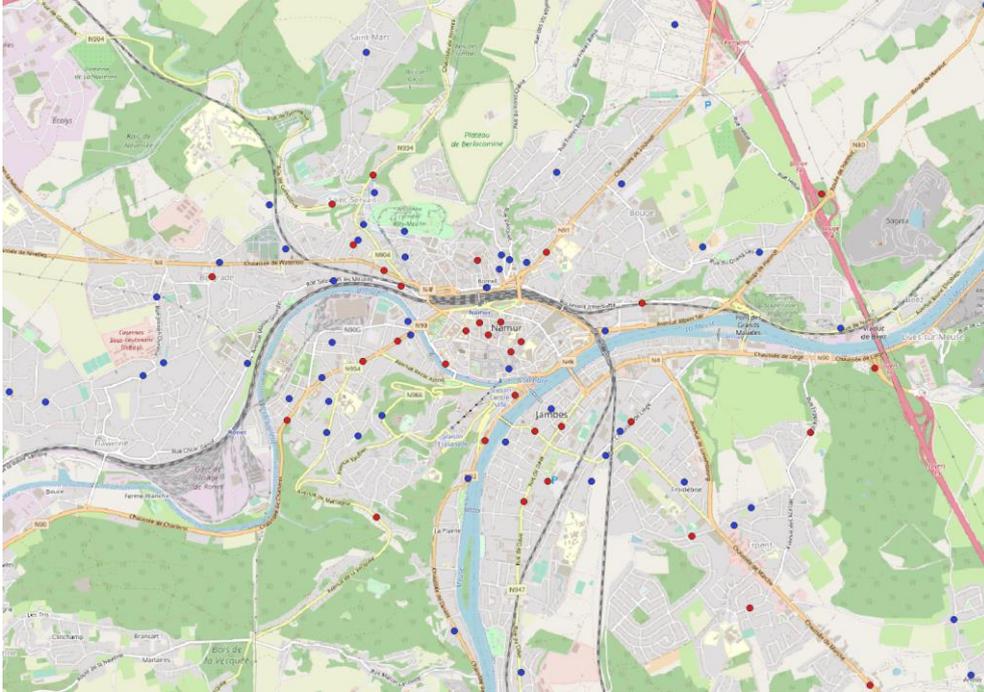


FIGURE 45. LOCALISATION DES COMPTAGES ISSEP (ROUGE) ET TELRAAM (BLEU) À NAMUR.

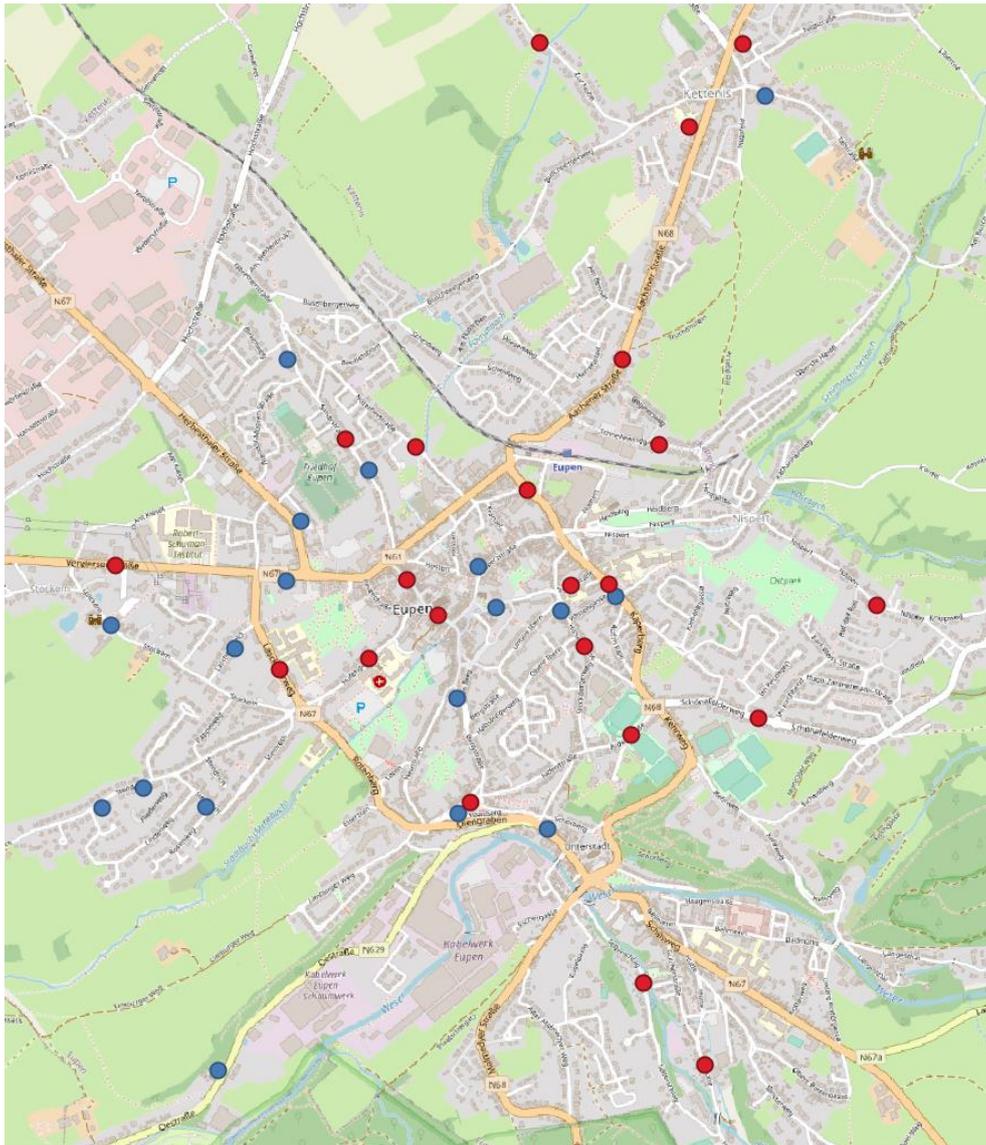


FIGURE 46. EMPLACEMENTS DES COMPTAGES ISSEP (ROUGE) ET TELRAAM (BLEU) À EUPEN.

c) Comptage du trafic à partir de caméras ANPR à Namur

Pour la calibration du modèle de Namur, des données de comptage provenant de caméras ANPR (*automatic Number Plate Recognition*) ont également été utilisées. Une distinction entre les véhicules légers et les véhicules lourds était disponible. Les données ont dû être agrégées car elles ont été extraites avec une résolution de 15 minutes. La plupart des caméras n'enregistraient qu'une seule direction. Certaines caméras n'ont pas été utilisées pour diverses raisons: elles mesuraient deux directions, elles n'ont pas pu être localisées, les données de comptage semblaient peu fiables (par exemple, beaucoup plus de véhicules lourds que de véhicules légers, les comptages étaient nuls, ...) ou elles ont été conservées pour la validation. Les comptages traités, utilisés dans la procédure d'étalonnage, sont présentés dans le tableau 28 (annexe 4).

3.4.2 Résultats

Le résultat du processus de calibrage sont les flux calibrés sur le réseau pour le scénario de base, qui est une heure de pointe typique du matin ou du soir à Namur et Eupen. Les flux du réseau ont été comparés aux comptages de trafic disponibles pour tous les modes.

3.4.2.1 Namur

Le coefficient de détermination (r^2) est une mesure statistique de la proportion de la variation de la variable dépendante qui est prévisible (les flux modélisés) à partir de la variable indépendante (les comptages de trafic). Ce coefficient est compris entre 0 et 1. Pour Namur, les valeurs r^2 pour les voitures et les camions sont très proches de 1, ce qui signifie qu'il y a une grande similitude entre les flux modélisés et les comptages de trafic disponibles (figures 47 à 52).

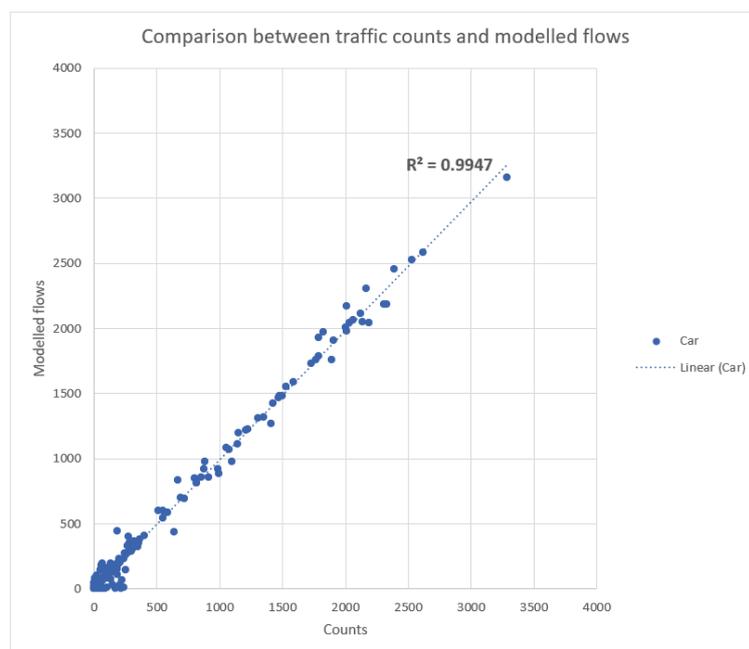


FIGURE 47. RÉSULTATS DE L'ÉTALONNAGE DU TRAFIC SIMULÉ À 8-9H À NAMUR POUR LE MODE VOITURE.

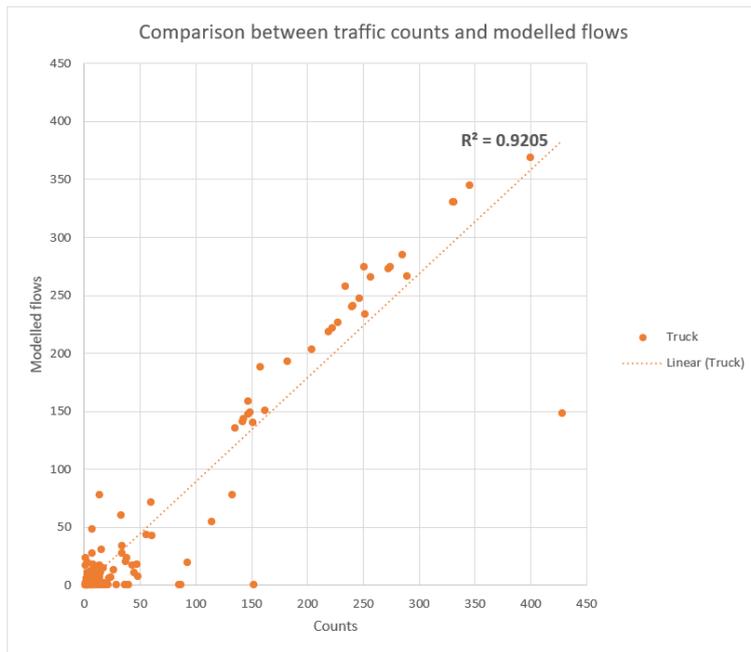


FIGURE 48. RÉSULTATS DE L'ÉTALONNAGE DU TRAFIC SIMULÉ À 8-9H À NAMUR POUR LE MODE POIDS LOURDS.

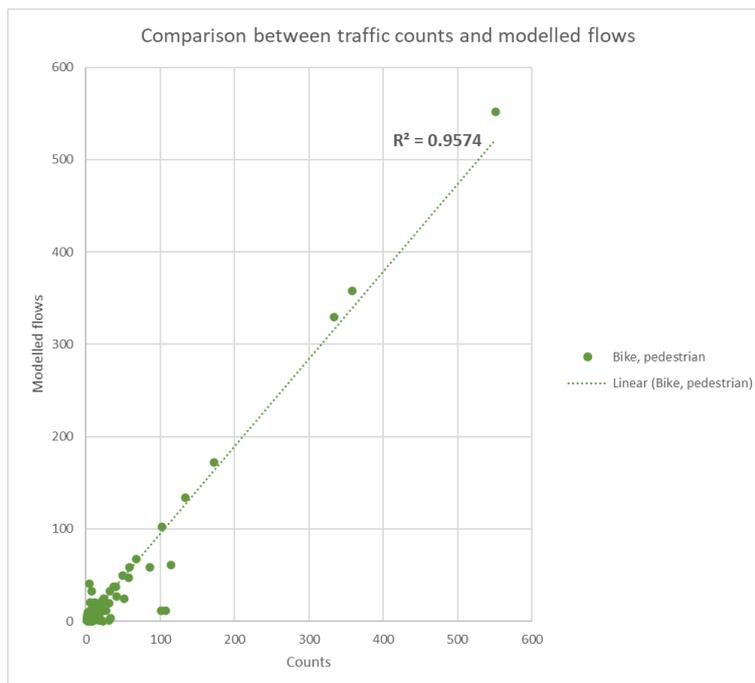


FIGURE 49. RÉSULTATS DE L'ÉTALONNAGE DU TRAFIC SIMULÉ À 8-9H À NAMUR POUR LES MODES VÉLO ET PIÉTON.

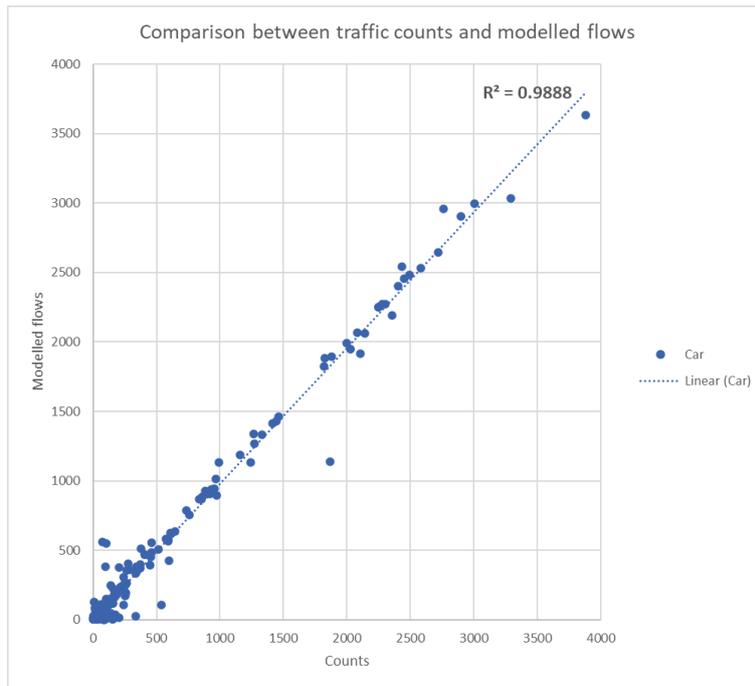


FIGURE 50. RÉSULTATS DE L'ÉTALONNAGE DU TRAFIC SIMULÉ À 17-18H À NAMUR POUR LE MODE VOITURE.

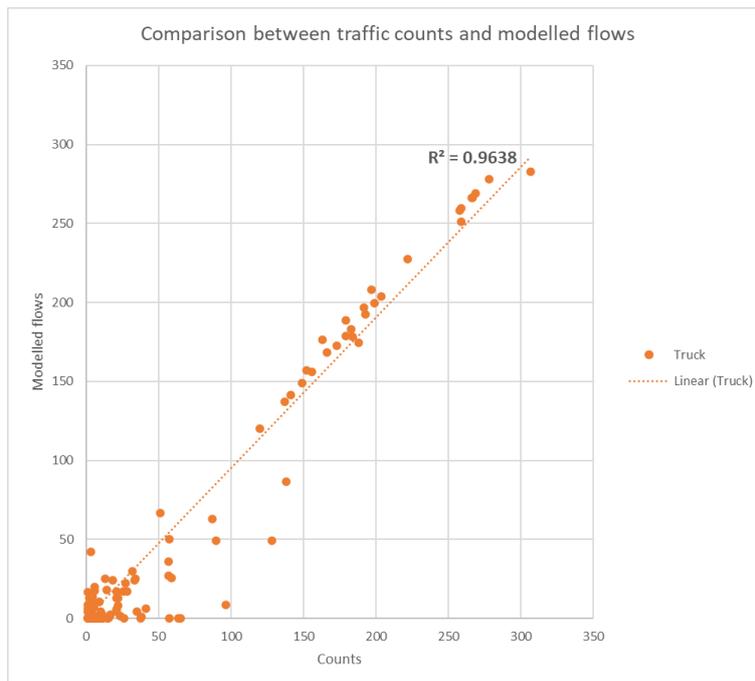


FIGURE 51. RÉSULTATS DE L'ÉTALONNAGE DU TRAFIC SIMULÉ À 17-18H À NAMUR POUR LE MODE POIDS LOURDS.

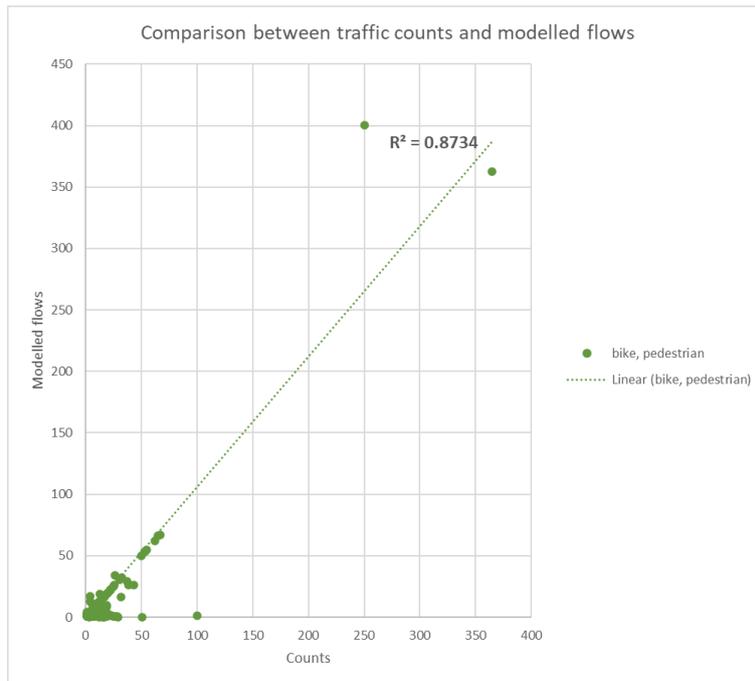


FIGURE 52. RÉSULTATS DE L'ÉTALONNAGE DU TRAFIC SIMULÉ À 17-18H À NAMUR POUR LES MODES VÉLO ET PIÉTON.

3.4.2.2 Eupen

Pour Eupen, les valeurs r^2 obtenues sont comparables à celles de Namur (figures 53 à 58).

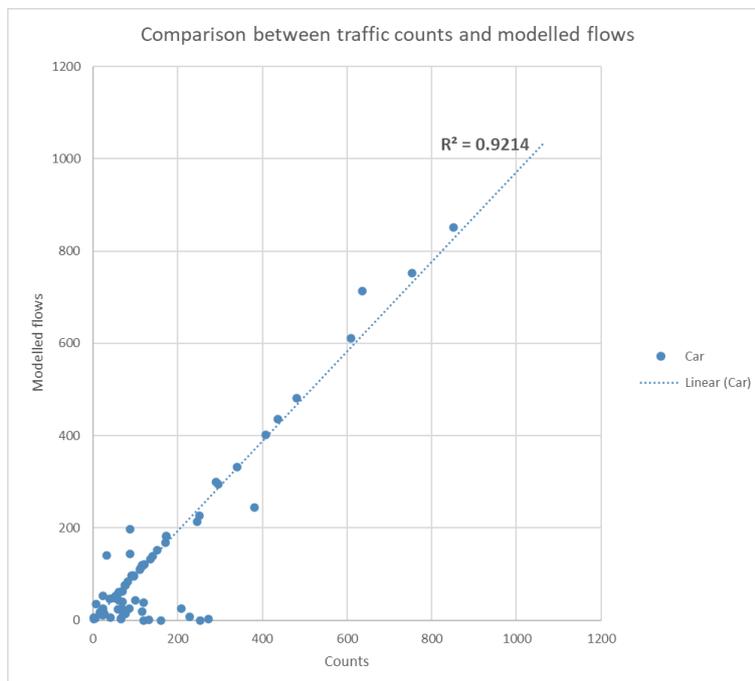


FIGURE 53. RÉSULTATS DE L'ÉTALONNAGE DU TRAFIC SIMULÉ À 8-9H À EUPEN POUR LE MODE VOITURE.

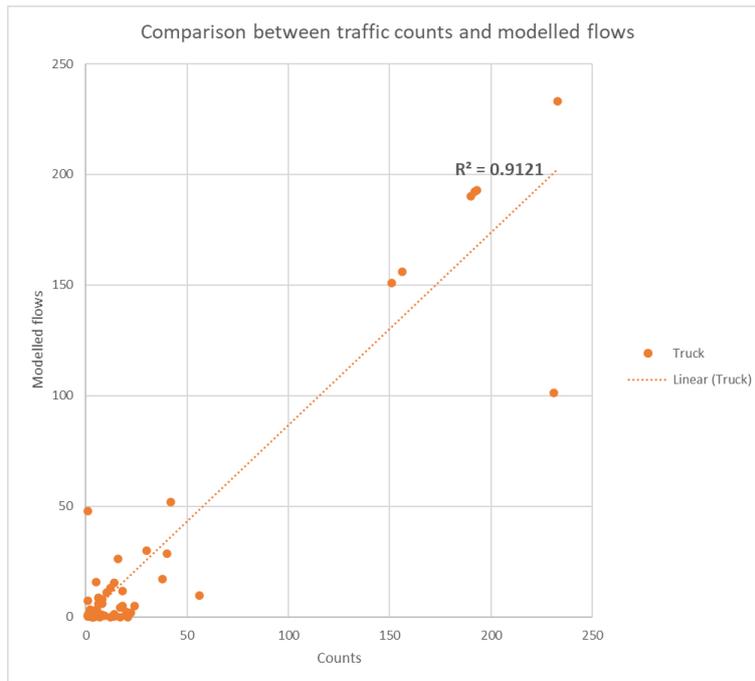


FIGURE 54. RÉSULTATS DE L'ÉTALONNAGE DU TRAFIC SIMULÉ À 8-9H À EUPEN POUR LE MODE POIDS LOURDS.

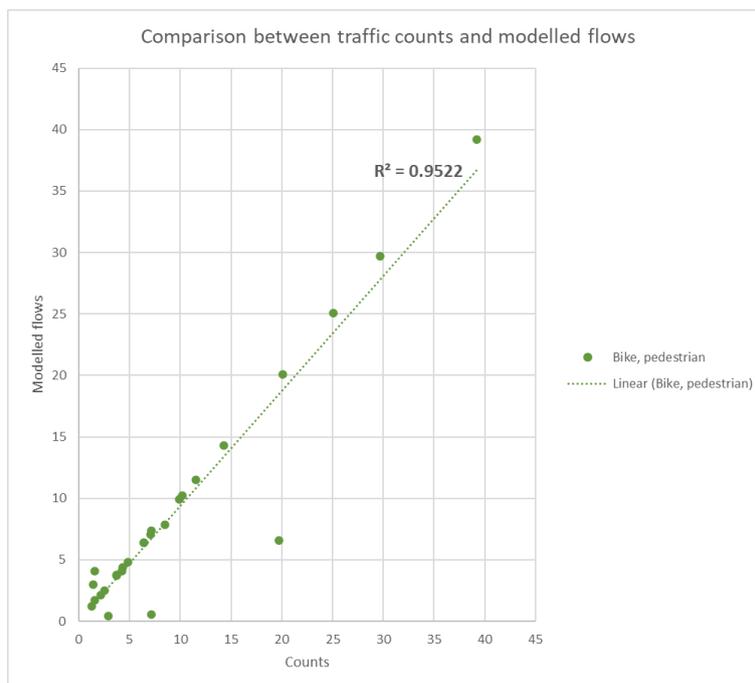


FIGURE 55. RÉSULTATS DE L'ÉTALONNAGE DU TRAFIC SIMULÉ À 8-9H À EUPEN POUR LES MODES VÉLO ET PIÉTON.

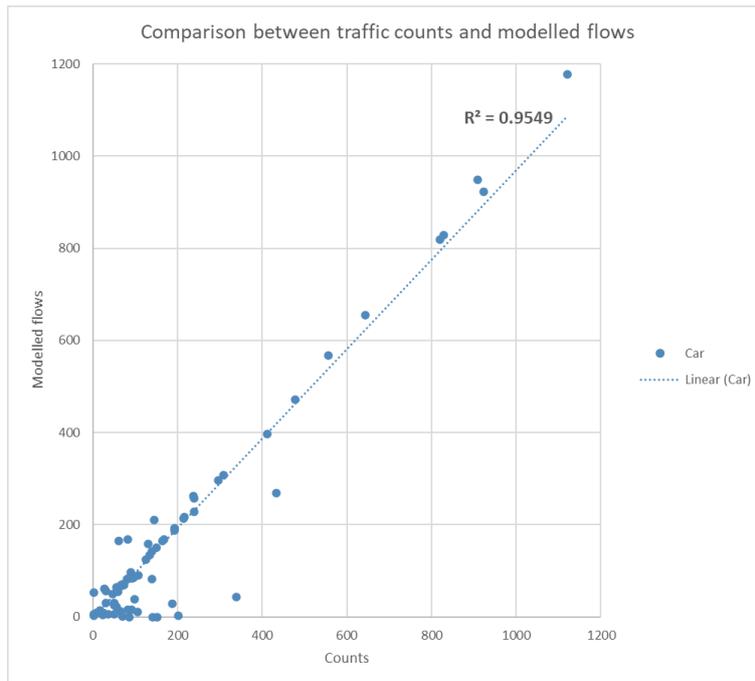


FIGURE 56. RÉSULTATS DE L'ÉTALONNAGE DU TRAFIC SIMULÉ À 17-18H À EUPEN POUR LE MODE VOITURE.

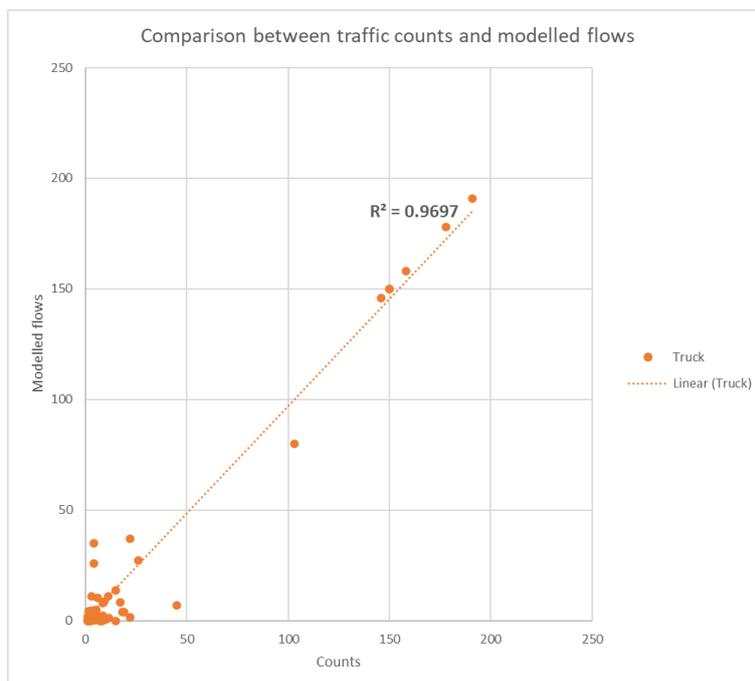


FIGURE 57. RÉSULTATS DE L'ÉTALONNAGE DU TRAFIC SIMULÉ À 17-18H À EUPEN POUR LE MODE POIDS LOURDS.

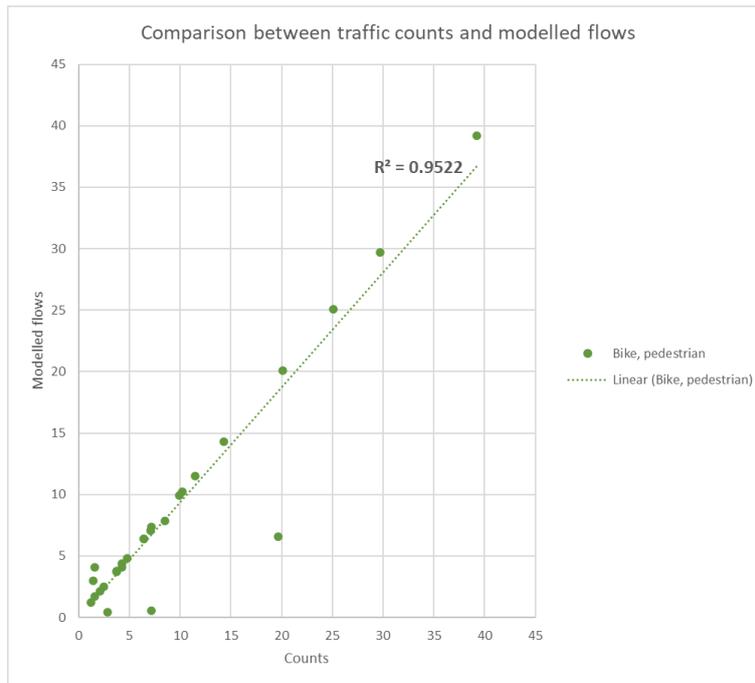


FIGURE 58. RÉSULTATS DE L'ÉTALONNAGE DU TRAFIC SIMULÉ À 17-18H À EUPEN POUR LES MODES VÉLO ET PIÉTON.

À certains endroits, les flux modélisés ne correspondent pas bien aux comptages de trafic, en particulier si le trafic mesuré est faible. Mais nous devons tenir compte du fait que le modèle développé est un modèle macroscopique, avec des simplifications de la réalité, ce qui rend impossible l'approximation du trafic pour toutes les petites routes et les routes locales. De plus, les comptages de trafic peuvent être incohérents car ils ont été collectés à des jours différents et même à des années différentes.

3.4.3 Validation du modèle

En raison du nombre limité de données de comptage, en particulier pour Namur, presque tous les comptages disponibles, utiles et jugés fiables ont été utilisés pour le calibrage. Pour les routes sans comptage, il est impossible de valider les flux modélisés. D'autres données de comptage - non mentionnées dans ce chapitre - peuvent être utilisées pour valider les modèles.

Cependant, nous pouvons comparer les comptages de trafic aux flux modélisés, avant que les comptages de trafic n'aient été pris en compte dans le développement du modèle (c'est-à-dire avant l'exécution de la procédure de calibrage de l'OD). Cela peut servir de validation des flux modélisés sur les routes pour lesquelles aucun comptage de trafic n'est disponible. Cet exercice de validation a été effectué pour les volumes de voitures dans le modèle de Namur. Les résultats sont affichés aux figures 59 et 60.

