Réflexion sur les méthodes d'évaluation environnementale des mesures de gestion des déplacements et du trafic : analyse critique et proposition d'un nouveau cadre conceptuel

Eugénie Brutti-Mairesse

▶ **To cite this version:**

Eugénie Brutti-Mairesse. Réflexion sur les méthodes d'évaluation environnementale des mesures de gestion des déplacements et du trafic : analyse critique et proposition d'un nouveau cadre conceptuel. Etudes de l'environnement. INSA de Lyon, 2013. Français. NNT : 2013-ENTP-0002 . tel-00921567

HAL Id: tel-00921567

https://theses.hal.science/tel-00921567

Submitted on 20 Dec 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

N° d'ordre 2013-ENTP-0002 Année 2013

THÈSE

Réflexion sur les méthodes d'évaluation environnementale des mesures de gestion des déplacements et du trafic : analyse critique et proposition d'un nouveau cadre conceptuel

Présentée devant
L'institut national des sciences appliquées de Lyon

Pour obtenir
Le grade de docteur

Ecole doctorale : MÉCANIQUE, ÉNERGÉTIQUE, GÉNIE CIVIL et ACOUSTIQUE
Ecole Centrale de Lyon – Université Claude Bernard-Lyon 1 – INSA Lyon
Spécialité : Génie Civil

Par
Eugénie Brutti-Mairesse

Soutenue le 12/03/2013 devant la Commission d'Examen composée de :

Michel ANDRÉ, Directeur de Recherche	Co-directeur de thèse
Bernard BOURGES, Professeur	Examinateur
Eric CORNELIS, Senior Research Associate	Rapporteur
Gérard HÉGRON, Directeur de Recherche	Rapporteur
Ludovic LECLERCQ, Directeur de Recherche	Directeur de thèse
Marcel MIRAMOND, Professeur	Examinateur

Cette thèse a été préparée au LTE, Laboratoire Transport Environnement (Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux)

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier sincèrement mes directeurs de thèse, Ludovic Leclercq et Michel André pour m'avoir fait confiance malgré les faibles connaissances dont je disposais dans le domaine des transports et des émissions de polluants, et pour leur engagement dans cette thèse. Je leur suis reconnaissante d'avoir toujours été conciliants avec mes contraintes familiales.

Mes remerciements vont également à Eric Cornélis et Gérard Hégron qui ont eu la gentillesse de rapporter cette thèse, merci pour le temps de lecture. Ils ont également contribué par leurs nombreuses remarques et suggestions à améliorer la qualité de ce mémoire, et je leur en suis très reconnaissante.

Je remercie les examinateurs de cette thèse, Bernard Bourges et Marcel Miramond d'avoir bien voulu lire et juger ces travaux.

Je remercie l'ensemble des partenaires du projet EvalPDU et particulièrement Jacques Bougnol, Mathieu De Kerleau et Annie Freneau qui ont effectué l'ensemble des simulations du trafic pour le développement de l'approche présentée en dernière partie. Merci à eux pour leur gentillesse, leur disponibilité et leurs réponses rapides à l'ensemble de mes demandes et de mes interrogations.

Je tiens aussi à mentionner le plaisir que j'ai eu à travailler au sein du LTE ; et j'en remercie tous ses membres. Des remerciements particuliers à : Anne-Laure, Anne-Christine, Amanda, Véronique, Alexandre, Sonia, Clément, Vincent, Anaïs ainsi qu'à : Agnès (merci d'avoir pris le temps de considérer les requêtes statistiques d'une novice et d'avoir été aux petits soins avec moi à la fin de cette thèse), Patricia, Masoud, Roger, Didier...

Merci à Aurélie de m'avoir gentiment accueilli dans son bureau ces dernières années.

Mes longs trajets quotidiens auraient sans doute été plus fatiguant et moins conviviaux sans mes covoitureurs : Attila, Murielle, Eric et Floriane. J'ai ainsi pu réduire mon impact écologique et adapter mes actions à mon domaine de recherche !

Cette thèse n'aurait pu débuter et s'achever sans le soutien inconditionnel de ma famille : mes grands-parents, mes parents et mes frère, sœurs, beau-frère ainsi que l'ensemble de ma famille. Je suis entièrement reconnaissante envers mes parents de m'avoir donné la chance de poursuivre de longues études. Leur présence dans les moments difficiles et de joie est inestimable.

A mes amis et particulièrement les Jem's, les copains du Québec et tous les autres, qui m'ont permis de m'évader ces dernières années, pas assez, mais on va se rattraper, merci.

Comment ne pas mentionner mon mari, Sébastien, qui me supporte au quotidien malgré mon caractère pas toujours facile, surtout dans les moments de stress ! Merci pour ta présence et tes éloges subjectifs. Un grand Mea Culpa à notre fils, Malo, qui n'a connu pour l'instant que des parents-doctorants avec tout ce que cela implique. C'est promis on va se poser un peu. À notre petite dernière, qui aura vécu ces fins de thèses in utéro, mais pour qui, je l'espère nous aurons plus de temps à consacrer dans les premières années de sa vie.

Je dédie cette thèse à mon grand-père, Jean-François

Sommaire

SOMMAIRE 5
LISTE DES TABLEAUX 9
LISTE DES FIGURES 11
LISTE DES ABREVIATIONS 14
INTRODUCTION GENERALE 17

CHAPITRE 1 LES MESURES DE GESTION DES DEPLACEMENTS ET DU TRAFIC, CLASSIFICATION 29

INTRODUCTION 29
1. CADRE D'ANALYSE DES MESURES DE GESTION DES DEPLACEMENTS ET DU TRAFIC 32
1.1. OBJECTIFS 33
1.2. CIBLES D'ACTIONS D'UNE MESURE 33
1.3. MOYENS D'ACTIONS 33
1.4. EFFETS OBSERVÉS 33
1.5. IMPACTS OBSERVÉS EN TERMES D'ÉMISSIONS DE POLLUANTS, DE CONSOMMATION D'ÉNERGIE ET D'ÉMISSIONS DE GES 35
2. LES MESURES DE GESTION DES DEPLACEMENTS ET DU TRAFIC 36
2.1. MESURES PERMETTANT D'AUGMENTER L'ATTRACTIVITÉ DES TRANSPORTS EN COMMUN. 36
2.2. MESURES PORTANT SUR L'ATTRACTIVITÉ DES MODES DOUX 38
2.3. MESURES FAVORISANT L'INTERMODALITÉ 39
2.4. MESURES AFFECTANT LE RÉSEAU DE VOIRIES 43
2.5. ORGANISATION DU TRANSPORT DE MARCHANDISES EN MILIEU URBAIN 46
2.6. ORGANISATION DU STATIONNEMENT 47
2.7. RESTRICTION SPATIALE DE L'UTILISATION DE LA VOITURE 48
2.8. ARTICULATION ENTRE TRANSPORT ET URBANISME 49
2.9. INFORMATION SUR LA MOBILITÉ 50
2.10. MESURES AFFECTANT LE PARC DE VÉHICULES 50
2.11. AUTRES MESURES 51
2.12. COMBINAISON DE MESURES 53
2.13. CONCLUSION 53
3. CLASSIFICATION DES MESURES 54
3.1. CLASSIFICATIONS EXISTANTES 54
3.2. CLASSIFICATION PROPOSÉE DANS LE CADRE DE L'ÉVALUATION DE L'IMPACT DES MESURES SUR LES ÉMISSIONS DE POLLUANTS 61
CONCLUSION 65

CHAPITRE 2 LES METHODES D'EVALUATION DE L'IMPACT DES MESURES DE GESTION DES DEPLACEMENTS ET DU TRAFIC SUR LA QUALITE DE L'AIR 69

INTRODUCTION 69
1. LES PDU ET LES PROBLEMATIQUES ENVIRONNEMENTALES 71
1.1. QU'EST-CE QU'UN PDU ? 72
1.2. LE CADRE RÉGLEMENTAIRE DU PDU 72
1.3. COMMENT LES PDU PRENNENT EN COMPTE LES PROBLÉMATIQUES ENVIRONNEMENTALES : CONSTAT 73

1.4. UNE ÉVOLUTION DEPUIS LA MISE EN PLACE DES ÉVALUATIONS ENVIRONNEMENTALES ? . 76
1.5. CONCLUSION ... 77

2. LES METHODES D'EVALUATION ENVIRONNEMENTALE ET LEUR POTENTIELLE APPLICATION DANS LE CADRE DES EVALUATIONS ENVIRONNEMENTALES DES MESURES ... 79

2.1. LA PRISE EN COMPTE DE LA POLLUTION DE L'AIR, DU BRUIT, ET DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE DANS LES PDU (CERTU, 1999) ... 79
2.2. LA MÉTHODE D'ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE DES PLANS ET PROGRAMMES D'INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT (MICHEL & MONIER, 2001) ... 80
2.3. NOTE MÉTHODOLOGIQUE SUR LES ÉTUDES D'ENVIRONNEMENT DANS LES PROJETS ROUTIERS (CERTU, 2001A) ... 80
2.4. BILAN DES PRATIQUES SUR L'ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE DES PLANS ET PROGRAMMES DE TRANSPORT EN FRANCE (INGEROUTE, AVRIL 2000) ... 81
2.5. LES OBSERVATOIRES DES PDU : DE LA MÉTHODE AUX INDICATEURS (CERTU, OCTOBRE 2001) 81
2.6. LA CIRCULAIRE DU 12/04/06 RELATIVE À L'ÉVALUATION DE CERTAINS PLANS, SCHÉMAS, PROGRAMMES ET AUTRES DOCUMENTS DE PLANIFICATION AYANT UNE INCIDENCE NOTABLE SUR L'ENVIRONNEMENT (CIRCULAIRE, 12/04/06) ... 82
2.7. LE DIAGNOSTIC ENERGIE ENVIRONNEMENT DÉPLACEMENT (DEED) ... 84
2.8. LE BILAN CARBONE ... 84
2.9. L'ÉVALUATION QUALITATIVE ... 85
2.10. CONCLUSION ... 86

3. ANALYSE CRITIQUE DES EVALUATIONS ENVIRONNEMENTALES DES PDU ... 87

3.1. L'ORGANISME RÉALISANT L'ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE ... 87
3.2. L'ÉCHELLE SPATIALE DE L'ÉVALUATION ... 88
3.3. LE DIAGNOSTIC OU ÉTAT INITIAL ... 90
3.4. LA DÉFINITION DES OBJECTIFS EN TERMES D'AMÉLIORATION DE LA QUALITÉ DE L'AIR, DE CONSOMMATION D'ÉNERGIE ET DE DIMINUTION DES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE ... 93
3.5. L'ÉLABORATION DE SCÉNARIOS ET LES HYPOTHÈSES ÉNONCÉES ... 94
3.6. LES DONNÉES UTILISÉES DANS L'ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE ... 96
3.7. LES DONNÉES SUR LA QUALITÉ DE L'AIR ... 99
3.8. LES GAZ À EFFET DE SERRE ... 100
3.9. LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE ... 102
3.10. L'ÉCHELLE TEMPORELLE DE L'ÉVALUATION ... 103
3.11. LES INDICATEURS ... 103
3.12. CONCLUSION ... 105

CONCLUSION ... 107

CHAPITRE 3 LES OUTILS DE MODELISATION (DEPLACEMENTS, TRAFIC ET EMISSIONS DE POLLUANTS) ... 109

INTRODUCTION ... 109

1. LES MODELES D'ESTIMATION DES DEPLACEMENTS ET DU TRAFIC ... 113

1.1. LES MODÈLES STATIQUES DE TRAFIC ... 114
1.2. LES MODÈLES DYNAMIQUES DE TRAFIC ... 125
1.3. CONCLUSION ... 129

2. LES EMISSIONS DE POLLUANTS ISSUES DU TRAFIC ... 130

2.1. LES POLLUANTS ... 130
2.2. APPROCHES DE CALCUL DES ÉMISSIONS DE POLLUANTS ... 135
2.3. LES PHÉNOMÈNES D'ÉMISSIONS ... 136

3. LES MODELES DE CALCUL DES EMISSIONS DE POLLUANTS DU TRAFIC ROUTIER ... 141

3.1. MODÈLES BASÉS SUR LES CONSOMMATIONS DE CARBURANT ... 142
3.2. LES MODÈLES UTILISANT DES FACTEURS D'ÉMISSION AGRÉGÉS ... 143
3.3. MODÈLES DÉSAGRÉGÉS BASÉS SUR LES VITESSES MOYENNES ... 144
3.4. MODÈLES S'APPUYANT SUR UNE DESCRIPTION FINE DU TRAFIC ... 151
3.5. MODÈLES MODAUX ET INSTANTANÉS ... 156
3.6. CONCLUSION ... 162

4. LE COUPLAGE DES MODELES D'ESTIMATION DU TRAFIC ET DES EMISSIONS ... 164

4.1. MODÈLE DE TRAFIC STATIQUE COUPLÉ AVEC UN MODÈLE DÉSAGRÉGÉ D'ÉMISSIONS BASÉ SUR LES VITESSES MOYENNES 164
4.2. MODÈLE DE TRAFIC DYNAMIQUE MICROSCOPIQUE COUPLÉ AVEC UN MODÈLE INSTANTANÉ D'ÉMISSIONS 164
4.3. CONCLUSION 165

CONCLUSION 167

CHAPITRE 4 LA REPRESENTATION DU TRAFIC ET DES EMISSIONS DE POLLUANTS DANS LES MODELES 171

INTRODUCTION 171

1. REPRESENTATION DES EFFETS ET DES IMPACTS DES MESURES DANS LES MODELES DE TRAFIC ET D'EMISSIONS 176

1.1. LES POLITIQUES CYCLABLES 177
1.2. REPRÉSENTATION DES PRATIQUES D'INTERMODALITÉ : CAS DES PARCS RELAIS (P+R) 179
1.3. LES POLITIQUES DE STATIONNEMENT (HORS P+R) 181
1.4. LES ZONES 30 182
1.5. BAISSE DE VITESSE SUR PÉRIPHÉRIQUE 184
1.6. CONCLUSION 185

2. LA REPRESENTATION DES DEPLACEMENTS ET DU TRAFIC DANS LES MODELES 187

2.1. LOCALISATION DES ORIGINES ET DES DESTINATIONS DES DÉPLACEMENTS 187
2.2. QUANTIFICATION / NOMBRE DE DÉPLACEMENTS 189
2.3. RÉPARTITION MODALE DES DÉPLACEMENTS 192
2.4. RÉPARTITION TEMPORELLE DES DÉPLACEMENTS ET DU TRAFIC 194
2.5. SPATIALISATION DU TRAFIC 196
2.6. CONCLUSION 198

3. LA REPRESENTATION DES EMISSIONS DE POLLUANTS DANS LES MODELES 199

3.1. APPROXIMATIONS LIÉES AUX MODÈLES 199
3.2. APPROXIMATIONS LIÉES AUX HYPOTHÈSES DE CALCUL D'ÉMISSION 201
3.3. APPROXIMATIONS LIÉES À LA QUANTIFICATION DU PARC, DES VÉHICULES, DU NOMBRE DE DÉMARRAGE, DES TRAJETS 203
3.4. LES CONDITIONS CINÉMATIQUES DES VÉHICULES (VITESSE, CONDITIONS DE CIRCULATION) 207
3.5. CONCLUSION 208

CONCLUSION 209

CHAPITRE 5 DE LA MISE EN ŒUVRE DES OUTILS (MODELES DE DEPLACEMENT ET D'EMISSIONS DE POLLUANTS) POUR L'EVALUATION DES MESURES 213

INTRODUCTION 213

1. OUTLINE OF AN EXPLORATORY APPROACH FOR CHARACTERIZING POLLUTANT EMISSIONS RESPONSE TO MOBILITY / TRAFFIC MEASURES 218

1.1. PRINCIPLES 218
1.2. OBJECTIVES 221
1.3. METHOD 221
1.4. SIMULATION CONFIGURATIONS 223
1.5. RESULTS 235
1.6. CONCLUSION 314

2. MISE EN PRATIQUE DE LA METHODE SUR LE CAS DE LA MESURE « MISE EN PLACE D'UN TCSP + P+R » 315

2.1. REPRÉSENTATION DE L'IMPACT DE LA MESURE AVEC L'APPROCHE CLASSIQUE 315
2.2. REPRÉSENTATION DE L'IMPACT DE LA MESURE AVEC L'APPROCHE DÉVELOPPÉE 319
2.3. COMPARAISON DES DEUX APPROCHES 323

CONCLUSION 325

CONCLUSION ET PERSPECTIVES 328
BIBLIOGRAPHIE 333
ANNEXES 343

Liste des Tableaux

TABLEAU 1 CLASSIFICATION DES MESURES DANS (PROSPECTS, 2001) 58
TABLEAU 2 CLASSIFICATION DES MESURES DANS (AIUTO, 1999) 58
TABLEAU 3 CLASSIFICATION PROPOSÉE 63
TABLEAU 4 EVALUATION QUALITATIVE DU PDU DE BÉTHUNE 85
TABLEAU 5 LES ORGANISMES ET CADRES DE RÉALISATION DE L'ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE 87
TABLEAU 6 CARACTÉRISTIQUES DE CHAQUE INDICATEUR ISSUES DE (AIUTO, 1999) 104
TABLEAU 7 POTENTIELS D'ATTRACTION DANS LE MODELE DE DEPLACEMENTS DE L'AGGLOMERATION TOULOUSAINE - SOURCE : (PTV FRANCE, 2008) 116
TABLEAU 8 RÉPARTITION DES DIFFÉRENTES CATÉGORIES D'USAGERS PAR RAPPORT À LA LIGNE DE TCSP - SOURCE : TABLEAU ISSU DE (CERTU, 2002) 117
TABLEAU 9 CARACTÉRISTIQUES DES PRINCIPAUX POLLUANTS ÉMIS PAR LE SECTEUR DU TRANSPORT ROUTIER 133
TABLEAU 10 POLLUANTS CONNUS SELON LES VITESSES ET CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT (GROUPE 1) 136
TABLEAU 11 POLLUANTS CALCULÉS À PARTIR DES CONSOMMATIONS DE CARBURANT (GROUPE 2) 136
TABLEAU 12 POLLUANTS HAP ET POP DONNÉS SOUS FORME DE SPÉCIATIONS (GROUPE 3) 136
TABLEAU 13 POLLUANTS COV DONNÉS SOUS FORME DE SPÉCIATION (COMPOSITION) (GROUPE 4) 136
TABLEAU 14 ESTIMATION DES ÉMISSIONS PAR ÉVAPORATION (COV, BENZÈNE SEULEMENT) (M ANDRÉ, ET AL., 2012) 137
TABLEAU 15 CARACTÉRISTIQUES DES DIFFÉRENTS TYPES DE MODÈLES DE CALCUL DES ÉMISSIONS DE POLLUANTS DU TRAFIC ROUTIER 142
TABLEAU 16 FACTEURS D'ÉMISSIONS SPÉCIFIQUES AGRÉGÉS POUR NO_x ET PM DU TRAFIC ROUTIER (GUIDEBOOK, 2009, NIVEAU 1) 143
TABLEAU 17 COEFFICIENTS DES FONCTIONS D'ÉMISSION À CHAUD DE COPERT4 147
TABLEAU 18 FACTEURS D'ÉMISSION PAR ÉVAPORATION DES VÉHICULES PARTICULIERS 148
TABLEAU 19 CLASSIFICATION EN « SITUATIONS DE TRAFIC » DEVELOPPEE DANS LE CADRE DU PROJET DE RECHERCHE ARTEMIS 152
TABLEAU 20 CONDITIONS DE TRAFIC » DÉFINIES DANS LE CADRE DU PROJET DE RECHERCHE ARTEMIS ET VITESSES ILLUSTRATIVES POUR 2 CAS 152
TABLEAU 21 CLASSIFICATION DES MESURES SUIVANT LEUR ÉVALUATION, ISSUE DE (CANTIQUE, 1999) 176
TABLEAU 22 COMPARAISON ENTRE LES PARTS MODALES OBSERVÉES (EMD) ET REPRODUITES PAR SIMULATION DES DÉPLACEMENTS DANS LE PROJET EVALPDU 194
TABLEAU 23 PRÉCISION DES FONCTIONS D'ÉMISSION POUR LES DIFFÉRENTES CATÉGORIES DE VÉHICULES ET LES POLLUANTS (KOURIDIS, ET AL., 2009) 201
TABLEAU 24 COMPARAISON DES PARCS DE VÉHICULES EN CIRCULATION DU DÉPARTEMENT DES PAYS DE LA LOIRE (SOURCE SOES) ET NATIONAL (SOURCE CITEPA) 203
TABLEAU 25 AFFECTATION DES COMPOSITIONS DE PARC AUTOMOBILE (URBAIN/RURAL/AUTOROUTIER) SUR NANTES MÉTROPOLE, HEURE DE POINTE MATIN ET COMPARAISON AUX ESTIMATIONS NATIONALES (PARC IFSTTAR 2008) 205
TABLEAU 26 TRIPS CHARACTERISTICS IN THE CHOSEN ZONES 225
TABLEAU 27 TOWNS IN WHICH ANNUAL EVOLUTION RATE IN MORE THAN 1.2 % 227
TABLEAU 28 SUMMARY OF THE CASE STUDY FOR THE STIMULUS 1: PC TRAVEL DEMAND 232
TABLEAU 29 SUMMARY OF THE CASE STUDY FOR THE STIMULUS 2: NETWORK CAPACITY 233
TABLEAU 30 SUMMARY OF THE CASE STUDY FOR THE STIMULUS 3: VEHICLE FLEET COMPOSITION 235
TABLEAU 31 NETWORK CHARACTERISTICS (LINKS AND MODEL ZONES) 236
TABLEAU 32 NUMBER OF TRIPS ACCORDING TO THE DIFFERENT AREAS 238
TABLEAU 33 TRAFFIC FLOW CHARACTERISTICS ACCORDING TO THE DIFFERENT AREAS AND TYPES OF ROADS 239
TABLEAU 34 POLLUTANT EMISSIONS DEPENDING ON THE AREA, THE TYPE OF ROADS AND THE TYPE OF VEHICLES 240
TABLEAU 35 LINKS NUMBER, NETWORK LENGTH AND TRAFFIC WITH SATURATION RATE HIGHER THAN 90%, ACCORDING TO THE DIFFERENT GEOGRAPHICAL AREAS 244
TABLEAU 36 SIMULATIONS WHICH ARE BESIDES THE RANGE OF MODEL VALIDITY 246
TABLEAU 37 TOTAL CO2 AND NOX EMISSION FOR THE CASE OF THE STIMULUS 1 252
TABLEAU 38 MEAN EMISSION FACTOR RELATED TO THE REFERENCE SCENARIO 254