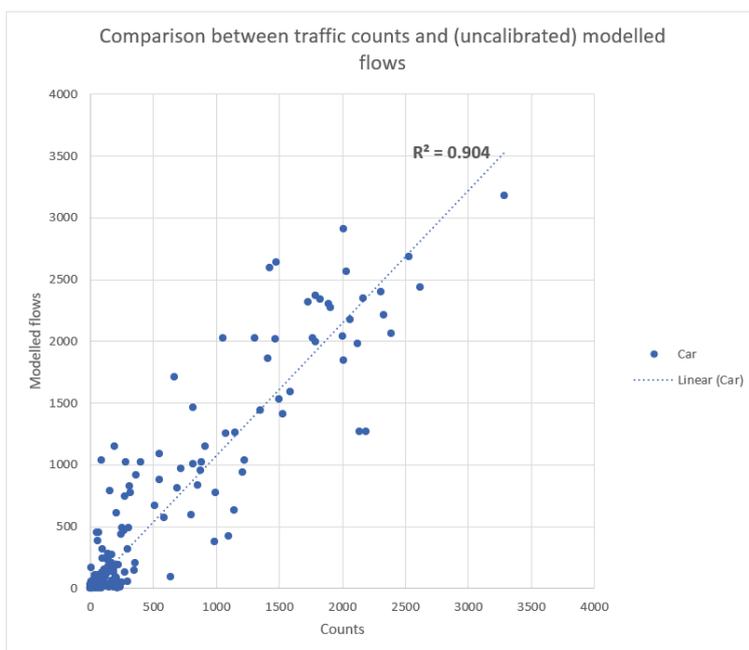


FIGURE 59. VALIDATION DES FLUX DE VOITURES MODÉLISÉS AVANT CALIBRAGE (8-9H).

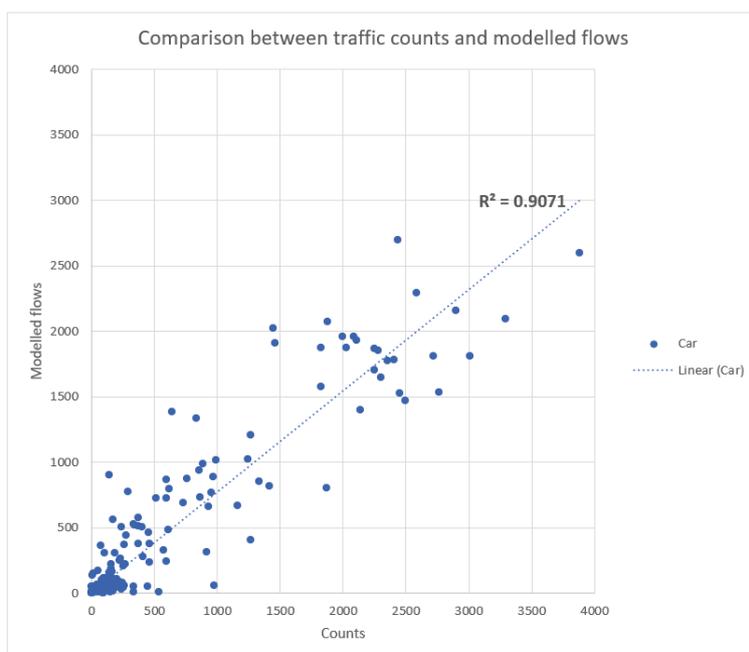


FIGURE 60. VALIDATION DES FLUX DE VOITURES MODÉLISÉS AVANT CALIBRAGE (17-18H).

Comme prévu, les écarts entre les flux modélisés et les comptages de trafic sont plus importants dans les directions positives (surestimation) et négatives (sous-estimation), mais l'écart moyen est limité. Sur la base de cette comparaison, on peut conclure que le modèle est capable d'approcher raisonnablement les flux de trafic réels à la plupart des endroits.

3.5 Scénarios

Ce chapitre décrit les scénarios calculés pour Namur et pour Eupen. Le point de départ de l'évaluation des scénarios est la situation actuelle, désormais appelée scénario de base. Le scénario de base est calibré à l'aide des comptages de trafic disponibles (cfr section 3.4).

3.5.1 Namur

3.5.1.1 Scénario de base

Les figures 61 et 62 présentent respectivement l'affectation des voitures et des poids lourds pendant l'heure de pointe du matin (8-9h). Les flux de piétons et de vélos simulés par le modèle seront prochainement présentés en annexe.

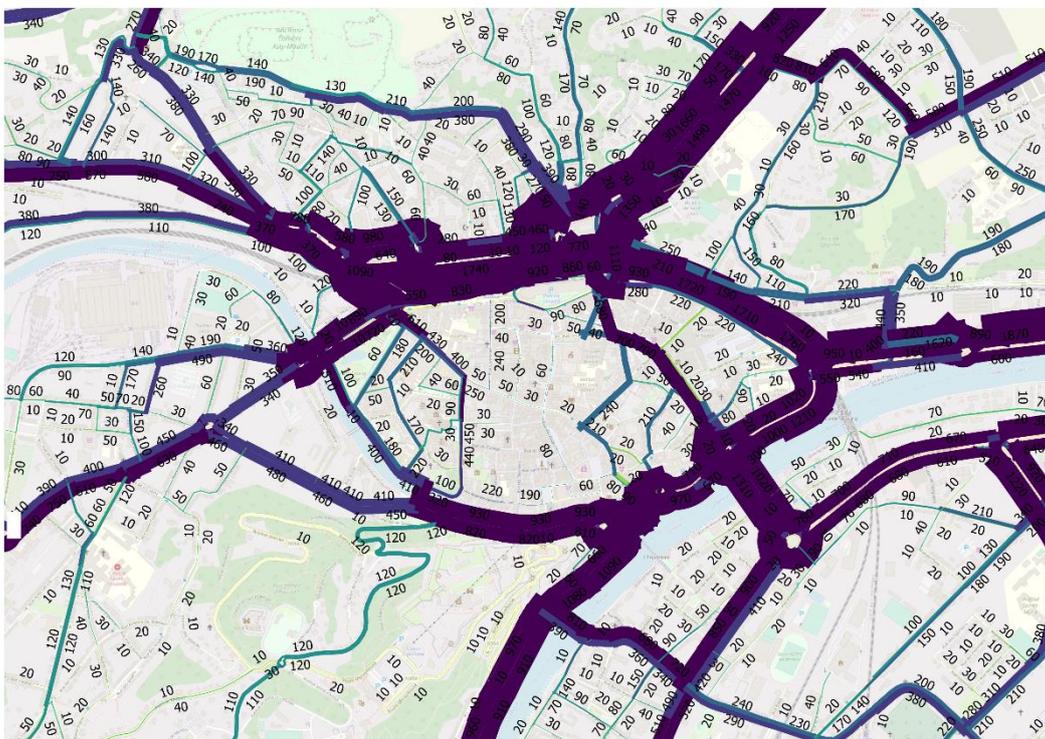


FIGURE 61. FLUX DE VOITURES À L'HEURE DE POINTE DU MATIN (8-9H) DANS LE MODÈLE DE NAMUR.

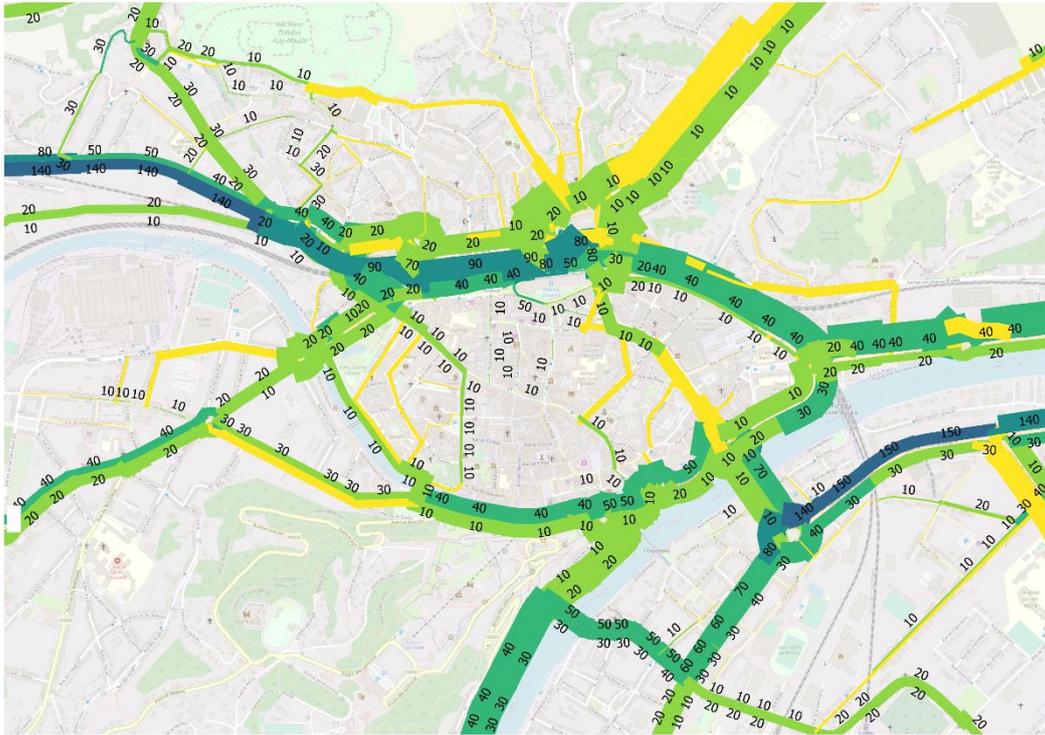


FIGURE 62. FLUX DE POIDS LOURDS À L'HEURE DE POINTE DU MATIN (8-9H) DANS LE MODÈLE DE NAMUR.

3.5.1.2 Scénarios d'extension de la zone piétonne

Deux scénarios d'extension de la zone piétonne à Namur ont été considérés. La Figure 63 montre la carte de la première phase d'extension décidée par la Ville (la phase 2, plus lointaine, inclus le quartier de l'Université et n'est pas être prise en compte dans ce premier scénario). Sur la figure, les lignes rouges représentent les principales boucles de circulation automobile.



FIGURE 63. PLAN DE CIRCULATION DE LA PREMIÈRE PHASE D'EXTENSION DU PIÉTONNIER.

Une carte des vitesses est présentée à la Figure 64. Les zones à 30 km/h sont en rouge. Il y a une correction pour l'avenue de la Gare et la rue Borgnet qui devraient également être à 30 km/h.

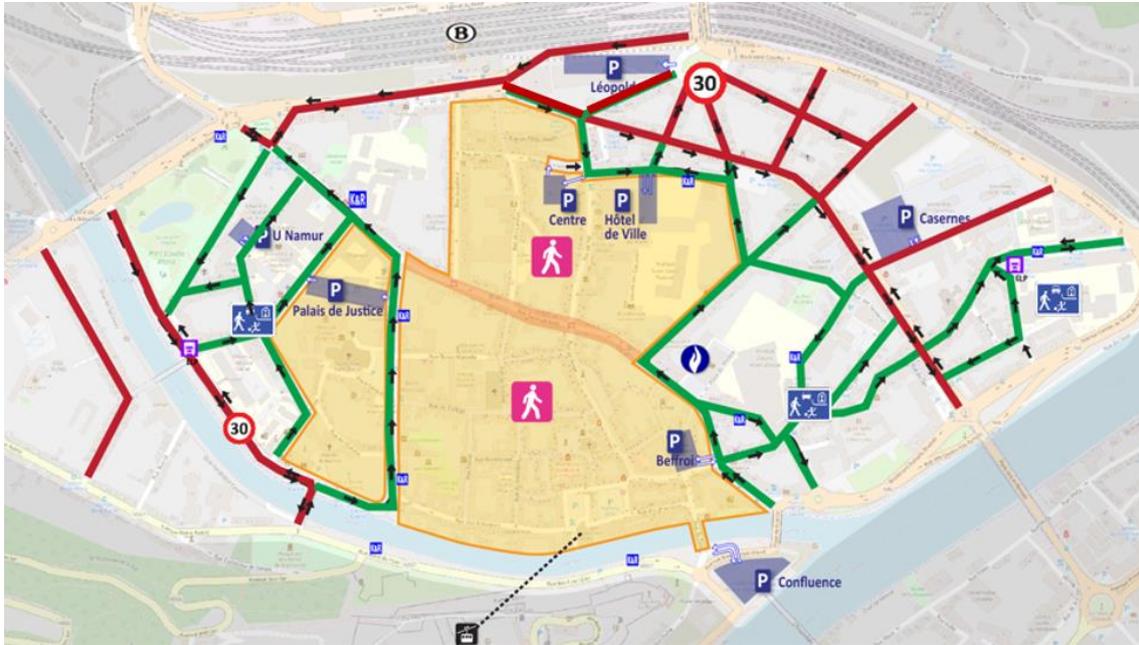


FIGURE 64. PLAN DE CIRCULATION AVEC LIMITATIONS DE VITESSE.

L'effet de ce scénario dans le modèle de trafic pendant l'heure de pointe du matin (8-9h) est montré à la Figure 65. On observe clairement une réduction du trafic dans la zone piétonne, indiquée en vert. Les chiffres négatifs indiquent la quantité de trafic qui disparaît de la zone. Logiquement, le trafic est reporté en périphérie du piétonnier.

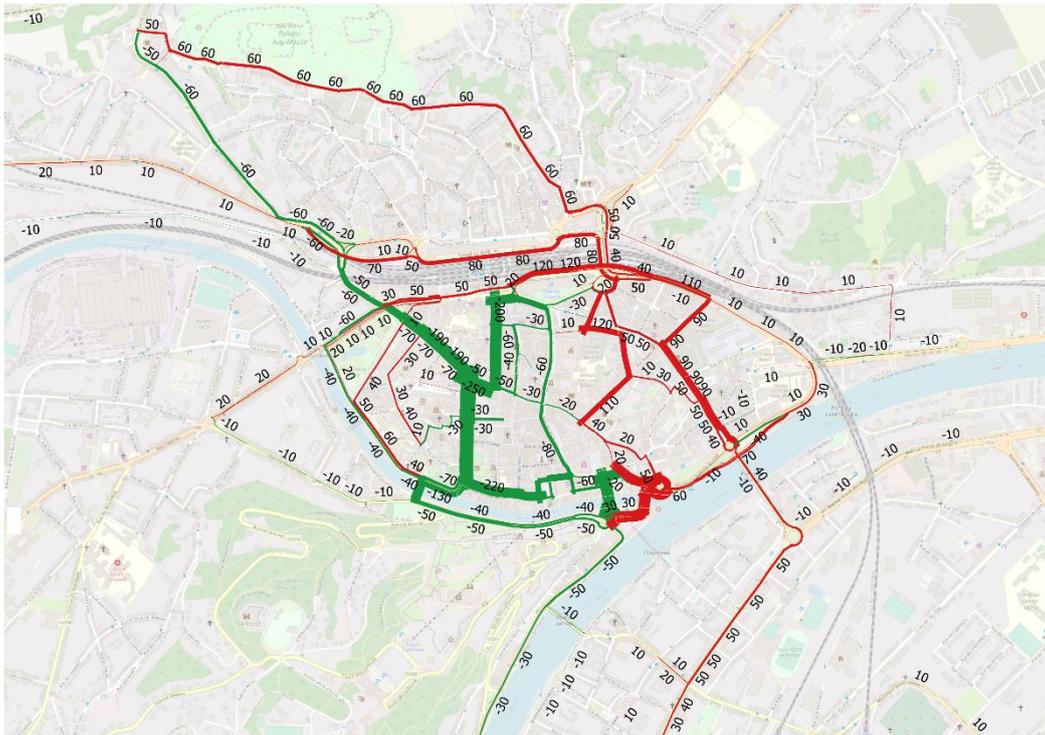


FIGURE 65. IMPACT SUR LES FLUX DE VOITURES DU SCÉNARIO D'EXTENSION DE LA ZONE PIÉTONNE (PHASE 1) PAR RAPPORT AU SCÉNARIO DE BASE (8-9H).

Un deuxième scénario, pas envisagé par la Ville à ce jour, considère un élargissement du piétonnier à l'ensemble de la Corbeille. Avec un axe Rogier-Brabant interdit aux véhicules, ce scénario a pour effet de concentrer le trafic sur la Petite Ceinture (avenue Reine Astrid, avenue Cardinal Mercier) et d'autres grands axes comme le boulevard d'Herbatte (Figure 66).

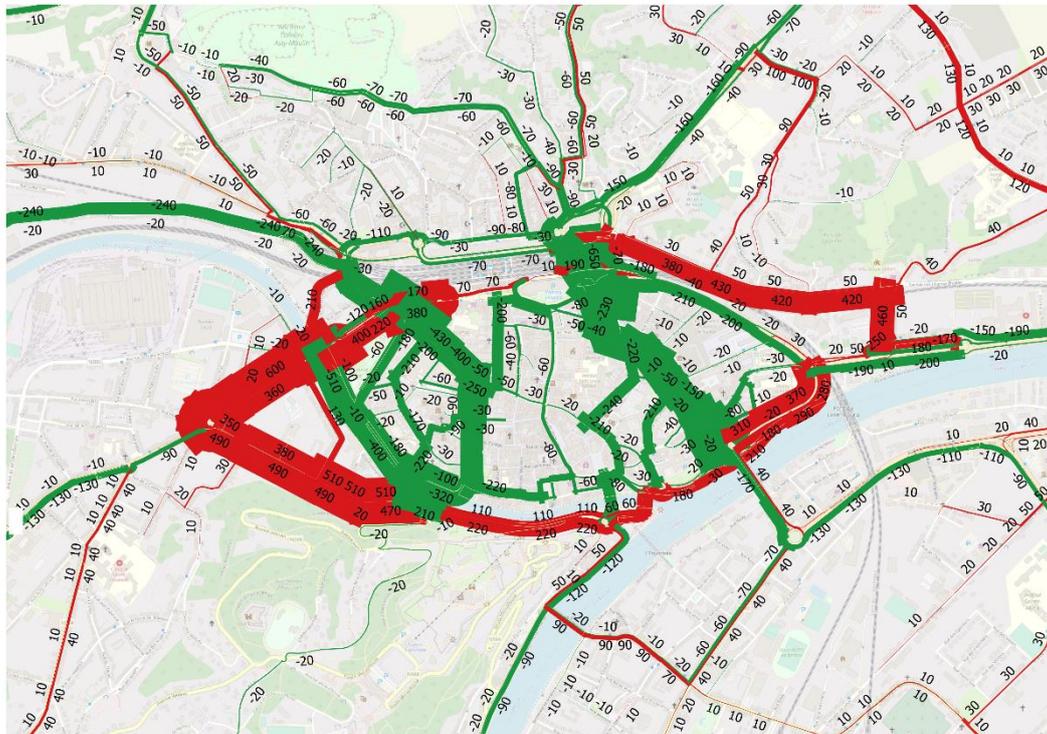


FIGURE 66. IMPACT SUR LES FLUX DE VOITURES DU SCÉNARIO D'EXTENSION DE LA ZONE PIÉTONNE (CORBEILLE ENTÈRE) PAR RAPPORT AU SCÉNARIO DE BASE (8-9H).

3.5.1.3 Scénario de mise en sens unique de la Petite Ceinture

La mise en sens unique (dans le sens horaire) de la Petite Ceinture en complément à la piétonisation de la Corbeille ne désengorge pas partout la Petite Ceinture avec une saturation du sens unique à certains endroits (Figure 67). Le modèle projette aussi un engorgement des avenues Bourgmestre Jean Materne et Gouverneur Bovesse.

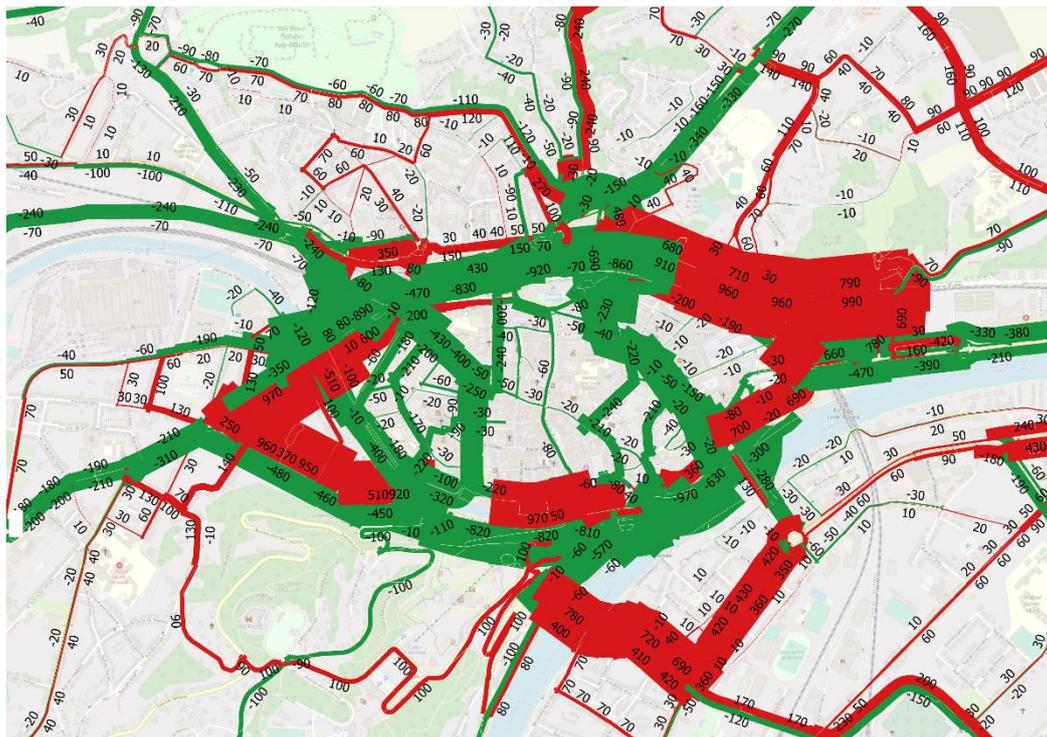


FIGURE 67. IMPACT SUR LES FLUX DE VOITURES D'UNE EXTENSION DE LA ZONE PIÉTONNE (CORBEILLE ENTIÈRE) ET D'UNE MISE EN SENS UNIQUE DE LA PETITE CEINTURE PAR RAPPORT AU SCÉNARIO DE BASE (8-9H).

3.5.1.4 Scénario P+R Erpent et Bouge

Ce scénario prend en compte le développement de deux P+R (parcs-relais ou park & ride) à Erpent et à Bouge.

Les temps de parcours des transports publics sont calculés à partir des horaires des TEC et du temps de marche vers/depuis un arrêt. Dans le modèle de choix modal, il y a un choix entre:

- aller d'une zone d'origine à une zone de destination en voiture (durée du trajet en voiture)
- aller d'une zone d'origine au lieu du P+R en voiture et aller du lieu du P+R à une zone de destination en transport public (inversé le soir).

Le tableau 14 montre le nombre de voitures utilisant les parkings de Bouge et d'Erpent dans le modèle. Le nombre de voitures utilisant les parkings P+R est très faible si les temps de parcours des transports publics correspondent à l'horaire actuel. Une analyse de sensibilité a été réalisée, dans laquelle les temps de parcours des transports publics ont été réduits de 10 et 20 %. Logiquement, une augmentation de l'utilisation est observée dans le modèle, mais le nombre de voitures reste limité par rapport à la capacité des parkings.

TABLEAU 14. NOMBRE DE VOITURES UTILISANT LES PARKINGS-RELAIS EN FONCTION DU TEMPS DE TRAJET EN TRANSPORTS PUBLICS.

	Horaire actuel	Temps de déplacement -10%.	Temps de déplacement -20%.
P+R Bouge 8-9h	85	104	129
P+R Erpent 8-9h	33	40	51
P+R Bouge 17-18h	52	67	87
P+R Erpent 17-18h	45	57	72

La figure 68 présente une visualisation des temps de parcours en transports publics depuis le P+R de Bouge, tels que calculés par le modèle. Les zones en violet sont accessibles en moins de 10 minutes par les transports publics. Une visualisation similaire est présentée à la figure 69 pour les temps de trajet vers le P+R de Bouge.

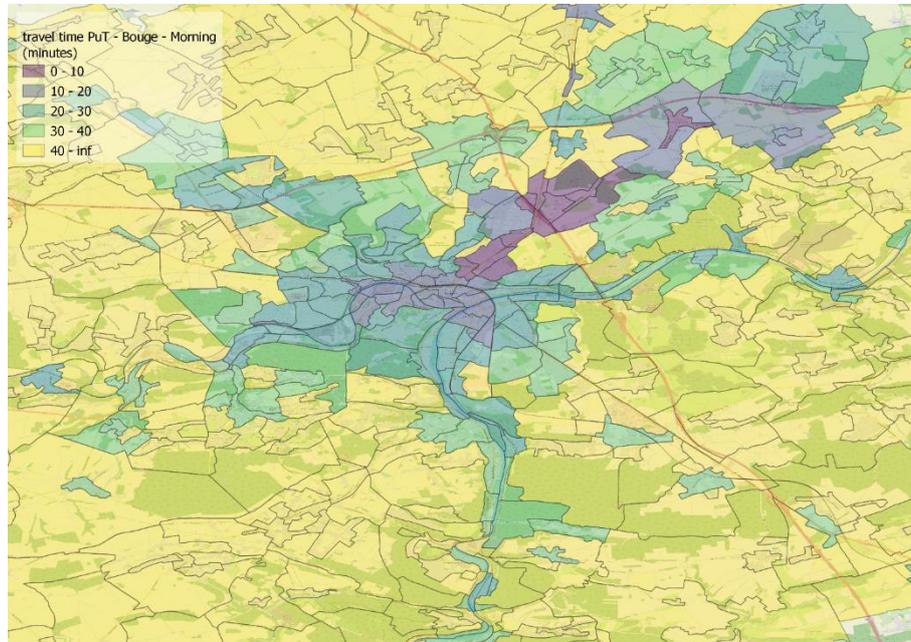


FIGURE 68. TEMPS DE PARCOURS EN TRANSPORTS PUBLICS À PARTIR DU P+R BOUGE (HEURE DE POINTE DU MATIN).

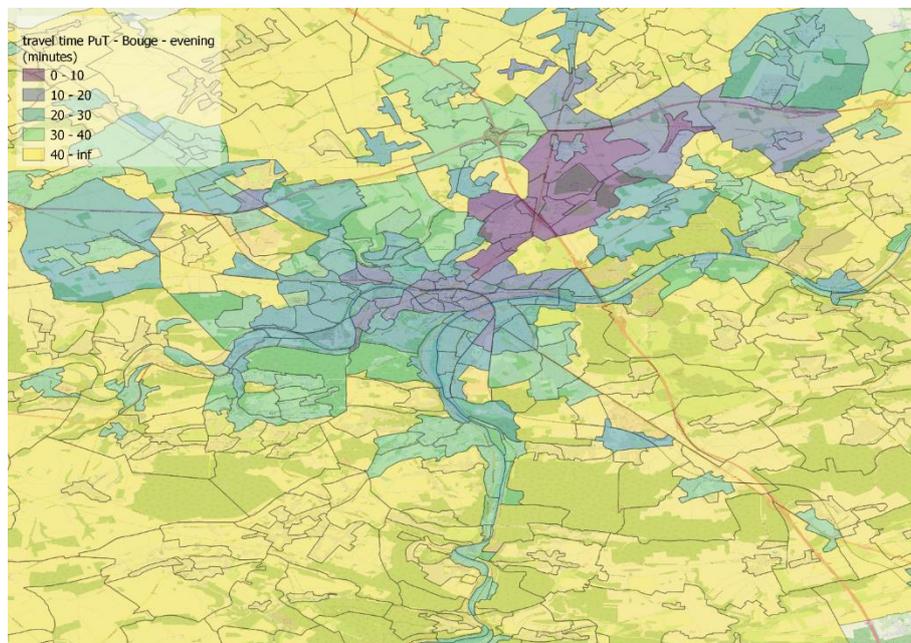


FIGURE 69. TEMPS DE PARCOURS EN TRANSPORTS PUBLICS VERS LE P+R BOUGE (HEURE DE POINTE DU SOIR).

Les figures 70 et 71 montrent les temps de parcours respectivement de et vers le P+R à Erpent. En fait, dans le modèle, les parkings ne sont pas intéressants pour les zones qui ne sont pas en violet.

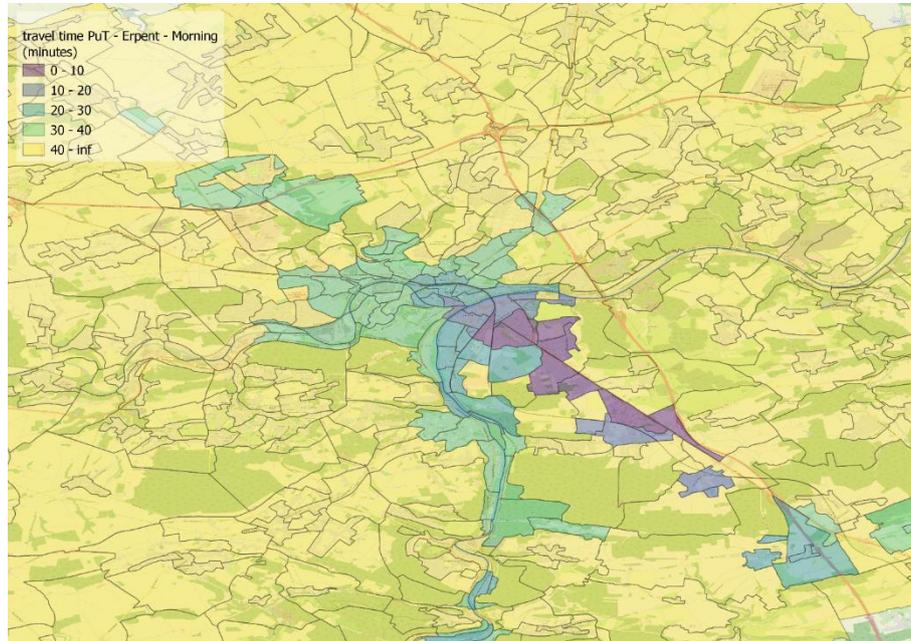


FIGURE 70. TEMPS DE PARCOURS EN TRANSPORTS PUBLICS DEPUIS LE P+R ERPENT (HEURE DE POINTE DU MATIN).

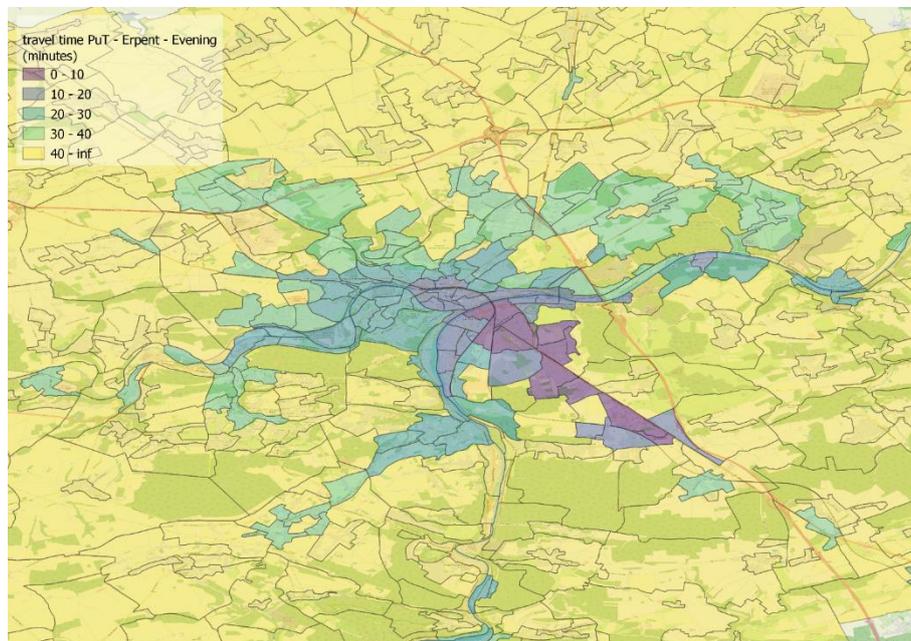


FIGURE 71. TEMPS DE PARCOURS EN TRANSPORTS PUBLICS VERS LE P+R ERPENT (HEURE DE POINTE DU SOIR).

3.5.2 Eupen

3.5.2.1 Scénario de base

Les figures 72 et 73 présentent respectivement l'affectation des voitures et des poids lourds pendant l'heure de pointe du matin (8-9h) sur le réseau d'Eupen.

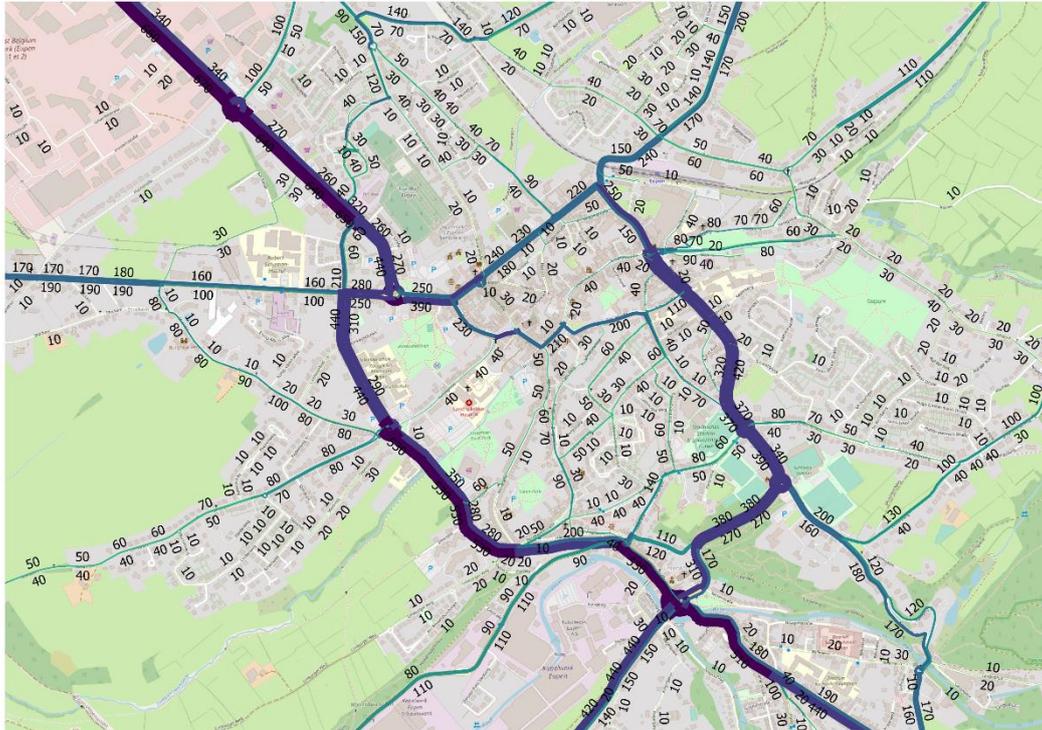


FIGURE 72. FLUX DE VOITURES À L'HEURE DE POINTE DU MATIN (8-9H) DANS LE MODÈLE D'EUPEN.

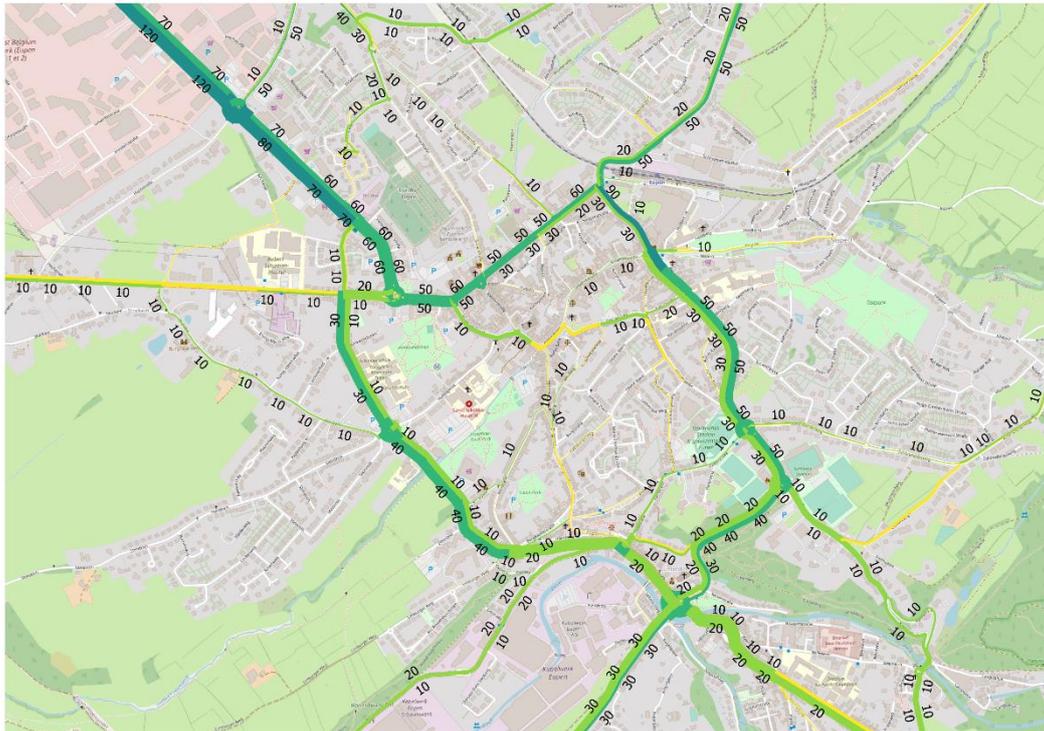


FIGURE 73. FLUX DE POIDS LOURDS À L'HEURE DE POINTE DU MATIN (8-9H) DANS LE MODÈLE D'EUPEN.

3.5.2.2 Scénario 1 - mise en sens unique du ring interne pour les véhicules lourds

Dans ce premier scénario, les véhicules lourds (camions) ne seraient autorisés à circuler que dans le sens inverse des aiguilles d'une montre sur le ring interne d'Eupen. L'effet de cette mesure est illustré à la figure 74. Dans ce scénario, le modèle projette une diminution du nombre de camions par rapport au scénario de base sur les routes avec des barres vertes et des nombres négatifs, par exemple sur le ring dans le sens interdit. Mais pour chaque diminution, il y a une augmentation ailleurs. Les routes avec des barres rouges et des nombres positifs présentent une augmentation du nombre de camions. Les routes où le trafic de camions a augmenté sont principalement situées dans la direction opposée sur le ring. Les effets de cette mesure à l'heure de pointe du soir sont similaires. Les effets prévus par le modèle doivent être vérifiés avec les personnes qui étudient ce scénario, afin de s'assurer qu'ils sont possibles et réalistes. Si une augmentation du trafic sur une route n'est pas souhaitable, des mesures supplémentaires peuvent être ajoutées au réseau modélisé afin de voir leurs effets.

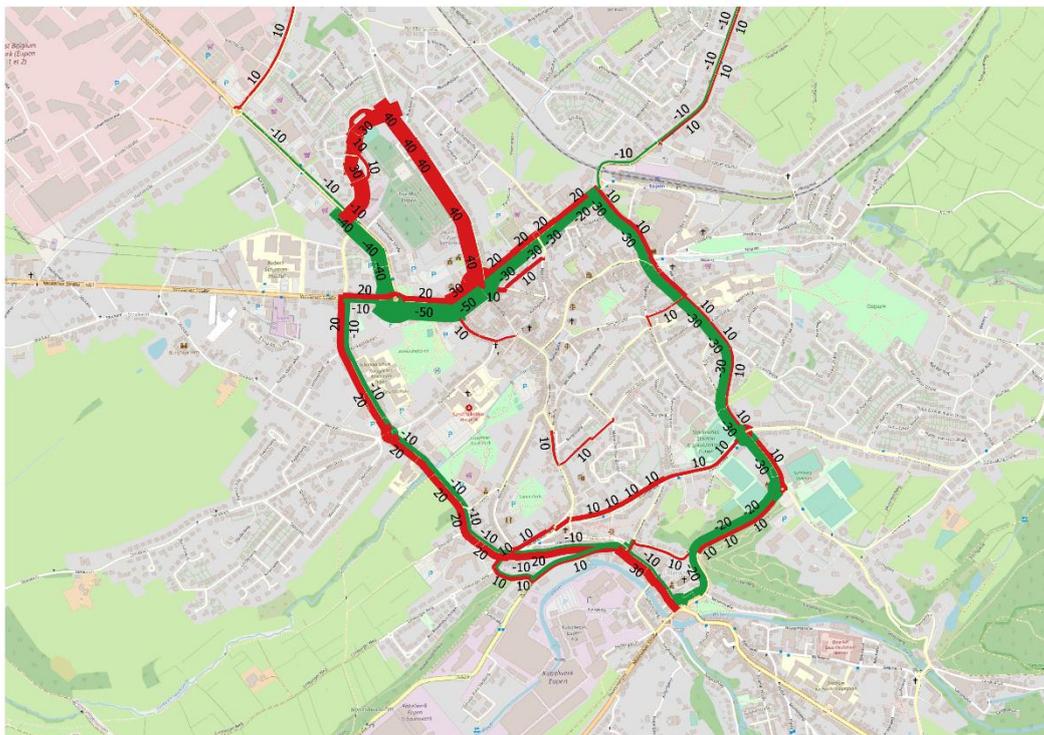


FIGURE 74. IMPACT SUR LES FLUX DE CAMIONS D'UNE MISE EN SENS UNIQUE DU RING INTERNE À EUPEN (SCÉNARIO 1) PAR RAPPORT AU SCÉNARIO DE BASE (8-9H).

3.5.2.3 Scénario 2 - scénario 1 avec un centre interdit aux poids lourds

Dans ce nouveau scénario, le scénario 1 est ajusté pour empêcher les camions de traverser le centre-ville pour éviter le ring en sens unique et raccourcir leur temps de trajet (figure 75).

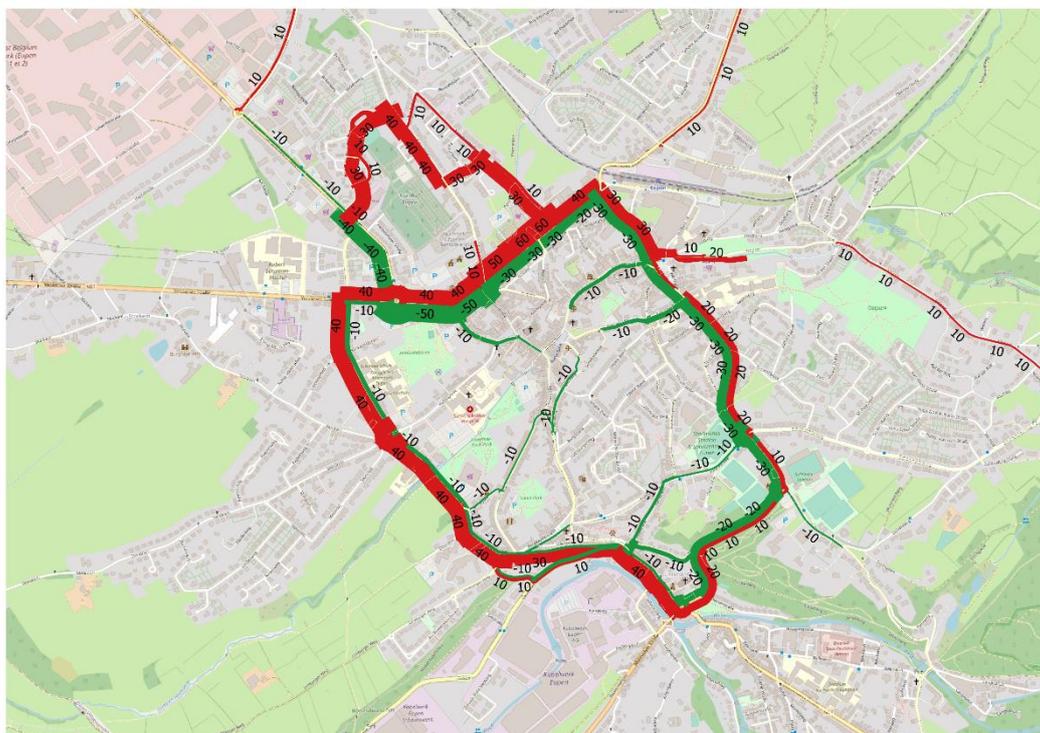


FIGURE 75. IMPACT SUR LES FLUX DE CAMIONS D'UNE MISE EN SENS UNIQUE DU RING INTERNE ET D'UN CENTRE INTERDIT AUX CAMIONS (SCÉNARIO 2) PAR RAPPORT AU SCÉNARIO DE BASE (8-9H).

3.5.2.4 Scénario 3 : scénario 2 avec une interdiction aux poids lourds de descendre la Simarstrasse

Pour éviter que les camions qui arrivent par l'Herbesthaler Strasse ne descendent la Simarstrasse pour accéder plus rapidement à l'Aachererstrasse (et éviter ainsi de devoir faire le tour du ring mis en sens unique), ce scénario interdit l'accès de la Theodor Moorenstrasse (au niveau de l'Herbesthaler Strasse) et de la Nöretherstrasse (au niveau de la Hochstrasse) aux camions. On voit que ce scénario a pour impact de concentrer tout le trafic poids lourds sur l'unique sens du ring (figure 76).

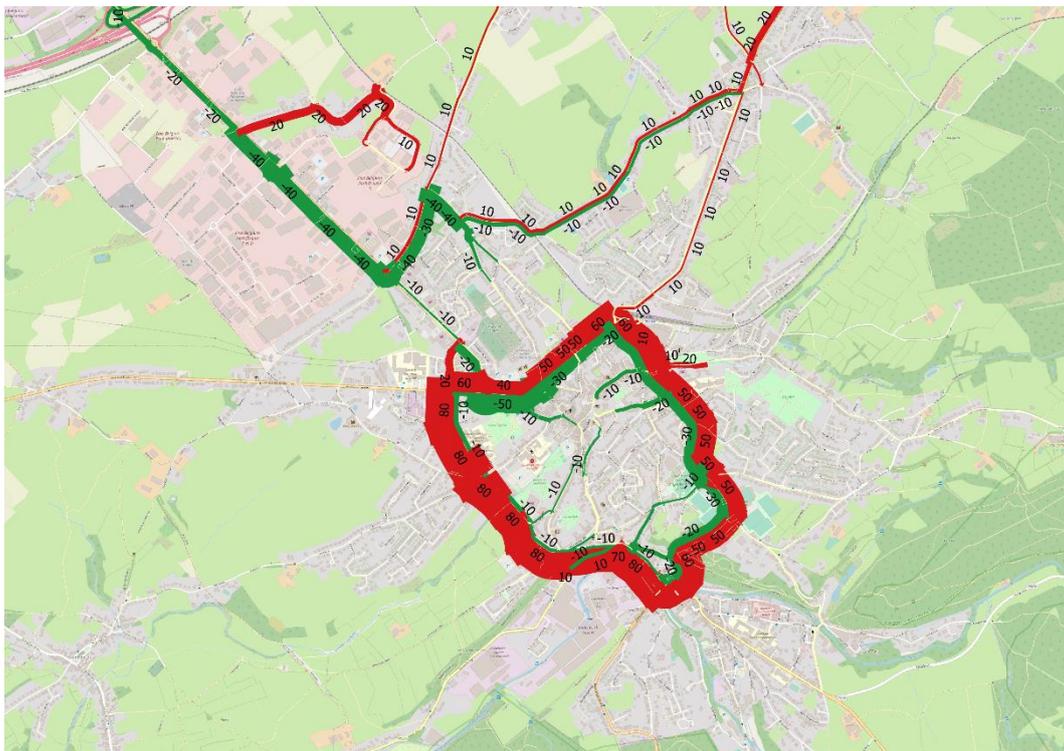


FIGURE 76. IMPACT SUR LES FLUX DE CAMIONS DU SCÉNARIO 3 (SCÉNARIO 2 AVEC UNE INTERDICTION AUX POIDS LOURDS DE DESCENDRE LA SIMARSTRASSE) PAR RAPPORT AU SCÉNARIO DE BASE (8-9H).

3.5.2.5 Scénario 4 - mise en sens unique de l'Olengraben pour tous les véhicules

La mise en sens unique de l'Olengraben pour tous les véhicules transpose le flux de trafic, principalement de voitures, sur la Judenstrasse et la partie Est du ring (figures 77 et 78).



FIGURE 77. IMPACT SUR LES FLUX DE VOITURES D'UNE MISE EN SENS UNIQUE DE L'OLENGRABEN À EUPEN (SCÉNARIO 4) PAR RAPPORT AU SCÉNARIO DE BASE (8-9H).

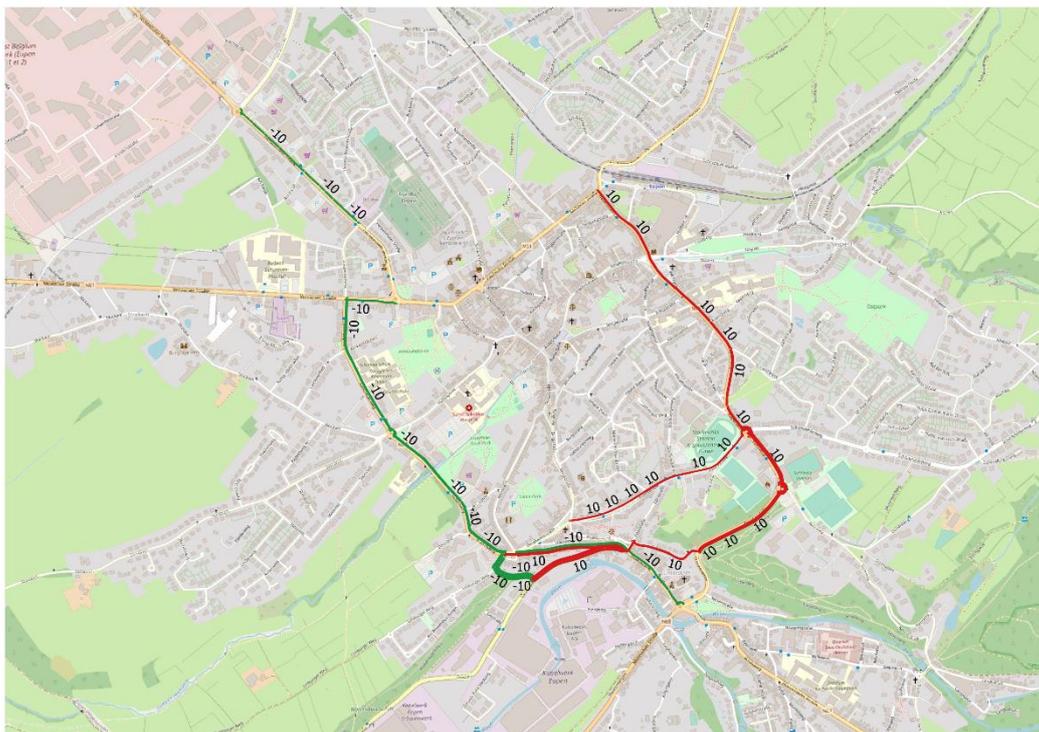


FIGURE 78. IMPACT SUR LES FLUX DE CAMIONS D'UNE MISE EN SENS UNIQUE DE L'OLENGRABEN À EUPEN (SCÉNARIO 4) PAR RAPPORT AU SCÉNARIO DE BASE (8-9H).

3.6 Flux hebdomadaires

Dans le cadre de la modélisation de la qualité de l'air, les intensités de pointe (8h et 17h) modélisées ne suffisent pas, car les émissions pour les heures creuses et pour les autres jours sont également indispensables. On distingue quatre types de jours différents:

1. Lundi-mardi-jeudi-vendredi
2. Mercredi
3. Samedi
4. Dimanche

L'objectif de cette étape de traitement est donc de générer des flux horaires pour ces types de jours à partir des flux modélisés aux heures de pointe. Les flux sont subdivisés entre les voitures et les camions. Les autres modes (vélos, piétons, usagers des transports publics) ne sont pas inclus, car les données sur les évolutions ne sont pas facilement disponibles et parce qu'ils ne joueront pas un rôle significatif dans le modèle de qualité de l'air.

En d'autres termes, les intensités aux heures de pointe sont transformées en flux horaires à l'aide d'un profil journalier général extrait des sources de données disponibles. Ce profil contient le rapport entre le débit d'une heure creuse et celui de l'heure de pointe correspondante. Les heures avant midi sont comparées au débit de pointe du matin, tandis que les heures après midi sont comparées au débit de pointe du soir.

Trois profils journaliers distincts sont calculés, pour chaque type de jour et séparément pour les voitures et les camions: un pour les flux sur l'autoroute, un pour le réseau secondaire à Namur et un pour le réseau secondaire à Eupen.

Le profil des flux sur l'autoroute est obtenu à partir du site "verkeersindicatoren"¹¹. Cette source de données a établi une moyenne des flux horaires pour les jours ouvrables et scolaires, par mode, ainsi que pour le samedi et le dimanche. Il n'y a pas de données distinctes pour les mercredis, car ils sont inclus dans les jours de travail/école, de sorte que le même profil est utilisé pour tous les jours ouvrables.

Le profil des flux sur le réseau secondaire est obtenu à partir des comptages de l'ISSeP. Les flux en dehors des heures de pointe, additionnés pour tous les sites, sont comparés aux flux comptés aux heures de pointe pour tous les sites, ce qui donne des ratios qui peuvent être appliqués aux flux modélisés. Les comptages des appareils Telraam ne peuvent pas être utilisés pour le moment car ils ne comptent que pendant la journée.

¹¹ <http://indicatoren.verkeerscentrum.be/vc.indicators.web.gui/indicator/index>

4 Modélisation de la qualité de l'air

4.1 ATMO-Street

Comme pour l'étude 2ZBE, la chaîne de modélisation ATMO-Street (figure 79), qui modélise les concentrations en polluants atmosphériques au niveau de la rue, a été utilisée pour simuler l'impact des scénarios de mobilité sur la qualité de l'air à Namur et à Eupen. ATMO-Street (Lefebvre *et al.*, 2013; Hooyberghs *et al.*, 2022) est né du couplage réalisé par le VITO entre le modèle IFDM (*Immission Frequency Distribution Model*) et le modèle OSPM (*Operational Street Pollution Model*). Le modèle IFDM est un modèle de dispersion atmosphérique de type bi-gaussien. Il permet de simuler la dispersion des polluants à partir des principales sources d'émissions polluantes industrielles et routières. Les concentrations en polluants sont calculées en différents points (récepteurs) du territoire étudié et ensuite interpolées pour l'ensemble de la zone. Le modèle de dispersion atmosphérique OSPM (Berkowicz *et al.*, 2008), développé à l'Université d'Aarhus au Danemark, simule la dispersion des polluants à l'intérieur de rues de type canyon. Il se base sur les équations de dispersion pour calculer les concentrations dans la direction transversale de la rue. Il permet de plus de distinguer la contribution directe des émissions du trafic de celle due à la recirculation causée par la présence de vortex.

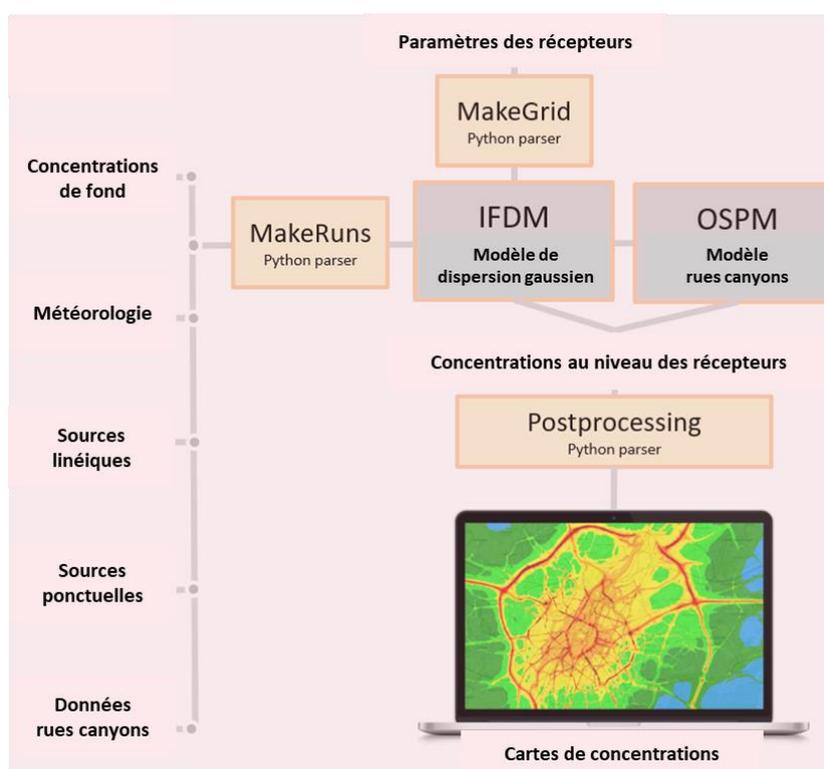


FIGURE 79. STRUCTURE, DONNÉES D'ENTRÉE ET SORTIES DU MODÈLE ATMO-STREET (VITO).

4.1.1 Données d'entrée

L'application du modèle nécessite un certain nombre de données d'entrée.

4.1.1.1 Les sources d'émissions polluantes

- Les sources de type ponctuel correspondant aux émissions industrielles (les grandes industries émettrices dans le périmètre communal sont prises en compte).
- Les sources de type linéaire correspondant aux émissions provenant du trafic routier. Pour les estimer, il est nécessaire de connaître :

- le réseau routier (dans cette étude, la base de données OpenStreetMap) ;
- la flotte de véhicule en Wallonie en 2021 (DIV, 2023) ;
- le nombre de véhicules par heure et leur vitesse moyenne par tronçon (modèle de mobilité) ;
- le mode de conduite (*driving mode*) par tronçon (urbain, rural ou autoroute) ;
- les facteurs d'émissions associés à chaque type de véhicule (base de données COPERT V).

Les facteurs d'émissions, qui sont fonction du type de véhicule (motorisation et norme Euro) mais aussi du mode de conduite, ont été moyennés par polluant et catégorie de véhicules (légers et lourds) au tableau 15. Ces facteurs permettent de convertir le trafic sur chaque tronçon routier en émissions polluantes qui seront dispersées par le modèle.

TABLEAU 15. FACTEURS D'ÉMISSIONS (COPERT V) MOYENS POUR LA FLOTTE DE VÉHICULES EN WALLONIE EN 2021.

	Véhicules légers			Véhicules lourds		
	Mode urbain	Mode rural	Mode autoroute	Mode urbain	Mode rural	Mode autoroute
NO _x (g/vkm)	0.53	0.35	0.51	3.65	1.76	0.62
BC (g/vkm)	0.01	0.01	0.01	0.04	0.02	0.02
PM _{2.5} (g/vkm)	0.03	0.02	0.02	0.11	0.08	0.06
PM ₁₀ (g/vkm)	0.05	0.03	0.02	0.17	0.14	0.10

4.1.1.2 Les dimensions caractéristiques de la rue

- la hauteur du bâti de chaque côté (sur base d'un modèle numérique de hauteur) ;
- la largeur de la rue (distance d'une façade à l'autre sur base du PICC) ;
- le nombre de bandes de circulation.

4.1.1.3 Les conditions météorologiques

- la vitesse et la direction moyennes du vent au niveau des toits ;
- la température ;
- le rayonnement solaire.

En l'absence de mesures de direction du vent dans les stations de mesure du réseau Pameseb (CRA-W), nous avons utilisé les sorties météo du modèle atmosphérique régional MAR (développé par le Laboratoire de Climatologie, ULiège) pour l'année 2022. Pour ces simulations, le MAR a été forcé aux frontières de son domaine par les réanalyses ERA5. Les sorties horaires du MAR sont à la résolution spatiale de 5 km.

L'équilibre chimique entre les oxydes d'azote et l'ozone ($\text{NO}_x\text{-O}_3$) est déterminé sur base de la température et du rayonnement solaire.

4.1.1.4 Les concentrations de fond des polluants étudiés

Pour Eupen, les concentrations de fond en 2022 utilisées pour les NO_x , les PM_x et le BC proviennent respectivement des stations de mesures d'Eupen, de Membach et de Sinsin. Pour Namur, les concentrations de fond pour les NO_x et les PM_x correspondent aux mesures de la station de Vezin et celles du BC de Sinsin.

4.1.2 Cartes de concentrations

Avec ces différentes données, les concentrations en polluants (NO_2 , BC, $\text{PM}_{2.5}$ et PM_{10}) sont simulées sur l'ensemble de la zone d'étude grâce à la combinaison des deux modules de dispersion IFDM et OSPM. Ces concentrations sont calculées à la résolution horaire au niveau des récepteurs distribués sur le territoire étudié et ensuite interpolées sur grille régulière à une résolution spatiale de 10 m.

4.1.3 Validation du modèle

Les concentrations en polluants simulées par le modèle ATMO-Street ont fait l'objet d'une validation pour l'année 2018 dans l'étude 2ZBE (ISSeP, 2020). Une vingtaine de mini-stations de la qualité de l'air, développées par l'ISSeP avec son partenaire HEPL (Haute École de la Province de Liège) et nommées Saïga, ont été achetées pour la présente étude. Leur réception très tardive, en raison des problèmes d'approvisionnement de certains composants des μ capteurs, a empêché leur déploiement avant la fin du projet. Elles seront finalement et heureusement installées en novembre 2023 dans les rues où un dispositif Telraam compte encore. Les résultats de ces mesures seront annexés à ce rapport dès que possible.

4.2 Projections pour Namur

4.2.1 Conditions 2022

4.2.1.1 Moyennes annuelles

En 2022, comme le laissait présager l'évolution des concentrations en NO₂ aussi bien à l'échelle de la Belgique qu'à l'échelle de la Wallonie (figure 1), les concentrations moyennes annuelles en NO₂ simulées à Namur sont plus faibles qu'en 2018 (ISSeP, 2020). À Namur, le modèle simule quelques dépassements très localisés de valeur limite annuelle européenne de 40 µg/m³ (chaussée de Louvain, boulevard Isabelle Brunell et avenue Comte de Smet de Nayer; figure 80). La valeur guide de l'OMS de 10 µg/m³ est, quant à elle, dépassée (presque) partout. La figure 81 affiche les concentrations à l'heure de pointe du matin (8h) moyennées sur l'année. C'est aux heures de pointe que le trafic est le plus intense et cartographier les niveaux de pollution à ces moments de la journée permet de mettre en évidence les points noirs ou *hotspots* de pollution (les pénétrantes, la Petite Ceinture mais aussi certaines rues du centre-ville).



FIGURE 80. CONCENTRATIONS MOYENNES ANNUELLES EN NO₂ À NAMUR EN 2022.



FIGURE 81. CONCENTRATIONS MOYENNES EN NO₂ À L'HEURE DE POINTE DU MATIN (8H) À NAMUR EN 2022.

4.2.1.2 Moyennes pour le mois de mai

Les concentrations moyennes en NO₂ au mois de mai sont également présentées (figure 82) car les concentrations de fond en mai ressemblent beaucoup aux concentrations de fond moyennes annuelles. Pour la réalisation des différents scénarios de mobilité, nous nous sommes donc permis de ne faire tourner le modèle que sur ce mois de mai pour épargner du temps de calcul et de l'espace de stockage. La figure 83 montrent les concentrations en NO₂ au mois de mai à l'heure de pointe du matin.