TABLEAU 39 COMPARISON OF THE TOTAL POLLUTANT EMISSION FOR EACH SIMULATION CALCULATED FROM THE TRAFFIC AND THE EMISSION FACTORS (EF) AND FROM THE TRAFFIC AND EMISSION MODELS 255
TABLEAU 40 ESTIMATION OF THE CORRECTIVE FACTOR (CF) 255
TABLEAU 41 COMPARISON OF THE MEAN TRIPS LENGTHS CALCULATED FROM THE TRAFFIC AND EMISSION MODELS AND FROM THE NUMBER OF TRIPS (OD MATRIX) 256
TABLEAU 42 COMPARISON OF THE TWO CALCULATIONS OF THE EMISSIONS IMPACT 257
TABLEAU 43 ERROR OF THE SIMPLIFIED METHOD DEPENDING ON THE EMISSION VARIATION BETWEEN THE STUDIED SCENARIO AND THE REFERENCE SCENARIO (%) 257
TABLEAU 44 VARIATION OF THE NUMBER OF TRIPS – GLOBAL DEMAND SCENARIO (CASE 1) 258
TABLEAU 45 SURFACE AREA OF THE IMPACTED ZONES FOR THE CASE 1 – SIMULATION – 50% TO +20% 258
TABLEAU 46 VARIATION OF THE NUMBER OF TRIPS – DEMAND SCENARIO – CASE 2 – SUB-CASE 1 – LOW TRAVEL GENERATION (STIMULUS 1) 265
TABLEAU 47 SURFACE AREA OF THE IMPACTED ZONES FOR THE CASE 2 – SUB-CASE 1 – LOW TRAVEL GENERATION (STIMULUS 1) . 265
TABLEAU 48 VARIATION OF THE NUMBER OF TRIPS DEMAND SCENARIO – CASE 2 – SUB-CASE 1 – HIGH TRAVEL GENERATION (STIMULUS 1) 268
TABLEAU 49 SURFACE AREA OF THE IMPACTED ZONES FOR THE CASE 2 – SUB-CASE 1 – HIGH TRAVEL GENERATION (STIMULUS 1) 269
TABLEAU 50 SURFACE AREA OF THE IMPACTED ZONES FOR THE CASE 2 – SUB-CASE 2 – LOW TRAVEL GENERATION – 1ST AREA (STIMULUS 1) 271
TABLEAU 51 SURFACE AREA OF THE IMPACTED ZONES FOR THE CASE 2 – SUB-CASE 2 – LOW TRAVEL GENERATION – 2ND AREA (STIMULUS 1) 274
TABLEAU 52 SURFACE AREA OF THE IMPACTED ZONES FOR THE CASE 2 – SUB-CASE 2 – HIGH TRAVEL GENERATION – 1ST AREA (STIMULUS 1) 276
TABLEAU 53 SURFACE AREA OF THE IMPACTED ZONES FOR THE CASE 2 – SUB-CASE 2 – HIGH TRAVEL GENERATION – 2ND AREA (STIMULUS 1) 278
TABLEAU 54 VARIATION OF THE NUMBER OF TRIPS –CASE 2 – SUB-CASE 3 (STIMULUS 1) 281
TABLEAU 55 SURFACE AREA OF THE IMPACTED ZONES FOR THE CASE 2 – SUB-CASE 3 (STIMULUS 1) 281
TABLEAU 56 VARIATION OF THE NUMBER OF TRIPS –DEMAND SCENARIO – CASE 2 – SPECIFIC SUB-CASE (STIMULUS 1) 283
TABLEAU 57 SURFACE AREA OF THE IMPACTED ZONES FOR THE CASE 2 – SPECIFIC SUB-CASE (STIMULUS 1) 283
TABLEAU 58 VARIATION OF THE NUMBER OF TRIPS – CASE 3 – SUB-CASE CITY CENTER (STIMULUS 1) 286
TABLEAU 59 SURFACE AREA OF THE IMPACTED ZONES FOR THE CASE 3 – SUB-CASE CITY CENTER (STIMULUS 1) 287
TABLEAU 60 VARIATION OF THE NUMBER OF TRIPS – CASE 3 – SUB-CASE SUBURBAN SITE (STIMULUS 1) 289
TABLEAU 61 SURFACE AREA OF THE IMPACTED ZONES FOR THE CASE 3 – SUB-CASE SUBURBAN SITE (STIMULUS 1) 289
TABLEAU 62 VARIATION OF THE NUMBER OF TRIPS – CASE 4 – SUB-CASE 1 (STIMULUS 1) 291
TABLEAU 63 SURFACE AREA OF THE IMPACTED ZONES FOR THE CASE 4 – SUB-CASE 1 (STIMULUS 1) 292
TABLEAU 64 VARIATION OF THE NUMBER OF TRIPS – CASE 4 – SUB-CASE 2 (STIMULUS 1) 293
TABLEAU 65 SURFACE AREA OF THE IMPACTED ZONES FOR THE CASE 4 – SUB-CASE 2 (STIMULUS1) 294
TABLEAU 66 SURFACE AREA OF THE IMPACTED ZONES FOR THE CASE 1 (STIMULUS 2) 296
TABLEAU 67 SURFACE AREA OF THE IMPACTED ZONES FOR THE CASE 2 (STIMULUS 2) 299
TABLEAU 68 SURFACE AREA OF THE IMPACTED ZONES FOR THE CASE 3 (STIMULUS 2) 301
TABLEAU 69 SURFACE AREA OF THE IMPACTED ZONES FOR THE CASE 4 (STIMULUS 2) 303
TABLEAU 70 SURFACE AREA OF THE IMPACTED ZONES FOR THE CASE 1 (STIMULUS 3) 306
TABLEAU 71 SURFACE AREA OF THE IMPACTED ZONES FOR THE CASE 2 – SUB-CASE 1 (STIMULUS 3) 310
TABLEAU 72 SURFACE AREA OF THE IMPACTED ZONES FOR THE CASE 2 – SUB-CASE 1 (STIMULUS 3) 312
TABLEAU 73 EVOLUTION DES INDICATEURS DE TRAFIC ENTRE LES SCÉNARIOS AVEC/SANS BUSWAY ET P+R (L. FOUILLÉ, 2011) 316
TABLEAU 74 EVOLUTION DES CONSOMMATIONS ET DES ÉMISSIONS ROUTIÈRES « AVEC/SANS BUSWAY » 317
TABLEAU 75 FACTEURS D'ÉMISSION DES DIFFÉRENTS POLLUANTS POUR LES SCÉNARIOS AVEC ET SANS BUSWAY 318
TABLEAU 76 INDICATEURS DANS (AIUTO, 1999) 353
TABLEAU 77 INDICATEURS DANS (CANTIQUE, 1999) 354
TABLEAU 78 COMPARAISON DES PARTS MODALES OBSERVÉES (EN GRAS) ET DES PARTS MODALES ESTIMÉES GRÂCE AU MODÈLE DE DÉPLACEMENT (EVALPDU) 355

Liste des Figures

FIGURE 1 SCHÉMA INTRODUCTIF 22
FIGURE 2 DÉMARCHE MÉTHODOLOGIQUE ADOPTÉE 24
FIGURE 3 GRILLE D'ANALYSE DES MESURES DE GESTION DES DÉPLACEMENTS MODIFIÉE À PARTIR DE (BROC & BOURGES, 2009) 32
FIGURE 4 PRINCIPE DES PARCS RELAIS - SCHÉMA ISSU DE (CERTU & CETE DE LYON, 2010) 40
FIGURE 5 TYPOLOGIE FONCTIONNELLE DES P+R 42
FIGURE 6 PRINCIPES DES PÉAGES CORDON ET DE ZONE (RAUX, 2008) 49
FIGURE 7 CLASSIFICATION DES MESURES SELON (ROSENBLOOM, 1978) 61
FIGURE 8 ILLUSTRATION DE L'APPROCHE DÉVELOPPÉE DANS LE PREMIER CHAPITRE 66
FIGURE 9 : EXEMPLE DE RÉSULTATS DE DEED DANS LE PDU DE GRENOBLE 84
FIGURE 10 COMPARAISON DES DIFFÉRENTES FORMES DE COURBES DÉBIT/VITESSE 122
FIGURE 11 EXEMPLE DE DIGRAMME FONDAMENTAL ISSU DE (CERTU, 2010) 126
FIGURE 12 FONCTION D'ÉMISSION NO_x, VOITURE DIESEL <2.0 LITRES, EURO 3 ISSU DE (BARLOW ET AL, 2001) 145
FIGURE 13 SCHÉMA DE PRINCIPE DE DÉTERMINATION DES FACTEURS D'ÉMISSIONS POUR CHACUNE DES SITUATIONS DE TRAFIC (OUTILS ARTÉMIS OU HBEFA) 153
FIGURE 14 EXEMPLE DE GÉNÉRATION DE PROFILS VITESSE/TEMPS 154
FIGURE 15 STRUCTURE DE MODÈLE VERSIT+ 156
FIGURE 16 CARTOGRAPHIE D'ÉMISSION DU MODÈLE VETESS 158
FIGURE 17 STRUCTURE DE MODÈLE D'ÉMISSION CMEM 159
FIGURE 18 STRUCTURE DU MODÈLE PHEM (CAS DES VÉHICULES LOURDS) 160
FIGURE 19 CARTES D'ÉMISSION DE MOTEURS DE CAMIONS EURO I, II, III 161
FIGURE 20 DONNÉES ENTRÉS ET SORTIE DU MODÈLE PHEM [PHEM USER GUIDE 2010] 161
FIGURE 21 SIMULATION DES ÉMISSIONS ET CONSOMMATION DU CARBURANT (FC) DE VÉHICULE ESSENCE EURO III PAR LE MODÈLE PHEM 162
FIGURE 22 SCHÉMA EXPLICATIF DE L'APPROCHE CENTRÉE SUR LES ENTITÉS « DÉPLACEMENT / TRAFIC » ET « EMISSIONS DE POLLUANTS » ET LEUR REPRÉSENTATION DANS LES OUTILS DE MODÉLISATION 173
FIGURE 23 SCHÉMA LOCALISANT L'INTRODUCTION DES ACTIONNEURS DANS LA DÉMARCHE GÉNÉRALE 210
FIGURE 24 PRINCIPLE OF THE APPROACH 219
FIGURE 25 RELATIVE DISTRIBUTION OF THE POLLUTANT EMISSIONS (IN MASS) WITH RESPECT TO VEHICLE CATEGORIES (REFERENCE SCENARIO) 219
FIGURE 26 TOWNS INCLUDED IN THE CONURBATION OF NANTES MÉTROPOLE AND ZONES OF THE MODEL 222
FIGURE 27 LOCALIZATION OF THE THREE AREAS FOR WHICH THE NUMBER OF TRIPS IS MODIFIED– EXAMPLE FOR THE 407 ZONE 226
FIGURE 28 POPULATION EVOLUTION RATES BETWEEN 1999 AND 2006 ON EACH TOWN OF THE NANTES MÉTROPOLE AREA (SOURCE : INSEE, AURAN) 227
FIGURE 29 NUMBER OF TRIPS STARTING FROM THE DIFFERENT MODEL ZONES BY SURFACE OF THE AREA AND LOCALIZATION OF THE CITY CENTER ZONES AND THE "ILE DE NANTES" AREA 228
FIGURE 30 NUMBER OF TRIPS COMING TO EACH ZONE, AS REGARDS THE SURFACE - LOCALIZATION OF THE CHOSEN ZONES 229
FIGURE 31 LOCALIZATION OF THE ARTERIAL ROAD 230
FIGURE 32 LOCALIZATION OF THE ORIGIN AND DESTINATION ZONES 231
FIGURE 33 LOCALIZATION OF THE TYPES OF ROADS AND OF THE DIFFERENT AREAS 236
FIGURE 34 MAIN NETWORK AND MODEL ZONES FOR THE NANTES METROPOLE AREA 237
FIGURE 35 LENGTH OF THE MAIN ROADS IN EACH MODEL ZONE 238
FIGURE 36 MEAN SPEED IN EACH MODEL ZONE FOR THE REFERENCE SCENARIO 239
FIGURE 37 CO_2 EMISSIONS FOR THE REFERENCE SCENARIO 241
FIGURE 38 NO_x EMISSIONS FOR THE REFERENCE SCENARIO 241
FIGURE 39 PART OF THE TOTAL LINKS WITH A SATURATION RATE GREATER THAN 90% AS REGARDS THE PC TRAVEL DEMAND 245
FIGURE 40 SPATIAL DISTRIBUTIONS OF THE DEMAND SCENARIOS IMPACTS (DIFFERENCE OF CO_2 EMISSIONS PER ZONE) FOR A VARIATION OF 1% OF TOTAL NUMBER OF TRIPS 250
FIGURE 41 CO_2 POLLUTANT EMISSIONS DEPENDING ON THE SPEED FOR THE PASSENGER CARS CATEGORY 251
FIGURE 42 NO_x POLLUTANT EMISSIONS DEPENDING ON THE SPEED FOR THE PASSENGER CARS CATEGORY 251

FIGURE 43 SPATIAL DISTRIBUTIONS OF THE CASE 1 - DEMAND SCENARIO IMPACTS (DIFFERENCE OF CO_2 EMISSIONS PER ZONE) FOR A VARIATION FROM -50% TO +20% OF THE TOTAL NUMBER OF TRIPS 262
FIGURE 44 SPATIAL DISTRIBUTION OF THE ORIGIN AND THE DESTINATION ZONES – CASE 1 263
FIGURE 45 VARIATION OF THE POLLUTANT EMISSIONS AND FUEL CONSUMPTION (CC) PARAMETERS AS REGARDS PC DEMAND..... 264
FIGURE 46 SPATIAL DISTRIBUTIONS OF THE CASE 2 – SUB-CASE 1 – LOW TRAVEL GENERATION - DEMAND SCENARIO IMPACTS (DIFFERENCE OF CO_2 EMISSIONS PER ZONE) FOR A LOCAL VARIATION OF – 75% AND +75% OF THE NUMBER OF TRIPS (STIMULUS 1)..... 266
FIGURE 47 SPATIAL DISTRIBUTION OF THE DESTINATION ZONES FOR THE MODIFIED TRIPS - CASE 2 – SUB-CASE 1 – LOW TRAVEL GENERATION (STIMULUS 1)..... 267
FIGURE 48 SPATIAL DISTRIBUTION OF THE TRAFFIC (DIFFERENCE OF TRAFFIC IN VEH.KM IN RELATION TO THE REFERENCE SCENARIO) OF THE CASE 2 – SUB-CASE 1 – LOW TRAVEL GENERATION - DEMAND SCENARIO IMPACTS FOR A LOCAL VARIATION OF -75% AND +75% OF THE NUMBER OF TRIPS (STIMULUS 1)..... 268
FIGURE 49 SPATIAL DISTRIBUTIONS OF THE CASE 2 – SUB-CASE 1 – HIGH TRAVEL GENERATION - DEMAND SCENARIO IMPACTS (DIFFERENCE OF CO_2 EMISSIONS PER ZONE) FOR A LOCAL VARIATION OF – 75% AND +75% OF THE NUMBER OF TRIPS (STIMULUS 1)..... 270
FIGURE 50 SPATIAL DISTRIBUTION OF THE DESTINATION ZONES FOR THE MODIFIED TRIPS - CASE 2 – SUB-CASE 1 – HIGH TRAVEL GENERATION (STIMULUS 1)..... 271
FIGURE 51 SPATIAL DISTRIBUTIONS OF THE CASE 2 – SUB-CASE 2 – LOW TRAVEL GENERATION – 1ST AREA- DEMAND SCENARIO IMPACTS (DIFFERENCE OF CO2 EMISSIONS PER ZONE) FOR A LOCAL VARIATION OF – 75% AND +75% OF THE NUMBER OF TRIPS (STIMULUS 1)..... 273
FIGURE 52 SPATIAL DISTRIBUTION OF THE DESTINATION ZONES FOR THE MODIFIED TRIPS - CASE 2 – SUB-CASE 1 – LOW TRAVEL GENERATION – 1ST AREA (STIMULUS 1)..... 274
FIGURE 53 SPATIAL DISTRIBUTIONS OF THE CASE 2 – SUB-CASE 2 – LOW TRAVEL GENERATION – 2ND AREA- DEMAND SCENARIO IMPACTS (DIFFERENCE OF CO2 EMISSIONS PER ZONE) FOR A LOCAL VARIATION OF – 75% AND +75% OF THE NUMBER OF TRIPS (STIMULUS 1)..... 275
FIGURE 54 SPATIAL DISTRIBUTION OF THE DESTINATION ZONES FOR THE MODIFIED TRIPS - CASE 2 – SUB-CASE 1 – LOW TRAVEL GENERATION – 2ND AREA (STIMULUS 1)..... 276
FIGURE 55 SPATIAL DISTRIBUTIONS OF THE CASE 2 – SUB-CASE 2 – HIGH TRAVEL GENERATION – 1ST AREA- DEMAND SCENARIO IMPACTS (DIFFERENCE OF CO2 EMISSIONS PER ZONE) FOR A LOCAL VARIATION OF – 75% AND +75% OF THE NUMBER OF TRIPS (STIMULUS 1)..... 277
FIGURE 56 SPATIAL DISTRIBUTION OF THE DESTINATION ZONES FOR THE MODIFIED TRIPS - CASE 2 – SUB-CASE 2 – HIGH TRAVEL GENERATION – 1ST AREA (STIMULUS 1)..... 278
FIGURE 57 SPATIAL DISTRIBUTIONS OF THE CASE 2 – SUB-CASE 2 – HIGH TRAVEL GENERATION – 2ND AREA- DEMAND SCENARIO IMPACTS (DIFFERENCE OF CO2 EMISSIONS PER ZONE) FOR A LOCAL VARIATION OF – 75% AND +75% OF THE NUMBER OF TRIPS (STIMULUS 1)..... 279
FIGURE 58 SPATIAL DISTRIBUTION OF THE DESTINATION ZONES OF THE MODIFIED TRIPS – CASE 2 – SUB-CASE 2 – HIGH TRAVEL GENERATION – 2ND AREA (STIMULUS 1)..... 280
FIGURE 59 SPATIAL DISTRIBUTIONS OF THE CASE 2 – SUB-CASE 3 - DEMAND SCENARIO IMPACTS (DIFFERENCE OF CO_2 EMISSIONS PER ZONE) FOR A VARIATION OF -2% AND +2% OF THE TOTAL NUMBER OF TRIPS (STIMULUS 1)..... 282
FIGURE 60 SPATIAL DISTRIBUTION OF THE DESTINATION ZONES FOR THE MODIFIED TRIPS – CASE 2 – SUB-CASE 3 (STIMULUS 1)... 283
FIGURE 61 SPATIAL DISTRIBUTIONS OF THE CASE 2 – SPECIFIC SUB-CASE - DEMAND SCENARIO IMPACTS (DIFFERENCE OF CO2 EMISSIONS PER ZONE) FOR A VARIATION OF -1% AND +1% OF THE TOTAL NUMBER OF TRIPS (STIMULUS 1) 285
FIGURE 62 SPATIAL DISTRIBUTION OF THE DESTINATION ZONES FOR THE MODIFIED TRIPS – CASE 2 – SPECIFIC SUB-CASE (STIMULUS 1) 286
FIGURE 63 SPATIAL DISTRIBUTIONS OF THE CASE 3 – CITY CENTRE – DEMAND SCENARIO IMPACTS (DIFFERENCE OF CO2 EMISSIONS PER ZONE) FOR A LOCAL VARIATION OF – 75% AND +75% OF THE NUMBER OF TRIPS (STIMULUS 1)..... 288
FIGURE 64 SPATIAL DISTRIBUTION OF THE ORIGIN ZONES FOR THE MODIFIED TRIPS – CASE 3 – SUB-CASE CITY CENTER (STIMULUS 1) 289
FIGURE 65 SPATIAL DISTRIBUTIONS OF THE CASE 3 – SUBURBAN CASE – DEMAND SCENARIO IMPACTS (DIFFERENCE OF CO2 EMISSIONS PER ZONE) FOR A LOCAL VARIATION OF – 75% AND +75% OF THE NUMBER OF TRIPS (STIMULUS 1)..... 290
FIGURE 66 SPATIAL DISTRIBUTION OF THE ORIGIN ZONES FOR THE MODIFIED TRIPS – CASE 3 – SUB-CASE SUBURBAN SITE (STIMULUS 1) 291
FIGURE 67 SPATIAL DISTRIBUTIONS OF THE CASE 4 – SUB-CASE 1 – DEMAND SCENARIO IMPACTS (DIFFERENCE OF CO2 EMISSIONS PER ZONE) FOR A LOCAL VARIATION OF – 75% AND +75% OF THE NUMBER OF TRIPS (STIMULUS 1)..... 293
FIGURE 68 SPATIAL DISTRIBUTIONS OF THE CASE 4 – SUB-CASE 2 – DEMAND SCENARIO IMPACTS (DIFFERENCE OF CO2 EMISSIONS PER ZONE) FOR A LOCAL VARIATION OF – 75% AND +75% OF THE NUMBER OF TRIPS 295

FIGURE 69 SPATIAL DISTRIBUTIONS OF THE EMISSION IMPACTS FOR THE CASE 1 – VARIATION OF – 5% AND +5% OF THE NETWORK CAPACITY (STIMULUS 2)..... 297
FIGURE 70 DIFFERENCE OF THE VOLUME OF TRAFFIC BETWEEN THE REFERENCE SCENARIO AND THE CASE 1 (STIMULUS 2)..... 298
FIGURE 71 DIFFERENCE OF THE NETWORK CAPACITY BETWEEN THE REFERENCE SCENARIO AND THE CASE 1 (STIMULUS 2)..... 298
FIGURE 72 SPATIAL DISTRIBUTIONS OF THE EMISSION IMPACTS FOR THE CASE 2 – VARIATION OF -5% AND +5% OF THE CENTRAL CITY CENTER NETWORK CAPACITY 300
FIGURE 73 COMPARISON OF THE NETWORK CAPACITY BETWEEN THE REFERENCE SCENARIO AND THE CASE 2 (STIMULUS 2) 300
FIGURE 74 SPATIAL DISTRIBUTIONS OF THE EMISSION IMPACTS FOR THE CASE 3 – VARIATION OF – 5% AND +5% OF THE RING ROADS CAPACITY (STIMULUS 2)..... 302
FIGURE 75 DIFFERENCE OF THE NETWORK CAPACITY BETWEEN THE REFERENCE SCENARIO AND THE CASE 3 (STIMULUS 2)..... 302
FIGURE 76 SPATIAL DISTRIBUTIONS OF THE EMISSION IMPACTS FOR THE CASE 4 – VARIATION OF – 10%, -5%, +5% AND +10% OF THE MAIN ROAD CAPACITY (STIMULUS 2) 305
FIGURE 77 DIFFERENCE OF THE NETWORK CAPACITY BETWEEN THE REFERENCE SCENARIO AND THE CASE 4 (STIMULUS 2)..... 305
FIGURE 78 SPATIAL DISTRIBUTIONS OF THE EMISSION IMPACTS (CO2 AND NOX) FOR THE CASE 1 – 2010, 2015 AND 2020 VEHICLE FLEET COMPOSITIONS (STIMULUS 3)..... 309
FIGURE 79 SPATIAL DISTRIBUTIONS OF THE EMISSION IMPACTS (CO2 AND NOX) FOR THE CASE 2 – SUB-CASE 1 (STIMULUS 3)... 311
FIGURE 80 SPATIAL DISTRIBUTIONS OF THE EMISSION IMPACTS FOR THE CASE 2 – SUB-CASE 2 (STIMULUS 3) 313
FIGURE 81 ECART CHARGE TV REFERENCE 2008 AVEC P+R ET SCÉNARIO SANS BUSWAY ISSU DE (L. FOUILLÉ, 2011) 317
FIGURE 82 EVOLUTION RELATIVE DES ÉMISSIONS DE NOX DU TRANSPORT ROUTIER – SCÉNARIO « AVEC/SANS BUSWAY »..... 318

Liste des abréviations

AASQA : Association Agrée de Surveillance de la Qualité de l'Air
ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
AOTU : Autorité Organisatrice de Transport Urbain
CDU : Centre de Distribution Urbaine
CERTU : Centre d'Etudes sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions publiques)
CETE : Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement
CITEPA : Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique
CO : Monoxyde de carbone
CO_2 : Dioxyde de carbone
COV : Composés Organiques Volatils
COVNM : Composés organiques volatils non méthaniques
DDE : Direction Départementale de l'Equipement
DRIRE : Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement
EMD : Enquête Ménages Déplacements
ENTD : Enquête Nationale Transports et Déplacements
EPCI : Etablissement Public de Coopération Intercommunale
GES : Gaz à Effet de Serre
HAP : Hydrocarbures aromatiques polycycliques
HPM : Heure de Pointe du Matin
HPS : Heure de Pointe du Soir
INRETS : Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité
INSEE : Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques
IRIS : Ilots Regroupés pour des Indicateurs Statistiques
ITS : Intelligent Transportation Systems
LAURE : Loi sur l'Air et l'Utilisation Rationnelle de l'Energie
LOTI : Loi d'Orientation des Transports Intérieurs
NO_x : Oxyde d'azote
O_3 : Ozone
OMS : Organisation Mondiale de la Santé
PDE : Plan de Déplacements Entreprise
PDES : Plan de Déplacements des Etablissements Scolaires
PDU : Plan de Déplacements Urbains
PL : Poids Lourds
PLU : Plan Local d'Urbanisme
PMV : Panneaux à Messages Variables
PPA : Plan de Protection de l'Atmosphère
PREDIT : Programme de Recherche et D'Innovation dans les Transports Terrestres
PRQA : Plan Régional de la Qualité de l'Air
PTU : Périmètre des Transports Urbains
RGP : Recensement Général de la Population
SOeS : Service de l'Observation et des Statistiques
SIG : Système d'Information Géographique
TDM : Travel Demand Management
TSM : Transportation System Management
TCSP : Transport en Commun en Site Propre
TER : Transport Express Régional
TIC : Technologies de l'Information et de la Communication
TRM : Transport Routier de Marchandises

UVP : Unité de Voiture Particulière : mesure de l'occupation de la voiri e par le trafic
VLS : Vélo en Libre Service
VP : Voiture Particulière
ZAPA : Zone d'action Prioritaire pour l'Air

Introduction Générale

Contexte et questions identifiées

La mobilité spatiale, caractérisée par le mouvement d'un point à l'autre de l'espace, est un besoin pour chacun d'entre nous, en raison de notre mode de vie et de consommation. Cette notion regroupe de nombreuses réalités, observables à des échelles temporelles et spatiales différentes et identifiables par l'adjectif la qualifiant (mobilité résidentielle, géographique, individuelle, quotidienne, locale…).