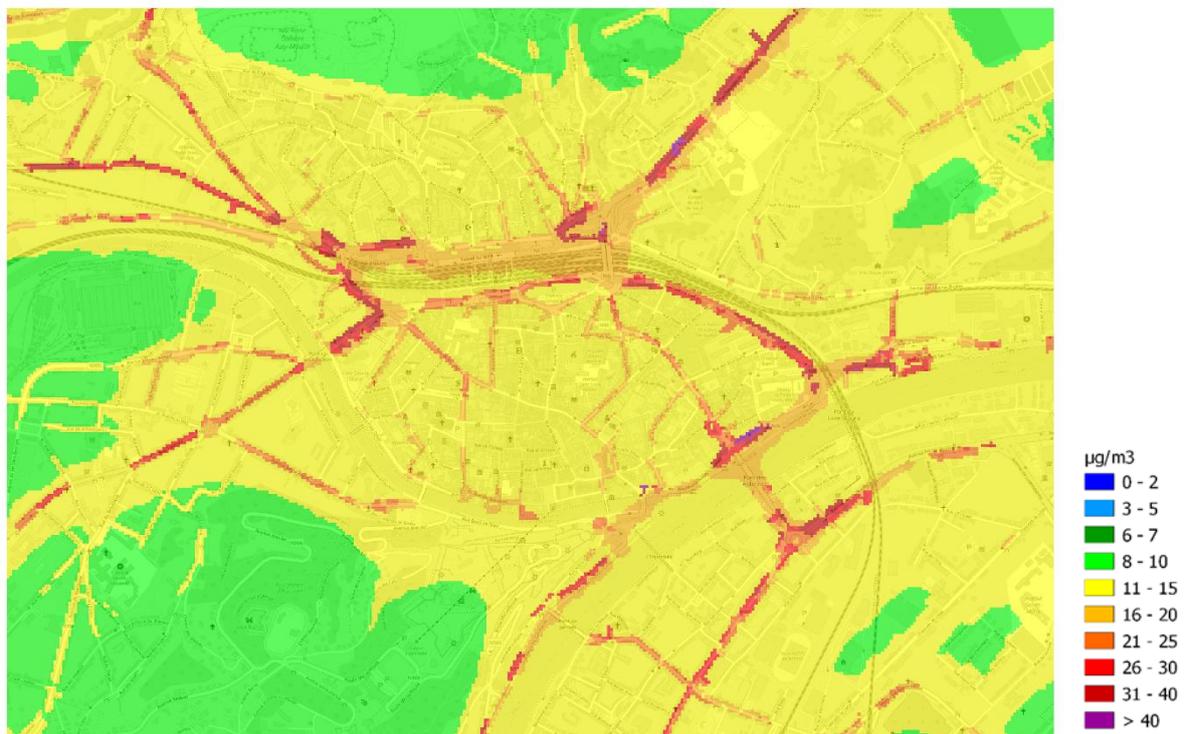


FIGURE 82. CONCENTRATIONS MOYENNES EN NO₂ À NAMUR EN MAI 2022.

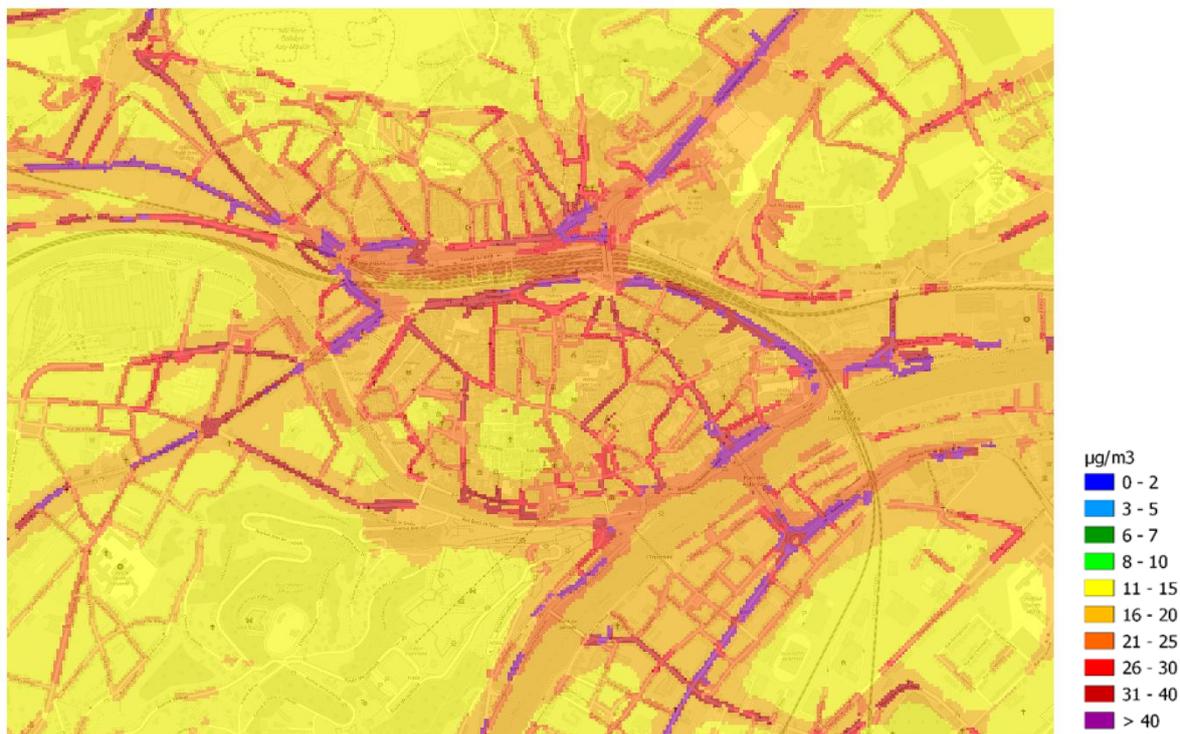


FIGURE 83. CONCENTRATIONS MOYENNES EN NO₂ À L'HEURE DE POINTE DU MATIN (8H) À NAMUR EN MAI 2022.

4.2.2 Scénario 1 : instauration d'une zone basses émissions communale

Ce sont d'abord les projections de l'impact sur la qualité de l'air à Namur des différentes phases d'interdiction de véhicules en cas d'instauration d'une zone basses émissions communale qui ont été actualisées par rapport à l'étude 2ZBE (ISSEP, 2020). Les interdictions progressives, initialement prévues en 2020, 2022 et 2025, par le décret wallon relatif à la lutte contre la pollution atmosphérique liée à la circulation des véhicules, sont rappelées dans le tableau 16.

TABLEAU 16. ZONE BASSES ÉMISSIONS COMMUNALE - CALENDRIER DES RESTRICTIONS.

Accès zone basse émission				
Début inter.	Diesel	Essence / CNG / LPG	Diesel	Essence
01-01-20	min. Euro IV	min. Euro II	2006 - 2010	1991 - 2000
01-01-22	min. Euro V	min. Euro III	2011 - 2015	2001 - 2005
01-01-25	min. Euro VI	min. Euro IV	2015 - 2019	2006 - 2010

Dans un premier scénario (scénario 1a), les interdictions prévues en 2020 et 2022 sont appliquées en même temps à la flotte de véhicules circulant fin 2021 (DIV, 2023). Dans un second scénario (scénario 1b), les interdictions prévues en 2025 s'ajoutent aux restrictions 2020-2022.

Les réductions des émissions attendues pour ces deux scénarios ont été calculées en prenant donc comme référence la flotte wallonne de 2021. A chaque sous-catégorie de véhicules (motorisation, norme Euro,...) sont associés un facteur d'émissions et un nombre de kilomètres parcourus (COPERT V). Les facteurs d'émissions se basent sur une large compilation de mesures et d'analyses comparatives de modèles d'émissions et prennent en compte un certain nombre de mesures faites dans des conditions réelles de conduite. L'ensemble des véhicules du parc wallon, qu'ils soient concernés ou pas (deux-roues) par les interdictions, est pris en compte dans le calcul des émissions produites par la flotte de véhicules en 2021 et des réductions d'émissions attendues en 2020, 2022 et 2025. Pour chaque phase du calendrier, nous avons fait l'hypothèse que les véhicules interdits seraient remplacés par des véhicules Euro 6d. Nos scénarios n'envisagent pas la possibilité que certains d'entre eux ne soient pas remplacés. Un *statu quo* dans la taille du parc wallon est donc supposé. Le nombre de kilomètres parcourus par chaque catégorie de véhicules est également préjugé constant.

Le tableau 17 présente, pour les différentes phases d'interdiction, les facteurs de réductions (pourcentage par rapport à 2021) des émissions pour les quatre polluants caractéristiques du transport routier : les oxydes d'azote (NO_x), les particules fines (PM₁₀ et PM_{2,5}) et les particules de *black carbon* (BC).

TABEAU 17. ÉVOLUTION PROJÉTÉE DES ÉMISSIONS DU TRANSPORT ROUTIER AVEC L'INSTAURATION D'UNE ZBE COMMUNALE (PAR RAPPORT À LA FLOTTE DE 2021).

	2020		2022		2025	
	Mode urbain	Mode rural	Mode urbain	Mode rural	Mode urbain	Mode rural
NO _x	-14 %	-22 %	-28 %	-36 %	-51 %	-64 %
BC	-25 %	-22 %	-65 %	-55 %	-66 %	-56 %
PM _{2,5}	-13 %	-9 %	-30 %	-21 %	-30 %	-21 %
PM ₁₀	-8 %	-6 %	-20 %	-13 %	-20 %	-13 %

Le tableau 18 donne le nombre de véhicules répertoriés fin 2021 en Wallonie qui devraient progressivement être touchés par les interdictions communales. Pour les deux premières phases d'interdictions (initialement prévues en 2020 et 2022), c'est la flotte 2021 qui est considérée (comme dans les simulations). Par contre, pour la dernière phase du calendrier (prévue en 2025), un renouvellement naturel de la flotte (extrapolation des années précédentes) est pris en compte car on considère que ces nouvelles restrictions arrivent trois ans plus tard.

TABEAU 18. NOMBRE DE VÉHICULES (ET POURCENTAGE PAR RAPPORT À LA FLOTTE 2021 TOTALE DE 2 247 664 VÉHICULES) NE RÉPONDANT PAS EN WALLONIE AUX CONDITIONS D'ACCÈS À UNE ZBE COMMUNALE, INITIALEMENT PRÉVUS EN 2020, 2022 ET 2025. C'EST LA FLOTTE 2021 QUI EST CONSIDÉRÉE POUR LES DEUX PREMIÈRES PHASES D'INTERDICTION ALORS QUE POUR LA DERNIÈRE PHASE D'INTERDICTION, APPLIQUÉE TROIS ANS PLUS TARD, UN TAUX DE RENOUVELLEMENT DE LA FLOTTE EST PRIS EN COMPTE.

	Diesel		Essence/CNG/LPG		Total	
	Véhicules	%	Véhicules	%	Véhicules	%
2020	90 521	4.0 %	39 700	1.8 %	130 222	5.8 %
2022	230 005	10.2 %	20 938	0.9 %	250 943	11.1 %
2025	270 331	12.0 %	11 813	0.5 %	282 144	12.5 %

Comptabilisés dans le tableau ci-dessus, les poids lourds (presque exclusivement à moteur diesel) progressivement interdits seraient au nombre de 8469, 3256 et 4706. Le nombre de véhicules à Namur représente plus ou moins 7-8 % de la flotte wallonne. Les trois phases du calendrier d'interdiction toucheraient donc respectivement 9 767, 18 821 et 21 161 véhicules.

4.2.2.1 Scénario 1a : conditions d'accès prévues à partir de 2022

Dans ce scénario, les véhicules diesel <= Euro 4 et essence/CNG/LPG <= Euro 2 circulant encore fin 2021 sont interdits (restrictions 2020 et 2022 du calendrier initialement prévu). Dans ces conditions, les concentrations en NO₂ pourraient diminuer de 5 à 10 % dans les rues résidentielles et jusqu'à 20 % sur les routes nationales par rapport à la situation en 2022 (figure 84). Plus aucun dépassement de la valeur limite annuelle de 40 µg/m³ n'est simulé par le modèle (figure 85). Beaucoup de zones en périphérie et le cœur de la Corbeille ne dépassent plus la valeur guide de 10 µg/m³ de l'OMS. La figure 86 montre les concentrations moyennes à l'heure de pointe du matin. Le modèle projette encore des dépassements sur les pénétrantes.



FIGURE 84. ÉVOLUTION DES CONCENTRATIONS EN NO₂ PROJETÉE SOUS LE SCÉNARIO 1A.

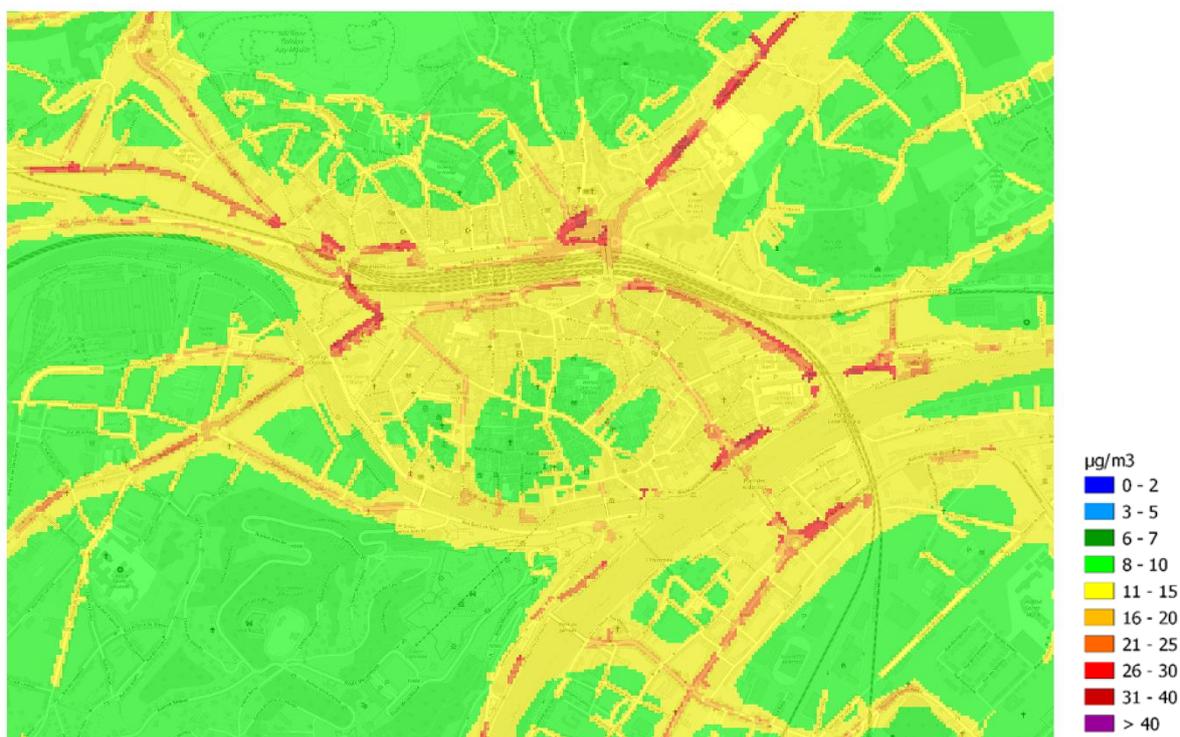


FIGURE 85. CONCENTRATIONS MOYENNES EN NO₂ DANS LE SCÉNARIO 1A (CONDITIONS MAI 2022).



FIGURE 86. CONCENTRATIONS MOYENNES EN NO₂ À L'HEURE DE POINTE DU MATIN (8H) DANS LE SCÉNARIO 1A (CONDITIONS MAI 2022).

4.2.2.2 Scénario 1b : conditions d'accès prévues à partir de 2025

Dans ce scénario, les véhicules diesel \leq Euro 5 et essence/CNG/LPG \leq Euro 3 circulant encore fin 2021 sont interdits (restrictions 2025 du calendrier initialement prévu). Dans ces conditions, des diminutions des niveaux de concentration en NO_2 de l'ordre de 15 % sont simulées dans les rues résidentielles et jusqu'à 40 % sur les routes nationales par rapport à la situation en 2022 (figure 87). Les concentrations de fond urbain ne dépassent plus la valeur guide de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de l'OMS (figure 88). Presque plus aucun dépassement de la valeur limite annuelle de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ n'est simulé par le modèle aux heures de pointe (figure 89).

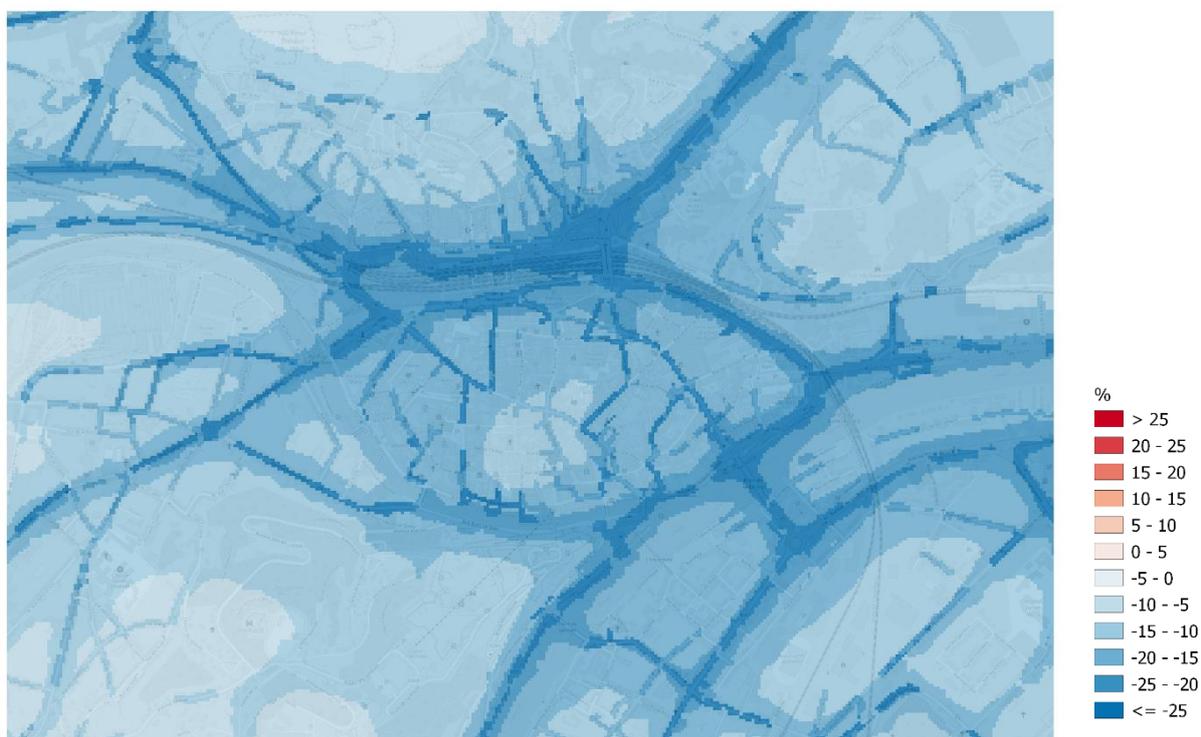


FIGURE 87. ÉVOLUTION DES CONCENTRATIONS EN NO_2 PROJETÉE SOUS LE SCÉNARIO 1B.



FIGURE 88. CONCENTRATIONS MOYENNES EN NO₂ DANS LE SCÉNARIO 1B (CONDITIONS MAI 2022).



FIGURE 89. CONCENTRATIONS MOYENNES EN NO₂ À L'HEURE DE POINTE DU MATIN (8H) DANS LE SCÉNARIO 1B (CONDITIONS MAI 2022).

4.2.3 Scénario 2 : extension du piétonnier

Deux scénarios d'extension, un officiel (scénario 2a) et un exploratoire (scénario 2b), ont été évalués.

4.2.3.1 Scénario 2a : première phase d'extension prévue par la Ville

Selon le modèle ATMO-Street, la première phase d'extension du piétonnier mis en place par la Ville devrait sans surprise diminuer les concentrations en NO₂ dans les rues nouvellement interdites aux véhicules. Les réductions les plus importantes sont simulées rue Godefroid et rue des Brasseurs (environ -35 %, figure 90). Le revers de cette mesure est que les concentrations pourraient doubler en certains points en bordure du piétonnier. Sur les figures 91 et 92, on voit que le nombre de rues où les concentrations en NO₂, moyennes et à l'heure de pointe, s'approchent des 10 µg/m³, a augmenté. L'impact de ce scénario sur le trafic pendant l'heure de pointe du matin (8-9h) est montré à la Figure 65.

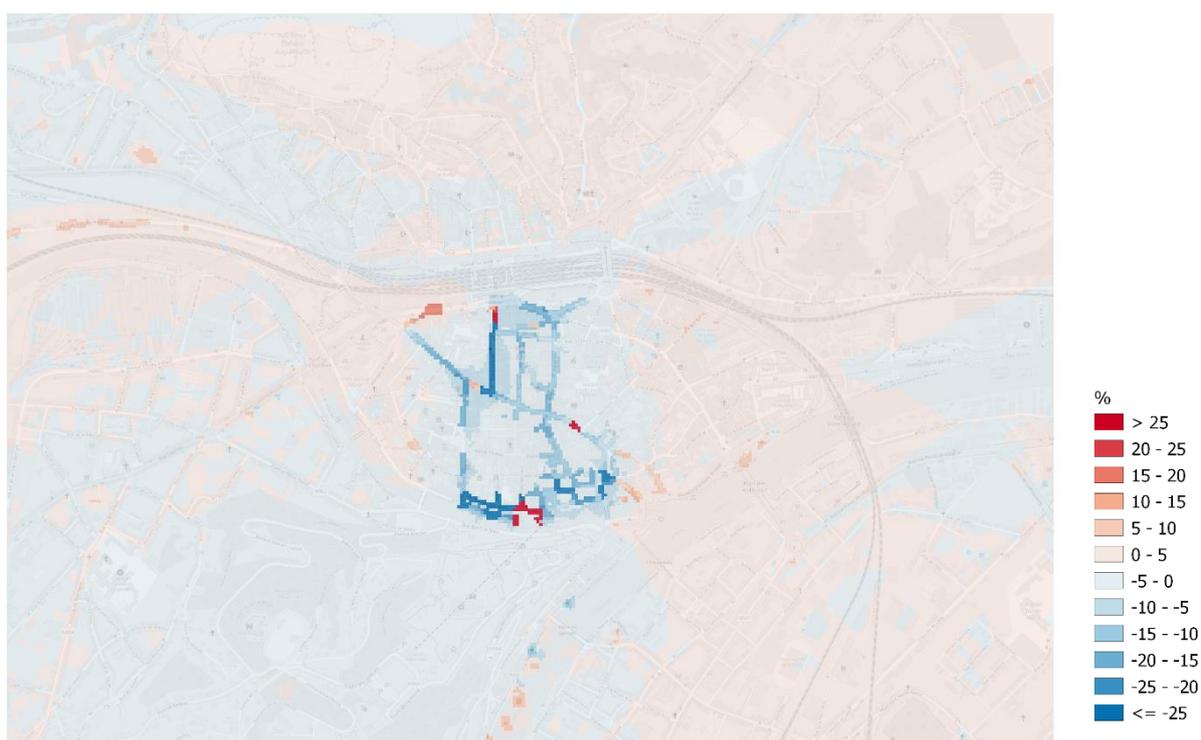


FIGURE 90. ÉVOLUTION DES CONCENTRATIONS EN NO₂ PROJETÉE SOUS LE SCÉNARIO 2A.

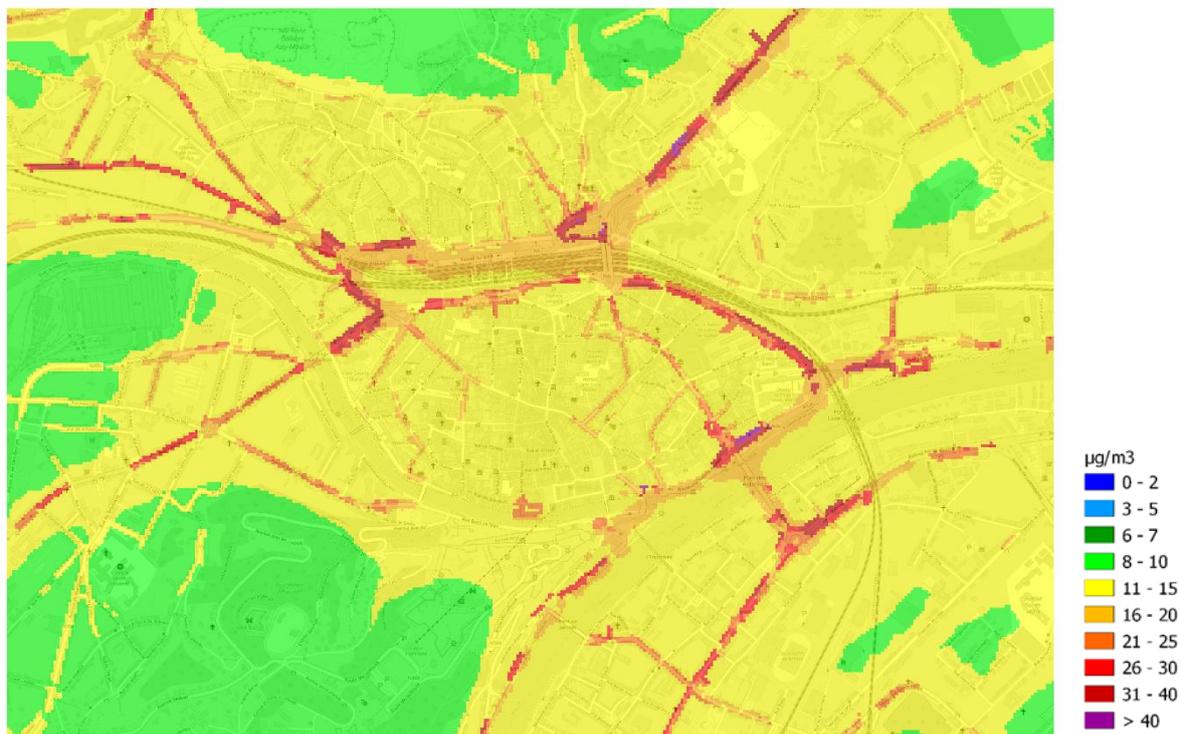


FIGURE 91. CONCENTRATIONS MOYENNES EN NO₂ DANS LE SCÉNARIO 2A (CONDITIONS MAI 2022).

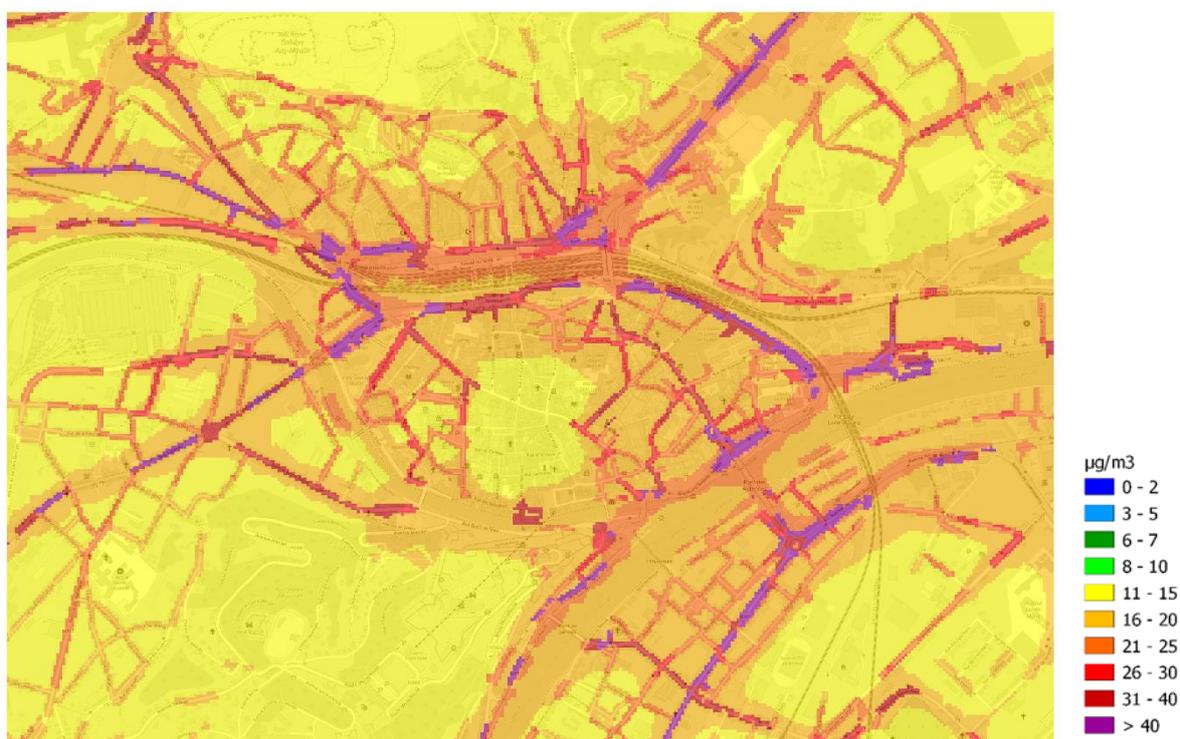


FIGURE 92. CONCENTRATIONS MOYENNES EN NO₂ À L'HEURE DE POINTE DU MATIN (8H) DANS LE SCÉNARIO 2A (CONDITIONS MAI 2022).

4.2.3.2 Scénario 2b : Corbeille entièrement piétonne

Un deuxième scénario, pas envisagé par la Ville à ce jour, considère un élargissement du piétonnier à l'ensemble de la Corbeille. Les concentrations en NO₂ diminuent dans l'ensemble des rues de la Corbeille avec des réductions de près de 50 % dans certaines artères (e.g ., rue de Bruxelles, axe Rogier-Brabant). Avec un axe Rogier-Brabant interdit aux véhicules, le report du trafic à l'extérieur de la Corbeille a pour effet d'augmenter d'environ 30 % les concentrations sur certains axes de la Petite Ceinture (e.g ., avenue Reine Astrid, avenue Cardinal Mercier) et d'autres grands axes comme le boulevard d'Herbatte (figure 93). Les figures 94 et 95 montrent les concentrations en NO₂ moyennes et à l'heure de pointe du matin. En plein cœur du piétonnier historique, les concentrations passent sous le seuil des 10 µg/m³. L'impact de ce scénario sur le trafic pendant l'heure de pointe du matin (8-9h) est montré à la figure 66.

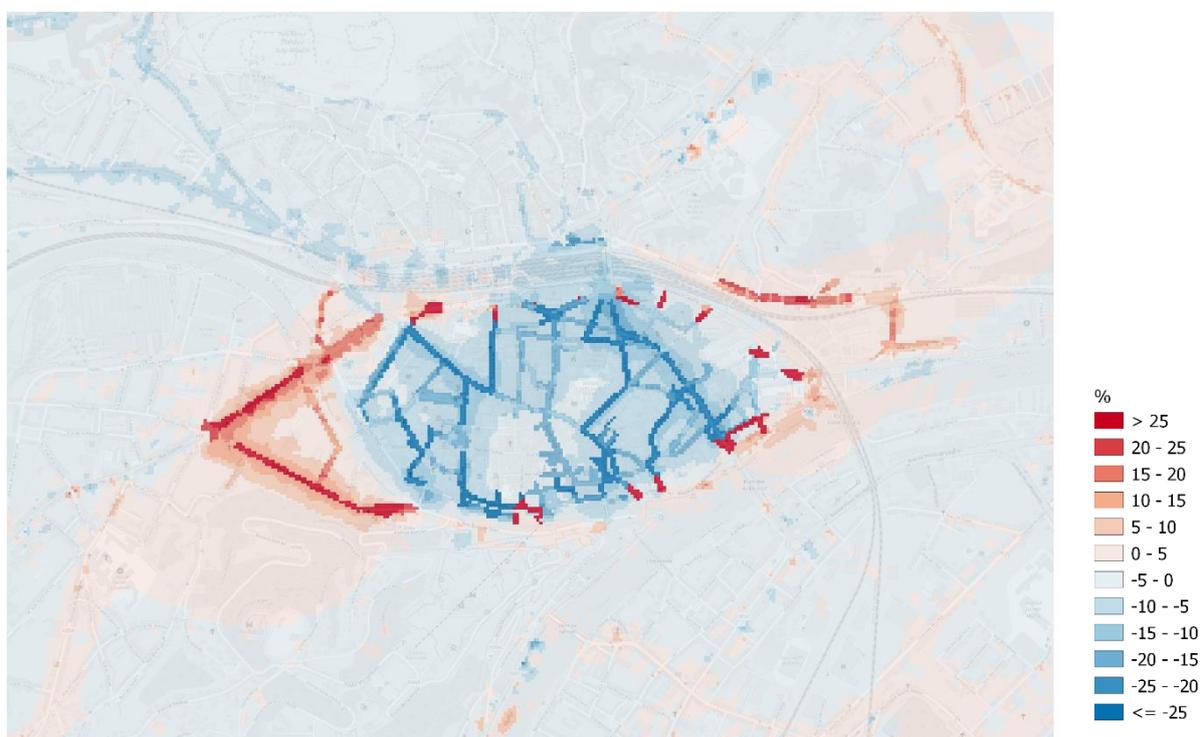


FIGURE 93. ÉVOLUTION DES CONCENTRATIONS EN NO₂ PROJETÉE SOUS LE SCÉNARIO 2B.



FIGURE 94. CONCENTRATIONS MOYENNES EN NO₂ DANS LE SCÉNARIO 2B (CONDITIONS MAI 2022).

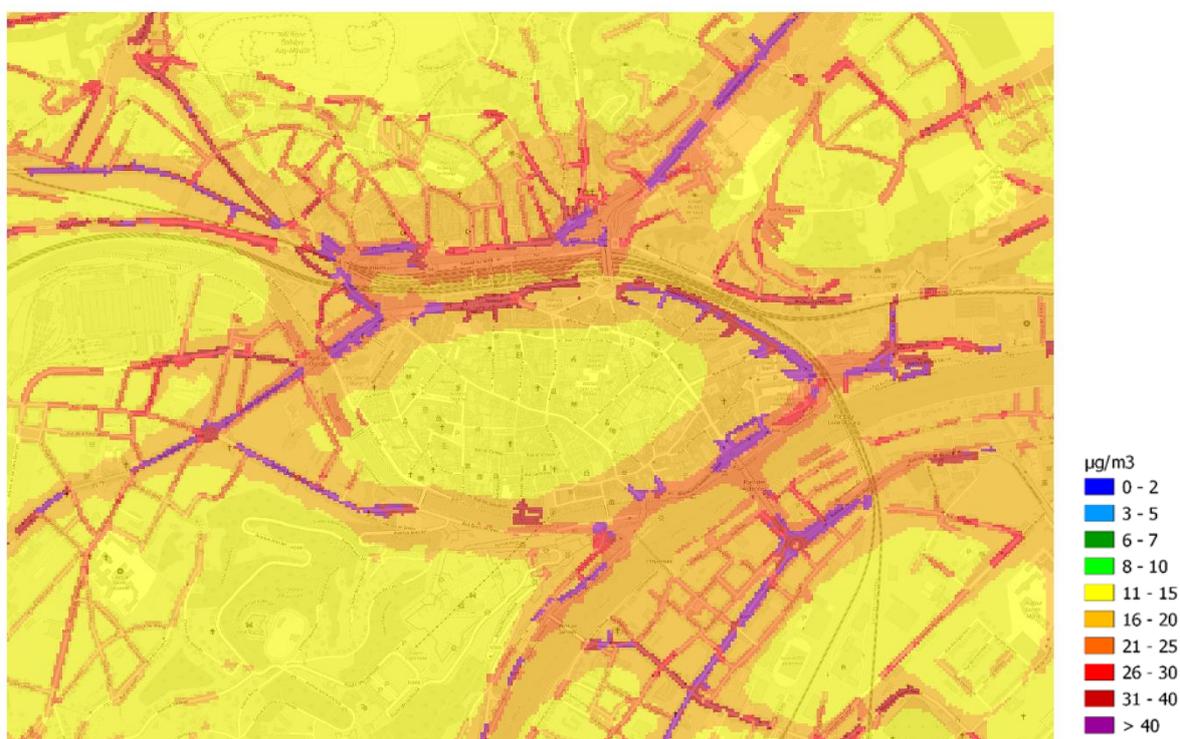


FIGURE 95. CONCENTRATIONS MOYENNES EN NO₂ À L'HEURE DE POINTE DU MATIN (8H) DANS LE SCÉNARIO 1B (CONDITIONS MAI 2022).

4.2.4 Scénario 3 : mise en sens unique de la Petite Ceinture

Dans ce scénario de mise en sens unique (dans le sens horaire) de la Petite Ceinture en complément à la piétonisation de la Corbeille, le modèle simule des diminutions de concentrations en NO₂ de plus de 40 % sur le nord de la Petite Ceinture (jusqu'à 50 % sur le boulevard Cauchy, figure 96). L'engorgement des avenues Bourgmestre Jean Materne et Gouverneur Bovesse projeté par le modèle de mobilité a pour conséquence d'augmenter les concentrations en NO₂ (d'environ 35 % avenue Materne). Les figures 97 et 98 montrent les concentrations en NO₂ moyennes et à l'heure de pointe du matin. L'impact de ce scénario sur le trafic pendant l'heure de pointe du matin (8-9h) est montré à la figure 67.

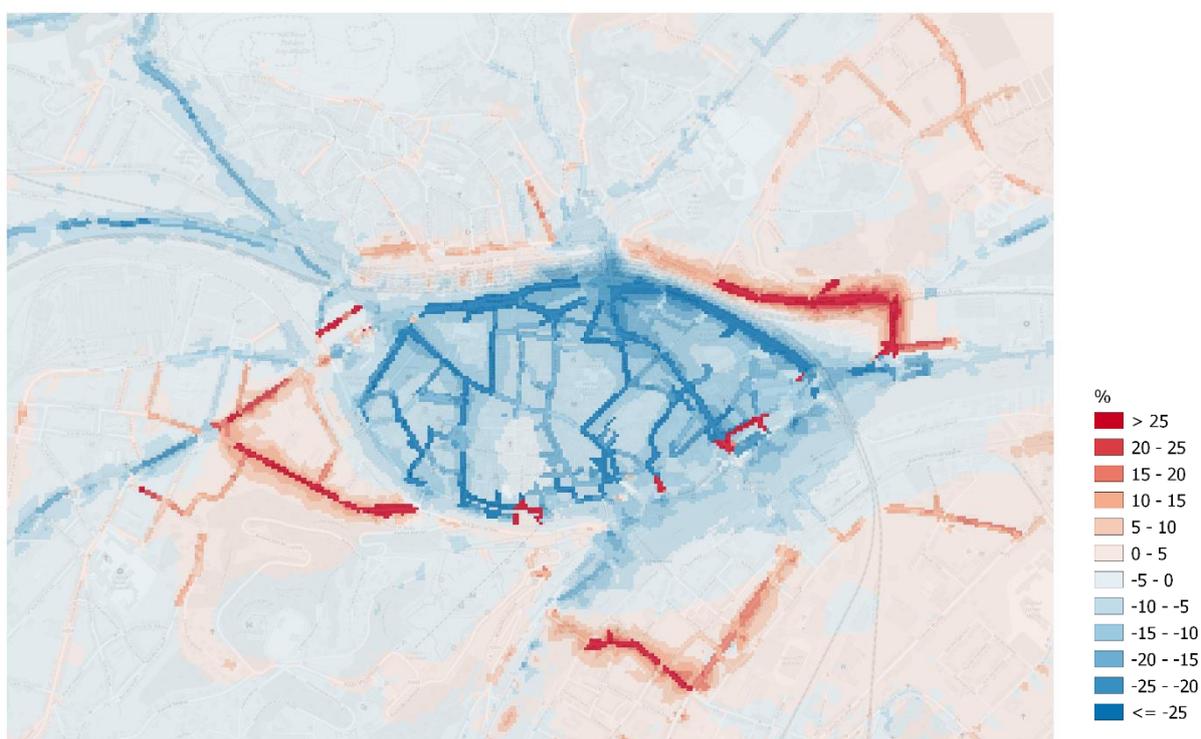


FIGURE 96. ÉVOLUTION DES CONCENTRATIONS EN NO₂ PROJETÉE SOUS LE SCÉNARIO 3.



FIGURE 97. CONCENTRATIONS MOYENNES EN NO₂ DANS LE SCÉNARIO 3 (CONDITIONS MAI 2022).

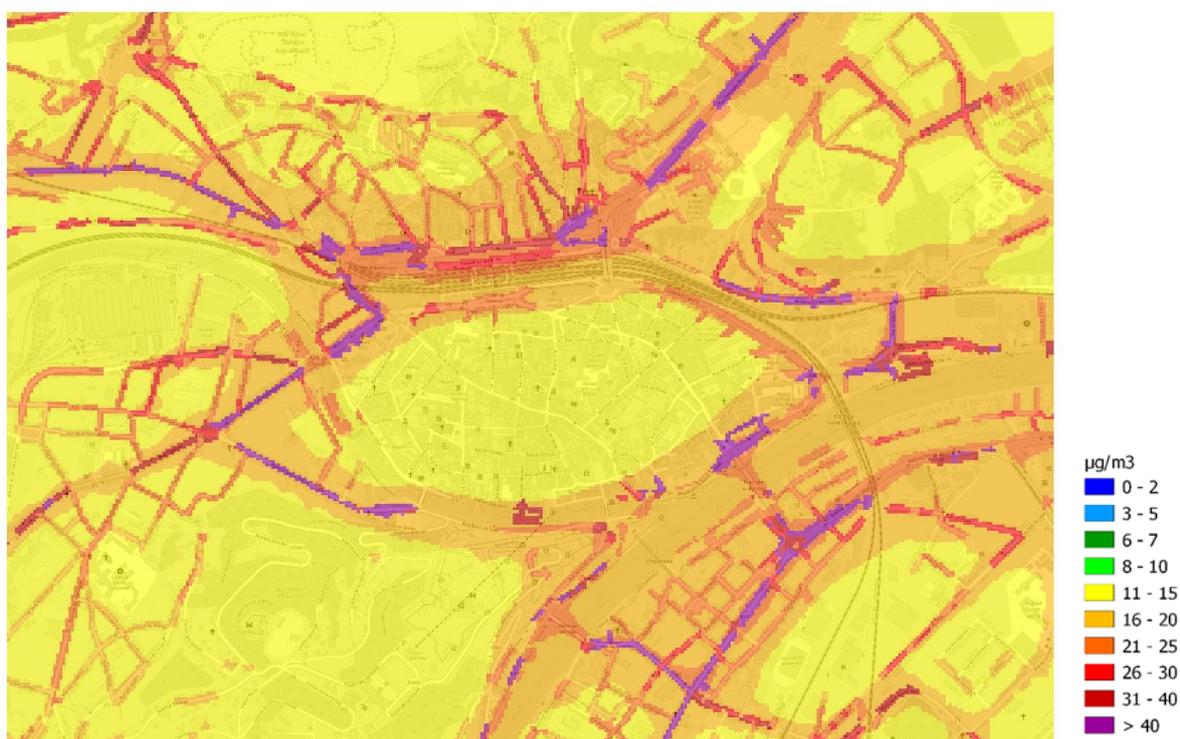


FIGURE 98. CONCENTRATIONS MOYENNES EN NO₂ À L'HEURE DE POINTE DU MATIN (8H) DANS LE SCÉNARIO 3 (CONDITIONS MAI 2022).

4.3 Projections pour Eupen

4.3.1 Conditions 2022

En 2022, les concentrations moyennes annuelles en NO₂ simulées à Eupen sont plus faibles qu'en 2018 (ISSeP, 2020). Le modèle ne simule aucun dépassement de la valeur limite annuelle européenne de 40 µg/m³ (figure 99). La valeur guide de l'OMS de 10 µg/m³ est, quant à elle, dépassée sur les routes régionales (pénétrantes et ring interne) et dans les rues principales du centre-ville. La figure 100 affiche les concentrations à l'heure de pointe du matin (8h) moyennées sur l'année. C'est aux heures de pointe que le trafic est le plus intense et cartographier les niveaux de pollution à ces moments de la journée permet de mettre en évidence les points noirs ou *hotspots* de pollution. À cette heure, les concentrations en NO₂ dépassent partout les 10 µg/m³.

4.3.1.1 Moyennes annuelles



FIGURE 99. CONCENTRATIONS MOYENNES ANNUELLES EN NO₂ À EUPEN EN 2022.

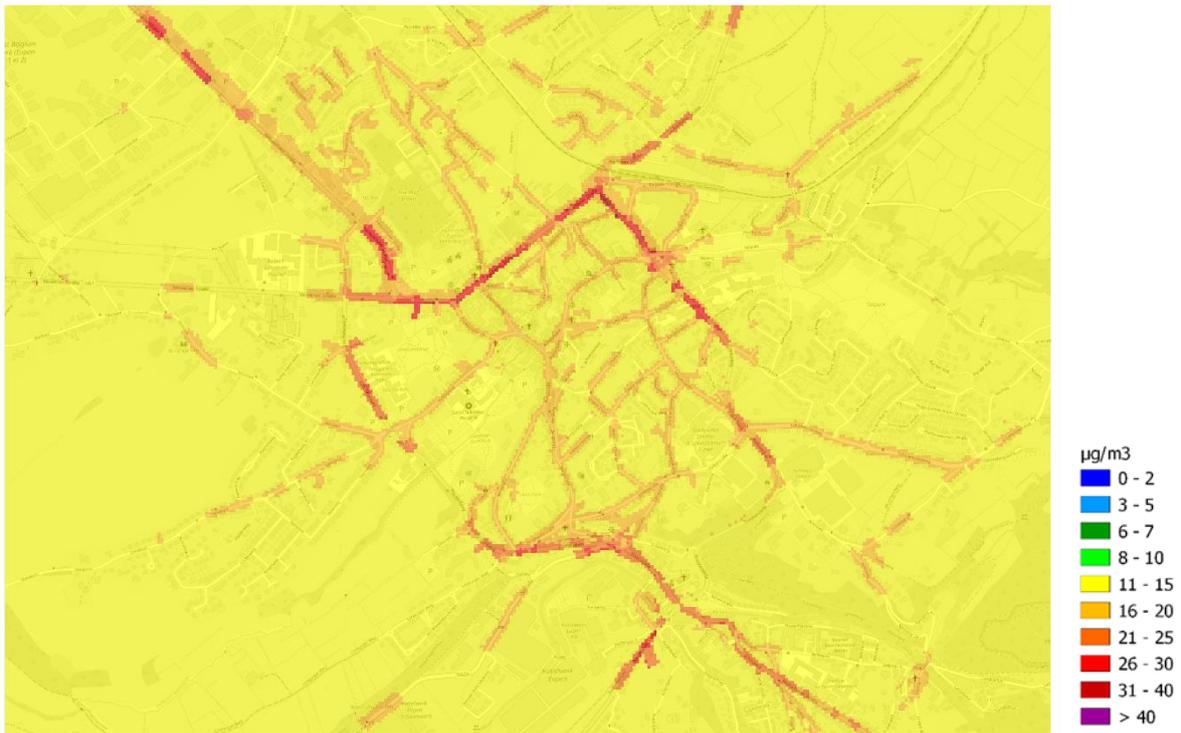


FIGURE 100. CONCENTRATIONS MOYENNES EN NO₂ À L'HEURE DE POINTE DU MATIN (8H) À EUPEN EN 2022.

4.3.1.2 Moyennes pour le mois de mai

Comme pour Namur, les concentrations moyennes en NO₂ au mois de mai sont également présentées (figure 101) car les concentrations de fond en mai ressemblent beaucoup aux concentrations de fond moyennes annuelles. Pour la réalisation des différents scénarios de mobilité, nous nous sommes donc permis de ne faire tourner le modèle que sur ce mois de mai pour épargner du temps de calcul et de l'espace de stockage. La figure 102 montrent les concentrations en NO₂ au mois de mai à l'heure de pointe du matin.

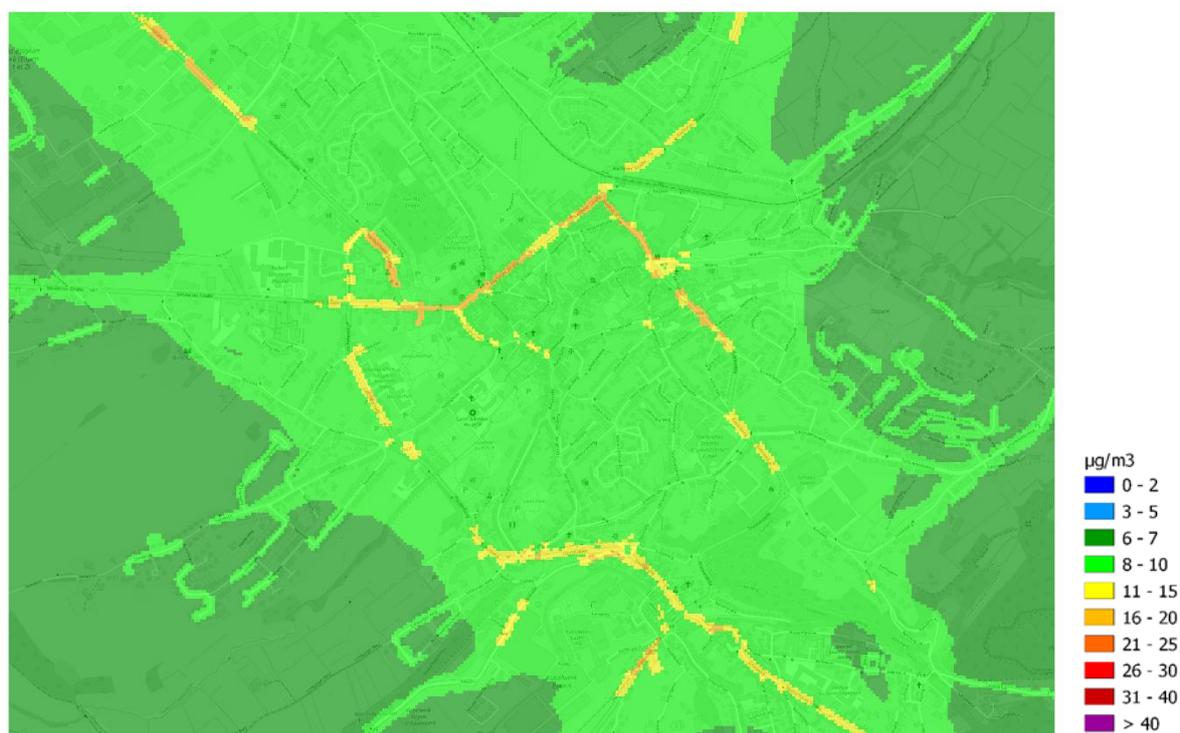


FIGURE 101. CONCENTRATIONS MOYENNES EN NO₂ À EUPEN EN MAI 2022.

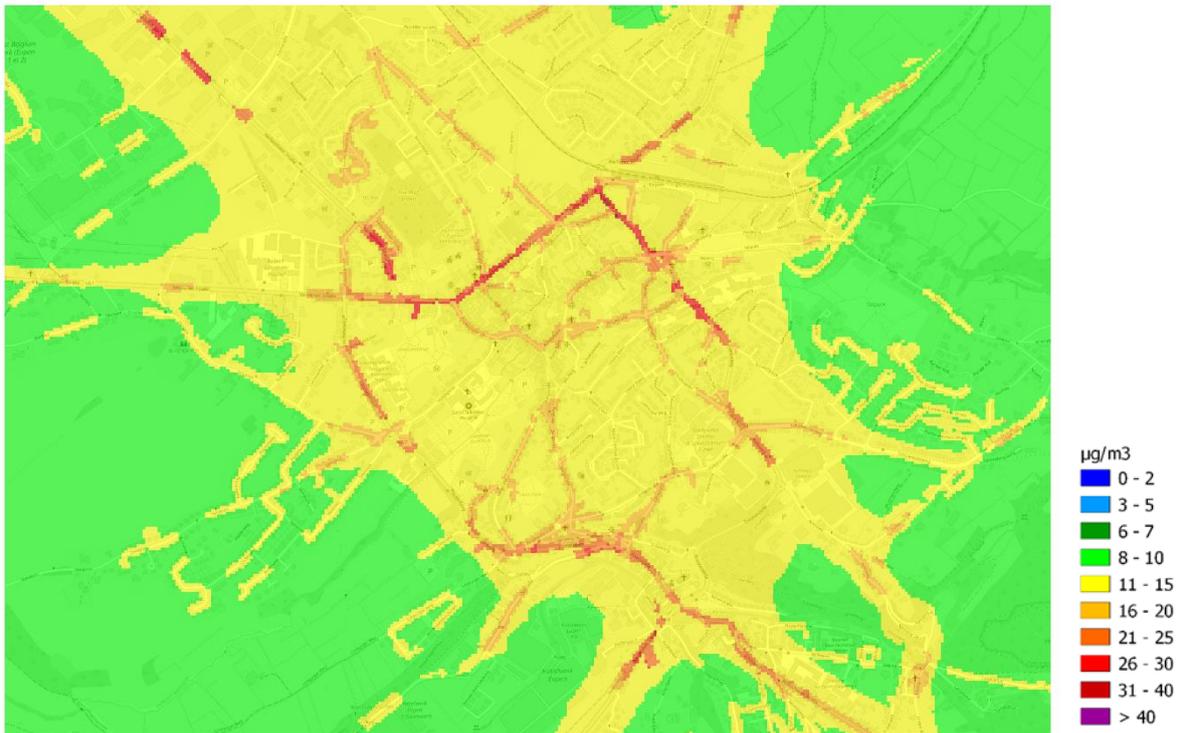


FIGURE 102. CONCENTRATIONS MOYENNES EN NO₂ À L'HEURE DE POINTE DU MATIN (8H) À EUPEN EN MAI 2022.

4.3.2 Scénario 1 : mise en sens unique du ring interne pour les poids lourds

Ce scénario a peu d'impact sur les concentrations en NO₂ sur le ring (figure 103). Le modèle projette les variations les plus importantes au niveau de l'Olengraben, où les concentrations augmenteraient de 5 à 10 % (ce qui ne va pas dans le bon sens) et au niveau de la Hookstrasse avec des diminutions de l'ordre de 10 %. Ce scénario reporte aussi le trafic sur la Simarstrasse et dans le centre-ville, ce qui augmente les niveaux de pollution dans les rues concernées (+ 30 % dans la Simarstrasse). Les figures 104 et 105 montrent les concentrations en NO₂ moyennes et à l'heure de pointe du matin. L'impact de ce scénario sur le trafic pendant l'heure de pointe du matin (8-9h) est montré à la figure 74.

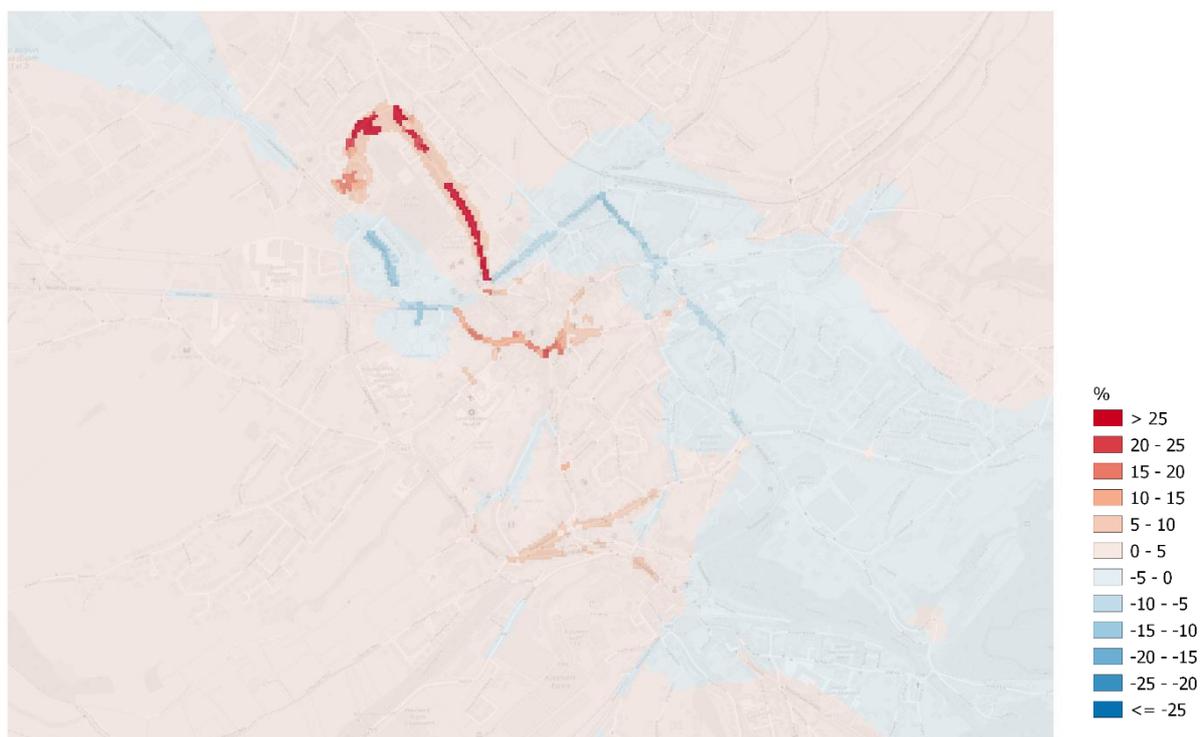


FIGURE 103. ÉVOLUTION DES CONCENTRATIONS EN NO₂ PROJETÉE SOUS LE SCÉNARIO 1.

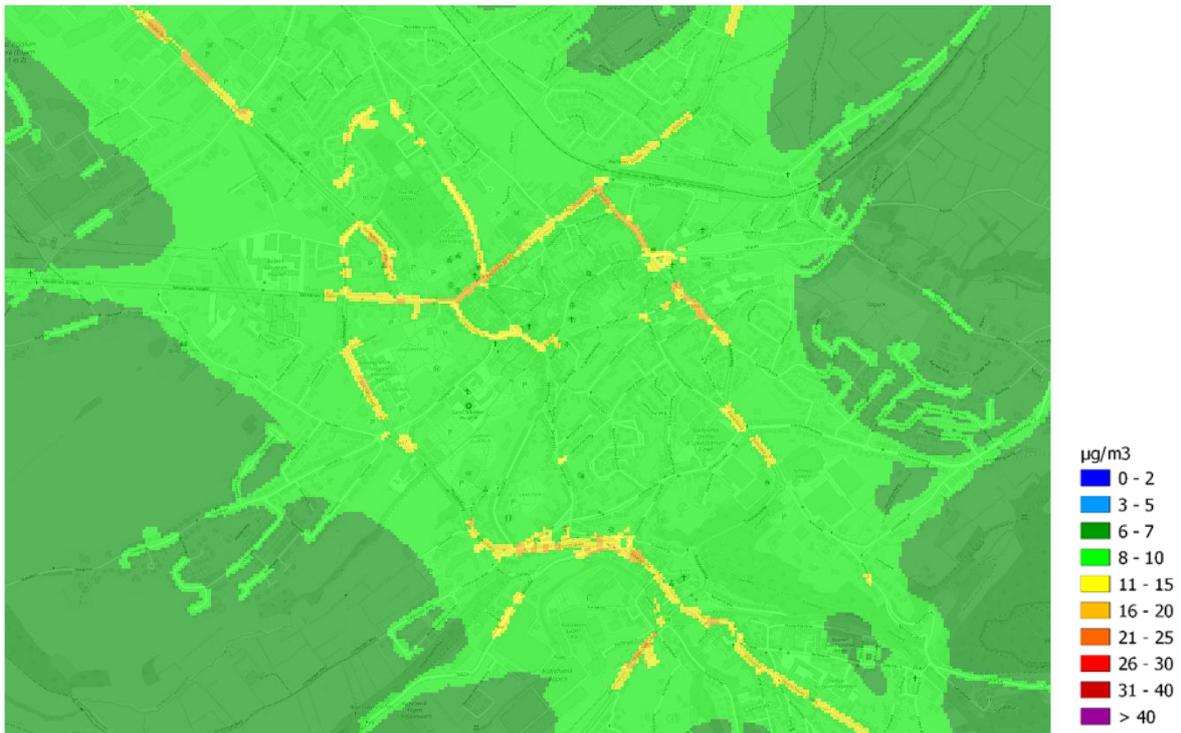


FIGURE 104. CONCENTRATIONS MOYENNES EN NO₂ DANS LE SCÉNARIO 1 (CONDITIONS MAI 2022).

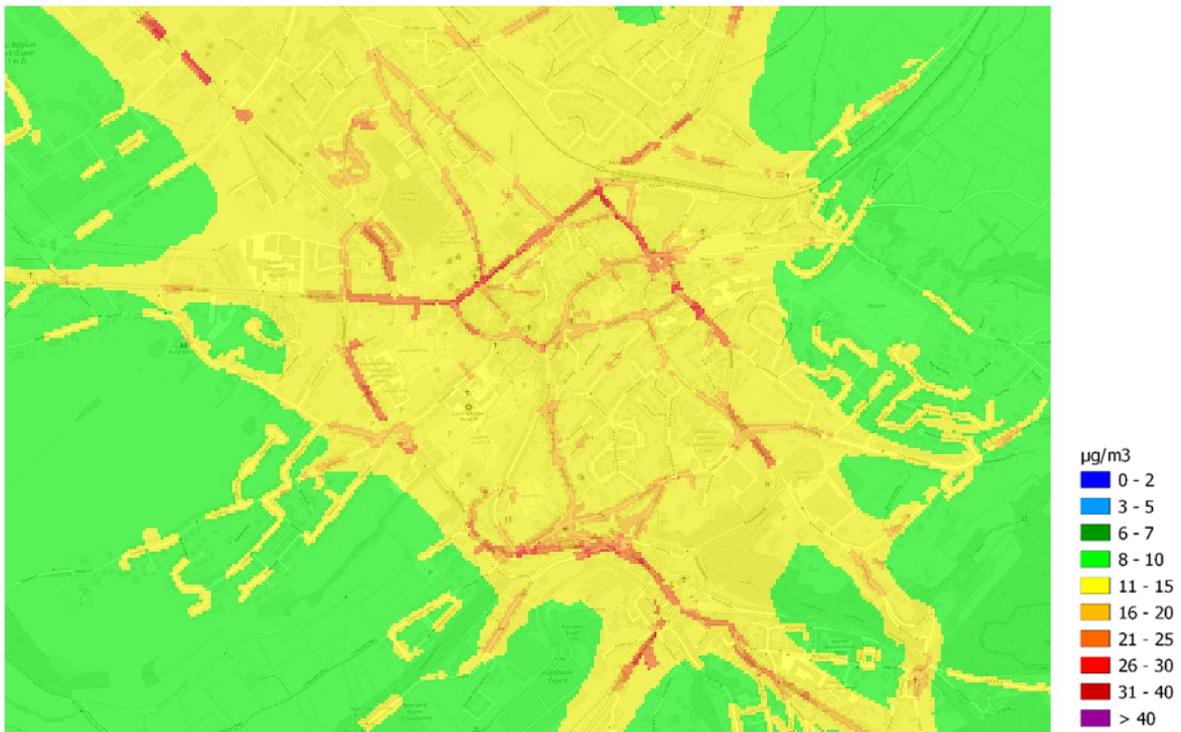


FIGURE 105. CONCENTRATIONS MOYENNES EN NO₂ À L'HEURE DE POINTE DU MATIN (8H) DANS LE SCÉNARIO 1 (CONDITIONS MAI 2022).