L'étude des déplacements et du trafic sur un réseau est fortement liée à la compréhension et l'analyse de certaines composantes de la mobilité. La mobilité quotidienne qui représente un changement de lieu résultant de la séparation spatiale des lieux de vie (déplacement entre le domicile et le lieu de travail par exemple), désigne ainsi la majorité des déplacements utilisant un réseau de transport (routier, ferré, cyclable…). Cette mobilité quotidienne ne peut être mentionnée sans la notion d'activité (travail, achat, visite…) qui est le moteur principal du déplacement si celle-ci se trouve dans un lieu différent. À cette mobilité quotidienne des individus s'ajoutent des déplacements liés au transport de biens matériels (marchandises) des lieux de production vers les lieux de vente.

Ces déplacements se distinguent par leur portée spatiale (mobilité locale[1] / mobilité à longue distance), leur milieu (routier, maritime, fluvial) et par leur mode (véhicule particulier, transport en commun, vélo, train …).

L'unité de mesure de la mobilité varie selon la composante analysée. Elle peut être caractérisée, entre autres, par le nombre de déplacements, de véhicules, de tonnes de marchandises par unité de temps et sur un espace donné.

Bref historique de la mobilité et des transports en France

L'histoire de la mobilité et des transports est étroitement liée aux modes de vie, aux évolutions de la ville et aux évolutions technologiques. Le déplacement est en premier lieu une nécessité pour l'homme afin de se nourrir, de commercer, d'échanger… En France, les premiers réseaux de transport sont organisés dès 188 av. JC avec la création de la voie Domitienne reliant l'Italie du Nord à l'Hispanie en traversant les Alpes et la Narbonnaise puis grâce à la conquête romaine de la Gaule (achevée en 52 av. JC) avec la création des voies romaines pour relier les principales villes de la Gaule entre elles.

Au moyen âge, les déplacements se font principalement à pied ou à cheval. Mais les nobles commencent à utiliser des chars. Devant l'encombrement de la voirie par ces véhicules, le Roi Philippe IV en limite l'usage (les premières mesures de gestion des déplacements et du trafic apparaissent).

La révolution industrielle, marquée par le développement du commerce, se nourrit et favorise les progrès technologiques effectués dans le domaine des transports. L'invention des moyens de

[1] La mobilité locale représente l'ensemble des déplacements réalisés par une personne pour mener une activité quelconque à moins de 80 km à vol d'oiseau de son domicile, en France métropolitaine par jour de semaine entre le lundi et le vendredi (Hubert, 2009)

transports mécanisés avec les bateaux à vapeur puis l'arrivée du chemin de fer au 19ème siècle favorise la distribution des produits et la circulation des personnes bien que celle-ci soit encore marginale.

Au début du 20ème s, l'automobile fait son apparition dans les villes françaises mais son utilisation est très restreinte. Cependant, le développement important des réseaux de tramway encourage notablement l'accroissement de la mobilité des individus.

À partir des années 30, le fordisme permet aux grands constructeurs automobiles européens de produire des véhicules à moindre coût. L'automobile se généralise d'abord dans les couches les plus aisées de la population et se popularise avant la guerre. Le transport routier de marchandises apparaît dans le même temps.

Au début des années 60, le tramway est gêné par la circulation automobile, les autobus lui sont alors préférés. Les réseaux de tramway disparaissent des villes.

Jusque dans les années 80, c'est l'ère de la ville automobile, l'absence de plan d'ensemble de gestion des réseaux laisse libre cours à la circulation individuelle automobile provoquant des encombrements importants dans toutes les villes. Le développement économique entraîne une augmentation forte des besoins en mobilité, devenue indispensable aux modes de vie actuels. La voiture, de par sa praticité et la flexibilité qu'elle offre à ses utilisateurs, s'est imposée comme le mode de transport principal des ménages provoquant l'abandon de la marche à pied et du vélo.

Au milieu des années 80, la formalisation d'un cadre législatif pour la gestion des déplacements urbains sous la forme des Plans de Déplacements Urbains (PDU) permet aux agglomérations de plus de 100 000 habitants de planifier, d'organiser et de gérer les déplacements effectués sur leurs réseaux. C'est dans ce cadre, par exemple, que les réseaux de tramway réapparaissent progressivement afin de proposer une alternative à l'utilisation de la voiture individuelle. Néanmoins, la mobilité ne cesse d'augmenter et la part de marché des véhicules individuels ne faiblit pas. Les réseaux de transport sont donc saturés.

Quelles sont les caractéristiques de la mobilité aujourd'hui ?

Les résultats de la dernière enquête nationale Transports et Déplacements (ENTD) et des Enquêtes Ménage Déplacements (EMD) permettent d'identifier une certaine stabilisation de la mobilité individuelle avec une moyenne de 3,6 déplacements réalisés en moyenne quotidiennement par chaque habitant des agglomérations françaises depuis 1994 (SOeS, 2010). En 2008, il s'est réalisé en moyenne 175 millions de déplacements locaux (en hausse de 4,5% par rapport à 1994). Cette augmentation est liée à la croissance démographique (+8% sur la période) (Hubert, 2009). Cependant, l'analyse des Enquêtes Ménage Déplacements des grandes villes tend à supposer que la mobilité des Français a connu un maximum entre les deux ENTD (1994 et 2008) et que l'évolution de court terme de la mobilité est aujourd'hui davantage orientée à la baisse que ne le laisse indiquer la comparaison des points de mesure.

Pour la première fois en 2008, la part modale de la voiture individuelle, même si son usage est prédominant, se stabilise par rapport à 1994 (SOeS, 2010). La pratique de la marche stagne et celle du vélo reste modeste. La fréquentation des transports collectifs dans les réseaux de plus de 250 000 habitants connaît une augmentation de 30% entre 2000 et 2010. En revanche, cette progression est nettement moins marquée dans les agglomérations de plus petite taille. On observe par ailleurs une diversification des alternatives de transport (covoiturage, autopartage, vélo libre service ...).

Tous motifs et tous modes confondus, les personnes parcouraient en moyenne chaque jour de semaine 17,4 km en 1982, elles en parcourent 25,2 km en 2008 (SOeS, 2010). En dehors des grandes agglomérations, les habitants parcourent des distances de plus en plus longues entre leur résidence et leurs différents lieux d'activité, notamment les lieux de travail ou d'apprivionnement (Hubert, 2009).

Les ménages sont de plus en plus nombreux à posséder une ou plusieurs voitures : 82% en 2008 contre 77% en 1994 (SOeS, 2010).

Le travail reste le motif principal des déplacements et continue de croître (+1,3% par an). À contrario, les déplacements pour les autres motifs (achat, loisirs…) qui avaient connu une forte augmentation jusqu'en 1994 paraissent en voie de stabilisation (+0,6% par an) (SOeS, 2010).

Entre 1990 et 2008, la circulation routière mesurée en véhicules.kilomètres a globalement augmenté de 28% (baisse de la mobilité automobile individuelle contrebalancée par la croissance démographique). Cependant, le bilan annuel de la circulation routière tout comme les EMD menées régulièrement dans les grandes villes françaises font apparaître pour la première fois depuis 1974, une baisse de la circulation automobile en 2005 (SOeS, 2010).

La crise financière survenue à partir de 2008 a ou aura sans doute des conséquences sur les caractéristiques de la mobilité mais celles-ci n'ont pas été identifiées dans l'enquête réalisée en 2008. Ces conséquences sont, à l'heure actuelle, peu étudiées. On peut néanmoins, dès à présent, émettre l'hypothèse que les tendances observées ces dernières années pourraient être modifiées à cause des effets de la crise tels que les augmentations du coût du carburant, la crise du logement, la hausse du chômage…

Des évolutions contrastées entre les territoires périphériques et les territoires centraux

Cet état des lieux général de la mobilité masque des réalités bien contrastées entre les territoires périphériques et les territoires centraux. La mobilité quotidienne est ainsi largement influencée par les lieux de vie. Dans les grandes agglomérations, la mobilité quotidienne des habitants diminue (-0,2 déplacement par jour) alors qu'elle augmente ailleurs (Hubert, 2009). La distance entre les lieux de vie est restée globalement stable dans les grandes agglomérations (79 pôles des aires urbaines de plus de 100 000 habitants) mais a augmenté de 12% en dehors, là où la population s'est implantée plus récemment, loin des aires d'activités. Entre 1994 et 2008, les reports entre modes de transport ne sont sensibles que dans les villes-centres des grandes agglomérations. Ces reports profitent aux modes lents ou légers (marche +3 points ; vélos et deux roues motorisés : +1,5 points environ chacun) au détriment de la voiture (-5 points) et des transports en commun (-2 points) (Hubert, 2009). Hors des grandes agglomérations et dans les couronnes périurbaines, la voiture est utilisée pour 75 à 85% des déplacements, ce qui en fait des territoires supportant quotidiennement le plus de déplacements.

Le transport de marchandises

Le transport routier de marchandises s'avère être un secteur particulièrement sensible à la conjoncture économique (crise financière : ralentissement de la croissance européenne). Cette sensibilité se traduit en premier lieu au niveau des kilomètres parcourus. La demande de transport routier de marchandises a subi en 2008 une baisse de 5,9% en tonnes.km par rapport à l'année 2007. Cette baisse du volume de l'activité, qui est la plus forte depuis 1993, fait suite à deux années de hausse (+3,7% en 2007 et +3% en 2006) et s'inscrit dans un contexte de diminution de la production industrielle de 2,5%. La circulation des Poids Lourds (PL) sur le réseau routier principal en France a enregistré une baisse de 1,7% en 2008 par rapport à 2007 (cette baisse n'ayant été que de 0,6% pour les véhicules légers) (IAURIF, 2010). Désormais, le transport intérieur terrestre de marchandises a repris sa croissance même si cela se fait à un rythme ralenti (+2,4% en tonnes.kilomètre en 2011 après +4,8% en 2010) (Commissariat général au développement durable, 2012).

Les enjeux environnementaux de la mobilité

Les déplacements sont très majoritairement mécanisés et produisent ainsi des gaz à effet de serre. La saturation des réseaux (augmentation de la congestion) ne fait qu'amplifier cette production par le biais de processus propres aux émissions de polluants des véhicules. Ce qui fait qu'en France, le transport routier est le premier émetteur de CO_2 (32% des émissions totales en 2010)[2]. Ainsi, en cumulant les déplacements locaux quotidiens et les déplacements à longue distance, chaque Français émet en moyenne près de 2 tonnes de dioxyde de carbone (CO_2) par an. La mobilité locale qui représente 60% des distances parcourues, produit plus de 70% des émissions de CO_2 en 2008. Sur de courtes distances, la voiture est responsable de 96% des émissions (SOeS, 2010).

Alors que le transport de marchandises ne représente que 25% du trafic (vehicules.kilomètre) dans l'agglomération nantaise, sa contribution aux émissions totales du transport routier est de 44 % pour le CO_2, de 57% pour les NOx et de 48 % pour les PM (exemple sur l'agglomération nantaise pour l'année 2008 (André, Fallah, Berger, Montenon, & Brutti-Mairesse, 2012)).

Les transports routiers sont par ailleurs à l'origine de l'émission d'un certain nombre de substances potentiellement toxiques pour l'homme et pour l'écosystème. Les émissions de NOx, par exemple, polluant toxique (irritant respiratoire) du secteur routier, représentent ainsi 55% des émissions totales en 2010. Le secteur est par ailleurs le quatrième émetteur de particules totales en suspension (9%). Même si une baisse générale des émissions de polluants du secteur routier est constatée depuis une dizaine d'année, localement et notamment près des voies de circulation, les niveaux peuvent dépasser les seuils réglementaires.

Les enjeux environnementaux et sanitaires liés à l'utilisation de l'automobile individuelle dans les déplacements quotidiens demeurent donc des enjeux contemporains liés au développement durable. L'amélioration de l'efficacité énergétique des véhicules, la réduction de leurs émissions et la promotion des énergies alternatives au pétrole contribuent et contribueront au développement d'une mobilité plus durable. Face à ce constat, établi déjà depuis plusieurs années, des démarches ont été initiées par les acteurs publics. Plans de déplacements Urbains, Plans Climat, Plans de Protection de l'Atmosphère, Grenelle de l'Environnement… sont un ensemble d'outils permettant de fixer des objectifs et des seuils d'émissions de polluants mais aussi de gérer, d'organiser et d'évaluer la mobilité et ses pratiques.

Étudier les solutions grâce à leur évaluation

L'éclatement de la localisation des activités sur le territoire observé ces dernières années (déspécialisation fonctionnelle des pôles, diffusion de l'emploi en zone périurbaine par exemple) ainsi que l'étalement des villes rendent les limites de la ville et de sa zone d'influence de plus en plus floues (déplacements entre les aires urbaines, allongement des distances domicile-travail…) (SOeS, 2010). Les évolutions de la forme urbaine et de la mobilité étant conjointes, les déplacements dans les villes se sont donc complexifiés, augmentant ainsi le niveau de difficulté quant à la compréhension et à la planification des milieux urbains.

Face à cette complexification et aux enjeux environnementaux des transports routiers, la gestion des déplacements fait face à de nouveaux défis. Des solutions basées sur le changement des comportements de mobilité, la rationalisation du développement des transports collectifs, l'intégration du transport de marchandises aux politiques urbaines, l'anticipation de la place des évolutions technologiques de la mobilité, la maîtrise de la localisation des lieux d'habitat et d'activités… sont progressivement en train d'être envisagées et de se mettre en place.

Mais quelles sont les populations cibles et les motifs de déplacements visés par les différentes solutions envisagées ? À une grande échelle, l'iniquité sociale engendrée par le péage urbain est largement critiquée. Cependant des solutions plus marginales (telles que l'autopartage par exemple

[2] http://www.citepa.org

principalement utilisé à Paris par les ménages aisés en raison de son coût d'utilisation relativement élevé) sont aussi vecteurs d'iniquités sociales. Comment concilier les objectifs du Grenelle de l'environnement prônant la mobilité pour tous avec les nouvelles solutions envisagées ? Plus les investissements dans les Transports en Commun sont importants plus la part modale de ce mode de transport est importante, mais avec la crise économique et la baisse des financements accordés aux collectivités territoriales, quel est le devenir de ce levier d'action ? Comment concilier l'augmentation de la consommation des ménages liée à nos modes de vie avec une gestion des transports routiers de marchandises en ville ? Comment envisager une gestion globale des déplacements alors que la diversité des territoires entraîne une diversité des mobilités ? Comment favoriser le transfert modal alors que l'allongement des distances domicile travail est un frein à l'utilisation des modes doux (marche à pied, vélo). Parmi les 14,6 millions d'actifs ayant un lieu fixe et régulier de travail et utilisant leur voiture, 6,3 millions d'entre eux (résidant essentiellement en zones urbanisées) pourraient ne pas l'utiliser, comment exploiter ce fort potentiel de transfert modal ? Comment se déplacer dans les territoires sans alternatives à l'automobile dans un contexte de crise économique ? Comment concilier augmentation démographique et baisse du trafic automobile ?

L'ensemble de ces questionnements fait ainsi apparaître un besoin essentiel de définition optimale des solutions envisagées (en termes de coûts, gain environnemental, satisfaction des usagers, équité sociale et environnementale, accès à la mobilité pour tous). Il paraît donc nécessaire d'évaluer l'efficacité des solutions selon ces différents critères.

Objet et objectifs de la thèse

Nous avons donc ciblé notre recherche sur l'évaluation de ces solutions. Celles-ci peuvent concerner la gestion des déplacements et du trafic, l'urbanisation ou encore plus marginalement la gestion de la consommation … La majorité des solutions étant néanmoins liée aux déplacements et au trafic, nous avons décidé de centrer nos travaux sur celles-ci. Nous parlerons désormais de **mesures de gestion des déplacements et du trafic**.

Celles-ci sont principalement regroupées dans les PDU. Néanmoins, certaines mesures ne sont pas encore autorisées en France (comme les péages urbains) ou dépassent le domaine de compétence des AOTU (Autorité Organisatrice des Transports Urbains) (comme la tarification du carburant ou le télétravail), et ne font pas partie de ces plans. Nous étudierons un large panel de ces mesures.

Comme nous l'avons précédemment souligné, l'étude des solutions devrait être réalisée par rapport aux différents critères que sont le coût, le gain environnemental, la satisfaction des usagers, l'équité sociale et environnementale, l'accès à la mobilité pour tous…

Nous focaliserons notre recherche sur l'évaluation des impacts des mesures sur l'**environnement**. La thématique de l'environnement est large. Elle permet ainsi d'aborder un ensemble de questionnements qui pourront traiter des différents critères ci-dessus. Le terme environnement est défini comme « l'ensemble des conditions naturelles (physiques, chimiques, biologiques) et culturelles (sociologiques) susceptibles d'agir sur les organismes vivants et les activités humaines »[3].

On cherche donc à analyser les modifications des conditions naturelles, causées par les mesures de gestion du trafic et des déplacements. Ces conditions naturelles sont principalement : le paysage, l'eau, le bruit, l'énergie, l'espace, la santé, la qualité de l'air et les gaz à effet de serre.

Nous nous intéressons ici à la qualité de l'air et aux émissions de gaz à effet de serre. L'impact des différentes mesures sur la qualité de l'air nécessite d'analyser la dispersion des polluants dans

[3] http://www.lepetitrobert.fr/

l'atmosphère. Nous aborderons les impacts des mesures sur la qualité de l'air uniquement à travers des retours d'expérience. L'analyse des concentrations atmosphériques des polluants nécessite la connaissance de phénomènes tels que l'évolution de la pollution de fond, la météorologie, la forme de la rue… Ces phénomènes ne seront pas abordés dans ces travaux. Nos analyses se contenteront donc d'évaluer des impacts en termes **d'émissions de polluants**.

La mise en place des mesures vise à modifier les émissions de polluants des véhicules d'une part directement et d'autre part indirectement par le biais **des composantes des déplacements et du trafic**.

L'ensemble de ces notions est récapitulé dans la Figure 1. Ainsi, l'objet de notre recherche est synthétisé par la flèche noire, les mesures ont un impact sur les émissions de polluants. Afin d'évaluer ces mesures, nous souhaitons quantifier et déduire leur impact. Les mécanismes d'action qui surviennent lors de la mise en œuvre d'une mesure font intervenir deux entités que sont les déplacements et le trafic ainsi que les émissions de polluants. La première entité intervient indirectement dans la quantification de l'impact alors que la seconde intervient directement. Ces deux entités sont en relation puisque des modifications apportées à l'entité déplacement / trafic a incontestablement des effets sur l'entité des émissions de polluants par le bais des conditions de circulation. On peut donc constater des effets ou des retours d'expérience sur les deux entités.

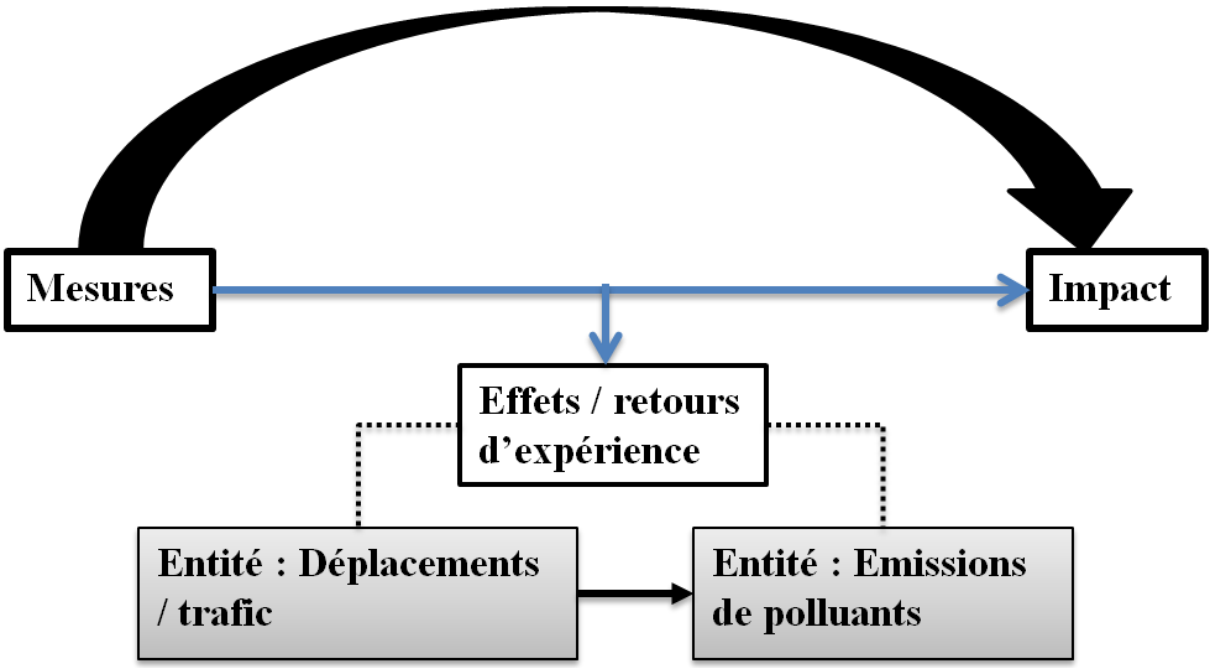


Figure 1 Schéma introductif

L'évaluation d'un ensemble de ces mesures est réalisée dans le cadre des évaluations environnementales des Plans de Déplacements Urbains. Leur évaluation a d'abord été un outil d'aide à la décision de l'action publique en fonction de critères économiques et financiers encadré par l'article 14 de la Loi d'Orientation des Transports Intérieurs (LOTI). Celui-ci précise que les projets de transports doivent être évalués avant, pendant et après leur réalisation. Ce n'est qu'à la fin des années 90 que les évaluations commencent à porter sur des critères environnementaux, ceci en lien direct avec l'émergence des enjeux environnementaux liés aux transports (pollution atmosphérique locale et effet de serre) et donc à l'attribution d'un objectif de maîtrise de la qualité de l'air.