4.3.3 Scénario 2 : scénario 1 avec un centre interdit aux poids lourds

Cette adaptation du scénario 1 qui interdit l'accès au centre-ville aux camions a l'effet escompté (figure 106). Les concentrations en NO₂ diminuent dans le centre mais n'est visiblement toujours pas une solution pour le ring interne avec des augmentations des niveaux de concentration de 5 à 10 % à l'ouest de ce ring (Lascheterweg, Olengraben). Les figures 107 et 108 montrent les concentrations en NO₂ moyennes et à l'heure de pointe du matin. L'impact de ce scénario sur le trafic pendant l'heure de pointe du matin (8-9h) est montré à la figure 75.

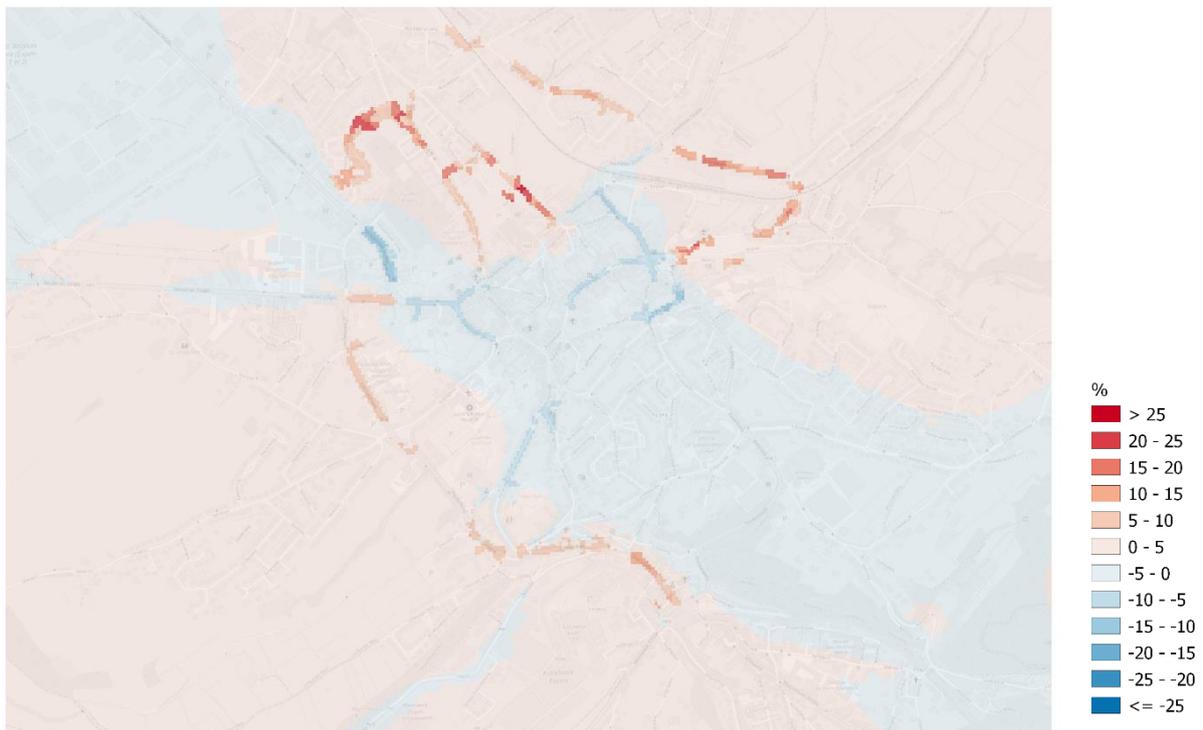


FIGURE 106. ÉVOLUTION DES CONCENTRATIONS EN NO₂ PROJETÉE SOUS LE SCÉNARIO 2.



FIGURE 107. CONCENTRATIONS MOYENNES EN NO₂ DANS LE SCÉNARIO 2 (CONDITIONS MAI 2022).

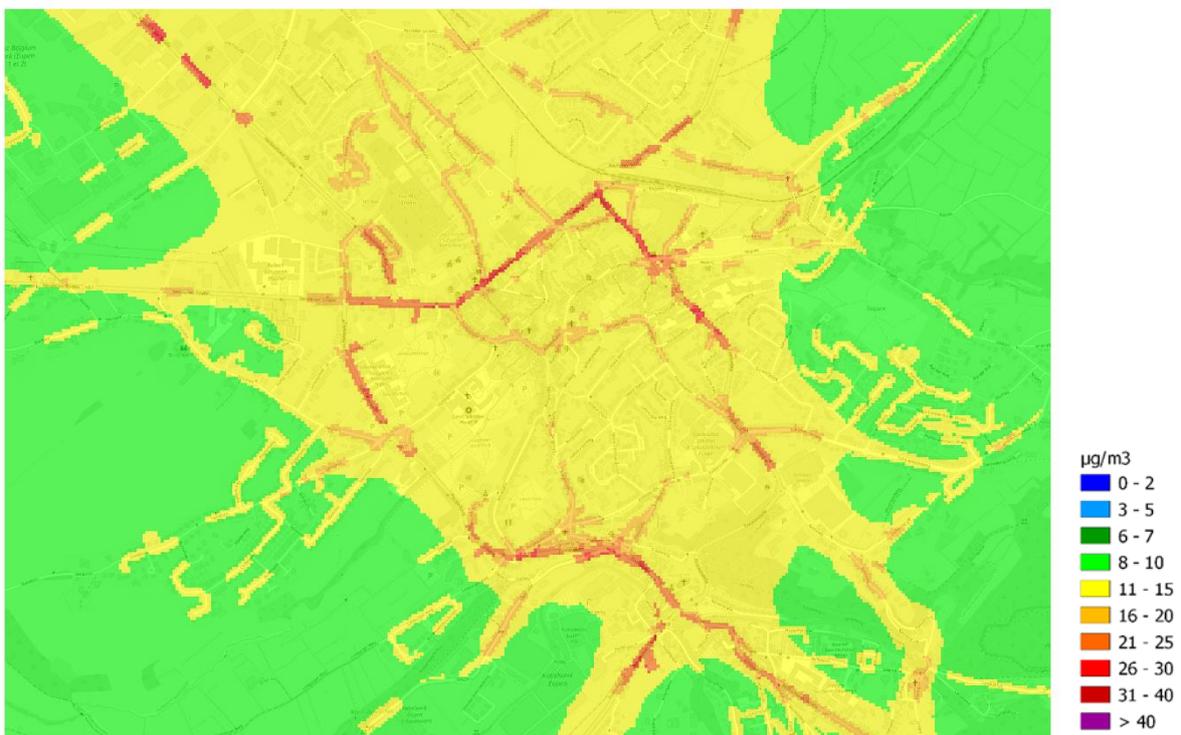


FIGURE 108. CONCENTRATIONS MOYENNES EN NO₂ À L'HEURE DE POINTE DU MATIN (8H) DANS LE SCÉNARIO 2 (CONDITIONS MAI 2022).

4.3.4 Scénario 3 : scénario 2 avec une interdiction aux poids lourds de descendre la Simarstrasse

Pour éviter que les camions qui arrivent par l'Herbesthaler Strasse ne descendent la Simarstrasse pour accéder plus rapidement à l'Aachenerstrasse (et éviter ainsi de devoir faire le tour du ring mis en sens unique), ce scénario interdit l'accès de la Theodor Moorenstrasse (au niveau de l'Herbesthaler Strasse) et de la Nöretherstrasse (au niveau de la Hochstrasse) aux camions. Ce scénario a pour effet de ramener le trafic sur le ring. Le modèle démontre que la mise en sens unique du ring n'est pas une solution pour améliorer la qualité de l'air avec des conditions qui se détériorent (figure 109), surtout à l'ouest et au sud du ring (les concentrations en NO₂ augmentent de 25 % sur la Haasstrasse). Les figures 110 et 111 montrent les concentrations en NO₂ moyennes et à l'heure de pointe du matin. L'impact de ce scénario sur le trafic pendant l'heure de pointe du matin (8-9h) est montré à la figure 76.

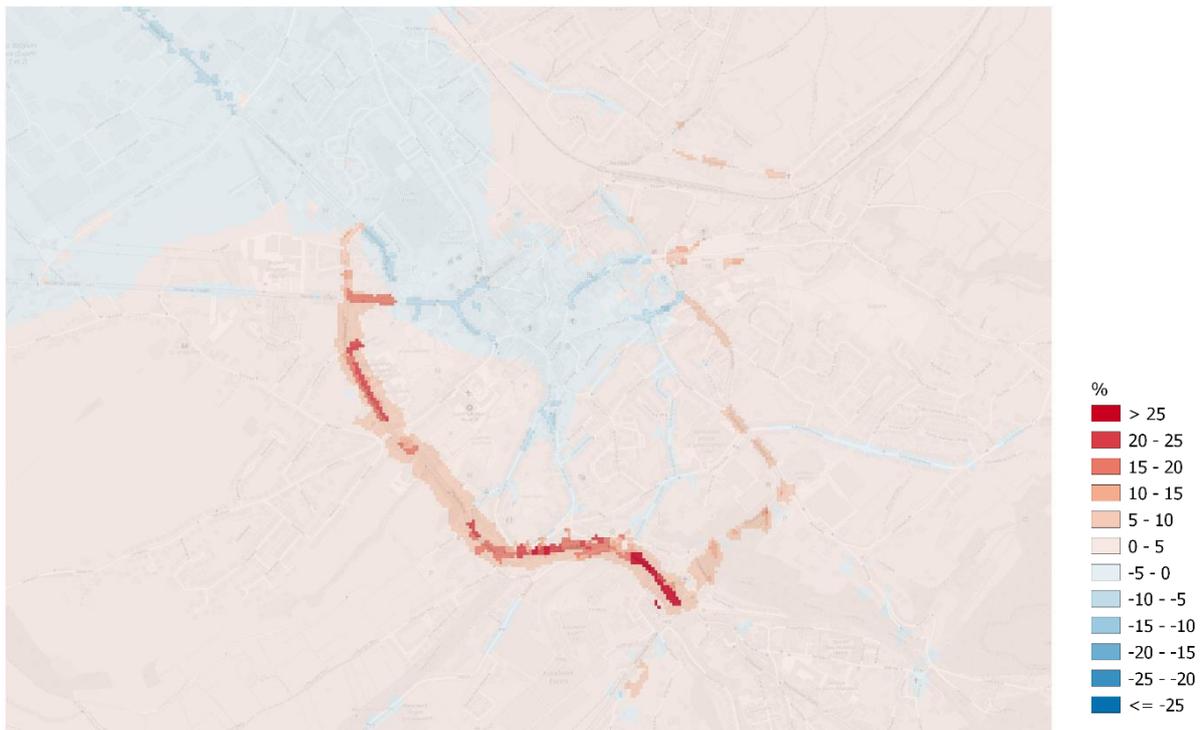


FIGURE 109. ÉVOLUTION DES CONCENTRATIONS EN NO₂ PROJETÉE SOUS LE SCÉNARIO 3.



FIGURE 110. CONCENTRATIONS MOYENNES EN NO₂ DANS LE SCÉNARIO 3 (CONDITIONS MAI 2022).

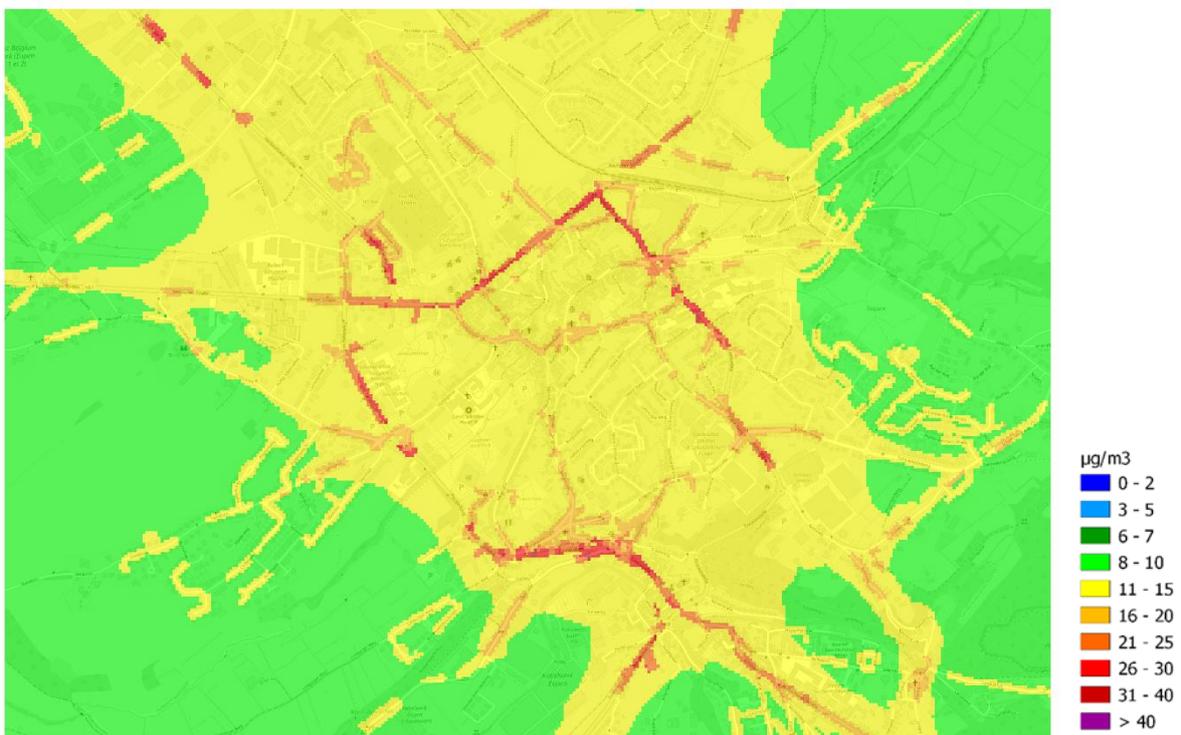


FIGURE 111. CONCENTRATIONS MOYENNES EN NO₂ À L'HEURE DE POINTE DU MATIN (8H) DANS LE SCÉNARIO 3 (CONDITIONS MAI 2022).

4.3.5 Scénario 4 : mise en sens unique de l'Olengraben pour tous les véhicules

Selon le modèle ATMO-Street, la mise en sens unique de l'Olengraben pour tous les véhicules diminuerait les concentrations en NO₂ de 5 à 10 % dans l'Olengraben mais le report du trafic les augmenterait dans la Judenstrasse de manière équivalente (figure 112). Les figures 113 et 114 montrent les concentrations en NO₂ moyennes et à l'heure de pointe du matin. L'impact de ce scénario sur le trafic léger et lourd pendant l'heure de pointe du matin (8-9h) est montré aux figures 77 et 78.

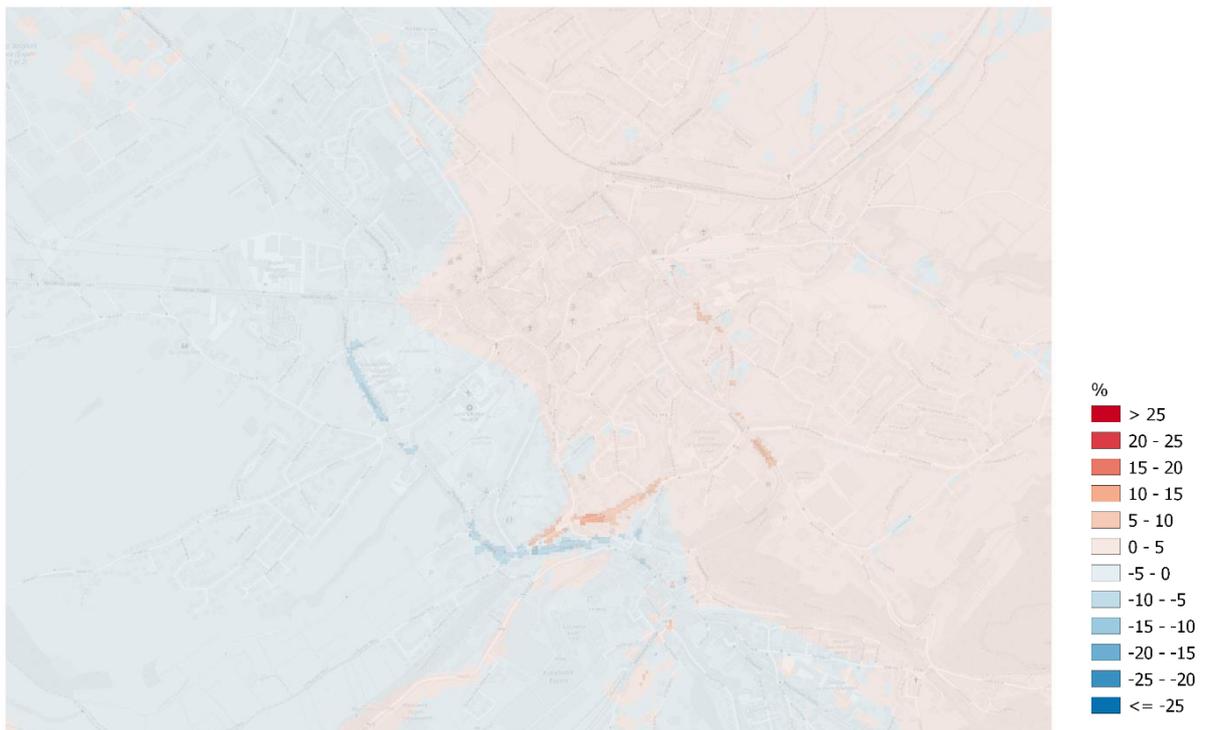


FIGURE 112. ÉVOLUTION DES CONCENTRATIONS EN NO₂ PROJETÉE SOUS LE SCÉNARIO 4.

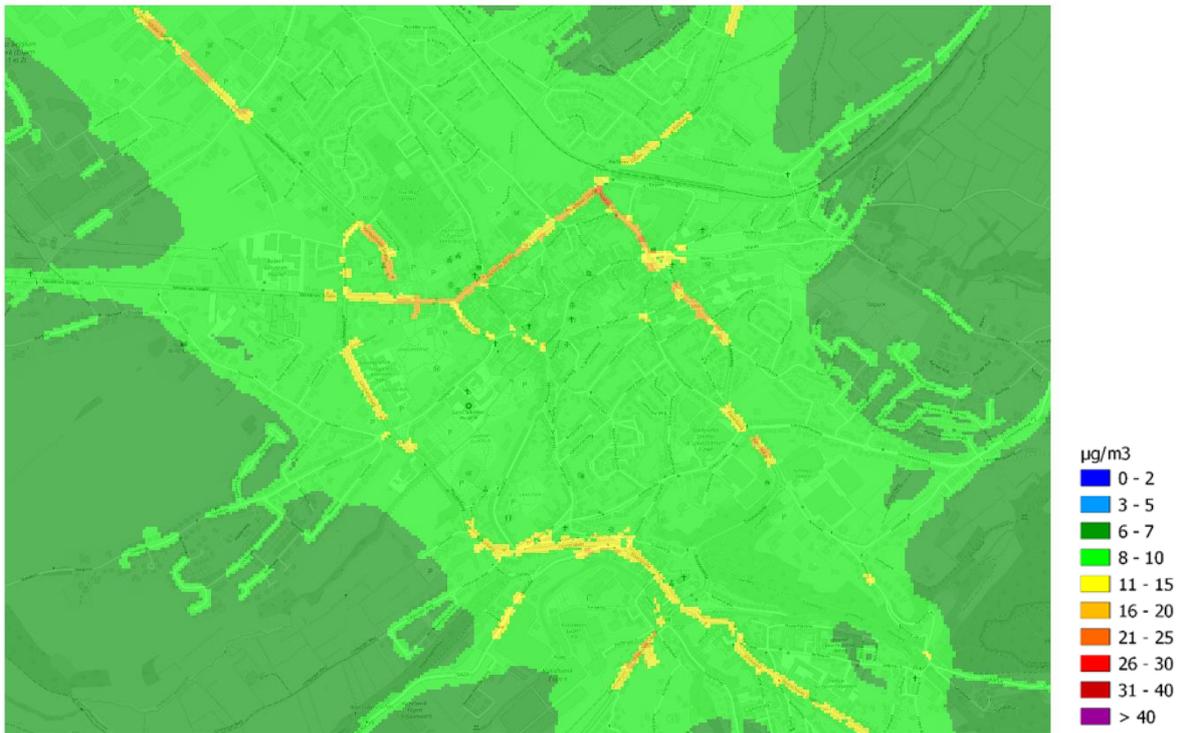


FIGURE 113. CONCENTRATIONS MOYENNES EN NO₂ DANS LE SCÉNARIO 4 (CONDITIONS MAI 2022).

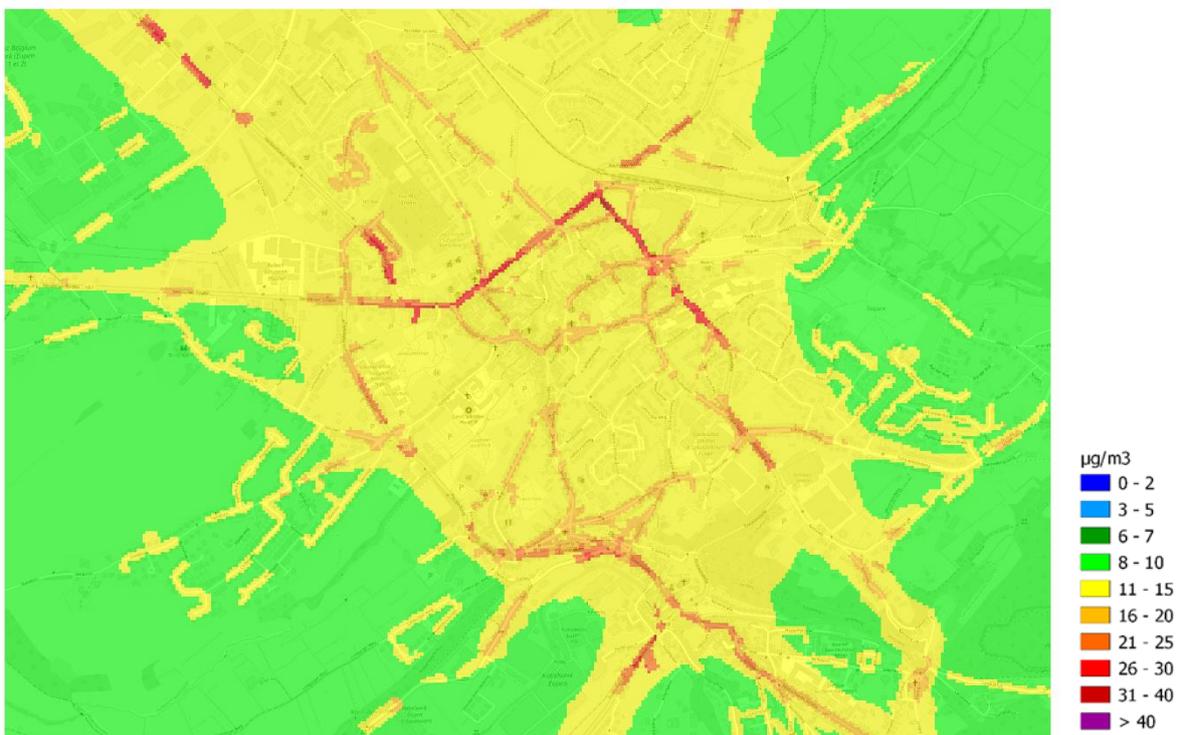


FIGURE 114. CONCENTRATIONS MOYENNES EN NO₂ À L'HEURE DE POINTE DU MATIN (8H) DANS LE SCÉNARIO 4 (CONDITIONS MAI 2022).

5 Discussion et conclusion

En 2019, une première étude (projet ZBE), également financée dans le cadre du Plan ENVieS, a été menée par l'ISSeP dans deux communes wallonnes, Eupen et Namur, afin d'objectiver l'intérêt d'instaurer des zones basses émissions communales, une mesure proposée dans le décret wallon relatif à la lutte contre la pollution atmosphérique liée à la circulation des véhicules. À Namur, des dépassements à l'échelle annuelle de la valeur limite européenne pour le NO₂ (40 µg/m³) et des lignes directrices de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) pour les particules fines (5 µg/m³ pour les PM_{2.5} et 15 µg/m³ pour les PM₁₀) ont été enregistrés et modélisés en 2018 et en 2019 dans de nombreuses artères de la commune. À Eupen, les concentrations en polluants n'étaient réellement critiques qu'aux heures de pointe du matin et du soir.

Dans ce contexte, alors que l'instauration d'une ZBE ne semblait pas pertinente à Eupen, le modèle ATMO-Street projetait la disparition des dépassements à Namur si le calendrier d'interdiction progressif prévu dans une ZBE communale était suivi jusqu'en 2025. Dans ses conclusions, l'étude ZBE recommandait dès lors d'agir de manière ciblée sur quelques communes wallonnes de taille importante. Dans son étude sur l'impact des mesures politiques liées au transport dans les villes, Hoen *et al.* (2021) indiquent que les villes dans lesquelles une ZBE a été mise en place sont généralement des entités de plus de 100 000 habitants, caractérisées par un trafic routier intense dans leur centre-ville qui entraîne de fortes concentrations en polluants atmosphériques. La taille de ces villes est en moyenne inférieure à celle des villes qui ont mis en place un péage urbain (600 000 hab. à Göteborg, 1 M hab. à Milan et Stockholm, 9 M. hab. à Londres). Selon ces auteurs, les villes plus petites (<100 000 hab.) peuvent néanmoins aussi bénéficier d'améliorations de la qualité de l'air grâce aux ZBE. Outre Namur, les villes qui pourraient être concernées et qui nécessiteraient une étude particulière sont surtout Liège, Charleroi et Mons. En parallèle, l'étude ZBE proposait d'étudier l'impact que pourraient avoir certaines politiques de mobilité locale, car cela permettrait d'apporter une réponse aux plus petites communes comme Eupen.

Ainsi, dans la foulée de l'étude ZBE, une étude dynamique intelligente du trafic (projet ENVieS EDIT) a été lancée pour évaluer l'incidence d'autres mesures de mobilité. Un modèle de mobilité a été développé pour les communes de Namur et d'Eupen pour estimer les flux de trafic dans ces deux entités. Les flux calculés, convertis en émissions polluantes, ont servi de données d'entrée au modèle de dispersion atmosphérique ATMO-Street, déjà utilisé dans le projet ZBE. La période de référence de ce nouvel exercice de modélisation est l'année 2022 avec l'état de la flotte wallonne à la fin 2021.

En 2022, comme décrit dans l'introduction, les concentrations en NO₂ à Namur et à Eupen sont plus faibles qu'en 2018 (ISSeP, 2020). Aucun dépassement de la valeur limite annuelle européenne n'est simulé à Eupen. À Namur, le modèle simule quelques dépassements très localisés (chaussée de Louvain, boulevard Isabelle Brunell et avenue Comte de Smet de Nayer). Malgré la tendance à la

baisse des concentrations, une année n'est pas l'autre, notamment en raison des conditions météorologiques, et l'Europe est dans un processus de durcissement de ses normes en matière de qualité de l'air. En effet, en septembre dernier, le Parlement européen a approuvé la révision de la Directive sur la qualité de l'air ambiant. Si ce projet est adopté par le Conseil européen, les États membres devront respecter des valeurs limites qui s'alignent sur les nouvelles recommandations de l'OMS d'ici 2035 (la valeur limite passera de 40 à 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour la moyenne annuelle en NO_2 , avec des seuils intermédiaires dès 2030).

Plusieurs scénarios ont été élaborés et analysés conjointement avec les deux communes. Pour Namur, les projections de l'impact de la mise en place d'une zone basses émissions (avec les différentes phases d'interdictions) réalisées dans le projet 2ZBE ont été actualisées. Dans les nouvelles projections, les restrictions prévues pour 2020 et 2022 (tableau 16) ont été regroupées. Les restrictions 2020-2022 et 2025 entraîneraient respectivement une diminution des émissions de NO_x de 28 % et 51 %. Avec ces réductions des émissions polluantes provenant du trafic, le modèle ATMO-Street projette des niveaux de concentrations en NO_2 plus faibles. Si on interdisait les véhicules diesel \leq Euro 4 et essence/CNG/LPG \leq Euro 2 (restrictions 2020-2022), les concentrations en NO_2 pourraient diminuer de 5 à 10 % dans les rues résidentielles et jusqu'à 20 % sur les routes nationales par rapport à la situation en 2022. Plus aucun dépassement de la valeur limite annuelle de 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ n'est simulé par le modèle. Si les véhicules diesel \leq Euro 5 et essence/CNG/LPG \leq Euro 3 étaient interdits (restrictions prévues initialement en 2025), ces diminutions sont respectivement de l'ordre de 15 % et 40 %. Presque plus aucun dépassement de la valeur limite annuelle de 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ n'est simulé par le modèle aux heures de pointe. Les nouvelles projections confirment sans surprise l'impact positif qu'aurait l'élimination des véhicules les plus polluants sur la qualité de l'air en ville. Ces interdictions concernent cependant un grand nombre de véhicules à Namur: 28 600 véhicules en 2022 (année de référence des projections) et 21 150 véhicules supplémentaires en 2025 (en tenant compte d'un taux renouvellement). Les tableaux de l'annexe 5 reprennent l'évolution de la flotte de véhicules des villes de Namur, Charleroi et Liège de 2018 à 2030. Rappelons que l'introduction d'une ZBE communale est à l'initiative de chaque commune et que la zone dans laquelle s'appliqueront les restrictions n'est pas forcément tout le territoire communal. À Lisbonne, par exemple, la ZBE, mise en place en 2011, est divisée en deux zones avec des normes d'accès différentes (les normes minimales actuellement requises étant les normes Euro 3 et Euro 2 respectivement pour la zone 1 et la zone 2; Santos *et al.*, 2019). De plus, étant donné qu'à l'heure actuelle, aucune commune wallonne ne s'est encore lancée dans l'instauration d'une zone basses émissions communale, le calendrier initialement prévu en 2019 pourrait être revu (les villes flamandes qui ont instauré une ZBE ont fait des adaptations à leur calendrier). Même si cela peut sembler peu ambitieux, il faut rappeler que plus le véhicule est ancien plus il pollue, donc prendre des mesures contre les véhicules \leq Euro 2 dans les grandes villes wallonnes aurait déjà un impact non négligeable sur la qualité de l'air.

À Anvers, une zone basses émissions est établie depuis le 1^{er} février 2017 sur une zone de 20 km^2 (tout le centre-ville et une partie de la Rive Gauche de l'Escaut). Depuis le 1^{er} janvier 2020 jusqu'au 31 décembre 2024, les véhicules diesel \leq Euro 4 (accès aux Euro 4 après paiement) et

essence/CNG/LPG <= Euro 1 sont interdits. En juillet dernier, la Flandre a annoncé que les règles régissant l'accès des véhicules aux zones basses émissions d'Anvers et de Gand ne seront pas renforcées avant début 2026, un an plus tard que prévu. Fin 2026, une nouvelle évaluation de la qualité de l'air déterminera si la trajectoire de resserrement proposée doit être ajustée ou si les interdictions prévues en 2027 et en 2028 peuvent être supprimées en raison d'une amélioration suffisante de la qualité de l'air.

Dans le dernier rapport annuel portant sur l'année 2021 (VMM, 2022), les concentrations moyennes annuelles en NO₂ et en carbone noir sont comparées aux concentrations de l'année 2016, l'année précédant l'introduction de la ZBE. Les concentrations en NO₂ ont diminué de 20 % à 35 % entre 2016 et 2021 dans les stations de surveillance de la ZBE mais ce sont des diminutions qui sont dans la fourchette des diminutions enregistrées dans les autres stations de mesure en Flandre (entre -13% et -40%). Selon les auteurs du rapport, il n'y a donc pas de preuve que la ZBE ait permis une diminution locale supplémentaire des concentrations de NO₂. Comme déjà discuté dans le rapport 2ZBE, plusieurs facteurs comme les conditions météorologiques, les travaux routiers ou la modification du parc automobile engendrée par la ZBE (tant dans la ZBE que dans le reste de la Flandre) compliquent l'analyse. Pour le carbone noir par contre, l'introduction de la ZBE semble avoir entraîné des diminutions locales supplémentaires (des diminutions entre 2016 et 2021 respectivement de 37 % à 56 % et de 27 % et 51 % dans la ZBE et le reste de la Flandre; VMM, 2022). Les restrictions actuelles à Anvers ont en effet principalement un impact sur les émissions de particules de suie; la réduction des particules d'azote devient plus importante à partir du prochain resserrement en 2026.

Instaurée en 2018, la ZBE de la Région de Bruxelles-Capitale (19 communes) impose les mêmes restrictions qu'à Anvers (diesel <= Euro 4 et essence/CNG/LPG <= Euro 1 interdits) depuis janvier 2022 jusque fin 2024. Dans le dernier rapport annuel portant sur l'année 2021 (IBGE, 2022), entre juin 2018 et octobre 2021, à mobilité (kilomètres parcourus) constante, la modification de la composition du parc aurait permis de réduire les émissions de 21 % pour les oxydes d'azote (NO_x), 26 % pour les particules fines (PM_{2,5}) et 59 % pour le carbone noir (ce qui correspond en gros aux réductions estimées dans le rapport 2ZBE en considérant la flotte fin 2017 et les premières interdictions prévues en 2020, identiques à celles de Bruxelles en 2021). En 2021, pour la deuxième année consécutive, toutes les stations de mesure de la Région ont respecté la norme annuelle européenne de 40 µg/m³ pour le NO₂. En revanche, la nouvelle valeur guide annuelle de l'OMS de 10 µg/m³ n'est respectée à aucune des stations.

D'après les résultats de la campagne de mesure « remote sensing » menée en octobre et novembre 2020, les véhicules diesel Euro 4, Euro 5 et Euro 6 (antérieurs à Euro 6d-TEMP) représentaient à eux seuls environ 85 % des émissions de NO_x pour les voitures et 95 % des émissions de NO_x pour les camionnettes (IBGE, 2022; annexe 6). L'interdiction de ces véhicules à partir de 2022, 2025 puis 2028 jouera un rôle déterminant pour réduire les émissions de NO_x. Rappelons que Bruxelles prévoit de devenir une zone zéro émissions, ce qui signifie que les véhicules diesel et à essence seront interdits dans la région respectivement en 2030 et 2035.

Londres a introduit dans son centre-ville la zone d'émissions la plus stricte au monde, l'*Ultra Low Emission Zone* (ULEZ), en avril 2019. Dans leur étude, Ma *et al.* (2021) observent que l'ULEZ n'a entraîné que de faibles améliorations de la qualité de l'air dans le contexte d'une tendance à la baisse à plus long terme des niveaux de pollution de l'air à Londres. En agrégeant les réponses à l'échelle de Londres, ils constatent une réduction moyenne de moins de 3 % pour les concentrations en NO₂, et des effets insignifiants sur les concentrations d'O₃ et de PM_{2.5}. Les auteurs concluent que l'ULEZ n'est qu'une des nombreuses politiques mises en œuvre pour lutter contre la pollution de l'air à Londres (la LEZ introduite en 2008 qui vise les véhicules lourds dans la majeure partie du Grand Londres, les zones de bus à faibles émissions, l'adaptation des bus, le programme de retrait des licences de taxis, l'obligation pour les nouveaux taxis d'avoir une capacité d'émission nulle et les normes d'émissions des véhicules Euro) et qu'on observe clairement que leur combinaison a permis d'améliorer la qualité de l'air.

À Namur, l'impact sur la qualité de l'air d'une extension du piétonnier (limitée ou étendue à l'ensemble de la Corbeille) et d'une mise en sens unique de la Petite Ceinture a également été évalué. Dans ces scénarios, le modèle projette des diminutions de concentrations en NO₂ qui dépassent les 25 % dans beaucoup de rues devenues piétonnes. Mis en sens unique, des réductions de près de 50 % sont simulées au niveau de certains tronçons de la Petite Ceinture. Cependant, la redistribution du trafic engendre également des augmentations importantes des concentrations en bordure de la zone piétonne ou au niveau des axes nouvellement empruntés.

L'impact sur la qualité de l'air de l'implantation de deux parkings de délestage à Bouge et à Erpent, avec un peu plus de 1000 emplacements au total, est négligeable avec environ 200 000 véhicules circulant à Namur par jour. De plus, ces parkings sont probablement utilisés par des personnes sensibilisées à la cause environnementale et, donc, pas nécessairement par des personnes possédant un véhicule ancien plus polluant. Une ZBE obligerait les utilisateurs d'un ancien véhicule à utiliser ces parkings. À titre de comparaison, dans le cas d'une ZBE, 17 % des véhicules seront concernés par les restrictions initialement prévues en 2022. Sans critère d'âge, 30 % des véhicules devraient stationner en périphérie du centre-ville pour atteindre les mêmes réductions d'émissions qu'avec une ZBE et les restrictions prévues en 2022. Les initiatives P+R vont néanmoins dans le bon sens pour une réduction de la congestion et un meilleur partage de l'espace entre les différents modes de déplacements. Durant la présente étude, le constat a par ailleurs été fait que le taux d'occupation de ces parkings était seulement de l'ordre de 10 %. Une analyse de sensibilité, réalisée avec le modèle de mobilité, montre que réduire les temps de parcours des transports publics de 10 et 20 % n'aurait que très peu d'impact sur le taux d'occupation de ces parkings.

À Eupen, les scénarios proposés par la Ville visaient principalement le trafic des véhicules lourds (la mise en sens unique du ring interne et l'accès interdit au centre pour ces véhicules). La disparition des poids lourds dans le centre-ville aurait un impact dans les quelques rues empruntées par ces véhicules (entre 5 et 15 % de réduction des concentrations en NO₂). Selon la modélisation toujours, la mise en sens unique du ring pour les camions aurait, quant à lui, un impact négatif avec des concentrations en NO₂ qui pourraient augmenter jusqu'à 25 % sur la Lascheterweg, l'Olengraben et

la Haasstrasse. La mise en sens unique de l'Olengraben pour tous les véhicules réduit les concentrations en NO₂ de 5 à 10 % mais transpose le problème ailleurs (la Judenstrasse notamment). Les scénarios testés engendrent soit un bénéfice faible ou ne vont pas dans le bon sens (dans le cas du ring) par rapport à une situation actuelle qui est bonne (aucun dépassement de la valeur limite annuelle européenne de 40 µg/m³). Si on considère les recommandations de l'OMS (limite à 10 µg/m³), elles ont été dépassées sur les pénétrantes et le ring interne en 2022 et des solutions pour ces axes devront être trouvées à l'avenir.

En conclusion, la réduction de la pollution atmosphérique dans les centres urbains nécessite un ensemble de mesures politiques, à multiples facettes et échelles, visant à réduire les émissions liées au transport (en ce qui concerne la présente étude), avec une coordination entre les autorités locales et régionales (voire nationales). L'outil d'aide à la décision en matière de politiques de mobilité et d'amélioration de la qualité de l'air qui a été développé dans ce projet permet clairement d'objectiver une mesure, avant sa mise en œuvre, en mettant en évidence ses effets positifs et négatifs. Les modèles développés pourront être mis à jour pour évaluer d'autres scénarios envisagés ultérieurement à Namur et à Eupen. Les nombreuses données nécessaires mais aussi la nécessité de recourir à une sous-traitance pour le développement du modèle de mobilité (qui limite l'accès à l'entièreté des développements réalisés) empêche cependant que cet outil soit directement transposable à d'autres villes wallonnes. L'ISSeP a néanmoins acquis une expertise en modélisation de la mobilité qu'elle pourra valoriser dans d'autres études d'impact. Dans le cadre de cette étude EDIT, des dispositifs de comptage du trafic (Telraam) et des mini-stations de la qualité de l'air (Saïgas), tous les deux peu coûteux, ont aussi été acquis et ont permis de récolter de nombreuses données, pour une meilleure estimation du trafic et des niveaux de pollution à Namur et à Eupen. Ce matériel est disponible et pourra être déployé pour d'autres études en Wallonie.

6 Coordination et communication

Comité d'accompagnement et réunions

Les membres de ce comité sont :

- Claudia Niessen (Bourgmestre de la Ville d'Eupen),
- Catherine Brüll (Échevine de l'Environnement, Ville d'Eupen),
- Alexandra Hilgers (Service de l'Urbanisme et de l'Environnement, Ville d'Eupen),
- Benoît Pesch (Service de l'Urbanisme et de l'Environnement, Ville d'Eupen),
- Stéphanie Scailquin (Échevine de l'Urbanisme, Ville de Namur),
- Michel Jehaes (Département des Voies Publiques, Ville de Namur),
- Michaël Petit (Service Mobilité, Ville de Namur),
- Jean-François Rixhen (Cabinet du Ministère de l'Environnement),
- Muriel Dozier (SPW-MI Mobilité et Infrastructures),
- Damien Borsu † (SPW-MI Mobilité et Infrastructures),
- Pol Gosselin (Cellule permanente Environnement-Santé),
- Stéphanie Berzigotti (Cellule permanente Environnement-Santé),
- Tom de Schutter (Union des Villes et Communes de Wallonie),
- Simon Riguelle (Directeur du Centre Régional de Crise de Wallonie),
- Stéphane Cools (Président de l'Agence wallonne de l'Air et du Climat),
- Virginie Hutsemékers (Agence wallonne de l'Air et du Climat),
- Philippe Maetz (Cellule Interrégionale de l'Environnement),
- Benjamin Bergmans (Institut Scientifique de Service Public, Direction de l'Environnement)
- Guy Gérard (Institut Scientifique de Service Public, Responsable de la Qualité de l'Air)
- Fabian Lenartz (Institut Scientifique de Service Public, Qualité de l'Air)
- Marie Dury (Institut Scientifique de Service Public, Qualité de l'Air)

Trois réunions du comité d'accompagnement ont été organisées: une réunion de lancement le 21 septembre 2021 (dans la foulée de la clôture du projet 2ZBE et dans l'attente de l'octroi de la subvention EDIT), une réunion intermédiaire le 9 février 2022 (réunion Teams) et une réunion finale le 26 septembre 2023 organisée à l'ISSeP.

Communications

Un communiqué de presse concernant l'appel à volontaires pour l'installation des dispositifs Telraam à Namur et à Eupen a été envoyé le 16 novembre 2021. L'information a été relayée par les deux Villes et les Médias via différents articles (dans « La Meuse », « RTBF.be ») et reportages (sur « Boukè », « RTBF Vivacité Namur », « Radio Contact, « RCF Radio Sud Belgique »).

Plusieurs séances d'informations pour la campagne de comptage Telraam ont été organisées en 2022: pour les citoyens participants à Namur, les 17 et 24 février (à la Bourse à Namur) et les 22 et 28 février 2022 via Teams, et les 15 et 24 mars via Teams pour les citoyens participants à Eupen.

Budget Général

Le projet a officiellement commencé le 1^{er} janvier 2021 pour s'achever le 30 juin 2023.

TABLEAU 19. PRÉVISIONS DE LA CONSOMMATION BUDGÉTAIRE.

Poste	2020	2021	2020	Total
Frais de personnel	35 000 €	134 000 €	72 800 €	241 800 €
Frais de fonctionnement	5 000 €	20 000 €	10 000 €	35 000 €
Frais d'investissement	0 €	50 000 €	0 €	50 000 €
Frais de sous-traitance	0 €	77 786 €	0 €	77 886 €
Frais généraux*	9 200 €	35 420 €	19 044 €	63 664 €
TOTAL	49 200 €	317 206 €	101 844 €	468 250 €

* Les frais généraux sont fixés forfaitairement à 23% des frais de personnel et de fonctionnement.

TABLEAU 20. CONSOMMATION BUDGÉTAIRE.

Poste	Total	Commentaires
Frais de personnel (FP)	214 552.65 €	Transfert de la différence vers FI (aethalomètre)
Frais de fonctionnement (FF)	40 156.49 €	Ministations Saïgas, licence Matlab, gestion du réseau Telraam
Frais d'investissement (FI)	58 273.65 €	Dispositifs Telraam et participation à l'achat d'un aethalomètre AE33 pour la mesure du carbone noir Transfert de la différence vers FF (ministations Saïgas)
Frais de sous-traitance (FS)	131 635.90 €	Modèle de mobilité et outil de calibration, intervention de l'AwAC à concurrence de 40 000 € dans le cadre d'une convention de partenariat de recherche et développement
Frais généraux (FG)	63 664.00 €	
TOTAL	508 282.69 €	

Collaborations

Dans le cadre du projet EDIT, nous avons accueilli une stagiaire, Ada Ceka, Master in Transportation Sciences de l'UHasselt, du 4 octobre au 10 décembre 2021. Elle a travaillé sur la collecte et le traitement des données nécessaires au développement du modèle de mobilité.

Rapport final n°... (numéro RAP du portail) – Acronyme
Institut Scientifique de Service Public – www.issep.be

7 Bibliographie

- AwAC (2018), Campagne “Tubes passifs NO₂ à Namur » : Principaux enseignements. Rapport réalisé sur base du rapport ISSeP : Minet I. (2017), Campagne de mesure du dioxyde d’azote dans l’air ambiant par tube passif.
- AwAC (2023), <https://awac.be/inventaires-demission/emission-de-nox/>
- Berkowicz B., Ketzler M., Jensen S.S., Hvidberg M., Raaschou-Nielsen O. (2008). Evaluation and application of OSPM for traffic pollution assessment for large number of street locations. *Environ. Modell. Softw.*, vol. 23, p. 296-303.
- Census (2011). https://www.census2011.be/download/statsect_nl.html
- Décret 2019/200758, <http://www.ejustice.just.fgov.be/eli/decret/2019/01/17/2019200758/moniteur>
- Hoën A., Hilster D., Király J., de Vries J. & de Bruyn S. (2021). Air pollution and transport policies at city level. Module 2: policy perspectives. Delft, CE Delft, March 2021, 67 p.
- Hooyberghs H., De Craemer S., Lefebvre W., Vranckx S., Maiheu B., Trimpeneers E., Vanpoucke C., Janssen S., Meysman F., Fierens F. (2022). Validation and optimization of the ATMO-Street air quality model chain by means of a large-scale citizen-science dataset. *Atmos. Environ.* 272(1):118946.
- IBGE (2022). Duprez L. & Bastin G. (grâce aux contributions de Dierckx S., Banken C., Ceustermans C., Dehouck S., Henrard M., De Vos T. & Goor F. Evaluation de la zone de basses émissions. Rapport 2021. 33 p.
- ISSeP (2020). Rapport final de l’étude ENVieS sur l’impact environnemental d’implantation de deux zones basses émissions sur le territoire wallon (2ZBE), 161 p., n° de rapport 2020-04972. https://www.wallonair.be/images/pdf/Rapport_final_2ZBE.pdf
- ISSeP & AWAC (2021). Réseaux de surveillance de la Qualité de l’Air - Rapport 2021, 284 p.
- Lefebvre W., Van Poppel M., Maiheu B., Janssen S., Dons E. (2013). Evaluation of the RIO-IFDM-street canyon model chain. *Atmos. Environ.*, vol. 77, p. 325-337.
- Ma, L., Graham, D. J., & Stettler, M. E. J. (2021). Has the ultra low emission zone in London improved air quality? *Environmental Research Letters*, 16(12), 124001–. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac30c1>
- MONITOR (2017). Derauw S., Gelaes S. & Pauwels C. (2019). Enquête Monitor sur la mobilité des belges. 49 p. <https://mobilit.belgium.be/fr/mobilite-durable/enquetes-et-resultats/enquete-monitor-sur-la-mobilite-des-belges>
- Santos, F. M., Gómez-Losada, Á., & Pires, J. C. M. (2019). Impact of the implementation of Lisbon low emission zone on air quality. *Journal of Hazardous Materials*, 365, 632–641. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.11.061>
- SEE (2001). Enquête socio-économique générale 2001. <https://statbel.fgov.be/fr/propos-de-statbel/que-faisons-nous/recensement-census/census-publications>
- VMM (2022). Luchtkwaliteit in de Antwerpse agglomeratie. Rapport annuel 2021. 132 p.

8 Annexes

8.1 Annexe 1 - Inventaire d'émissions par secteur en Wallonie

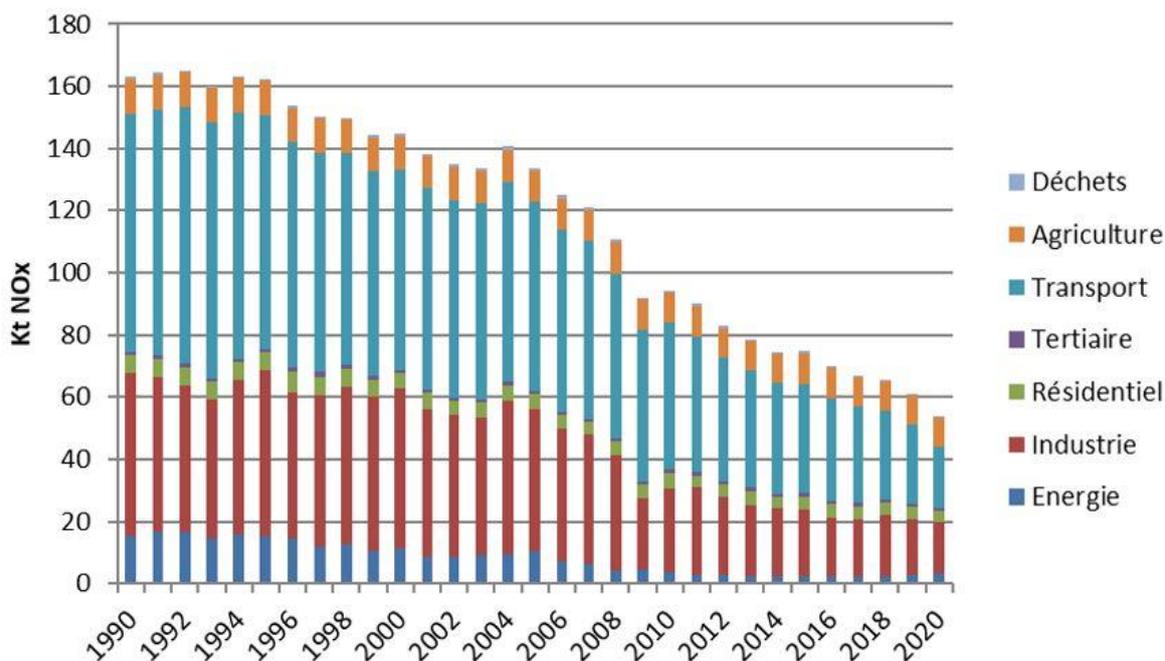


FIGURE 115. ÉVOLUTION DES ÉMISSIONS DE NO_x PAR SOURCE D'ÉMISSIONS EN WALLONIE.

TABLEAU 21. ÉVOLUTION DES ÉMISSIONS DE NO_x PAR SOURCE D'ÉMISSIONS EN WALLONIE (EN KT; AWAC, 2023).

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Energie	15.344	15.309	11.158	10.300	3.744	2.530	2.320	2.255	2.333	2.539	2.587
Industrie	52.560	53.196	51.669	45.777	26.981	21.169	18.846	18.369	19.556	18.058	16.675
Résidentiel	5.505	5.774	4.693	4.839	4.786	4.327	4.283	4.273	4.259	4.063	3.739
Tertiaire	1.074	1.222	1.026	1.029	1.184	0.988	1.007	0.950	0.947	0.932	0.849
Transport	76.480	74.953	64.741	60.760	46.981	35.208	33.190	31.297	28.498	25.491	19.754
Agriculture	11.489	11.169	10.716	10.207	9.882	9.910	9.675	9.268	9.340	9.248	9.323
Déchets	0.577	0.656	0.592	0.856	0.620	0.585	0.607	0.589	0.598	0.571	0.570
Total	163.0	162.3	144.6	133.8	94.2	74.7	69.9	67.0	65.5	60.9	53.5

Evolution émissions de NO_x (kt)

Rapport final n°... (numéro du portail) – Acronyme
 Institut Scientifique de Service Public – www.issep.be

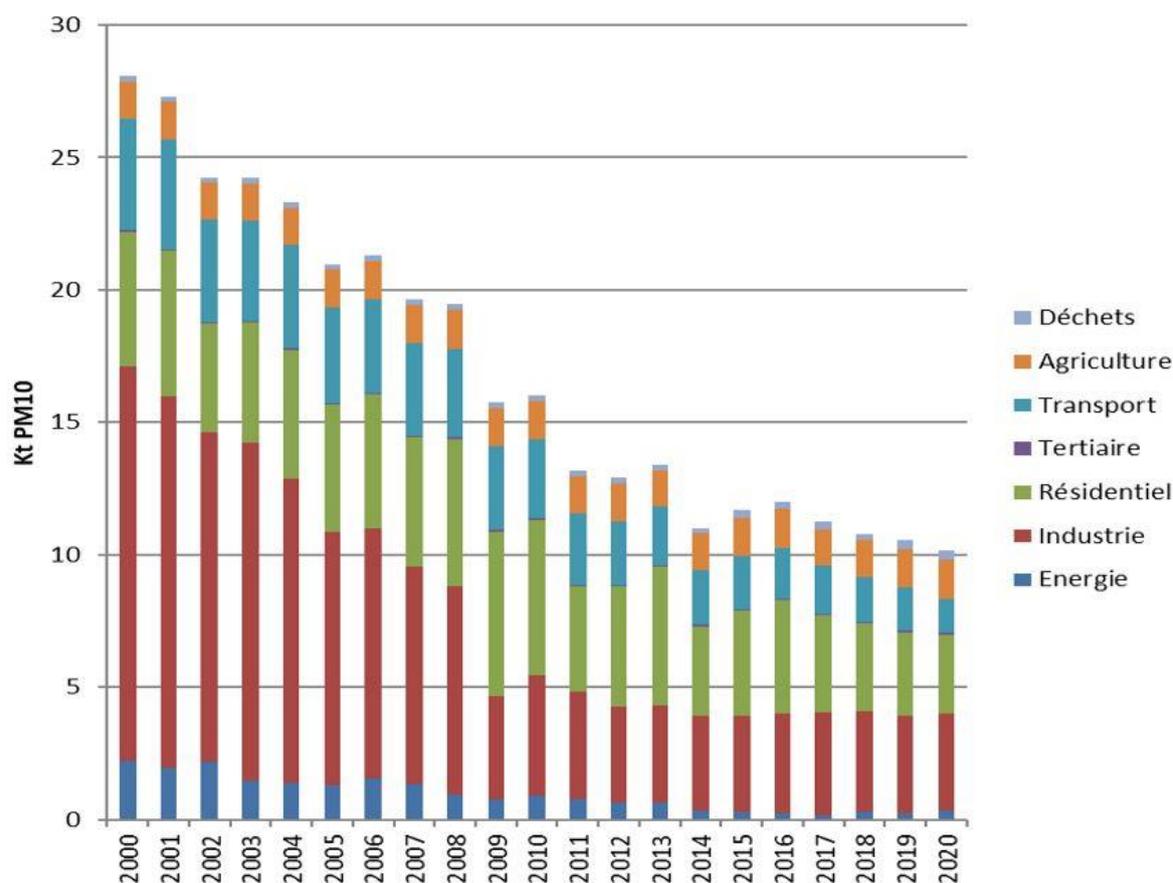


FIGURE 116. ÉVOLUTION DES ÉMISSIONS DE PM₁₀ PAR SOURCE D'ÉMISSIONS EN WALLONIE (AWAC, 2023).

TABLEAU 22. ÉVOLUTION DES ÉMISSIONS DE PM₁₀ PAR SOURCE D'ÉMISSIONS EN WALLONIE (EN KT; AWAC, 2023).

Kt PM ₁₀	2000	2005	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Énergie	2.229	1.284	0.904	0.780	0.622	0.619	0.327	0.284	0.227	0.174	0.307	0.245	0.347
Industrie	14.866	9.559	4.553	4.063	3.642	3.684	3.592	3.643	3.773	3.877	3.789	3.651	3.633
Résidentiel	5.095	4.832	5.853	3.968	4.543	5.227	3.381	3.954	4.284	3.657	3.296	3.174	2.998
Tertiaire	0.052	0.055	0.056	0.054	0.059	0.066	0.057	0.069	0.062	0.067	0.057	0.059	0.057
Transport	4.203	3.600	3.005	2.707	2.395	2.208	2.070	2.014	1.911	1.806	1.701	1.617	1.342
Agriculture	1.431	1.442	1.443	1.388	1.418	1.359	1.380	1.429	1.480	1.376	1.396	1.443	1.423
Déchets	0.195	0.199	0.206	0.211	0.231	0.235	0.178	0.287	0.281	0.314	0.242	0.375	0.383
Total	28.07	20.97	16.02	13.17	12.91	13.40	10.99	11.68	12.02	11.27	10.79	10.56	10.18

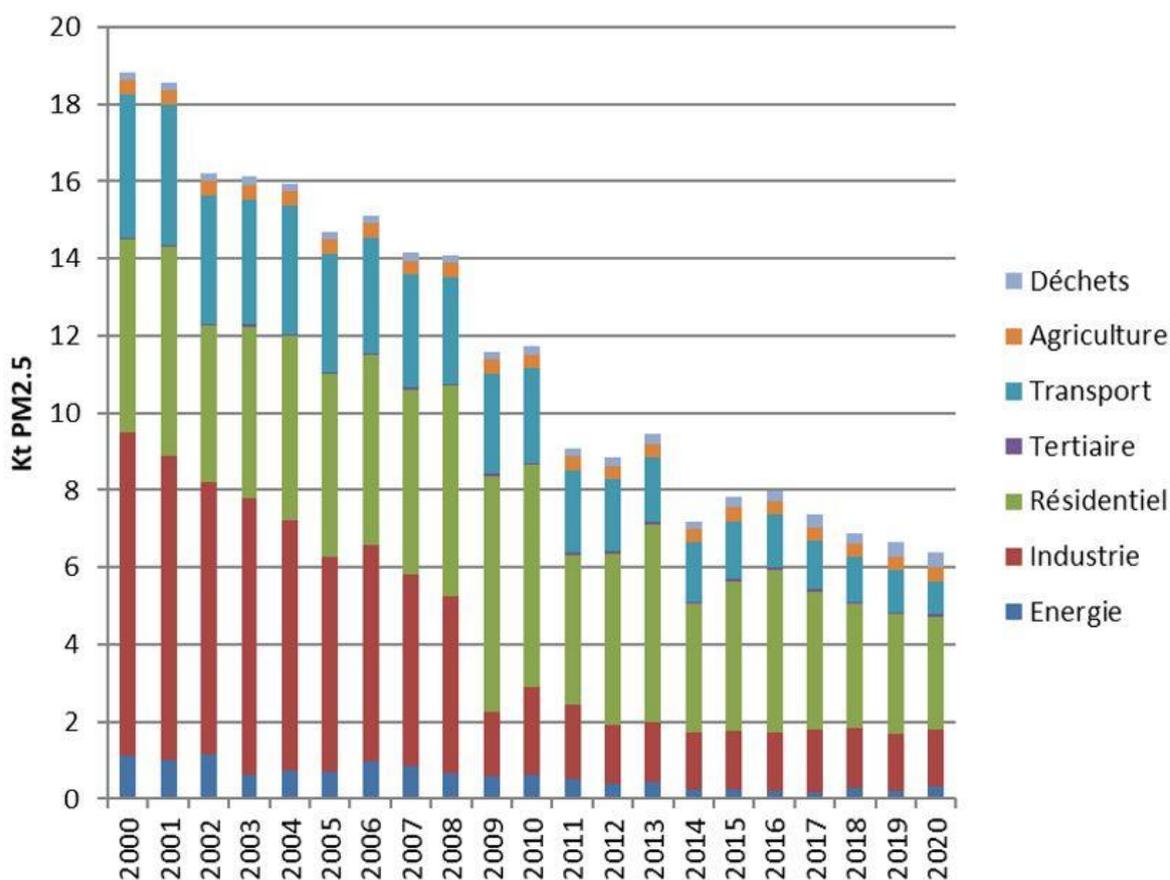


FIGURE 117. ÉVOLUTION DES ÉMISSIONS DE PM_{2.5} PAR SOURCE D'ÉMISSIONS EN WALLONIE (AWAC, 2023).

TABLEAU 23. ÉVOLUTION DES ÉMISSIONS DE PM_{2.5} PAR SOURCE D'ÉMISSIONS EN WALLONIE (EN KT; AWAC, 2023).