Ce nouveau critère d'évaluation a permis de développer et de mettre en pratique de nouvelles méthodes et outils. Ceux-ci sont, à l'heure actuelle, multiples et variés mais présentent de nombreuses faiblesses (analyse à une échelle uniquement globale, quantification d'un unique effet, non prise en compte des déplacements effectués à vélo, par la marche…). Par ailleurs, les autorités en charge de

l'évaluation sont souvent amenées à développer leurs propres outils qui ne sont pas applicables et transférables à d'autres cas. Les approches développées dans le cadre de ces évaluations ne sont donc pas totalement satisfaisantes. Nous le verrons plus en détails dans les premiers chapitres.

Néanmoins, les différentes méthodes utilisent majoritairement des outils de modélisation. Ces outils permettent d'obtenir, en effet, des données assez riches, localisées et évolutives. Ces outils sont classiquement constitués par une modélisation des déplacements et du trafic, des émissions de polluants, des concentrations des polluants dans l'atmosphère et plus rarement de l'exposition des personnes voire des impacts sanitaires. Nous avons donc choisi de conserver une approche utilisant des outils de modélisation.

L'objectif de ce travail est donc dans un premier temps de :

- Mettre à plat l'ensemble des mesures de gestion des déplacements et du trafic et relever leurs effets à travers des retours d'expérience

Dans un deuxième temps, il nous paraît indispensable :

- D'analyser les différentes méthodes et outils à disposition afin de faire émerger leurs caractéristiques, leurs domaines de pertinence et leurs limites

Puis :

- De comprendre les différents mécanismes d'action intervenant lors de la mise en place d'une mesure

En dernier lieu, l'ensemble des connaissances synthétisées dans les points précédents nous permettra :

- D'entamer une démarche de simplification des méthodes en formalisant un nouveau cadre de représentation et d'analyse des effets des mesures basé sur une décomposition en actions élémentaires bien choisies

Approche et plan de thèse

Nous adoptons une démarche largement basée sur le croisement d'analyses bibliographiques et des états de l'art car le champ thématique est vaste et les sources de données sont variées (publications, documents publics…).

Nous avons opté dans un premier temps pour une approche centrée sur les mesures. La mise à plat de l'ensemble des mesures et la caractérisation de leurs effets ont été effectuées grâce à des analyses bibliographiques et des retours d'expérience. Celles-ci permettent de faire apparaître une grande variété de mesures et de leurs effets. Dans un souci de lisibilité, nous classons les mesures. La classification obtenue nous permet d'identifier les différents paramètres qui caractérisent les mesures. Nous émettons l'hypothèse, par ailleurs, qu'elle pourra nous servir dans notre démarche de simplification des méthodes.

Dans un deuxième temps, nous avons envisagé d'adopter une approche centrée sur les méthodes et les outils d'évaluation. Leur mise à plat permet de dégager les éléments pertinents et d'identifier les limites. Nous émettons l'hypothèse que chaque type de mesure identifié dans l'approche centrée sur les mesures pourrait coïncider avec les domaines de pertinence de chaque classe d'outils.

Dans un troisième temps, nous analysons les différents mécanismes d'action par le biais de la représentation dans les modèles des deux entités déplacements / trafic d'une part, et émissions de polluants d'autre part.

L'ensemble de ces mises à plat, analyses critiques et résultats préliminaires permet de conclure que l'analyse de sensibilité et de pertinence doit être réalisée à partir d'entrées génériques et bien positionnées dans la chaîne de modélisation. Ce concept d'actionneurs nous sert de base à la proposition d'un nouveau cadre d'évaluation et d'analyse. Cette approche exploratoire devrait constituer un préalable à d'autres améliorations méthodologiques qui pourront être développées dans la poursuite de ces travaux.

L'approche esquissée est comparée avec l'approche classique mise en œuvre dans le projet EvalPDU sur le cas particulier de la mesure « mise en place d'un transport en commun en site propre» sur l'agglomération de Nantes (Busway). Cette comparaison nous permet d'évaluer la pertinence de celle-ci. Nous en déduisons l'intérêt de poursuivre le développement de ce cadre d'évaluation afin de faire émerger de nouvelles méthodologies (plus simples, qui donnent une première idée grossière de l'impact d'une mesure…). Précisions que l'ensemble du travail réalisé dans cette thèse a été réalisé dans le cadre du projet EvalPDU. Ce programme de recherche pluridisciplinaire coordonné par l'Institut de Recherche sur les Sciences et Techniques de la Ville a permis d'enrichir la réflexion sur l'évaluation des impacts environnementaux d'un PDU et leurs conséquences socio-économiques (pour plus d'informations : http://semfinalevalpdu.sciencesconf.org/).

La démarche générale est résumée dans la Figure 2.

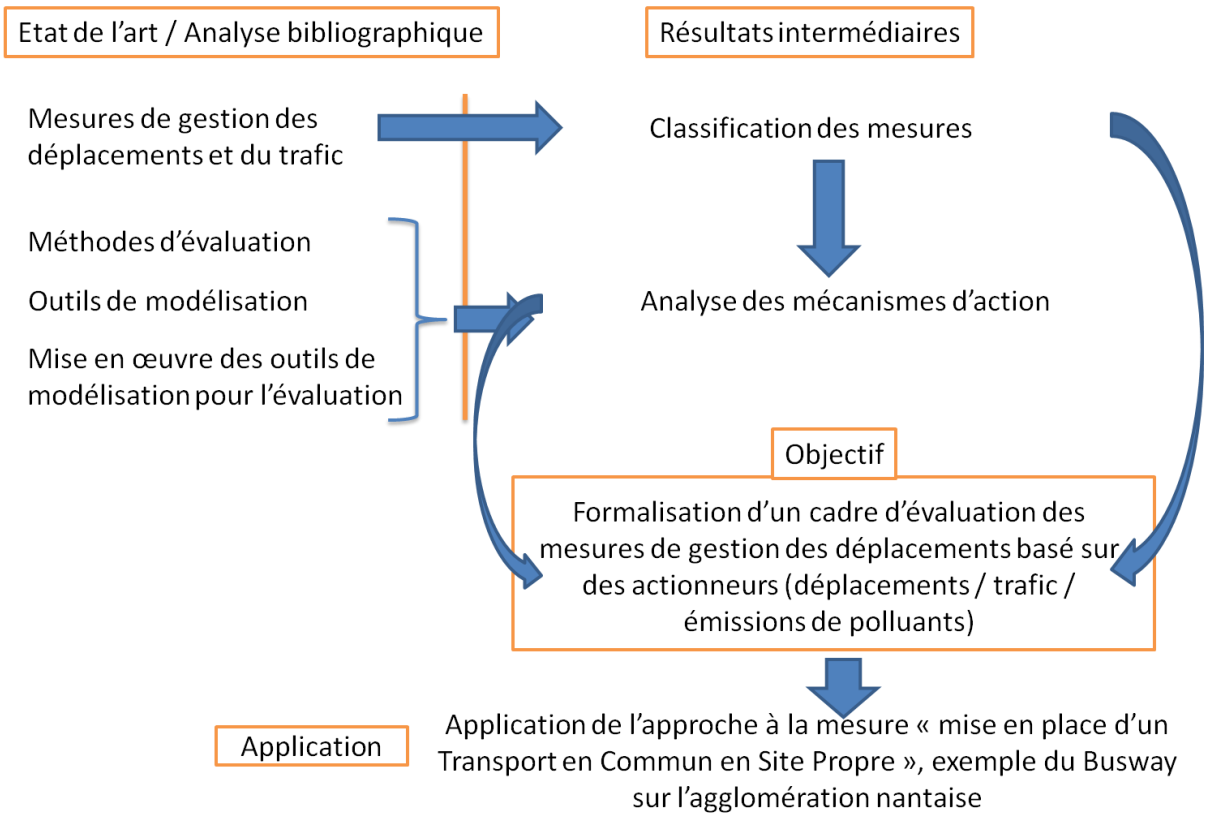


Figure 2 Démarche méthodologique adoptée

L'ensemble de l'approche est pluridisciplinaire : elle fait intervenir des champs thématiques extrêmement larges indispensables à l'étude de la mobilité et de son impact sur l'environnement. Par ailleurs, notre travail a un caractère opérationnel indéniable car la méthodologie finale devrait constituer un outil d'aide à la décision dans le cadre notamment des évaluations environnementales des Plans de Déplacements Urbains.

Le **chapitre 1** décline l'ensemble des mesures de gestion du trafic et des déplacements. Différents retours d'expérience sont présentés pour chaque mesure afin de caractériser leurs effets et leurs impacts. La littérature est abondante pour certaines mesures alors qu'elle est pauvre pour d'autres. Les retours d'expérience sont évidemment dépendants des contextes locaux autant géographiques qu'urbanistiques, mais aussi des autres politiques qui sont appliquées sur le territoire et de la méthode d'observation adoptée. On ne propose donc pas pour chaque mesure un état de l'art exhaustif des retours d'expérience mais plutôt un benchmarking des différentes études. Cette analyse peut permettre de connaître les impacts potentiels en relevant les principales tendances et comparer des agglomérations avec des contextes identiques**.** La grande diversité des mesures nous amène à réfléchir à une manière de les classer afin de faciliter leur évaluation.

Le **deuxième chapitre** de cette thèse porte sur les différentes méthodes d'évaluation. Dans un premier temps, nous analysons comment sont abordées les problématiques environnementales dans les PDU. Cette première partie introductive nous permettra d'analyser les informations définies dans ces plans et sur lesquels pourront se baser les évaluations environnementales (objectifs, impacts attendus, données disponibles…). Nous exposerons ensuite les différentes méthodes d'évaluation environnementale existantes et tenterons de dégager leurs avantages et leurs limites.

Le **chapitre 3** présente un travail de synthèse des différents outils de modélisation disponibles réalisé dans le but d'identifier leurs différentes applications, leurs domaines de validité, leurs limites et leurs avantages. Une première partie présentera les outils de modélisation du trafic et des déplacements, une deuxième partie sera consacrée aux outils de modélisation des émissions de polluants, enfin une troisième partie présentera les différentes possibilités de couplage entre ces deux types d'outils.

La première partie du **chapitre 4** s'appuie sur l'étude de cinq mesures pour définir l'intégration de leurs effets dans les outils de modélisation (les paramètres affectés, les indicateurs produits…). La deuxième partie s'attache à identifier les différentes composantes des deux entités : déplacements / trafic et émissions de polluants afin d'analyser les mécanismes d'action et leur représentation dans les outils.

Le dernier chapitre **(chapitre 5)** présente la formalisation d'un cadre d'évaluation des mesures de gestion des déplacements et du trafic basé sur des actionneurs. Celle-ci est déduite des analyses et des résultats obtenus dans les chapitres précédents (retours d'expérience des mesures, représentation des déplacements, du trafic et des émissions de polluants dans les modèles). Une base de données dose/réponse permettra de définir des impacts en terme de trafic et d'émissions relatifs à des modifications de mobilité et de trafic induites par les mesures. La deuxième partie du chapitre propose une application de cette approche exploratoire au cas de la mise en service du Busway sur l'agglomération nantaise. Les résultats seront comparés avec ceux d'une approche classique. Nous relevons les différents avantages et inconvénients de chaque approche.

Précisions terminologiques

Afin de rendre plus clair l'ensemble de la démonstration présentée dans ce manuscrit, nous définissons les notions utilisées.

Mesures de gestion des déplacements et du trafic

Les mesures sont les solutions (ou les actions) envisagées ou mises en place afin de gérer le trafic et les déplacements. Leur spectre d'action est large pouvant ainsi concerner aussi bien l'offre de transport ou la sensibilisation à un mode de transport. Nos travaux se sont principalement centrés sur les mesures mises en place en milieu urbain. L'ensemble des mesures est largement présenté dans le 1er chapitre.

Évaluation environnementale

L'évaluation environnementale vise à estimer les conséquences et résultats sur l'environnement, tant positifs que négatifs, d'un projet, d'une politique, d'un programme, d'un plan ou d'une réalisation… afin d'en vérifier la qualité. Elle a pour but de déterminer si les objectifs du projet sont ou seront atteints.

Méthode d'évaluation

La méthode d'évaluation est la démarche adoptée permettant de mener une évaluation. Elle dépend essentiellement de l'objectif de l'évaluation. Les méthodes peuvent différer selon leurs principes, leurs étapes, les outils utilisés …

Outil d'évaluation

Nous englobons dans les outils d'évaluation l'ensemble des moyens techniques permettant d'appliquer une méthode. Notre recherche a porté essentiellement sur les outils de modélisation. Néanmoins, les outils peuvent aussi être des mesures in situ de concentrations atmosphériques de polluants, des enquêtes de mobilité …

Les mécanismes d'action

Ces mécanismes sont l'ensemble des phénomènes ou processus intervenant lors de la mise en place d'une mesure pour in fine impacter les émissions de polluants. Dans notre travail, ces mécanismes peuvent mettre en action les composantes des entités.

Entité

Nous avons identifié des entités particulières étant impactées lors de la mise en place d'une mesure : les déplacements et le trafic ainsi que les émissions de polluants. Chacune de ces entités peut être analysée séparément. Néanmoins, de nombreuses interactions interviennent entre elles.

Composantes

Les composantes représentent l'ensemble des caractéristiques qui composent les entités. Le quatrième chapitre de la thèse se focalisera sur la description des composantes de ces deux entités.

Effet des mesures

Un effet est une modification des différentes composantes des entités résultant de la mise en place d'une mesure. Dans notre travail, les effets sont principalement appréhendés par les retours d'expérience.

Impact des mesures

L'impact désigne l'ensemble des variations des émissions de polluants par rapport à l'état initial. L'impact est global, il peut donc être la synthèse des différents effets selon une fonction particulière : agrégation des effets, amplification ou diminution de l'impact par deux effets conjoints…

Actionneur

Les actionneurs (ou stimuli) représentent les éléments que nous avons identifié dans le dernier chapitre comme étant des composantes particulières pouvant être déclinées spatialement et jouant un rôle clé dans les mécanismes d'action.

Chapitre 1 Les mesures de gestion des déplacements et du trafic, classification

Introduction

Les mesures de gestion des déplacements et du trafic sont les actions envisagées ou mises en place afin d'organiser le trafic et les déplacements. Leur spectre d'action est large et peut concerner aussi bien l'offre de transport, la sensibilisation à un mode de déplacement ou la gestion locale du trafic. Elles sont mises en place à différents niveaux par :

- les Autorités Organisatrices de Transport Urbain (AOTU) par le biais des Plans de Déplacements Urbains (PDU) regroupant un ensemble de mesures afin d'organiser les déplacements urbains à l'échelle d'une agglomération,
- les entreprises par le biais de mesures telles que la mise en place d'activités échelonnées ou d'horaires flexibles,
- les instances gouvernementales par le biais de mesures telles que la prime à la casse ou les réglementations en termes d'émissions de polluants…

Avant d'envisager l'évaluation de ces mesures, nous proposons dans ce premier chapitre, de les catégoriser et de les hiérarchiser afin de mieux cibler nos objets d'évaluation et d'envisager leur évaluation par type regroupant des problématiques communes. Cette démarche a pour but d'envisager l'évaluation d'une manière méthodique évitant des analyses répétées sur des questionnements similaires.

Les mesures regroupées au niveau des PDU concernent :

- le développement des transports en commun. et des moyens de déplacement économes et les moins polluants,
- l'aménagement et l'exploitation du réseau principal de voirie d'agglomération,
- le stationnement,
- le transport de marchandises
- et l'encouragement à l'utilisation des transports en commun et du covoiturage pour les déplacements domicile/travail (Loi, 30/12/96).

Ces plans permettent d'envisager une quarantaine de mesures (42 dans le PDU de Nantes) suivant différents objectifs (développer l'offre alternative à la voiture, redéfinir les usages de la voirie, créer de nouveaux franchissements, améliorer la sécurité et l'accessibilité dans les déplacements, organiser le transport de marchandises en ville, utiliser le stationnement comme un outil de maîtrise de la circulation, informer sur l'ensemble des possibilités de transport, suivre et évaluer le PDU, (Communauté Urbaine de Nantes, 2000)). L'analyse des mesures mises en place dans ces plans constitue un premier aperçu de leur diversité. C'est pourquoi, nous nous basons essentiellement sur la description de ces mesures. Néanmoins, nous tenterons d'élargir notre champ d'analyse avec des mesures mises en place dans d'autres cadres.

Dans une première partie, nous recensons et décrivons différentes mesures. La description de chacune d'entre elles est basée sur une grille d'analyse permettant d'identifier un ensemble de caractéristiques. Ainsi, nous identifions leurs objectifs, leurs cibles d'actions, leurs moyens d'action et les effets et impacts observés grâce aux retours d'expérience.

La grande diversité des mesures nous amène dans une deuxième partie à les classer. Un aperçu des différentes classifications relevées dans la littérature ainsi que les critères de la grille d'analyse utilisée dans la première partie nous permettent de relever des éléments pertinents pour la construction d'une classification adaptée à notre étude.

1. CADRE D'ANALYSE DES MESURES DE GESTION DES DEPLACEMENTS ET DU TRAFIC 32

1.1. OBJECTIFS 33
1.1.1. Objectifs d'une mesure en termes d'impact environnemental 33
1.1.2. Objectifs opérationnels d'une mesure 33
1.2. CIBLES D'ACTIONS D'UNE MESURE 33
1.3. MOYENS D'ACTIONS 33
1.4. EFFETS OBSERVES 33
1.4.1. En termes de nombre de déplacements 33
1.4.2. En termes de parts modales 34
1.4.3. En termes de conditions de déplacements 35
1.5. IMPACTS OBSERVES 35
1.5.1. En termes d'émissions de polluants, de consommation d'énergie et d'émissions de GES 35

2. LES MESURES DE GESTION DES DEPLACEMENTS ET DU TRAFIC 36

2.1. MESURES PERMETTANT D'AUGMENTER L'ATTRACTIVITE DES TRANSPORTS EN COMMUN. 36
2.2. MESURES PORTANT SUR L'ATTRACTIVITE DES MODES DOUX 38
2.3. MESURES FAVORISANT L'INTERMODALITE 39
2.4. MESURES AFFECTANT LE RESEAU DE VOIRIES 43
2.5. ORGANISATION DU TRANSPORT DE MARCHANDISES EN MILIEU URBAIN 46
2.6. ORGANISATION DU STATIONNEMENT 47
2.7. RESTRICTION SPATIALE DE L'UTILISATION DE LA VOITURE 48
2.8. ARTICULATION ENTRE TRANSPORT ET URBANISME 49
2.9. INFORMATION SUR LA MOBILITE 50
2.10. MESURES AFFECTANT LE PARC DE VEHICULES 50
2.11. AUTRES MESURES 51
2.12. COMBINAISON DE MESURES 52
2.13. CONCLUSION 53

3. CLASSIFICATION DES MESURES 54

3.1. CLASSIFICATIONS EXISTANTES 54
3.1.1. Gestion des déplacements versus gestion du trafic 54
3.1.2. Push and Pull measures 54
3.1.3. Classification selon les « objectifs » des mesures 55
3.1.4. Classification selon les moyens d'actions 55
3.1.5. Classification selon des indicateurs de trafic et d'émissions de polluants 56
3.1.6. Classification combinée par moyens d'action et modes de transport affectés 56
3.1.7. Mesures principales et mesures complémentaires 58
3.1.8. Hiérarchisation des mesures par leurs effets 59
3.1.9. Classifications spécifiques 59
3.1.10. Autres classifications 60
3.2. CLASSIFICATION PROPOSEE DANS LE CADRE DE L'EVALUATION DE L'IMPACT DES MESURES SUR LES EMISSIONS DE POLLUANTS 61

CONCLUSION 65

1. Cadre d'analyse des mesures de gestion des déplacements et du trafic

Des listes de mesures ont déjà été exposées dans la littérature (AIUTO, 1999). Néanmoins, elles ne s'accompagnent jamais d'une description complète de chacune des mesures. Nous proposons donc dans cette première partie, une mise à plat d'une quarantaine de mesures. On se propose de les décrire, de les caractériser et de définir leurs effets potentiels ou obtenus à partir de retours d'expérience.

Afin de rendre notre présentation plus pertinente, nous tentons de définir pour chacune d'entre elles les paramètres identifiés dans la grille d'analyse (Figure 3). Cette grille ne constitue en aucun cas une classification des mesures, elle permet simplement d'avoir une base d'analyse de chacune des mesures. Néanmoins, certains critères pourront éventuellement apparaître pertinents pour une classification des mesures dans le cadre de leur évaluation, après analyse et synthèse de l'ensemble des descriptions des mesures.

Nous décrivons dans les sous-sections suivantes la nature et les caractéristiques des critères afin de recenser, pour chaque mesure, des informations comparables.

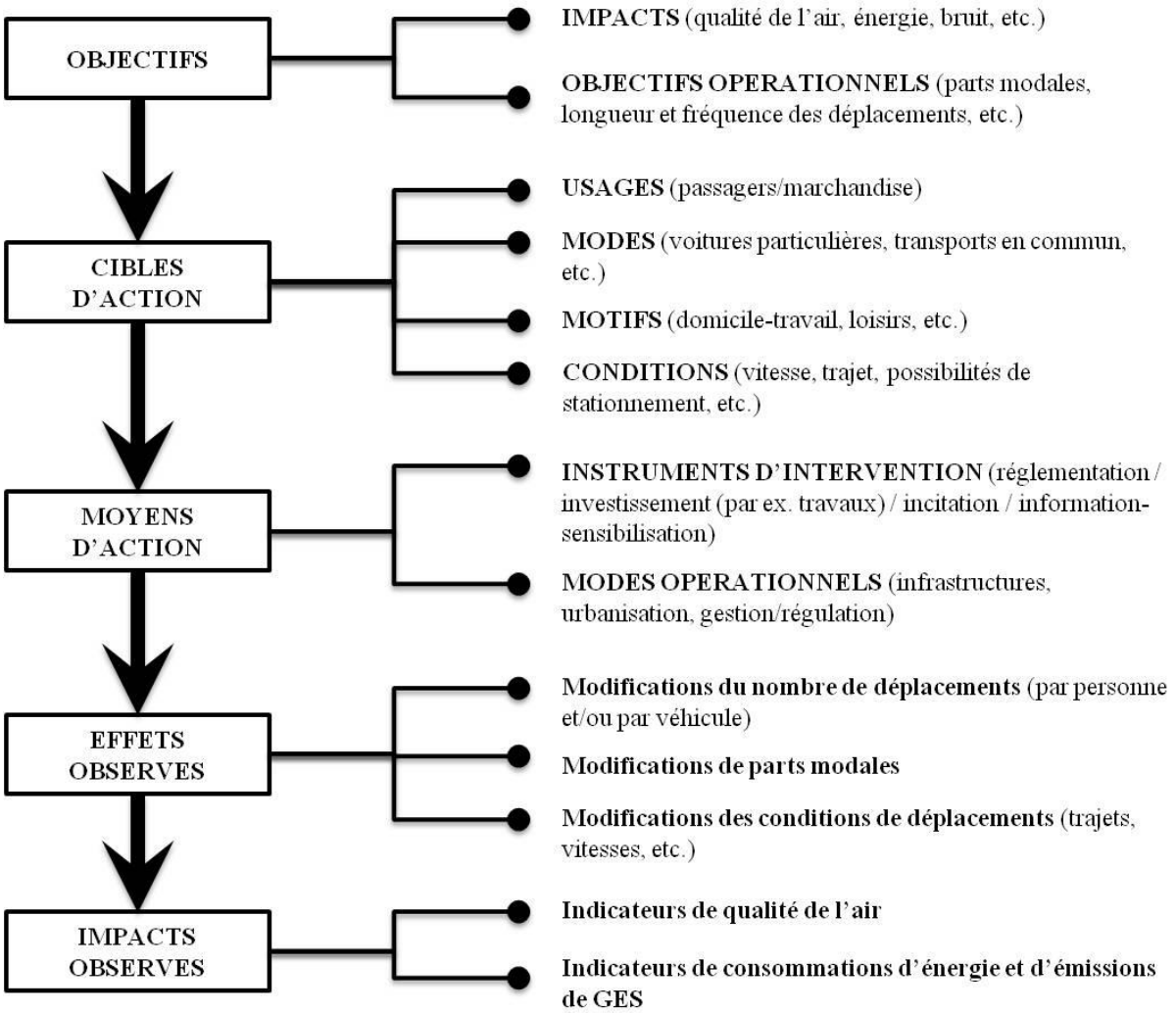


Figure 3 Grille d'analyse des mesures de gestion des déplacements modifiée à partir de (Broc & Bourges, 2009)

1.1. Objectifs

1.1.1. Objectifs d'une mesure en terme d'impact environnemental

Les objectifs dépendent clairement du cadre d'application de la mesure mise en place. Les objectifs et donc la définition des impacts ne sont ainsi pas systématiquement relatifs à l'environnement. L'objectif d'une mesure est généralement, en premier lieu, la gestion des déplacements. Les différentes lois comme la loi relative à la Solidarité et au Renouvellement Urbain (SRU) ont orienté les objectifs des PDU vers des objectifs environnementaux. Dans les PDU, ces objectifs sont malgré tout rarement formulés alors que dans le cadre d'une évaluation environnementale, ils sont essentiels afin d'évaluer les impacts observés.