Kt PM _{2.5}	2000	2005	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Energie	1.128	0.692	0.609	0.509	0.403	0.443	0.253	0.250	0.200	0.155	0.265	0.213	0.300
Industrie	8.359	5.582	2.301	1.921	1.503	1.543	1.477	1.524	1.534	1.638	1.566	1.469	1.480
Résidentiel	5.006	4.736	5.735	3.884	4.447	5.120	3.316	3.870	4.195	3.576	3.226	3.107	2.934
Tertiaire	0.051	0.054	0.056	0.054	0.059	0.066	0.057	0.068	0.062	0.066	0.057	0.058	0.056
Transport	3.701	3.048	2.445	2.160	1.878	1.694	1.547	1.475	1.370	1.268	1.167	1.086	0.882
Agriculture	0.380	0.375	0.365	0.359	0.349	0.340	0.343	0.365	0.354	0.339	0.348	0.350	0.347
Déchets	0.195	0.199	0.206	0.211	0.230	0.234	0.178	0.287	0.281	0.314	0.241	0.375	0.383
Total	18.82	14.69	11.72	9.10	8.87	9.44	7.17	7.84	8.00	7.36	6.87	6.66	6.38

Evolution des émissions de BC en Wallonie

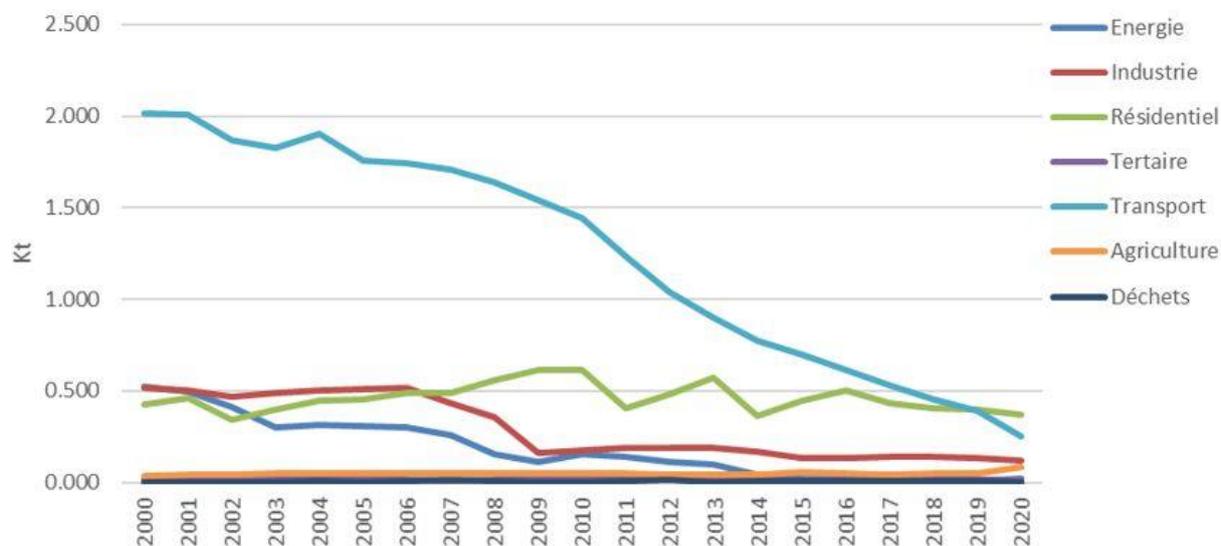


FIGURE 118. ÉVOLUTION DES ÉMISSIONS DE BC PAR SOURCE D'ÉMISSIONS EN WALLONIE (AWAC, 2023).

8.2 Annexe 2 – Localisation des comptages Telraam à Namur et à Eupen

TABLEAU 24. RUES DANS LESQUELLES DES COMPTAGES TELRAAM ONT ÉTÉ RÉALISÉS À NAMUR.

Rue	Localité	Code postal	Date de démarrage	Dernier import
Rue du Grand Feu	Bouge	5004	25/11/2021	22/10/2023
Rue des Dames Blanches	Namur	5000	16/02/2022	22/10/2023
Rue Aibye	Wierde	5100	27/03/2022	16/10/2023
Rue Joseph Durieux	Belgrade	5001	19/02/2022	14/12/2022
Route de Hannut	Namur	5021	20/02/2022	22/10/2023
Rue du Centre	Saint-Marc	5003	24/05/2022	22/10/2023
Chemin de Pottisseau	Wépion	5100	24/04/2022	16/01/2023
Avenue Jean 1er	Namur	5000	20/02/2022	22/10/2023
Rue de Bricgniot	Saint-Servais	5100	20/02/2022	15/05/2023
Rue Artoisenet	Namur	5000	20/02/2022	15/10/2022
Rue Marcel Héron	Flawinne	5020	08/03/2022	19/10/2023
Rue de Bomel	Namur	5000	20/02/2022	05/04/2023
Avenue Marcel Gourdin	Namur	5001	20/02/2022	22/10/2023
Rue des Bluets	Jambes	5100	21/02/2022	28/02/2023
Rue Auguste Leblanc	Namur	5002	22/02/2022	22/10/2023
Rue Adolphe Ortmans	Saint-Servais	5002	22/02/2022	06/06/2023
Rue Saint Fargeau Ponthierry	Temploux	5020	05/04/2022	22/10/2023
Chaussée de Perwez	Namur	5002	22/02/2022	22/10/2023
Rue Joseph Debehogne	Vedrin	5020	13/05/2022	22/10/2023
Rue des Balaives	Wierde	5100	27/02/2022	26/05/2023
Rue René Copette	Vedrin	5020	25/02/2022	22/10/2023
Rue Chaudes-Voies	Naninne	5100	17/05/2022	20/05/2022
Avenue Albert 1er	Namur	5000	26/02/2022	22/10/2023
Rue Saint-Antoine	Temploux	5020	26/02/2022	17/08/2023
Rue des Aubépinés	Namur	5101	26/02/2022	04/03/2023
Chemin des Aides	Bouge	5004	26/02/2022	14/10/2023
Rue de l'Industrie	Saint-Servais	5002	26/02/2022	22/10/2023
Rue du Pavillon	Namur	5002	26/02/2022	22/10/2023
Boulevard de la Meuse	Jambes	5100	11/03/2022	22/10/2023
Chaussée de Liège	Jambes	5100	27/02/2022	11/04/2022
Rue de Namur	Beez	5000	01/03/2022	15/08/2023
Rue des Verreries	Jambes	5100	28/02/2022	30/11/2022
Rue du Roi Chevalier	Marche-les-Dames	5024	27/06/2022	22/02/2023
Rue du Grand Feu	Namur	5004	02/03/2022	22/10/2023
Avenue de Tabora	Namur	5000	02/03/2022	22/10/2023
Rue du Grand Tige	Namur	5101	03/03/2022	22/10/2023

Rue Camille Charlier	Flawinne	5020	05/03/2022	18/09/2023
Rue Delimoy	Namur	5004	14/06/2022	22/10/2023
Montagne Sainte-Barbe	Jambes	5100	29/07/2022	20/10/2023
Rue de Dave	Namur	5100	07/03/2022	22/08/2022
Rue Émile Dessenius	Flawinne	5020	26/03/2022	03/09/2022
Chaussée de Waterloo	Saint-Servais	5002	19/03/2022	22/10/2023
Avenue Cardinal Mercier	Namur	5000	13/03/2022	21/02/2023
Rue du Petit Babin	Malonne	5020	13/03/2022	27/02/2023
Rue des Noyers	Namur	5000	13/03/2022	31/07/2023
Avenue Arthur Procès	Namur	5000	13/03/2022	04/08/2023
Avenue de la Vecquée	Malonne	5020	15/03/2022	22/10/2022
Rue Château des Balances	Namur	5000	20/03/2022	29/06/2023
Rue Chaudes-Voies	Naninne	5100	22/03/2022	22/10/2023
Rue de Gembloux	Saint-Servais	5002	20/05/2022	22/10/2023
Rue Georges Attout	Bouge	5004	25/03/2022	19/07/2022
Rue Jean-Baptiste Fichet	Jambes	5100	24/04/2022	22/10/2023
Rue Saint Nicolas	Namur	5000	14/06/2022	13/02/2023
Rue Saint-Luc	Bouge	5004	14/06/2022	23/05/2023
Avenue Cardinal Mercier	Namur	5000	12/06/2022	14/11/2022
Rue Léanne	Namur	5000	12/06/2022	22/10/2023
Rue des Carrières	Namur	5000	21/06/2022	06/05/2023
Avenue Prince de Liège	Jambes	5100	23/06/2022	22/10/2023
Léopold de Hulster	Namur	5002	24/06/2022	10/06/2023
Rue Godefroid	Namur	5000	25/06/2022	22/10/2023
Rue du Beauvallon	Saint-Servais	5002	16/12/2022	22/10/2023

TABLEAU 25. RUES DANS LESQUELLES DES COMPTAGES TELRAAM ONT ÉTÉ RÉALISÉS À EUPEN.

Rue	Localité	Code postal	Date de démarrage	Dernier import
Hisselsgasse	4700	Eupen	31/03/2022	22/10/2023
Gospert	4700	Eupen	06/04/2022	19/03/2023
Stockem	4700	Eupen	06/04/2022	24/06/2022
Talstrasse	4701	Eupen	22/04/2022	22/10/2023
Lascheterfeld	4700	Eupen	21/04/2022	25/08/2022
Bergstrasse	4700	Eupen	04/05/2022	10/10/2022
Bergkapellstrasse	4700	Eupen	16/05/2022	11/01/2023
Simarstrasse	4700	Eupen	23/05/2022	22/10/2023
Alter Malmedyer Weg	4700	Eupen	16/06/2022	22/10/2023
Neustrasse	4700	Eupen	16/06/2022	14/09/2022
Oestrassen	4700	Eupen	24/06/2022	14/09/2023
Hochstrasse	4700	Eupen	24/06/2022	22/10/2023
Haasstrasse	4700	Eupen	16/09/2022	22/10/2023

8.3 Annexe 3 - Propriétés du réseau

Dans cette annexe sont décrits tous les attributs pertinents liés aux zones, aux nœuds et aux liens.

Zone

Attribut	description
zone_id	Index unique de la zone. Cet indice est utilisé pour identifier une zone de manière unique.
niveau	La catégorie de la zone. Cet attribut peut prendre les valeurs "core", "buffer" ou "virtual_external".
code_région	Code identifiant la source primaire de la zone. <ul style="list-style-type: none">- Les zones internes situées en Belgique ont le code de région "BE" et utilisent les secteurs statistiques belges comme source primaire (https://statbel.fgov.be/en/open-data/statistical-sectors-2021).- Les zones internes situées en Allemagne ont le code de région "DE" et utilisent la grille 1kmx1km de l'EEE (https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/eea-reference-grids-2) comme source primaire.- Les zones de niveau 'virtual_external' n'ont pas de code région. Elles sont générées sur mesure.
source_id	Pour les zones qui ont une source primaire, l'identifiant de la source est l'identifiant unique de la zone dans la source primaire à partir de laquelle cette zone a été dérivée. Plus précisément, l'id_source contient l'identifiant unique de la source primaire : <ul style="list-style-type: none">- dans la colonne "CS01012021", pour les zones dont le code région est "BE" ;- dans la colonne "CELLCODE", pour les zones dont le code région est "DE".

Nœud

Attribut	description
node_id	Index unique du nœud. L'index est utilisé pour identifier un nœud de manière unique.
osmid	La plupart des nœuds sont extraits d'OSM. Il s'agit de l'identifiant du nœud sur OSM. Pour visualiser ce nœud sur OSM, on peut visiter <a href="http://www.openstreetmap.org/node/<osmid>">www.openstreetmap.org/node/<osmid> . Si aucune valeur n'est renseignée, le nœud n'est pas directement dérivé d'un nœud OSM.
type de nœud	Chaîne représentant le type de nœud, tel qu'il est dérivé d'OSM. Cet attribut n'est pas utilisé de manière fonctionnelle.
zone_id	zone_id de la zone dans laquelle le nœud est situé. Les zones externes ne sont pas étendues dans l'espace 2D, de sorte que les nœuds situés "dans" ces zones ne sont liés que virtuellement. En règle générale, un seul nœud est

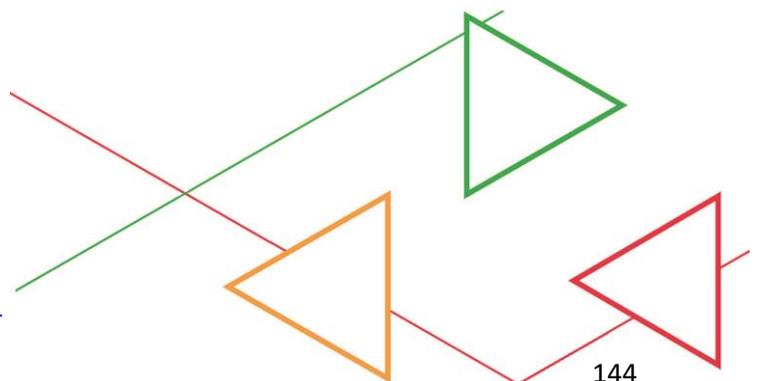
situé dans chaque zone externe virtuelle.

- centroïde** Valeur booléenne indiquant si le nœud est un centroïde. Les centroïdes sont des nœuds associés à une zone, par lesquels tout le trafic en provenance ou à destination de cette zone est injecté ou retiré du réseau. Seules les zones externes virtuelles sont associées à des centroïdes. Lorsqu'un nœud est un centroïde, il l'est pour la zone spécifiée par l'identifiant zone_id.
- x_coord** Coordonnée x du nœud dans le système de référence WGS84.
- y_coord** Coordonnée y du nœud dans le système de référence WGS84.
- géométrie** Géométrie ponctuelle, contenant les informations spatiales pour QGIS. Il s'agit essentiellement de POINT (x_coord, y_coord).

Tronçon

Attribut	description
link_id	Index unique du lien. L'index est utilisé pour identifier un lien de manière unique.
osmid	La plupart des liens sont extraits d'OSM. Il s'agit de l'identifiant de la voie sur OSM. Pour visualiser cette voie sur OSM, on peut visiter <a href="http://www.openstreetmap.org/way/<osmid>">www.openstreetmap.org/way/<osmid> . Lorsqu'aucune valeur n'est renseignée, le lien n'est pas directement dérivé d'un nœud OSM. Il peut y avoir plusieurs liens avec le même osmid : une voie sur OSM peut avoir plusieurs nœuds intermédiaires et les deux directions d'une voie peuvent avoir le même osmid.
voie unique	Booléen indiquant si le même lien existe également dans la direction opposée. Si oneway est vrai, le même lien n'a pas de contrepartie dans la direction opposée.
voies	Le nombre de voies dont dispose cette liaison.
lanes_orig	Le nombre de voies qui ont été associées à l'origine à un lien sur OSM. Pour les liaisons qui ne sont pas à sens unique, lanes_orig est la somme des voies dans les deux sens.
autoroute	Le type d'autoroute de la liaison. Par ordre décroissant d'importance, les valeurs possibles sont autoroute, liaison autoroutière, primaire, liaison primaire, secondaire, liaison secondaire, tertiaire, liaison tertiaire, résidentielle et rue vivante,
vitesse maximale	Vitesse maximale autorisée en km/h sur une liaison.
la longueur	La longueur d'un lien en m.
nom	Le nom de la rue à laquelle appartient le lien.
accès	Décrit l'accessibilité juridique d'un élément. Cet attribut n'est pas utilisé de manière fonctionnelle.
voiture accessible	Booléen indiquant si le lien est accessible aux voitures.
camion_accessible	Booléen indiquant si le lien est accessible aux camions.

- vélo_accessible** Booléen indiquant si le lien est accessible aux cyclistes.
- pied_accessible** Booléen indiquant si le lien est accessible aux piétons.
- capacité** Capacité de chaque voie sur cette liaison en pcu/h (unités de voitures particulières par heure).
- connecteur** Booléen indiquant si ce lien est un connecteur. Les connecteurs sont des liens virtuels qui relient les nœuds centroïdes au réseau routier physique réel. Les connecteurs relient toujours un centroïde à un nœud non centroïde et vice versa. Les connecteurs ne sont pas dérivés d'OSM. Ainsi, certains attributs sont remplis avec des valeurs par défaut ou ne sont pas remplis du tout.
- orienté** Booléen indiquant si seuls les voyages dirigés sont autorisés sur cette liaison. À l'heure actuelle, tous les liens sont des liens dirigés.
- alpha** α valeur pour la fonction volume-retard du BPR (Bureau of Public Roads).
- bêta** β valeur pour la fonction volume-retard du BPR (Bureau of Public Roads).
- coût_extra** Coût additionnel de la pénalité en secondes associé à cette liaison.
- from_node_id** node_id du nœud auquel ce lien est connecté en amont.
- to_node_id** node_id du nœud auquel ce lien est connecté en aval.
- géométrie** Géométrie de ligne, contenant les informations spatiales de ce lien pour QGIS.



8.4 Annexe 4 – Comptages utilisés pour le calibrage du modèle de mobilité

TABLEAU 26. COMPTAGES RADAR ISSEP UTILISÉS À EUPEN.

Nombre	LINK_ID	Nom	Voitures 8-9h	Camions 8-9h	Voitures 17-18h	Camions 17-18h
1	6378	Aachenerstrasse NB	171	1	215	4
2	230	Aachenerstrasse SB	140	14	193	4
3	4593	Bergkapelstrasse EB	75	6	80	1
4	4134	Bergkapelstrasse WB	48	0	73	2
5	867	Hisselgasse SB	32	2	61	3
6	38	Hisselgasse NB	60	1	23	0
7	1593	Hookstrasse SB	151	16	297	103
8	8165	Hookstrasse NB	291	231		
9	11287	Hufengasse EB	273	12	201	1
10	10781	Hufengasse WB	69	0	51	1
11	12373	Hutte NB	26	8	92	4
12	12374	Hutte SB	86	9	56	3
13	44	Judenstrasse EB	51	2	93	2
14	42	Judenstrasse WB	70	8	107	3
15	7829	Kaperberg SB	340	40	477	26
16	4035	Kaperberg NB	408	42	412	22
17	755	Kirchstrasse SB	382	24	433	19
18	11431	Klosterstrasse NB	281	1	272	0
19	11211	Lascheterweg NB	295	12	308	6
20	12674	Lascheterweg SB	437	30	557	11
21	4072	Nispert EB	77	14	96	15
22	7669	Nispert WB	65	7	30	7

23	21406	Norethstrasse NB	161	3	86	0
24	16766	Norethstrasse SB	120	3	152	2
25	8521	Schelterslag NB	1	0	3	0
26	3771	Schelterslag SB	6	0	13	0
27	11421	Schnellewindgasse NB	39	1	47	0
28	12148	Schnellewindgasse SB	61	2	89	3
29	12011	Schonefelderweg WB	24	0	28	0
30	11246	Schonefelderweg EB	23	3	55	2
31	8720	Schulstrasse EB	88	56	145	45
32	3637	Simarstrasse SB	228	0	106	0
33	3642	Simarstrasse NB	100	0	140	0
34	11297	Vervierserserstrasse WB	94	18	193	18
35	23695	Vervierserserstrasse EB	253	17	142	15
36	12388	Weimerstrasse SB	136	8	135	5
37	12336	Weimerstrasse NB	121	5	168	3
38	4050	Winkelstrasse EB	116	6	150	1
39	3101	Winkelstrasse WB	113	1	126	3
40	3098	Zur Nohn NB	24	0	23	0
41	7284	Zur Nohn SB	41	0	36	0

TABLEAU 27. COMPTAGES RADAR ISSEP UTILISÉS À NAMUR.

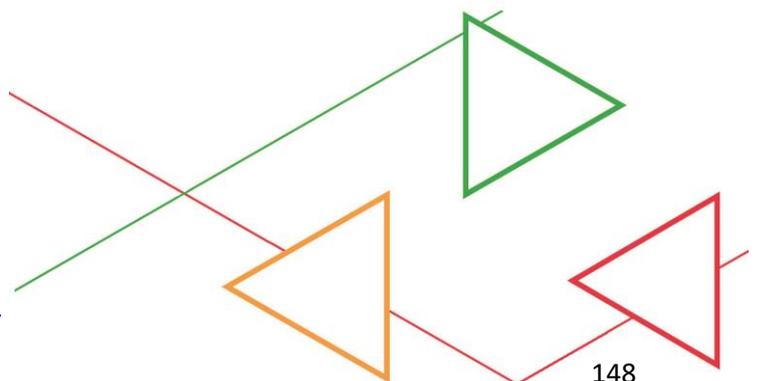
Nombre	LINK_ID	Nom	Voitures 8-9h	Camions 8-9h	Voitures 17-18h	Camions 17-18h
1	460	Rue d'Erpent Val SB	102	1	137	2
2	6137	Av. du Gouverneur Bovesse SB	803	33	618	27
3	22430	Ch. de Liège NB	377	9	448	5
4	2928	Rue du Dave SB	551	8	453	4

5	2227	Rue de l'Armée Grouchy EB	87	5	339	4
6	15979	Rue Deneumoustier SB	202	4	183	5
7	1072	Bld du Nord WB	185	2	450	3
8	12139	Rue du Bricgniot NB	19	3	20	0
9	2214	Rue de Bruxelles EB	278	45	267	22
10	16780	Av. Des Champs Elysées WB	214	6	149	7
11	3855	Rue d'Erpent Val NB	82	2	107	1
12	529	Av. du Gouverneur Bovesse NB	400	34	375	9
13	19202	Ch. De Liège SB	420	12	460	3
14	8298	Rue du Dave NB	251	8	373	6
15	12990	Rue de l'Armée Grouchy WB	318	3	142	4
16	6346	Rue Deneumoustier NB	236	3	254	3
17	1074	Bld du Nord EB	56	7	154	4
18	3284	Rue du Bricgniot SB	10	1	27	1
19	2213	Rue de Bruxelles WB	194	8	183	2
20	19158	Rue des Carmes SB	34	3	109	2
21	15821	Av. Des Champs Elysées EB	240	14	333	3

TABLEAU 28. COMPTAGES ANPR TRAITÉ À NAMUR.

Nombre	LINK_ID	Nom	Voitures 8-9h	Camions 8-9h	Voitures 17-18h	Camions 17-18h
1	7239	A01A01	1206	7	1270	3
2	22635	A02A02	1525	0	861	10
3	210	A03A01	722	56	410	57
4	5350	A03A02	2137	14	991	13
5	3334	A03A03	1499	0	886	1
6	2872	A04A01	671	0	595	0

7	17485	A04A02	1142	37	1159	28
8	16613	A05A02	1353	0	970	3
9	8157	A10A01	1096	4	975	0
10	17483	A10A02	984	0	917	0
11	8166	A10A03	511	4	593	2
12	12919	A10A05	882	0	954	2
13	14774	A10A07	873	7	854	87
14	17108	A10A08	816	0	644	0
15	5236	A10A11	915	1	760	0
16	14494	A10A11bis	813	0	929	0
17	1891	A10A13	1153	14	1268	6
18	1943	A10A14	552	0	513	0
19	22300	A06A00	851	0	612	0
20	18185	A10A15	1052	1	835	4
21	11773	A11A05	206	13	167	10
22	2212	A11A07	640	15	596	21
23	3303	A11A09	357	0	337	0
24	21240	anpr-ange	76	0	79	0
25	20476	anpr-fer	224	6	207	1



8.5 Annexe 5 - Évolution de la flotte des villes de Namur, Charleroi et Liège de 2018 à 2030

TABLEAU 29. ÉVOLUTION DE LA FLOTTE DE VÉHICULES À NAMUR, CHARLEROI ET LIÈGE DE 2018 À 2030 (PROJECTION EXPONENTIELLE À PARTIR DES VALEURS DE LA PÉRIODE 2018-2021).

ALL	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Euro 0	19.508	18.877	18.293	17.797	17.234	16.713	16.208	15.718	15.243	14.782	14.335	13.902	13.482
Euro 1	6.810	5.347	4.463	3.858	3.123	2.587	2.142	1.774	1.469	1.217	1.008	835	691
Euro 2	28.871	22.384	17.912	14.771	11.635	9.306	7.443	5.954	4.762	3.809	3.046	2.437	1.949
Euro 3	67.791	55.967	46.733	39.264	32.600	27.179	22.660	18.892	15.750	13.131	10.948	9.127	7.609
Euro 4	219.172	195.044	176.840	159.583	143.345	129.059	116.197	104.616	94.190	84.803	76.351	68.742	61.891
Euro 5	290.110	269.994	254.270	239.337	224.066	210.235	197.257	185.081	173.656	162.936	152.878	143.441	134.587
Euro 6	257.691	318.551	375.454	429.431	518.349	614.183	727.736	862.284	1.021.706	1.210.604	1.434.426	1.699.629	2.013.864

TABLEAU 30. ÉVOLUTION DE LA FLOTTE DE VÉHICULES DIESEL À NAMUR, CHARLEROI ET LIÈGE DE 2018 À 2030 (PROJECTION EXPONENTIELLE À PARTIR DES VALEURS DE LA PÉRIODE 2018-2021).

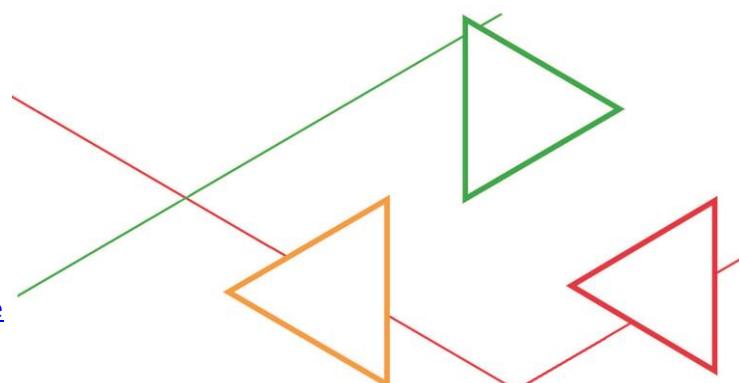
DIESEL	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Euro 0	2.837	2.651	2.544	2.439	2.310	2.198	2.092	1.991	1.895	1.804	1.717	1.634	1.555
Euro 1	2.235	1.694	1.389	1.182	932	754	611	495	401	324	263	213	172
Euro 2	11.550	8.535	6.573	5.254	3.964	3.049	2.345	1.804	1.387	1.067	821	631	486
Euro 3	51.475	41.930	34.514	28.421	23.272	19.099	15.673	12.862	10.556	8.663	7.109	5.834	4.788
Euro 4	146.841	129.449	116.400	103.067	91.764	81.647	72.646	64.636	57.510	51.170	45.528	40.509	36.043
Euro 5	201.653	185.829	173.432	161.196	149.491	138.817	128.905	119.700	111.153	103.216	95.846	89.002	82.647

Rapport final n°... (numéro du portail) – Acronyme
 Institut Scientifique de Service Public – www.issep.be

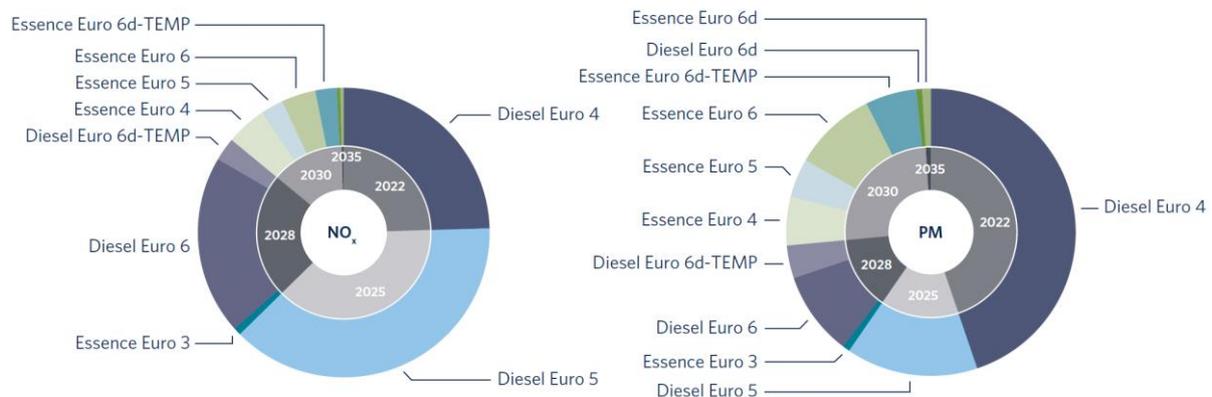
Euro 6	118.431	139.187	162.560	182.344	211.041	243.970	282.037	326.043	376.916	435.727	503.713	582.308	673.167
---------------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------

TABLEAU 31. ÉVOLUTION DE LA FLOTTE DE VÉHICULES ESSENCE ET CNG À NAMUR, CHARLEROI ET LIÈGE DE 2018 À 2030 (PROJECTION EXPONENTIELLE À PARTIR DES VALEURS DE LA PÉRIODE 2018-2021).

ESS / CNG	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Euro 0	16.671	16.226	15.748	15.358	14.927	14.520	14.125	13.740	13.366	13.002	12.648	12.304	11.969
Euro 1	4.574	3.653	3.074	2.676	2.194	1.836	1.537	1.286	1.076	901	754	631	528
Euro 2	17.321	13.849	11.339	9.517	7.700	6.307	5.165	4.231	3.465	2.838	2.324	1.904	1.559
Euro 3	16.316	14.037	12.220	10.843	9.383	8.186	7.142	6.231	5.436	4.743	4.138	3.610	3.150
Euro 4	72.330	65.595	60.440	56.515	51.661	47.584	43.829	40.370	37.184	34.250	31.547	29.058	26.764
Euro 5	88.457	84.166	80.838	78.142	74.700	71.683	68.787	66.009	63.342	60.783	58.328	55.972	53.711
Euro 6	139.260	179.364	212.894	247.087	306.841	370.734	447.932	541.205	653.901	790.062	954.577	1.153.349	1.393.511

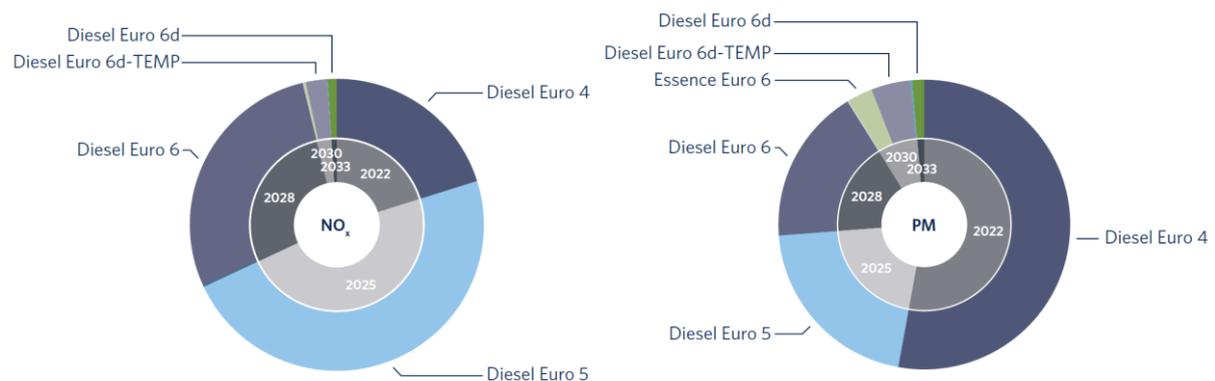


8.6 Annexe 6 - Part estimée des émissions totales de NO_x et PM pour les véhicules M1 et N1 à Bruxelles en automne 2020



Part estimée des émissions totales d'oxydes d'azote (NO_x) et de particules (PM) pour les voitures particulières circulant à Bruxelles au cours de l'automne 2020, par norme d'émissions et type de carburant. Le cercle central répartit les émissions totales à l'année à laquelle les catégories de véhicules seront assujetties aux restrictions de la LEZ.

FIGURE 119. PART ESTIMÉE DES ÉMISSIONS TOTALES DE NO_x ET DE PM POUR LES VOITURES PARTICULIÈRES (CATÉGORIE M1) CIRCULANT À BRUXELLES EN AUTOMNE 2020 (IBGE, 2022).



Part estimée des émissions totales d'oxydes d'azote (NO_x) et de particules (PM) pour les véhicules utilitaires légers circulant à Bruxelles au cours de l'automne 2020, par norme d'émissions et type de carburant. Le cercle central répartit les émissions totales à l'année à laquelle les catégories de véhicules seront assujetties aux restrictions de la LEZ.

FIGURE 120. PART ESTIMÉE DES ÉMISSIONS TOTALES DE NO_x ET DE PM POUR LES VÉHICULES UTILITAIRES LÉGERS (CATÉGORIE N1) CIRCULANT À BRUXELLES EN AUTOMNE 2020 (IBGE, 2022).



Institut scientifique
de service public

Rue du Chéra 200
4000 LIÈGE

Zoning Schweitzer
Rue de la Platinerie, 14
7340 COLFONTAINE

Rapport final n°... (numéro du portal) – Acronyme
Institut Scientifique de Service Public – www.issep.be



Wallonie