1.1.2. Objectifs opérationnels d'une mesure

Une mesure est programmée en fonction d'objectifs (définis dans les PDU à partir des conclusions de l'état initial et des enjeux du territoire). Ces objectifs, si la mesure entre dans le cadre des PDU, sont en cohérence avec les objectifs définis dans la Loi sur l'Air et l'Utilisation Rationnelle de l'Energie (LAURE) (Annexe 1). Ces objectifs opérationnels sont très fréquemment définis en termes de parts modales.

1.2. Cibles d'actions d'une mesure

Afin d'être efficace, une mesure cible généralement certaines composantes de l'ensemble des déplacements urbains. Ces cibles peuvent être liées à l'usage, c'est-à-dire aux éléments qui se déplacent ou sont déplacés (passagers ou marchandises). Elles peuvent être liées aux motifs de déplacement (domicile-travail dans le cas des P+R par exemple, ou achat dans le cas des dessertes en transports en commun de grands sites commerciaux). Les mesures peuvent aussi porter sur un ou plusieurs modes de déplacements (TC, Voiture particulière…).

1.3. Moyens d'actions

Les moyens d'actions sont les outils déployés afin de mettre en œuvre cette mesure (réglementation : horaires de livraisons de marchandises dans les centres villes, investissement : construction d'une ligne de tramway, incitation : augmentation de la fréquence des TC, information/sensibilisation : campagnes de sensibilisation au covoiturage). Le mode opérationnel est le type d'actions déployées : construction d'infrastructures, urbanisation, gestion, régulation …

1.4. Effets observés

1.4.1. En terme de nombre de déplacements

Une mesure peut avoir comme effet de créer ou de supprimer des déplacements. Dans le cas de la création de déplacements, les personnes n'effectuaient pas ce déplacement auparavant (même avec un autre mode de déplacement). C'est typiquement le cas de l'utilisation des vélos en libre

service pour se promener en ville, certaines personnes réalisent un déplacement qu'elles n'auraient pas effectué sans ce mode de transport. Dans le deuxième cas, les personnes n'effectuent plus le déplacement. C'est le cas par exemple du déplacement pour le motif achat dans les zones soumises à un péage urbain. Certaines personnes vont préférer abandonner ce déplacement, trop coûteux, grouper leurs achats ou les effectuer sur internet.

1.4.2. En termes de parts modales

La répartition de l'ensemble des déplacements suivant le mode choisi et sur un territoire particulier peut être modifiée soit par des transferts modaux soit par une augmentation ou une diminution du nombre de déplacements effectués avec un mode particulier. L'action de transfert modal est dépendante de plusieurs critères :

- Le temps de parcours entre le lieu de départ et le lieu d'arrivée : ce temps de déplacement serait un des critères les plus importants dans le choix modal (Vande Walle & Steenberghen, 2006)

- Le coût du déplacement : péage, prix de l'essence, coût d'un ticket de transport en commun…

- L'enchaînement de plusieurs déplacements : il est montré dans (Vande Walle & Steenberghen, 2006) que plus les chaînes de déplacements sont complexes, c'est-à-dire, plus elles impliquent d'activités, plus elles sont effectuées en voiture. Ceci s'explique par le fait même que l'automobile est beaucoup plus flexible. Pour effectuer une chaîne de déplacements complexes (comprenant plusieurs motifs de déplacements), un mode de transport flexible sera ainsi plus efficace en termes de temps de déplacements.

- Le motif de déplacement (Thomann)

- La distance de déplacement : ce critère pèserait beaucoup moins dans le choix de transport que le temps de déplacement (Vande Walle & Steenberghen, 2006)

- Les indicateurs socio-économiques caractérisant l'individu effectuant ce choix : son revenu, la composition du ménage auquel il appartient, son accessibilité à un véhicule, son âge, son sexe…

- L'accessibilité du lieu de destination avec les différents modes de déplacements : places de stationnement, arrêt de Transports en Commun, nombre de correspondances de TC nécessaires…

Le choix de mode de transport correspond, pour une personne qui effectue un déplacement donné, au moyen de déplacement qu'elle utilise pour effectuer ce déplacement. Les différents modes de déplacement en milieu urbain sont : la voiture, la moto, les transports publics (TCSP, bus, train, transports interurbains…), le vélo, la marche à pied, le covoiturage ou encore une combinaison de plusieurs de ces modes de déplacement (déplacements multimodaux).

Les changements de comportement peuvent s'effectuer de différentes manières : changement dans le choix du mode de transport (TC, voiture, vélo…) ou dans le type d'utilisation d'un mode de transport (covoiturage, déplacement multimodal…). Les transferts modaux peuvent être observés entre tous les modes (voiture vers TC, TC vers vélo, mais aussi marche à pied vers voiture…). Mais il semblerait que les différents types de transferts modaux puissent être dépendants des trajets et des contextes. (Schuitema, Steg, & Vlek, 2007) et (Eriksson, Nordlund, & Garvill, 2010) montrent en effet que les déplacements courts effectués en voiture sont plus facilement remplacés par des déplacements en vélo ou à pied en réponse à une augmentation des prix des carburants alors que les déplacements longs en voiture sont plus facilement remplacés par le train ou le bus en réponse à une baisse des prix des tickets de transport public.

Le choix modal est aussi réalisé pour le transport de marchandises. En milieu urbain, celles-ci peuvent être transportées par rail, par route ou par une combinaison de plusieurs modes.

1.4.3. En termes de conditions de déplacements

Les conditions de déplacements peuvent être caractérisées par les indicateurs décrivant le flux des véhicules : la vitesse, le débit, l'itinéraire ainsi que le temps de parcours aussi bien pour les VP, PL que pour les TC. Concrètement, suite à la mise en place d'une mesure de gestion des déplacements, les vitesses moyennes des véhicules particuliers, par exemple, peuvent être diminuées soit directement suite à une baisse de la vitesse limite, soit indirectement, suite à la baisse de capacité d'une infrastructure routière. Les conditions de déplacement seront décrites au niveau local et au niveau de l'agglomération suivant les types de mesures.

1.5. Impacts observés en termes d'émissions de polluants, de consommation d'énergie et d'émissions de GES

Les impacts en termes d'émissions de polluants, de consommation d'énergie et d'émissions de GES sont directement liés au nombre total de déplacements, de kilomètres parcourus et à de nombreux autres paramètres tels que la durée du déplacement à froid, les conditions de circulation, le comportement de conduite, l'entretien du véhicule, l'utilisation d'auxiliaires, la composition du parc de véhicules … Les impacts peuvent être observés à l'échelle d'un ou d'un ensemble de véhicules.

Rappelons que des paramètres conjoncturels peuvent interférer avec les effets et les impacts des mesures. Ces effets conjoncturels peuvent être : l'évolution démographique ou économique, le vieillissement et le renouvellement naturel du parc de véhicules c'est-à-dire le remplacement de véhicules anciens par des véhicules neufs ou encore les conditions météorologiques qui peuvent influer sur les conditions de circulation mais aussi sur la dispersion des polluants dans l'atmosphère. Il est très difficile d'isoler ces éléments conjoncturels et les effets des mesures.

2. Les mesures de gestion des déplacements et du trafic

Nous proposons ci-après une déclinaison exhaustive des différentes mesures. Afin de faciliter la lecture de cette déclinaison, nous proposons de classer ces mesures comme suit :

- Mesures permettant d'augmenter l'attractivité des transports en commun
- Mesures portant sur l'attractivité des modes doux
- Mesures favorisant l'intermodalité
- Mesures affectant le réseau de voiries
- Organisation du transport de marchandises en milieu urbain
- Restriction spatiale de l'utilisation de la voiture
- Articulation entre transport et urbanisme
- Information sur la mobilité
- Autres mesures
- Combinaison de mesures

Cette classification n'est pas pertinente dans le cadre de notre étude, elle permet simplement d'organiser, dans un premier temps, l'ensemble des mesures. Nous discuterons, par la suite, de la manière dont pourraient être classées ces mesures.

Nous présentons une liste synthétique des mesures en Annexe 2.

2.1. Mesures permettant d'augmenter l'attractivité des transports en commun

L'ensemble de ces mesures permet de développer l'offre alternative à la voiture en augmentant l'attractivité des transports en commun.

Mesure 1. **Augmentation de la fréquence des transports en commun :** Cette mesure consiste à augmenter l'offre en transport en commun par la fréquence des dessertes. Elle a comme objectif de diminuer le temps d'attente. Les effets observés paraissent faibles : il est ainsi montré dans (Gandit, 2007) que la fréquence de passage des bus n'est pas liée à l'utilisation des transports en commun alors qu'un nombre de correspondances à effectuer important est associé à une plus faible utilisation des transports en commun. Néanmoins, une enquête présentée dans (IAURIF, 2009) montre d'une part que le temps de parcours (77%) est le facteur déterminant du choix de mode de transport, loin devant les critères de sécurité, de propreté (12%), et de confort (4%) et que les clients potentiels des TC sont plus sensibles aux fréquences qu'à la proximité d'un arrêt.

Mesure 2. **Mise en site propre de lignes de transports en commun :** Un transport en commun en site propre (TCSP) emprunte une voie ou un espace qui lui est réservé, pas nécessairement sur toute la longueur de la ligne, mais généralement sur les portions les plus encombrées. L'objectif de cette mesure est de diminuer le temps de parcours des TC notamment aux heures de pointe durant lesquelles le trafic automobile dense peut contraindre la vitesse des TC lorsqu'ils circulent sur la même voie. La mise en site propre permet aussi de limiter la place accordée aux voitures particulières, en réduisant la capacité des voies ainsi qu'en donnant la priorité aux véhicules en site propre par la mise en place de feux de signalisation aux intersections.

Mesure 3. **Réduction des tarifs d'utilisation des transports en commun :** Cette mesure consiste à baisser le prix des tickets de transport en commun ou à mettre en place des abonnements (spécifiques ou non à une catégorie de population : étudiants, séniors,…). De nombreuses études ont analysé les effets de la gratuité des transports. L'étude de (Bamberg & Schmidt, 2001) montre que la mise en place de la gratuité des TC pour les étudiants a entraîné une baisse de 13 % de l'utilisation de

la voiture chez ceux-ci. Des changements de comportement similaires (transfert modal de la voiture vers les transports en commun) ont été observés dans les études de (Bamberg & Schmidt, 2003), (Hunecke, Blobaum, Matthies, & Hoger, 2001) suite à la mise en place de la gratuité des transports en commun pour toute la population mais la part des transferts est moindre. D'autres études ont tenté d'évaluer les effets de la mise en place de cette mesure sur une période de temps limité dans le but de sensibiliser les usagers à l'utilisation des transports en commun. Celles-ci montrent que pendant la période où le titre de transport est gratuit, les reports modaux de la voiture vers les TC sont significatifs (Bamberg & Schmidt, 1999) (Thogersen & Moller, 2008) (Fujii & Kitamura, 2003). Cependant, lorsque cette phase est terminée et que les utilisateurs doivent payer le plein tarif, l'étude de (Fujii & Kitamura, 2003) montre que la majorité des personnes abandonne les transports en commun mais que le taux d'utilisation des TC est encore légèrement supérieur au groupe témoin qui n'avait pas bénéficié de la gratuité des transports en commun dans la première période de l'expérience. L'étude de (Thogersen & Moller, 2008) montre quant à elle que le taux d'utilisation des TC est revenu au niveau du groupe témoin après la phase de gratuité des transports en commun. Les deux études émettent donc des conclusions contradictoires. Pour la première, la sensibilisation aux transports en commun par la gratuité temporaire du ticket peut produire une augmentation de l'utilisation des transports en commun ainsi qu'une baisse de l'habitude d'utiliser sa voiture. Pour la deuxième étude, la connaissance insuffisante du fonctionnement du réseau des transports collectifs et notamment des horaires de passage des véhicules ainsi que la tarification élevée des tickets ne sont pas les barrières les plus importantes dans l'utilisation des transports en commun.

Mesure 4. **Organisation temporelle de l'offre en transports en commun** : Cette mesure consiste à répartir temporellement les horaires de passage des véhicules de transport en commun suivant les besoins des individus. Cela peut être la mise en place de bus de nuit ou de transport à la demande ou la réorganisation des horaires de bus pendant les vacances scolaires par exemple. Cette mesure a pour objectif de proposer une offre en transports en commun pour les individus qui souhaitent se déplacer pendant ces périodes de temps.

Mesure 5. **Augmentation de l'offre kilométrique du réseau de transports en commun :** Cette mesure peut prendre la forme d'une mise en service de nouvelles lignes de transports en commun (métro, tramway, bus, etc.) ou de l'extension de lignes existantes. L'objectif principal de cette mesure consiste à favoriser le transfert modal de la voiture particulière vers les transports en commun. Cette mesure peut induire des déplacements en TC, c'est-à-dire encourager la réalisation de nouveaux déplacements (Vieira, Moura, & Viegas, 2007) (Acutt & Dodgson, 1997). L'accessibilité nouvelle ou renforcée de certains lieux, induite par la mise en place de ces nouvelles infrastructures, peut modifier l'attractivité de ces lieux et donc la structuration des déplacements (c'est-à-dire les lieux d'origine et de destination des déplacements). L'augmentation de cette offre peut aussi consister en la mise en place de moyens de transport répondant à des demandes spécifiques : desserte des zones urbaines ou périurbaines peu denses, des espaces périphériques, desserte fine de l'hypercentre. Elle peut enfin concerner une population cible particulière (personnes âgées, isolées…), c'est le cas du transport à la demande.

Mesure 6. **Hiérarchisation du réseau de transports en commun :** Cette organisation permet de mailler le réseau des TC en définissant des axes forts, en hiérarchisant les axes et en permettant une meilleure lisibilité de celui-ci afin d'éviter les itinéraires complexes nécessitant la réalisation de plusieurs correspondances. La hiérarchisation du réseau peut aussi passer par la redéfinition de types de lignes (lignes express, classiques, de nuit, lignes à la demande) associées à des fréquences spécifiques (IAURIF, 2009). L'organisation de cette offre semble avoir un impact important sur le choix modal (Gandit, 2007).

Mesure 7. **Mise en place d'une information aux voyageurs des TC grâce aux Panneaux à Message Variable (PMV)** : L'objectif de cette mesure est de faciliter l'utilisation des transports en commun en fournissant aux usagers des informations en temps réels sur les délais d'attente des véhicules. Elle doit permettre un transfert modal vers les TC mais son effet est limité. Elle doit être mise en place avec d'autres mesures pour que son effet soit significatif.

2.2. Mesures portant sur l'attractivité des modes doux

La plupart des mesures présentées dans cette partie (sauf peut être la mise en place de vélos en libre service) sont inefficaces seules. Elles doivent être combinées avec d'autres mesures afin que leurs effets (notamment sur le transfert modal) soient significatifs.

Mesure 8. **Augmentation de l'offre de pistes ou bandes cyclables**[4] : L'objectif de cette mesure est de favoriser le transfert modal de la voiture particulière vers le vélo. Mais, appliquée seule cette mesure ne permet pas d'obtenir des effets significatifs. Il est ainsi montré que cette mesure doit être associée avec la mise en place de moyens de dissuasion de l'usage de la voiture en ville (réduction du nombre de places de stationnement ou augmentation des tarifs de stationnement, baisse de la vitesse, baisse de la capacité de la voirie pour les VP), d'aménagements pour le stationnement des vélos, d'une sensibilisation à l'usage du vélo, de faibles coûts des TC et du train et d'une densification urbaine afin de limiter la longueur des déplacements (CERTU, 2001a).

Les utilisateurs du vélo sont principalement les hommes (AURAN, 2004; CERTU, 2001a; IFEN, 2003), les étudiants (CERTU, 2001a) et les moins de 25 ans (AURAN, 2004; IFEN, 2003). Ce serait plutôt des actifs résidants en centre ville et effectuant leurs déplacements domicile-travail (IFEN, 2003).

Le déplacement moyen est de 3 km (CERTU, 2001a) (AURAN, 2004). Le domaine de compétitivité de l'utilisation du vélo concerne les déplacements de moins de 5 km effectués en ville (CERTU, 2001a), (Treil, 2005), (IFEN, 2003).

L'impact de l'augmentation de la pratique du vélo en terme de réduction des émissions de gaz à effet de serre est mesuré dans (Bussière & Bernard, 2000). Il est ainsi montré que dans la Province de Québec, si les cyclistes avaient utilisé la voiture plutôt que le vélo, le volume d'émissions de CO_2 attribuables à l'activité automobile et autobus aurait augmenté de 6% (sachant que la part modale des vélos était en 1995 de 21%). Dans cette étude, tous les déplacements en vélo aussi bien les déplacements de loisirs que les déplacements utiles (pour la plupart domicile-travail) sont pris en compte. La part des déplacements de loisirs est très importante (83%).

Les effets de cette mesure sont observables sur le long terme (CERTU, 2001a).

Mesure 9. **Mise en place d'équipements permettant le stationnement des vélos et des deux roues** *:* Les stationnements de vélos et deux roues sont constitués de supports physiques tels que des arceaux, des parcs vélos … Leur implantation en milieu urbain se fait généralement aux abords des stations de transports en commun (train, métro, tramway, bus) et des parcs de stationnement automobile pour favoriser la multimodalité et ainsi augmenter la surface de rabattement des TC (Treil, 2005), notamment en périphérie de l'aire urbaine, comme dans les zones fortement achalandées (centre-ville, entrées des voies piétonnes, etc.). Les dispositifs peuvent être gardés ou surveillés.

Mesure 10. **Sensibilisation à l'utilisation du vélo** : Cette sensibilisation peut être effectuée au travers de différentes outils (Plan de Déplacements Entreprise, Plan de Déplacements des Etablissements Scolaires, vélobus …) et à destination de différents publics.

Mesure 11. **Mise en place de Vélos en libre service** (VLS): Un système de vélos en libre service met à disposition du public des vélos, gratuitement ou non. Ce service de mobilité permet d'effectuer des déplacements de proximité principalement en milieu urbain. L'étude de (Ravalet, Bussière, & Collomb, 2008) analyse, grâce à la comparaison de deux EMD effectuées sur Lyon (1995

[4] Une piste cyclable est une section de chaussée spécifique dévolue exclusivement aux cyclistes. Elle est matériellement isolée des voies de circulation des véhicules motorisés, et distincte des trottoirs en ville. Une bande cyclable est une voie contiguë à la chaussée, réservée aux cyclistes. Elle est délimitée par des bandes blanches peintes au sol.

et 2006) l'effet de la mise en place des VLS (2006). L'étude fait apparaître une évolution de 124 % de la pratique du vélo. Il dispose d'une image positive (écologique, respectueux de l'environnement). Les utilisateurs sont en priorité les hommes (75%). On observe une très forte augmentation de l'utilisation du vélo chez les 30-35 ans, les travailleurs (mais avec une prédominance des étudiants), de la part des cadres (augmentation de 6 à 24 % chez les cyclistes), et pour les déplacements domicile travail (évolution de 28% en 1995 à 34% en 2006 des déplacements vélo). Les personnes utilisant leur vélo habitent de plus en plus aux alentours du centre ville. La proportion la plus importante de déplacements effectués en vélo se situe pour une distance à vol d'oiseau entre 1 et 2 km, elle est encore élevée pour des distances entre 2 et 3 km. Les citadins concernés par la pratique du vélo sont des adultes actifs plutôt aisés, résidants dans le centre. La pratique du vélo est favorisée dans les endroits où la densité urbaine est importante. Ces données sont confirmées par l'étude de (AURAN, 2004). Cette mesure permet de sensibiliser la population à l'utilisation du vélo en rendant visible le vélo dans la ville.

Mesure 12. **Augmentation de l'offre d'itinéraires piétonniers** : Les aménagements piétonniers peuvent être : des passages piétons adaptés et sécurisés, des voies piétonnes, des itinéraires piétons pour relier les principaux points structurants du territoire, la mise en place de trottoirs,… Cette mesure permet de favoriser le report modal de la voiture vers la marche à pied pour les déplacements de faible distance.

Mesure 13 : **Actions encourageant la pratique du covoiturage :** Le covoiturage est l'utilisation conjointe et organisée (à la différence de l'auto-stop) d'un véhicule, par un conducteur non professionnel et un ou plusieurs tiers passagers, dans le but d'effectuer un trajet commun. Des actions de sensibilisation peuvent être réalisées dans le cadre des Plans de Déplacements Entreprise (PDE) par exemple ou grâce à la mise en place de sites internet dédiés à l'organisation du covoiturage. Des places de parking ou encore des voies d'autoroutes réservées (comme c'est le cas aux Etats-Unis) pour les pratiquants peuvent être mises en place. Cette mesure permet de réduire le nombre de déplacements VP en augmentant le nombre de personnes par véhicule.

2.3. Mesures favorisant l'intermodalité

Les critères favorisant les pratiques intermodales sont de plusieurs types :

- les difficultés de stationnement à destination
- le gain de temps (dans le cas de ville où le stationnement est difficile et la congestion importante)
- le coût monétaire moins important
- le moyen d'éviter le stress de la circulation …

Les mesures traitant de l'offre de stationnement à destination du déplacement seront traitées dans la partie 2.6. L'ensemble des mesures présentées joue sur les autres critères.

Mesure 14 : **Mise en place d'un titre de transport multimodal :** un titre de transport multimodal permet de voyager sur différents réseaux de transport (tram, train, car, bus …) à la fois. Cette mesure permet de faciliter l'utilisation des TC pour les déplacements complexes (correspondance, changement de mode de déplacements…).

Mesure 15 : **Aménagement de pôles d'échanges intermodaux** : Un pôle d'échanges est un lieu d'articulation des réseaux qui vise à faciliter les pratiques intermodales entre différents modes de transport de voyageurs. Les pôles d'échanges peuvent assurer, par leur insertion urbaine, un rôle d'interface entre la ville et son réseau de transport. Ils permettent de favoriser le report modal vers les transports en commun.

Mesure 16 : **Création de parcs relais sur des lignes de TC structurantes** : Un parc relais est un espace de stationnement pour automobiles, situé en périphérie d'une ville et destiné à inciter les

automobilistes à accéder au centre-ville en transport en commun : métro, tram, train de banlieue ou bus. Le véhicule est donc garé dans un espace extérieur ou intérieur jusqu'au retour du passager. Le parc peut être payant ou gratuit, gardé ou non.

Différents objectifs opérationnels ou environnementaux sont mis en avant (CERTU & CETE de Lyon, 2010), (Margail, 1996), (Marsden, 2006) :

- Favoriser le transfert modal vers les transports en commun, en améliorant la complémentarité de mode au sein d'un même déplacement et en optimisant l'usage des transports en commun
- Protéger le centre ville du trafic automobile et de ses nuisances associées
- Améliorer l'accessibilité au centre ville
- Améliorer l'espace public en créant des places de stationnement à proximité des lignes d'axe lourd TC pour éviter le stationnement sauvage autour de ces lieux d'échange
- Investir à moindre coût dans l'augmentation de l'offre en transports collectifs

Les principales cibles de cette mesure sont les pendulaires motorisés qui habitent en périphérie du centre et pour qui la nouvelle offre proposée facilite l'utilisation des TC pour les trajets domicile-travail. Cela permet ainsi de désengorger les voies principales de circulation (Margail, 1996) (CERTU & CETE de Lyon, 2010).

La modification des parts modales suite à la mise en place d'un P+R résulte d'un transfert entre les différents types de trajet présentés dans la Figure 4. La partie verte représente l'offre de transport avant la mise en place du P+R et la partie bleue l'offre avec la mise en place du P+R. Avant la mise en place du P+R, les usagers avaient le choix entre : un déplacement effectué en totalité en transport individuel (TI) (trait vert), un déplacement effectué en totalité en transport en commun (TC) (pointillés) ou pour moitié en TI et pour moitié en TC mais avec des conditions de transfert non structurées. La mise en place du P+R permet de structurer ce transfert en proposant une offre de stationnement appropriée.

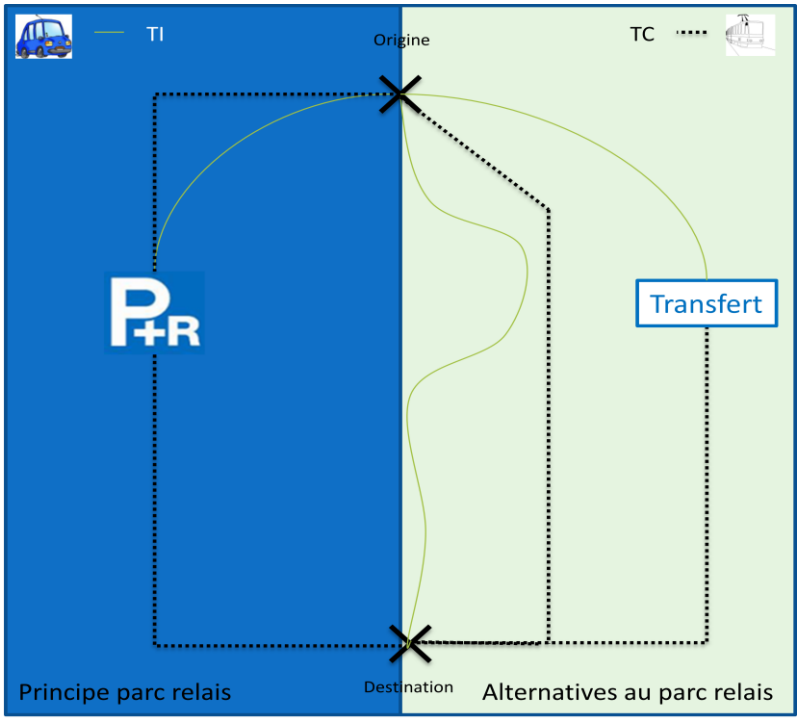


Figure 4 Principe des parcs relais - Schéma issu de (CERTU & CETE de Lyon, 2010)

Les effets de la mise en place des P+R dépendraient de différents facteurs :

- De son dimensionnement (nombre de places) (CERTU & CETE de Lyon, 2010),
- Des conditions d'utilisation : qualité de l'offre TC proposée en connexion avec le P+R, conditions d'accès en voiture, tarification, information et communication, sécurité de l'aménagement. Il est par exemple montré dans (Prady) que 60% des anciens utilisateurs de VP, et à présent nouveaux usagers des P+R ont recours à l'intermodalité car le P+R leur offre la possibilité de se stationner gratuitement et facilement au niveau du P+R contrairement aux conditions de stationnement dans la zone de destination de leur déplacement (manque de place, coût de stationnement).
- Et enfin de la localisation du P+R. Selon le CERTU, le P+R doit être situé suffisamment en amont de la congestion pour éviter à l'automobiliste de souffrir des embouteillages mais pas trop en amont pour dissuader l'automobiliste d'effectuer un plus long déplacement avec son véhicule. De plus, ils doivent être situés au plus près des lieux d'origine des déplacements de la population cible (i.e. ceux visés par l'utilisation du P+R) (CERTU & CETE de Lyon, 2010). Une typologie des P+R selon leur localisation est effectuée dans (OFEN, 2004). Elle est présentée dans la Figure 5.

(OFEN, 2004) définit ainsi quatre types de P+R :

- Les P+R situés sur des couloirs d'approche semi-urbain ou rural (en jaune) : le transfert se fait sur le réseau TC urbain (autobus) ou interrégional (train) et permet l'accès à la ville. Le transport collectif peut être en site propre urbain ou régional ou en site banal urbain (en jaune).
- Les P+R situés en périphérie urbaine (en bleu) : le transfert se fait sur le réseau TC urbain et permet l'accès au centre-ville. Le transport collectif peut être en site propre urbain (tram) ou en site banal urbain.
- Les P+R situés en gare de centre-ville : le transfert se fait sur le réseau TC interrégional et permet l'accès à d'autres villes.
- Les P+R donnant accès à certaines stations touristiques (en vert) : le transfert se fait sur le réseau TC de la station.

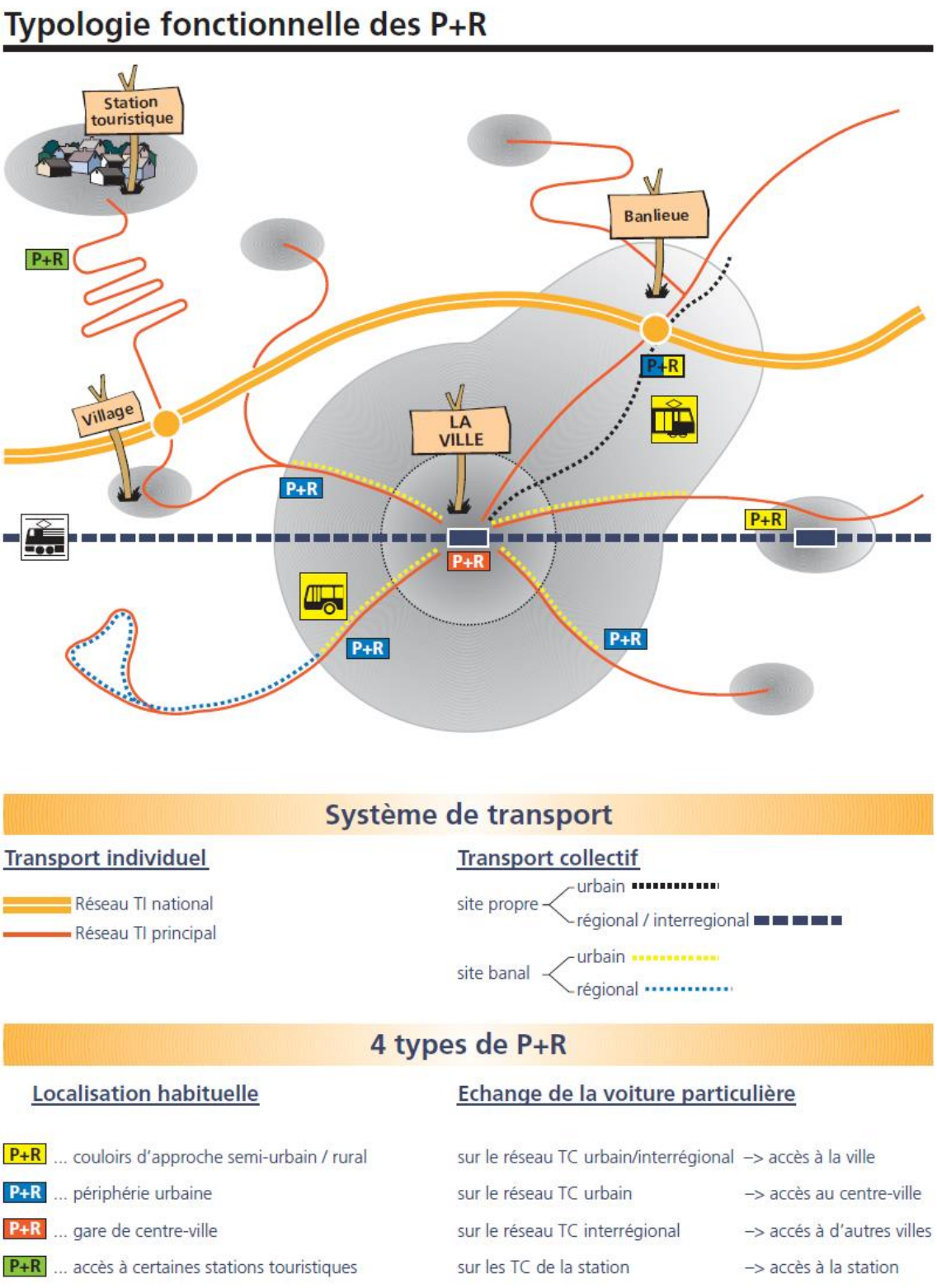


Figure 5 Typologie fonctionnelle des P+R

Pour donner un ordre de grandeur de la part des déplacements multi modaux, nous pouvons citer les résultats de l'EMD 2006 de Lyon qui mentionnent une part de 1,5% des déplacements totaux et de 2,1% des déplacements mécanisés (SYTRAL, 2007). Par ailleurs, le potentiel d'usagers utilisant les TC suite à la mise en place de parcs relais serait de 5 à 7 % de la clientèle des axes lourds (CERTU, 2003).

Les effets des P+R sur le nombre de kilomètres effectués en VP sont variables suivant la localisation des P+R. Selon la typologie présentée dans (OFEN, 2004) sur le cas Suisse, on observe une baisse du nombre de kilomètres effectués en VP de -50% pour les P+R de type couloir d'approche et gare de centre ville, alors que l'on observe plutôt une augmentation du nombre de kilomètres effectués en VP de l'ordre de +55% pour les P+R en périphérie. Or, en France, 70% des parcs relais sont du type périphérie urbaine en étant situés entre 2 et 5 km du centre ville (CERTU & CETE de LYON, 2010).

L'étude de (OFEN, 2004) montre par ailleurs que le nombre de déplacements pour les utilisateurs des P+R n'augmente pas. Néanmoins, le fait d'utiliser le P+R modifierait les habitudes de mobilité, bénéficiant en majorité aux transports collectifs, pour 1 utilisateur sur 2.

De nombreuses études relativisent les effets des P+R. Il convient en effet, de distinguer les usagers qui réalisaient la totalité de leur trajet en VP de ceux qui utilisaient un autre type de TC (bus) avant la mise en place de l'infrastructure et qui, après cette mise en place, utilise leur voiture jusqu'au parc relais car celui-ci offre des conditions de confort et de rapidité plus appréciables que les TC (CERTU & CETE de LYON, 2010). (Margail, 1996) explique que la part des usagers n'utilisant auparavant que la voiture n'est pas aussi importante que ce qui est souvent grossièrement estimé. On peut considérer qu'un tiers des usagers du parc correspond à des nouveaux usagers. (OFEN, 2004) confirme cet ordre de grandeur à partir d'une étude allemande qui avance une part de 32% des usagers. Toutefois, les enquêtes de fréquentation des parcs relais de l'agglomération de Montpellier montrent que deux tiers des usagers de ces parcs n'utilisaient pas les transports en communs avant la mise en place de la ligne de tramway et la création du P+R (CERTU, 2005), (Prady). La mise en place des P+R conjointement à la création d'axes lourds pourrait amplifier les effets de la seule création d'axes lourds.

Enfin, le rôle des parcs relais sur l'étalement urbain est souvent évoqué mais peu d'études ont été menées sur ce sujet. (Margail, 1996) cite deux études : une allemande et l'autre anglaise qui montrent que le centre ville étant accessible dans des conditions optimales (places disponibles et gratuites dans le P+R, offre TC performante), les habitants peuvent choisir un domicile plus attractif (en terme de prix d'achat, de m^2 ...) en périphérie. Ce qui a non seulement pour effet d'augmenter la longueur des déplacements mais contribue également à aller à l'encontre d'une « ville compacte ».

Les impacts sur l'environnement des P+R sont directement liés au nombre de kilomètres réalisés en VP. Dans (OFEN, 2004), le bilan énergétique se révèle positif pour l'utilisation des P+R de type couloir d'approche, la diminution de l'énergie consommée par l'utilisateur est de l'ordre de 35% en moyenne, mais avec une dispersion des résultats relativement importante, puisqu'ils varient entre -45% et +7%. Le bilan énergétique des P+R de type « gare de centre ville » se révèle également positif. Une diminution d'environ 75% de l'énergie consommée est observée. Par contre, le bilan énergétique est négatif pour les P+R de type « périphérie urbaine ». Une augmentation de l'énergie consommée de l'ordre de +50% est ainsi observée.

De plus, les parcs relais étant un espace attractif, un afflux de véhicules, induit par leur mise en place, peut nuire à la qualité de l'air ou entraîner des nuisances dans le quartier concerné.

2.4. Mesures affectant le réseau de voiries

Mesure 17 : **Hiérarchisation du réseau viaire** : Il s'agit d'adapter les différents types de voiries aux différents niveaux de demande des usagers. Cela doit permettre d'améliorer le confort et la sécurité des usagers en organisant et gérant le trafic. Une simple voirie de desserte, par exemple, privilégiera les modes doux et sera traitée en conséquence (revêtement, largeur limitée, limitation de vitesse,…) alors qu'une voie structurante sera aménagée afin de recevoir une charge de véhicules élevée.

Mesure 18 : **Réduction ou augmentation de la capacité des autoroutes urbaines :** Il s'agit d'ajouter ou de supprimer une voie de circulation. Les réductions de voie VP peuvent être effectuées en faveur d'une voie de bus en site propre. La mise en service d'une voie supplémentaire peut être observée sur une autoroute ou une voie rapide urbaine déjà fortement congestionnée. Cette mesure peut modifier directement ou indirectement la vitesse et les caractéristiques cinématiques du flux de véhicules. Il est admis que la vitesse du véhicule influence les émissions de polluants (Beevers & Carslaw, 2005), mais cette relation est complexe et dépend entre autres des polluants, des caractéristiques du déplacement telles que la longueur (André & Hammarstom, 2000) ou encore les accélérations et décélérations du véhicule (In't Panis, Broekx, & Liu, 2006; Leblanc, Saunders, Meyer, & Guensler, 1995). D'autre part, la fluidification du trafic par l'augmentation de capacité d'un axe peut induire un trafic et ainsi compenser les effets de la mesure (Hymel, Small, & Dender, 2010). Les effets de cette mesure peuvent donc être dissemblables suivant les échelles observées (à l'échelle de la ville, du véhicule ou du quartier). Les méthodes d'évaluation adoptées (prise en compte ou non du trafic induit par exemple) doivent en tenir compte.

Mesure 19 : **Réduction de la vitesse sur autoroutes, périphériques ou boulevards urbains :** La réduction de la vitesse sur des voies urbaines permet d'améliorer la sécurité et d'éviter les coupures urbaines. Une réduction des vitesses d'environ 20 km/h sur les voies rapides est souvent envisagée dans le but de réduire les phénomènes de congestion. Il est en effet montré qu'une baisse de vitesse de 130 à 110 km/h permet de diminuer la dispersion des vitesses individuelles pratiquées, réduisant ainsi les changements de file et les coups de frein. Il est donc possible d'entretenir un trafic fluide au débit soutenu pendant de plus longues périodes avant de basculer dans un régime en accordéon et donc de diminuer le nombre de phases de congestion (CETE Méditerranée, 2009). Après l'application de la mesure, le temps de parcours est plus intéressant en heure de pointe car les épisodes de congestion sont réduits. Toutefois, en heure creuse, sur l'exemple du CETE Méditerranée 2009, une perte d'1min25 est observée. Mais, les comportements ne seraient à priori pas sensibles à une variation de temps de cet ordre là. L'impact de cette mesure sur la vitesse dépend du respect ou non de ces limites par les automobilistes. Il est montré dans (CETE Méditerranée, 2009), que la présence de radars permet d'optimiser les effets.

La réduction de vitesse sur les grandes voies urbaines ou de contournement permet de ce fait une baisse des émissions de polluants. Les ordres de grandeur varient suivant les échelles spatiales d'analyse. Lorsque l'on regarde au niveau de la voie concernée, les émissions de NO_x diminuent de 11% dans le cas de (ORAMIP, 2006), de 20 à 25% dans l'étude de (Keuken, Jonkers, Wilmink, & Wesseling, 2010) et de 29% dans le cas de (CETE Méditerranée, 2009). Les émissions de particules baissent de 18% dans (ORAMIP, 2006), de 15 à 20% dans l'étude de (Keuken, et al., 2010) et de 26% dans l'étude de (CETE Méditerranée, 2009). Par contre lorsque l'on regarde au niveau d'une agglomération, les baisses sont moins importantes. (Goncalves, Jimenez-Guerrero, Lopez, & Baldasano, 2008) parviennent à des baisses d'émissions de NO_2 et de CO de l'ordre de 1 % et de PM_{10} et de SO_2 de l'ordre de 0,9% sur l'agglomération de Barcelone. (Keller, et al., 2008) quant à eux obtiennent des réductions de 4% des émissions de NO_x et des effets non significatifs sur les émissions de COV. L'étude de (Coelho, Farias, & Rouphail, 2005) observe une augmentation de la congestion et donc une augmentation de 10% des émissions de NO_x suite à la mise en place d'une réduction de la vitesse à 70 km/h.

Quelques éléments explicatifs permettent de justifier les variations observées en termes d'émissions de polluants :

- les baisses des émissions pourraient être différentes suivant la période de temps (heure creuse ou heure de pointe) en lien direct avec la présence d'un trafic congestionné ou pas (Keller, et al., 2008),
- une réduction plus importante serait observée lorsque les poids lourds sont en nombre important sur la voie concernée par la réduction de vitesse (Keuken, et al., 2010),
- enfin le respect ou non de la nouvelle limitation de vitesse influe sur les niveaux de réduction, la présence de radar contrôlant la vitesse permettrait une réduction plus importante des émissions de polluants (Keuken, et al., 2010).

Les méthodes d'évaluation adoptées induisent aussi des variations dans les résultats. On peut notamment souligner l'importance du choix des outils de modélisation du trafic et des émissions de polluants. Ce type de mesure modifie en effet la cinématique individuelle des véhicules (accélérations et décélérations) et les phénomènes de congestion. Or les modèles de trafic de type statique ainsi que les modèles d'émissions basés sur des vitesses moyennes ne permettent pas de représenter pleinement ces phénomènes. L'utilisation de ces outils provoque sans doute une sous estimation des bénéfices en termes d'émissions de polluants comme l'a montré notamment l'étude de (Goncalves, et al., 2008). On s'interroge d'autre part sur les effets indirects de ces mesures en termes de report modal, la littérature étant pauvre sur ce sujet. La fluidification du trafic pourrait avoir une influence sur le choix modal en faveur de la voiture particulière. L'étude (CETE Méditerranée, 2009) montre en effet que l'autoroute est capable de supporter des trafics 10% plus élevés suite à une baisse de vitesse de 130 km/h à 110 km/h sur autoroute.

Mesure 20 : **Remplacement des carrefours à feux par des giratoires** : Le remplacement des carrefours à feux par des carrefours giratoires réduirait les émissions polluantes du fait de la réduction des phases d'accélération, de décélération et d'attente aux intersections (Chevallier, 2005; Sisiopiku & Oh, 2001; Varhelyi, 2002). L'étude de (Varhelyi, 2002) révèle ainsi des diminutions d'émissions de CO de 29%, de NOx de 21% et de consommation de carburant de 28%. La baisse du nombre d'arrêts des véhicules induirait une augmentation de la capacité du réseau (Sisiopiku & Gunda, 2001) mais la diminution des temps de parcours due à l'augmentation de cette capacité induirait à long terme un trafic supplémentaire et supprimerait donc les bénéfices initiaux pouvant même conduire à une dégradation de la qualité de l'air (possibilité envisagée dans (Chevallier, 2005)).

Mesure 21 : **Mise en place d'onde verte** : La mise en place d'une onde verte sous forme de synchronisation des feux permet de réduire le nombre de phases d'accélération et de décélération du flot de véhicules. Les effets et les impacts de cette mesure pourraient être les mêmes que pour la mesure précédente.

Mesure 22 : **Mise en place d'un jalonnement dynamique** par Panneaux à Messages Variables (PMV) : Les systèmes de transport intelligents permettent de gérer le trafic routier au travers des moyens et équipements dynamiques utilisés par les postes de contrôle de la circulation sur les réseaux routiers et autoroutiers. Ils représentent également un atout pour l'information des usagers et plus généralement pour l'exploitation de la route. Cette mesure doit permettre de limiter les épisodes de congestion en orientant le trafic vers des itinéraires secondaires.

Mesure 23 : **Création d'infrastructures routières** : L'objectif de cette mesure est d'augmenter la capacité totale du réseau et de créer de nouveaux franchissements routiers. Elle peut avoir comme principal effet de décongestionner le réseau global. Mais elle peut aussi induire de la demande de déplacements (Vieira, et al., 2007) (Acutt & Dodgson, 1997) créée par l'offre supplémentaire. Ces mesures peuvent de plus modifier la structuration des déplacements (origine et destination des déplacements). En effet, l'accessibilité nouvelle ou renforcée de certains lieux peut engendrer une nouvelle attractivité résidentielle, commerciale ou pour les entreprises.

Mesure 24 : **Mise en place d'une zone 30** : Une zone 30 délimite un périmètre urbain dans lequel non seulement la vitesse maximale autorisée est de 30 km/h pour tous les véhicules, mais où les aménagements sont tels qu'ils favorisent la cohabitation pacifique de tous les usagers (cyclistes, véhicules motorisés et piétons).

Le décret de 2008 autorisant la circulation des vélos dans les deux sens en zone 30 peut favoriser le report modal vers le vélo car les déplacements sont ainsi facilités et le temps de parcours amélioré. Nous ne disposons pas d'indication sur ce potentiel de report modal.

Les effets de la mise en place de zones 30 sont largement conditionnés par le respect de la limitation de vitesse, la taille de la zone (pouvant s'étendre d'une unique rue à tout un centre ville), la largeur de la rue, la présence d'aménagements spécifiques (coussins berlinois, ralentisseurs …). Lorsque la mise en place d'une zone 30 n'est pas accompagnée d'aménagements spécifiques, les

vitesses ne sont pas modifiées (Courbot, 2010). Il explique aussi que la pression en termes de stationnement ne permet souvent pas la réalisation de ce type d'aménagements (chicanes, écluses). Une évaluation particulière sur un quartier résidentiel a été effectuée et ne permet pas de conclure à une baisse significative de la vitesse ni à une amélioration de la sécurité. (Rennesson, 2005) alerte sur l'importance d'aménager les entrées et les sorties de zones afin d'obtenir l'effet escompté et de créer un effet de porte. Nous pouvons d'autre part mentionner qu'il semblerait exister, pour certains cas, un report de trafic sur les voies parallèles. La baisse de trafic observée après la mise en place d'une zone 30 dans (Owen, 2005) pourrait ainsi être expliquée par ces reports de trafic, mais ceux-ci ne sont pas quantifiés dans les articles étudiés.

Les aménagements de type chicanes permettent de « casser » la vitesse mais, suivant le comportement des conducteurs, les brusques accélérations et décélérations peuvent augmenter les émissions de certains polluants (Acutt & Dodgson, 1997) (In't Panis, Broekx, et al., 2006). (Crabbe & Elsom, 1998) montrent ainsi que la consommation de carburant des véhicules peut augmenter de 25%, les émissions de CO, HC et CO_2 de 25 à 50% alors que les émissions de NOx peuvent baisser de 30%, pour une baisse de vitesse de 50 à 30 km/h. De nombreuses évaluations de cette action s'attachent à analyser l'évolution des concentrations de polluants, mais les résultats ne permettent pas de démontrer un impact clair notamment à cause de paramètres extérieurs qui influent directement sur les concentrations aux abords des voies tels que la largeur de la rue, son orientation, la météorologie… (Owen, 2005) (LIG'AIR, 2008). Les effets d'une politique de réduction des vitesses sont donc complexes (In't Panis, Broekx, et al., 2006) et l'observation de leurs impacts l'est également comme en témoigne l'étude de (In't Panis, Beckx, & Broekx, 2006) qui montre que, suivant la méthode utilisée (et notamment la représentation de la vitesse dans les modèles), les résultats varient fortement.

Mesure 25 : **Mise en place d'une zone de rencontre**: La mise en place de ces zones a pour objectif de réaliser un partage plus équitable de la voirie entre les modes. Les zones de rencontre permettent un partage de la chaussée entre piétons, cyclistes et véhicules motorisés, alors que la chaussée était souvent auparavant réservée à la circulation automobile. La mise en place de zones de rencontre est souvent accompagnée de la mise en place d'aménagements spécifiques permettant de réduire fortement la vitesse des véhicules motorisés. Les effets peuvent s'apparenter aux effets des zones 30.

Mesure 26 : **Mise en place d'une aire piétonne** : Les aires piétonnes permettent un partage de la voirie entre les cyclistes et les piétons. Cette mesure permet de réduire considérablement le trafic dans une rue ou dans une zone (les véhicules de résidants ainsi que la livraison de marchandises pour les commerces situés dans la rue concernée sont généralement autorisés à circuler) et les émissions de polluants. Un report de trafic sur les voies parallèles est néanmoins à prévoir.

2.5. Organisation du transport de marchandises en milieu urbain

Mesure 27 : **Création d'espaces logistiques ou centres de distributions urbaines (CDU)** : Le CDU est un point nodal de rupture de charge permettant de réceptionner, de trier, de réexpédier, voire de traiter, des marchandises à destination ou en provenance d'une agglomération, d'une ville ou d'un hypercentre (Ademe). À Graz, par exemple, l'organisation de la logistique urbaine permet de regrouper les marchandises dans un centre de distribution hors de la ville et de mettre en service des véhicules électriques pour la distribution de marchandises dans les rues étroites de la vieille ville (Ademe, 2010b).

Mesure 28 : **Organisation spatiale des déplacements camions** : Les schémas de circulation camions permettent de définir des itinéraires spécifiques et des conditions particulières de leur circulation dans l'agglomération. L'objectif est de concentrer ce trafic lourd sur des axes aménagés à cet effet.

Mesure 29 : **Gestion des livraisons de marchandises en ville** : Cette gestion doit permettre un acheminement dans les meilleures conditions des flux de marchandises à destination ou en provenance de la ville (Ademe). L'objectif est de limiter les stationnements gênant la circulation sur la voirie et de limiter les déplacements des camions dans les centres villes en les remplaçant par des véhicules plus adaptés.

2.6. Organisation du stationnement

À l'heure actuelle, les politiques de stationnement ont comme principal objectif de maîtriser la circulation en exerçant de fortes contraintes sur l'utilisation de la voiture dans certaines zones.

Mesure 30 : **Tarification du stationnement suivant les usages** : Cette mesure permet de définir des tarifs de stationnement différents selon les usages afin de limiter les déplacements en VP sans contraindre les activités implantées dans la zone concernée. Cette mesure semble avoir un fort impact sur le changement modal. Tout d'abord l'étude de (Washbrook, Haider, & Jacard, 2006) montre que la hausse des coûts internes (frais d'assurance, de stationnement, de carburant) induit un plus fort report modal que la hausse des temps de déplacements en Voiture Particulière. Nous pouvons citer aussi l'étude de (Dasgupta, Oldfield, Sharman, & Webster, 1994) qui montre que le fait de doubler les tarifs de parking dans les cinq villes anglaises étudiées, réduit la part modale des déplacements en voiture de 13% dans toute la ville et que les émissions de CO_2 sont réduites de 2 à 4% dans la ville. Enfin l'étude réalisée par (PREDIT, 2008) montre qu'une politique très contraignante sur le stationnement des visiteurs (ex : tarifs très élevés ou piétonisation du centre ville) semblerait permettre de supprimer les ¾ des déplacements en voiture qui se font actuellement en direction du centre-ville, ce qui est considérable.

Mesure 31 **: Gestion de l'offre de stationnement** : Les places de stationnement peuvent être différenciées suivant leur utilisation : lieu de travail, achat, résidentiel… Différents outils existent afin de contrôler le nombre de places pour chacune de ces utilisations. Le Plan Local d'Urbanisme (PLU) permet par exemple de définir des normes minimales et maximales pour les nouvelles constructions. Il est aussi possible de réserver certaines places de stationnement pour chacun de ces usages.

Les résultats de l'étude (CERTU, 2009) montrent que sur les déplacements courts, l'effet d'une contrainte de stationnement est fort : le report modal de la voiture particulière vers la marche à pied et les deux roues varie de 20 à 34% en valeur absolue selon les agglomérations. Sur les déplacements longs, l'effet conjugué d'une bonne desserte en transports collectifs et d'une contrainte de stationnement de niveau fort permettent de forts rééquilibrages modaux. Les politiques mises en œuvre et la configuration urbaine des territoires influent sur l'étendue et la force de la contrainte ainsi que sur les reports observés selon les agglomérations. On peut noter aussi que la disponibilité d'une place de stationnement au bout de la chaîne de déplacement est un critère déterminant notamment pour les pendulaires. Le taux d'utilisation de la voiture varie fortement en fonction de la possibilité ou non de stationner (Teillac, 2010). Néanmoins, plusieurs études relèvent les effets négatifs de cette mesure. La réduction significative du stationnement en centre ville risquerait en effet d'avoir un effet négatif sur les activités commerciales du centre ville (Darbéra, 1999) et d'encourager les déplacements vers les centres d'activité périphériques, ce qui pourrait s'avérer négatif sur le plan écologique, car générateur de mobilité automobile et propice à l'étalement urbain (PREDIT, 2008).

Mesure 32 **: Gestion de la durée du stationnement** : La gestion de la durée du stationnement permet de mieux optimiser l'offre ainsi que la rotation des places. Une réglementation spécifique longue durée pour les résidents favorise par exemple l'utilisation de modes alternatifs à la voiture pour les déplacements tout en garantissant une place de stationnement sur le lieu de résidence. L'interdiction des stationnements de longue durée pour les pendulaires permet de restreindre l'usage de la voiture pour le trajet domicile travail. Enfin, une réglementation incitant au stationnement de courte durée pour les visiteurs permet une meilleure rotation des places. La mauvaise rotation des places peut avoir un effet pervers sur la distance parcourue par les automobilistes à la recherche d'une

place. Selon l'étude (DRAST, 2003) cette distance peut être triplée par rapport à celle nécessaire dans des secteurs où la rotation est élevée. Vis-à-vis de la qualité de l'air, une rotation faible dans un secteur hyper central a des conséquences négatives fortes sauf si elle dissuade la réalisation des déplacements.

2.7. Restriction spatiale de l'utilisation de la voiture

Mesure 33 : **Mise en place d'une zone à accès réservé aux véhicules peu polluants :** Le principe est d'interdire l'accès de manière permanente ou temporaire aux véhicules dont les moteurs ne répondent pas à certaines normes d'émissions ou d'équipement (normes Euro et/ou présence d'un filtre à particules) (Ademe, 2010a). Peu de pays disposent à ce jour de résultats de mesure de la qualité de l'air in situ pour quantifier l'impact de ces zones. Le rapport de l'Ademe (Ademe, 2010a) présente différentes études, menées dans des pays européens qui ont tentés d'évaluer l'impact de ces zones grâce à une modélisation. Il est ainsi montré que la zone à faibles émissions de la ville de Stockholm a induit un changement de la flotte des véhicules : une diminution du nombre de camions « essence » au profit du gaz et du diesel ainsi qu'une diminution du nombre de bus essence et diesel au profit de l'éthanol et du gaz. Aux Pays Bas, une comparaison de la composition des parcs dans les villes qui ont des Low Emission Zones (LEZ) et dans celles qui n'en ont pas, permet de conclure à une baisse du nombre de véhicules respectant les normes EURO 3 et inférieurs et une augmentation des normes supérieures. La réduction des émissions directes des véhicules est significative mais les bénéfices attendus sur la qualité de l'air sont plus modérés, notamment compte tenu de la multitude des sources d'émission en zone urbanisée. Les réductions d'émission les plus importantes sont les émissions de PM_{10} (jusqu'à 40 % en Suède contre 10% pour le dioxyde d'azote) sur la zone. En Allemagne, 35 zones sont recensées. Chaque véhicule circulant dans la zone doit posséder un autocollant de couleur représentant la catégorie de véhicules à laquelle il appartient (en fonction de sa norme Euro et ou de la présence d'un filtre à particules). Les restrictions sont définies via ces catégories de véhicules. Suivant la restriction appliquée (les catégories de véhicules impactées), les impacts en termes de concentration de polluants ne seront pas les mêmes : la restriction la plus stricte (circulation autorisée uniquement pour les véhicules EURO 3 et 4 Diesel et EURO 1 et plus Essence) engendre une baisse des concentrations de PM de 10 à 12% et une baisse d'environ 20 jours du nombre de jours de dépassement des valeurs seuils. Dans ces villes allemandes, une perte de vitalité de la zone concernée par la restrction est observée, ce qui témoigne d'une modification de la zone de destination de certains déplacements. Aucune indication n'est donnée quant à l'évolution des émissions de polluants à l'extérieur de la zone mais on peut supposer qu'un report de trafic en dehors de la zone induit des augmentations d'émissions.

Mesure 34 : **Mise en place d'un péage urbain** : Un péage urbain est « une taxation de l'usage de la voirie en milieu urbain » (Mirabel, 2004). Il existe cependant une multitude de péages urbains différents. Ils se distinguent par l'objectif du péage, sa forme, sa tarification, son application temporelle, la destination des recettes,… Il existe, tout d'abord trois types de péage urbain suivant leur objectif. Le péage urbain de financement a pour principal objectif de fournir des moyens financiers à l'exploitant de l'infrastructure pour qu'il puisse couvrir les investissements effectués et éventuellement développer le réseau de voirie. Un péage de congestion a pour objectif de faire payer aux automobilistes les pertes de temps qu'ils engendrent pour les autres automobilistes. Enfin, le péage urbain environnemental fait payer à l'automobiliste le coût des nuisances qu'il engendre en se déplaçant avec sa voiture. Dans certains cas, deux objectifs peuvent être attribués au même péage, nous verrons le cas de Londres, par exemple et les différentes problématiques que cela soulève. Les péages urbains sont aussi différenciés par leur mode de fonctionnement (Figure 6). Le péage de cordon (à gauche) est payé à chaque entrée dans la zone de péage. Le péage de zone (à droite) est payé une seule fois pour toute la journée, il permet de se déplacer librement à l'intérieur et hors de la ville.

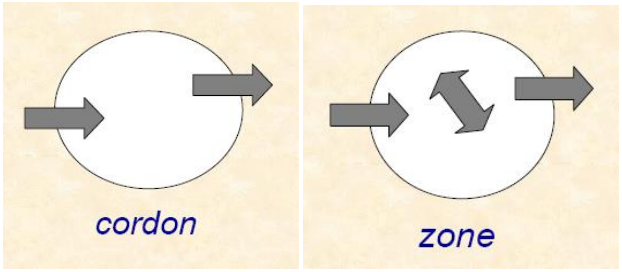


Figure 6 Principes des péages cordon et de zone (Raux, 2008)

Différents tarifs peuvent être pratiqués. Dans certaines villes, les tarifs sont très élevés et permettent de dissuader les automobilistes de rentrer dans le centre ville. Dans la ville de Londres, par exemple, le tarif est de 7,5 euros pour toute la journée, les automobilistes sont ainsi fortement incités à prendre les transports en commun. Dans les villes de Norvège au contraire, les tarifs sont très faibles (de 0,6 à 1,3 euros), les recettes servent dans ce cas à financer des infrastructures, un tarif trop élevé dissuaderait les automobilistes et les recettes seraient moins élevées.

La réduction du trafic dépend beaucoup du tarif du péage. Si la tarification est trop faible (comme dans le cas d'un péage de financement), le trafic ne baissera pas significativement. Pour le péage de contournement, l'ordre de grandeur de baisse du trafic est de 14 %. Un an après la mise en service du péage urbain de Londres, l'étude de (IAURIF, 2003) montre une baisse du trafic des véhicules particuliers de 34 % aux heures de péage. Les entrées évitées dans le centre ville se reportent pour 20 % sur d'autres modes de transport individuel, pour 25% sur d'autres parcours et pour 55 % sur les transports en commun. On observe une baisse de 14% du temps de parcours dans la zone de péage, une baisse du trafic de 15 % en véhicules.kilomètres pendant les heures de péage. Environ 60 000 véhicules ont disparu de la zone à péage chaque jour (30 % en moins), avec pour plus de la moitié, un transfert vers les TC, pour le reste vers le vélo ou les taxis et pour 4000 un renoncement à aller au centre ville (6,6%). Néanmoins, pour le péage de Londres, (Abadie, 2003) note une augmentation de 4 % du trafic sur la rocade entourant la zone à péage. Quatre ans après la mise en place du péage, l'impact est cependant plus mitigé car la baisse de la congestion n'a été que temporaire, les espaces de circulation automobiles ayant été réduits au profit des autres modes de déplacements (IAURIF, 2008a).

Le retour d'expérience des péages norvégiens fait apparaître : une baisse de 9 à 18% de véhicules.kilomètres dans le péage et de 2% dans l'agglomération (IAURIF, 2008b). À Bergen, Oslo et Trondheim, les baisses de trafic sont faibles du fait de tarifs faibles (à Bergen : baisse du trafic de moins de 3%, à Oslo : pas d'impact significatif sur le nombre de passages au péage et à Trondheim : baisse de 10% des véhicules qui rentrent en période de pointe et de 8 à 9 % hors période de pointe) (Ramjerdi, Minken, & Ostmoe, 2004).

Enfin, une étude présentée dans (Loukopoulos, Jakobsson, Garling, Schneider, & Fuji, 2004) montre que les individus envisageraient davantage de réduire leurs déplacements en voiture dans le cas de la mise en place du péage urbain (à l'entrée de l'agglomération, le prix variant selon le type de véhicule et l'heure de la journée) que dans le cas d'une interdiction de circulation dans les centres ville ou de la mise à disposition d'un conseiller en déplacement (marketing individualisé pour définir les possibilités de déplacements alternatifs à la voiture et offrir un essai gratuit des transports en commun pendant une période). Ces derniers n'ont pas d'effet significatif.

2.8. Articulation entre transport et urbanisme

Mesure 35 : **Les contrats d'axe et les politiques de cohérence transport-urbanisme** : Le contrat d'axe est une démarche de coproduction de projets de TCSP en cohérence avec des projets d'urbanisme. L'enjeu essentiel est la mise en pratique localement de l'articulation entre urbanisme et

transport pour planifier et construire la ville durable sans création de nouvelle structure (Montet, 2008). Ils permettent de mener des actions conjointes dans le domaine des transports et de l'urbanisme afin de densifier les zones urbaines et éviter le phénomène d'étalement urbain. Ces mesures étaient peu présentes dans les PDU conçus avant 2000 (aucune mesure de ce type n'est présente dans le PDU de Nantes de 2000 par exemple). Leur mise en œuvre a été renforcée par la loi SRU en 2000. L'articulation de la planification urbaine et des politiques de déplacements ainsi que la compatibilité entre le PDU et le PLU sont en effet au cœur des objectifs de cette loi. Elle incite entre autres à définir des zones à ouvrir à l'urbanisation sous condition de desserte en transport collectif (ce que permettent les contrats d'axe). Ce type de mesure a donc rencontré, ces dernières années un certain retentissement chez les décideurs politiques. On voit apparaître, à titre d'exemple, de nombreuses évocations de la « ville compacte » dans le PDU de Nantes de 2010 (Nantes Métropole Communauté Urbaine, 2011). Il est ainsi précisé dans un des axes stratégiques que *les pôles urbains existants ou en devenir doivent être renforcés avec des fonctions urbaines diversifiées et un meilleur équilibre entre habitat, emplois, services, commerces et équipements. Ceci permet de réduire les distances de déplacements et de promouvoir la pratique des modes alternatifs aux modes individuels motorisés.*

Ces mesures permettent de limiter la longueur de déplacements en favorisant la proximité entre le réseau de transport public et les lieux de vie.

La mise en œuvre de ces mesures ainsi que leurs effets sont observables sur une période de temps relativement longue, comme le montre l'étude de (Acutt & Dodgson, 1997). De plus, la nécessaire intervention de nombreux acteurs du territoire rend leur application complexe.

Enfin, il faut préciser que les mesures ayant trait à l'urbanisme et aux transports sont en interaction. Il est donc difficile de déterminer laquelle influence l'autre.

2.9. Information sur la mobilité

Mesure 36 : **Centrale de mobilité :** Une centrale de mobilité est une structure (association, organisme, service public…) dont la fonction est de faciliter la mobilité de ses usagers (les citoyens d'un territoire par exemple). Si la centrale de mobilité fournit de l'information et prend les réservations, elle travaille aussi avec les transporteurs, les entreprises, les administrations, les centres commerciaux… pour améliorer le système de transport local par l'animation et la concertation.

Mesure 37 : **Incitation à la mise en place de Plans de Déplacements Entreprises (PDE) et Plan de Déplacements Etablissement Scolaire (PDES)**: Le Plan de Déplacements Entreprise vise à rationaliser les déplacements liés à une ou plusieurs entreprises (trajets domicile-travail et déplacements professionnels des collaborateurs, déplacements des visiteurs) et à développer des modes de déplacements plus respectueux de l'environnement. L'élément le plus fréquent des PDE est la mise en place du remboursement d'une partie des abonnements aux transports collectifs pour les employés. L'impact des aides financières en faveur des modes doux dans le cadre des PDE semble contradictoire suivant les études. L'étude de (ATEMA Conseil, MHC Conseil, & ADEME, 2005) montre en effet qu'en France, lorsqu'un tel plan est mis en place dans une entreprise, seulement 20 à 50 % des salariés y adhèrent et ce sont souvent des salariés déjà utilisateurs des transports en commun qui bénéficient d'une subvention TC. L'impact des aides serait donc marginal sur le report modal. L'étude de (Mathon, 2007) montre par ailleurs que les premiers retours d'expériences des PDE indiquent des reports modaux de la voiture vers d'autres modes qui peuvent être significatifs en fonction de la localisation de l'entreprise et des contraintes de stationnement. Le Plan de Déplacements Établissement Scolaire permet de repenser les trajets des enfants, entre leur domicile et leur établissement scolaire, en privilégiant des solutions de transport durable (www.plan-deplacements.fr/).

2.10. Mesures affectant le parc de véhicules

Modifier le parc de véhicules est un moyen de modifier le parc automobile et ainsi de réduire les émissions de polluants provenant des véhicules en circulation.

Mesure 38 : **Renouvellement des parcs de véhicules (des collectivités) avec des véhicules propres (gaz, électrique,…)** : Le parc peut être amélioré par la mise en circulation de véhicules non conventionnels, essentiellement des véhicules électriques, au GPL, hybride ou à hydrogène. Globalement, ces véhicules émettent moins de polluants que les véhicules thermiques même lorsque l'on prend en compte les émissions durant leur cycle de vie global (fabrication, production d'énergie, usage et recyclage) (Colella, Jacobson, & Golden, 2005) (Granovskii, Dincer, & Rosen, 2006). (Perujo & Ciuffo, 2010) montrent en outre, qu'un parc comprenant 20% de véhicules électriques (considérée comme un scénario probable en 2030) permet une réduction de 15% des émissions de CO_2, en comparaison avec une composition de parc actuelle (le parc italien dans cette étude). Ce résultat inclut les émissions de CO_2 liées à la production de l'électricité. En ce qui concerne les émissions des véhicules circulant au GPL, elles sont significativement moins élevées que celles des véhicules diesel pour les NO_x, moindres pour les polluants non réglementés (COV) et le benzène, du même ordre de grandeur pour le CO_2 et supérieures pour le CO et les HC (Gagnepain, 2004). Les potentiels de réduction des émissions sont variables suivant le type de véhicules sur lequel les actions interviennent. L'étude (Ademe, 2010b) regroupe des exemples d'entreprises françaises qui ont remplacé les camions effectuant les livraisons de marchandises en zone urbaine par des véhicules électriques. Le groupe Deret a ainsi réduit le nombre de kilomètres parcourus de 14% et les émissions de CO_2 de 30%.

2.11. Autres mesures

Mesure 39 : **Mobilité virtuelle :** Le télétravail et les achats par internet ne sont généralement pas encouragés dans le but de réduire les déplacements automobiles. Leur but est souvent économique. Les mesures ne peuvent être appliquées dans le cadre de politiques de transport. Les autorités ne sont en effet pas compétentes pour agir dans ce sens. Les décisions relèvent des structures employant des personnes ou commercialisant des produits. Ces mesures peuvent néanmoins avoir un impact sur la demande de déplacements. À première vue, on peut imaginer que le télétravail permet de supprimer des déplacements liés au travail et que les achats par internet réduisent les déplacements ayant comme motif les achats. Mais la réalité n'est pas aussi évidente. Une étude de 1997 (Gould & Golob, 1997), début de la démocratisation d'internet, montre en effet que les personnes qui pratiquent le télétravail dépensent plus de temps pour les activités de shopping ou les divertissements à l'extérieur de leur domicile. Leur temps de trajet économisé serait en effet utilisé pour de nouveaux déplacements. Parallèlement, il est montré qu'actuellement ce ne sont plus les mêmes personnes qui effectuent des achats à distance. Auparavant, les personnes effectuant des achats à distance (sur catalogue) le faisaient par nécessité car elles n'avaient pas accès aux infrastructures de transport. Avec le développement de cette accessibilité, ces personnes ont moins tendance à faire des achats électroniques et ce sont plutôt les personnes souhaitant faire des achats au meilleur prix qui se dirigent vers ce type de pratique. Il est d'autre part montré que les déplacements effectués pour livrer les marchandises augmentent avec ce type d'achat. Mais cette tendance est remise en cause dans des études plus récentes. L'étude de (Bakis, Vidal, & Veler, 2007) s'interroge par exemple sur la baisse de la mobilité observée dans les dernières enquêtes ménages. Outre les raisons d'ordre démographique, urbanistiques, économiques et comportementales, ils se demandent quel peut être le rôle des TIC (Technologies de l'Information et de la Communication) dans cette baisse.

Mesure 40 : **Flexibilité des horaires de déplacements :** La flexibilité des horaires de travail dans les entreprises ou la modification des horaires d'ouvertures des structures commerciales et de loisir permettent d'étaler les déplacements dans le temps. Dans le cas de la flexibilité des horaires de travail, les bénéfices attendus en termes d'allongement des périodes de pointe auraient déjà été réalisés ces dernières années (Bussière & Lewis). Néanmoins il faut souligner que les effets de la flexibilité du travail sont en partie annihilés par l'inflexibilité des horaires scolaires.

Mesure 41 : **Prix du carburant** : L'effet d'une modification des prix de l'essence sur la demande de déplacements en voiture particulière a été largement étudié. De nombreuses études définissent l'élasticité[5] de la demande au prix du carburant. Celle-ci varie entre -0,1 et -0,3 suivant les études (Dargay, 2007) (Goodwin, Dargay, & Hanly, 2004) (Graham & Glaister, 2002). (Goodwin, et al., 2004) indique par exemple une valeur d'élasticité de -0,25 et (Haire & Machemehl, 2007), indique des valeurs d'élasticité de -0,24 sur les parts modales des Bus, de -0,07 sur la part modale des TC lourds et de -0,27 sur la part modale du train. Une valeur d'élasticité moyenne de -0,17 est proposée dans (Stover & Christine Bae, 2010). Une distinction entre des valeurs d'élasticité à court terme (-0,25) et à long terme (-0,64) est proposée dans (Goodwin, et al., 2004). Ces valeurs diffèrent suivant les contextes : il est par exemple noté dans (Stover & Christine Bae, 2010) que l'élasticité peut augmenter si le taux de chômage est élevé dans la zone étudiée ou qu'elle peut diminuer dans les grandes villes. (Sterner, 2007) indique que l'augmentation du prix du carburant permet de faire baisser significativement les émissions de gaz à effet de serre.

Mesure 42 : **Réglementation des niveaux d'émission** : Le renouvellement du parc de véhicules conventionnels est une évolution naturelle du parc réalisée grâce au remplacement d'anciens véhicules. Or, dans l'union européenne, les véhicules neufs (VL, PL, et 2 roues) sont soumis à des normes EURO limitant les émissions de polluants par kilomètre. Le renouvellement du parc automobile, grâce à ces normes permet donc de réduire les émissions de polluants. (Vestreng, et al., 2009) observent par conséquent, une baisse des émissions de NO_x dans les années 1990-2005 liées à la mise en place des normes EURO. (Joumard, 2003) précise que depuis l'introduction des premières normes, la somme des émissions d'HC et de NO_x a été divisée par quatorze pour les voitures et par trois pour les poids lourds, tandis que les PM ont été divisées par sept pour les véhicules légers diésel. Cependant, l'inertie du parc, compte tenu de la durée de vie d'un véhicule est élevée (Commissariat général au développement durable & SOeS, 2010). Une dizaine d'années ou plus sont en effet nécessaires avant qu'une part importante du parc soit conforme aux nouveaux standards d'émission (Vestreng, et al., 2009).

Mesure 43 : **Prime à la casse** : Des actions incitatives peuvent toutefois accélérer le renouvellement du parc. La prime à la casse est une prime attribuée au moment de l'achat d'un véhicule neuf en échange d'un véhicule ancien. En France, de 2009 à 2010, cette aide était attribuée à la condition qu'elle s'accompagne de l'acquisition d'un véhicule neuf dont les émissions de dioxyde de carbone soient inférieures ou égales à 160 grammes de CO_2/km et de l'abandon d'un véhicule de plus de 10 ans.

Mesure 44 : **Bonus / Malus basé sur les émissions unitaires de CO_2** : La modulation fiscale en faveur du carburant diesel ainsi que le bonus malus à l'achat de véhicules neufs (basé sur les émissions unitaires de CO_2 plus faibles pour les diésels) a conduit en 17 ans à une augmentation de 35% de la part des diésels dans les voitures particulières. Mais cette « diésélisation » du parc a des effets différents suivant les polluants. La « diésélisation » impacte en effet à la baisse les émissions de CO, CO_2 et de COVNM alors qu'elle provoque une augmentation des émissions de particules et des émissions de NO_x (Commissariat général au développement durable & SOeS, 2010).

Sachant qu'entre 1990 et 2007, les émissions polluantes en France ont diminué alors que le trafic routier augmentait (Commissariat général au développement durable & SOeS, 2010), on peut conclure à l'importance du renouvellement du parc dans la réduction des émissions polluantes liées au trafic routier.

[5] Concept économique qui permet de mesurer le degré de sensibilité de la demande aux variations de prix, cette élasticité est définie comme le rapport entre la variation relative de la demande de déplacements en Voiture Particulière et la variation relative du prix du carburant. Ce rapport est généralement négatif car lorsque le prix augmente, la quantité demandée diminue.

2.12. Combinaison de mesures

Il apparait dans de nombreuses études qu'une combinaison de ces mesures peut être plus efficace (Papaioannou & Georgiou), (Marshall & Banister, 2000), (Banister, 2008), (May, Kelly, & Shepherd, 2006), (Vieira, et al., 2007) (Banister, 2008) (May, et al., 2006). Une amélioration de l'offre en transports en commun associée à des actions qui permettent d'augmenter les temps de parcours sur le même trajet en voiture est particulièrement préconisée (Genre-Grandpierre, 2007) (Goodwin, 1999) (Noland, 1995) (Marshall & Banister, 2000) tout comme la combinaison des actions de sensibilisation des modes doux et des actions de restriction de l'utilisation de la voiture (Papaioannou & Georgiou). L'étude de (Eriksson, et al., 2010) montre par exemple que la diminution de l'utilisation de la voiture est plus importante lorsque l'on combine une augmentation de 50% du prix du carburant, une réduction de 50% du prix du ticket de TC et une augmentation de la fréquence des TC entre le centre ville et les différents lieux d'habitation et les zones industrielles plutôt que lorsqu'on additionne les effets des mesures individuelles.

(Bonnel, Caubel, & Massot, 2003) montrent que les effets des actions d'accompagnement (rabattement en vélo ou en voiture et stratégies performantes d'information permettant de réduire les temps d'attente) sont du même ordre que ceux liés aux investissements sur les systèmes lourds de transports collectifs. Donc, bien que chacune des actions isolées ait un impact limité, les reports modaux observés lors de la mise en œuvre d'actions combinées est significative. Dans cette étude qui simule un scénario complet avec une croissance du budget temps, une offre de transport très importante et des stratégies d'accompagnement de l'offre TC, les auteurs observent des reports modaux pour environ 28% des déplacements automobiles quotidiens ce qui représente 20% des véhicules.kilomètres alors que ceux-ci ne représentaient pas plus de 13% pour les actions individuelles.

2.13. Conclusion

Une grande diversité de mesures de gestion des déplacements et du trafic a donc été recensée et est confirmée dans les études de (Acutt & Dodgson, 1997) (May, Jopson, & Matthews, 2003) (PROSPECTS, 2001) (SPECTRUM, 2004). Les objectifs, cibles et moyens d'actions, effets et impacts relevés diffèrent. La palette de mesures devrait encore s'élargir. Les nouvelles technologies telles que les ITS (systèmes de transport intelligents) permettent d'enrichir considérablement les outils : information sur le réseau via téléphone portable, détection de la formation de la congestion par caméra… D'autre part, l'évolution des réglementations permet de définir un cadre légal à certaines mesures (les systèmes d'autopartage sont définis dans les « lois Grenelle de l'Environnement » par exemple). L'évolution législative permet également de mener des expérimentations en vue de l'application de nouvelles mesures (expérimentations des Zones d'Actions Prioritaires pour l'Air (ZAPA) dans les « lois Grenelle de l'Environnement »).

3. Classification des mesures

Dans le cadre d'une rationalisation des méthodes d'évaluation environnementale des mesures de gestion des déplacements et du trafic, la diversité des mesures et de leurs caractéristiques justifie un travail préalable de classification des mesures. Elle nous permettra de rationnaliser nos réflexions en envisageant des problématiques par catégorie de mesures. Nous recherchons donc une classification regroupant des mesures assez homogènes, ayant des effets du même type et du même ordre de grandeur et ayant des problématiques communes (sur les échelles spatio-temporelles d'impact, sur les leviers d'action, …)

3.1. Classifications existantes

Différentes classifications ont été relevées dans la littérature. Leur description en termes d'objectifs, d'applications, de faiblesses et d'avantages nous permettra de définir des paramètres de classification pertinents pour envisager une réflexion sur les méthodes d'évaluation.

3.1.1. Gestion des déplacements et gestion du trafic

Les mesures de gestion des déplacements (Travel Demand Management, TDM) sont définies comme visant à réduire la demande de déplacements en persuadant les voyageurs d'utiliser des modes à fort taux d'occupation ou des modes douxalors que les mesures de gestion du trafic (Transportation System Management, TSM) visent à gérer les infrastructures routières et augmenter leur efficacité (Taylor, Nozick, & Meyburg, 1998). Cette catégorisation a été utilisée pour définir des combinaisons de mesures performantes et prévoir leurs effets sur le trafic et la demande. Son objectif n'est pas d'évaluer les impacts sur l'environnement.

La classe des mesures de gestion du trafic regroupe des mesures techniques qui permettent d'agir sur les véhicules, et plus particulièrement sur les conditions de circulation ou leur itinéraire alors que les mesures de gestion des déplacements tentent de modifier les comportements de mobilité des individus et notamment d'orienter leur réponse en termes de transfert modal. Ces mesures se différencient donc selon leurs mécanismes d'action.

Les échelles d'application sont différentes entre ces deux catégories : les TSM sont souvent appliquées localement sur un linéaire de voirie, alors que les TDM sont souvent appliquées sur une zone, plus ou moins importante.

Cette classification intéressante définit deux grands groupes de mesures qui diffèrent selon leurs mécanismes d'action (les comportements de conduite et les comportements de mobilité) et selon les échelles d'application. Néanmoins, une large variété de mesures existe au sein des mesures de gestion des déplacements et notamment en termes d'effets sur la mobilité et le trafic et donc indirectement en termes d'impact sur les émissions de polluants.

3.1.2. Mesures incitatives et mesures restrictives

Certaines études distinguent les mesures qui découragent l'utilisation de la voiture (push measures) et celles qui encouragent l'utilisation des modes alternatifs (pull measures). Cette classification permet selon (Garling, et al., 2002) d'analyser le rôle de la population dans la réussite ou non de la mesure.

Les « pull measures », définies dans (Steg & Vlek, 1997), augmentent l'offre et l'accessibilité des modes de transport autres que la VP et encouragent l'utilisation de ces modes. Elles peuvent porter sur le vélo (offre en pistes cyclables), sur les transports en commun (nouvelles lignes de bus) ou sur la marche à pied (itinéraires piétons).

Les « push measures », définies dans (Steg & Vlek, 1997), restreignent l'utilisation de la voiture par des moyens financiers comme les péages urbains ou la tarification du stationnement mais la restriction peut aussi se faire par une baisse de la place accordée à la voiture particulière (restriction de capacité d'une rue, piétonisation du centre ville). La hausse du coût du carburant entraîne une restriction de l'utilisation de la voiture individuelle.

Cette classification est basée sur les moyens d'action. L'avantage de cette approche est de considérer les réponses comportementales des individus selon les types de mesures. De plus, elle mentionne la notion d'amplification des effets lorsque ces types de mesures sont mises en place conjointement.

3.1.3. Classification selon les « objectifs » des mesures

Dans (CERTU, 2008) ainsi que dans les présentations des documents PDU, les mesures sont classées suivant leurs objectifs : baisse de la vitesse réglementaire, régulation de trafic, orientation des flux de trafic, promotion des modes et de véhicules propres et action sur le stationnement. Cette classification a été construite dans le but d'estimer les impacts des mesures sur l'environnement.

Elle est basée sur les objectifs des mesures, or ceux-ci sont trop vagues pour que celle-ci soit utile. En effet, de nombreuses mesures peuvent appartenir à plusieurs des classes définies. La mise en place d'un P+R par exemple a comme objectif de promouvoir l'utilisation des TC, d'offrir des places de stationnement à la périphérie des villes et de réguler le trafic des véhicules particuliers dans le centre ville.

3.1.4. Classification selon les moyens d'actions

(AIUTO, 1999), (Viegas, 2003), (Acutt & Dodgson, 1997), (Tanaboriboon, 1992), (CANTIQUE, 1999) et (PROSPECTS, 2001) classent les mesures selon leurs moyens d'action : infrastructures, tarification, information, réglementation, action sur les comportements, urbanisme et développement urbain et les combinaisons d'actions. Ces classifications ont été définies dans des cadres et pour des objectifs différents. Dans (AIUTO, 1999) et (PROSPECTS, 2001), l'objectif est d'évaluer l'impact sur la qualité de l'air d'un ensemble de mesures. Dans (Vieira, et al., 2007) qui utilise la classification définie dans (Viegas, 2003), le but est de montrer l'intérêt de planifier des combinaisons de mesures afin d'augmenter leur efficacité sur l'environnement et de minimiser les effets négatifs et les barrières à leur implantation. Dans (PROSPECTS, 2001), l'objectif est d'évaluer l'impact des mesures non techniques sur les émissions de CO_2, NO_X, HC, SO_2, Particules, de tester leur efficacité sur la réduction des émissions et de les hiérarchiser selon l'intensité de leur effet.

Ces classifications par moyen d'actions sont très intéressantes pour un décideur car cela lui permet d'orienter le choix des mesures à mettre en place en fonction de ses compétences et de son domaine d'intervention. Dans le cadre de l'évaluation environnementale des mesures, celles-ci sont également intéressantes car elles permettent de regrouper des actions ayant des cibles d'action communes. Par exemple, l'ensemble des mesures touchant à la tarification ou aux taxes ont pour but de modifier le coût du déplacement. Par contre, à l'intérieur de certaines classes, comme par exemple la classe « institutional measures » dans la classification de CANTIQUE, les mesures sont extrêmement diverses d'un point de vue de l'échelle d'application, de l'objectif, et de la cible d'actions. Cette classe regroupe en effet des mesures comme la mise en circulation de véhicules

respectant les nouvelles normes Euro, la flexibilité des horaires de travail, la régulation dynamique du trafic…

3.1.5. Classification selon des indicateurs de trafic et d'émissions de polluants

Dans (CANTIQUE, 1999), une autre classification est définie en fonction d'indicateurs de trafic et d'émissions de polluants.

Les auteurs définissent :

- Les mesures opérationnelles qui affectent la consommation d'énergie et les émissions spécifiques de polluants (par véhicules.km)
- Les mesures stratégiques qui optimisent l'utilisation du véhicule particulier, affectant le nombre de veh.km effectués pour une demande en transport donnée (exprimée en passagers.km / tonnes.km)
- Les mesures de demande réduisant la demande de déplacements globale (passager.km ou tonnes)

Le principal intérêt de cette classification est de s'appuyer sur des indicateurs permettant de caractériser les impacts des mesures. Malheureusement, cette classification n'est ni approfondie ni déclinée en mesures types.

3.1.6. Classification combinée par moyens d'action et modes de transport affectés

La classification proposée dans (PROSPECTS, 2001) et déjà mentionnée dans la partie 3.1.4, intègre également une distinction entre les mesures selon le mode affecté.

Cette classification est présentée dans le Tableau 1. Elle décline les mesures par moyens d'action comme par exemple : gestion des infrastructures, puis elle classe les mesures selon l'action désirée, par exemple : mesures favorisant l'utilisation des transports en commun, des exemples de mesures sont ensuite cités comme dans ce cas : les priorités pour les bus.

Land Use measures	Development densities	
	Development pattern	
	Development mix	
	Developer contributions	
	Parking standards	
	Communted payments or cashing out offers	
	Value capture and business taxes	
Attitudinal and behavioural measures	Awareness Campaigns	
	Flexible Working Hours	
	Tele-commuting	
	Compagny travel plans	
Infrastructure measures	Measure to influence car-use	New road construction
		New off-street parking
	Measure to influence public transport use	Conventional rail provision
		Light rail
		Guided bus
		Park and ride
		Terminals and interchanges
		Enhancement of bus and rail vehicles
	Provision for cyclists and pedestrians	Cycle routes
		Pedestrian routes
		Pedestrian areas
	Provision for freight	Lorry park
		Transshipment facilities
Management of the infrastructure	Measures to influence car use	Road maintenance
		Conventional traffic management
		Urban traffic control
		Intelligent transport system
		Accident remedial measures
		Traffic calming
		Physical restrictions on car use
		Regulatory restrictions
		Parking controls
		Car sharing
		Car clubs
	Measure to influence public transport use	Bus priorities
		High occupancy vehicle lanes
		Public transport service levels
		Bus service management measures
		Bus partnerships
	Provision for cyclists and pedetrians	Cycle lanes and other priorities, whereby a part of the highway is specifically allocated to cyclists
		Pedestrian crossing facilities
	Provision for freight	Lorry routes and bans
Information provision	Measure to influence car use	Conventional direction signing
		Variable message signs
		Real-time driver information systems
		Parking guidance and information systems
	Measure to influence public transport use	Conventional timetable
		Real time passenger information
		Trip Planning Systems
		Operation information systems
	Provisions for cyclists and pedestrians	Static direction signs
		Tactile footways
	Provision for freight	Static direction signs
		Fleet management systems
Pricing	Measure to influence car use	Parking charges
		Charges for ownership of private parking space

		Urban congestion charging
		Vehicle ownership taxes
		Fuel taxes
	Measures to influence public transport use	Fare levels
		Fare structure
		Concessionary fares

Tableau 1 Classification des mesures dans (PROSPECTS, 2001)

La distinction par mode de transport parait délicate. En effet, les mesures affectent généralement plusieurs modes et réduire l'impact d'une action à un seul mode risque de masquer son impact sur les autres modes. De même, la mesure « priorité bus », affecte le temps de parcours de bus mais aussi les conditions de circulation des véhicules particuliers. La mesure « mise en place d'un parc relais » affecte les transports en commun mais aussi la circulation des VP jusqu'au parc relais.

3.1.7. Mesures principales et mesures complémentaires

(AIUTO, 1999) et (Vieira, et al., 2007) définissent des mesures principales et complémentaires. Ces dernières sont des mesures « légères » mais qui permettent d'intensifier les impacts des mesures principales. Ces mesures peuvent être : des actions de communication et d'information sur l'utilisation des modes doux et TC (information multimodale, journée de sensibilisation « une journée sans ma voiture »…), des aides financières pour l'utilisation des TC (une des actions des Plans de Déplacements Entreprise)… La classification issue de (AIUTO, 1999) est présentée dans le Tableau 2. Elle présente ainsi un panel de mesures qui, mises en œuvre conjointement, peuvent être plus efficaces. Ainsi une mesure favorisant le covoiturage pourrait être plus efficace avec la mise en place d'une voie réservée à cette pratique, sur les axes congestionnés.

TDM MAIN MEASURES			**COMPLEMENTARY MEASURES**
INNOVATIVE SUPPLY SYSTEMS	PRICING MEASURES	REGULATION MEASURES	
1. Park-and-Ride	1. Road pricing	1. Access control management measures	1. HOV priority measures
2. Car-pooling	2. Parking pricing	2. Parking management measures	2. Traffic light measures
3. Dial-a-ride	3. Public transport (PT) fare structure	3. Traffic calming	3. Variable Message Signals (VMS)
4. Card-operating cars		4. pedestrianisation & Cyclist measures	4. Ramp metering
		5. PT measures (traveller information systems, vehicle priority, integrated ticketing).	5. Enforcement of regulations (in particular, parking)
			6. Staggered activity times (in particular, school and working times)

Tableau 2 Classification des mesures dans (AIUTO, 1999)

La distinction entre des mesures principales et des mesures secondaires est intéressante car elle permet de hiérarchiser les mesures. Elle permet également d'envisager la prise en compte de combinaisons de mesures (alliant une/des mesures principales avec une/des mesures complémentaires).

3.1.8. Hiérarchisation des mesures par leurs effets

On ne trouve pas dans la littérature de classification par classes d'effet (fort, moyen, faible). Néanmoins, l'ensemble des retours d'expérience des mesures permet d'envisager cette classification. Nous mentionnons ci-après les éléments qui pourraient être utilisés à cette fin.

Il est ainsi indiqué dans (CANTIQUE, 1999) que les mesures non techniques de tarification présentent un impact élevé sur les émissions de polluants. Cet impact est moins élevé pour les politiques de choix de mode et encore moins pour les politiques de régulation. En comparant l'efficacité des mesures par type d'agglomération, il est montré que dans les villes fortement congestionnées, les politiques de tarification et de régulation sont les plus efficaces alors que dans les villes intermédiaires ce sont les politiques de choix modal.

Les potentiels de transfert modal semblent dépendre du type d'agglomération (taille, forme...) et des caractéristiques de la mesure (tarifs du ticket de bus ou du péage, fréquences de bus…). Un péage apparait comme la mesure ayant le plus fort potentiel de report modal. Un bilan des effets du péage de Londres six mois après sa mise en place montre, en effet, un transfert modal de la VP vers les TC d'environ 20% alors que la mise en place d'un axe TC lourd permet un report modal de la VP vers les TC de l'ordre de 10 à 15% (CERTU, 2002). Les résultats d'une enquête de préférence déclarée décrite dans (Loukopoulos, et al., 2004) vont dans ce sens en montrant que les personnes sondées réduiraient leurs déplacements en voiture dans le cas de la mise en œuvre d'un péage urbain (à l'entrée de l'agglomération, le prix variant selon le type de véhicule et l'heure de la journée) uniquement dans le cas d'une interdiction de circulation dans les centres villes.

Enfin, comme nous l'avons déjà mentionné, les « push measures » telles que l'augmentation des coûts pour les déplacements en voiture influenceraient plus la demande de déplacements que les « pull measures » telles que l'amélioration des transports en commun (Espino, Ortuzar, & Roman, 2007; O'Fallon, Sullivan, & Hensher, 2004), mais cette différence n'a pas toujours été confirmée (Schuitema, et al., 2007), (Eriksson, et al., 2010).

La formulation d'une classification de ce type, basée sur des retours d'expérience, pourrait être très utile dans un cadre d'aide à la décision. Elle permet en effet de définir les mesures à mettre en œuvre afin d'atteindre des objectifs de réduction des émissions de polluants.

3.1.9. Classifications spécifiques

Des classifications plus ciblées des mesures relatives aux transports de marchandises (Russo & Comi, 2010) ou aux actions d'ITS (ECOSTAND, 2011) permettent de définir des paramètres propres à chaque catégorie d'actions.

La classification relative aux transports de marchandises est réalisée dans le but de rationaliser la mise en œuvre des mesures relatives à ce mode de transport et de définir leurs impacts en fonction de leur type.

La classification proposée définit :

- les mesures relatives à l'infrastructure matérielle :

-linéaire, si elles réfèrent à des tronçons du réseau de transport urbain ou métropolitain (mise en place d'un réseau de transport urbain réservé aux véhicules de marchandises)

-surfacique ou relative à un nœud, si elles réfèrent à des zones qui peuvent être réservées pour des opérations relatives au transport de marchandises (zones de chargement ou de

déchargement, nœuds logistiques pour optimiser la distribution des marchandises dans les zones urbaines ou métropolitaines comme les centres de distribution urbaine)

- les mesures relatives à l'infrastructure immatérielle ou ITS, cette classe inclut les systèmes d'information sur le trafic, les services d'optimisation des itinéraires…
- les mesures relatives à l'équipement, cette classe inclut :

-les mesures sur le chargement, si elles font référence à l'introduction de nouveaux standards en termes de chargement pour optimiser les manipulations et le transport avec de nouveaux véhicules faiblement polluants.

-les mesures sur le véhicule, si elles font référence aux caractéristiques des véhicules (réduction des émissions de polluants des camions, utilisation de véhicules électriques, au gaz, transport sur rail).

- les mesures relatives à la gestion du réseau. Dans cette classe, nous retrouvons les régulations de trafic (temps limité de parking, péage routier, permission spécifique, occupation sur la voirie…).

Ces classifications définissent des paramètres intéressants relatifs à l'espace géographique d'application de la mesure (linéaire, surfacique) par exemple, mais elles sont trop spécifiques et ne concernent donc que peu de mesures. Elles sont donc de faible intérêt pour notre application.

3.1.10. Autres classifications

D'autres classifications plus originales en ce qui concerne les paramètres pris en compte, ont été développées. On peut citer deux exemples : (Ferguson, 1990), cités dans (Taylor, et al., 1998) classe les TDM en fonction des 4 étapes du modèle à 4 étapes : génération, distribution, choix modal, affectation. (Rosenbloom, 1978) classe les mesures en 4 catégories dans le but d'évaluer les mesures permettant de réduire les périodes de pointe congestionnées :

- les approches sociales : qui s'appuient sur la flexibilité des horaires des déplacements
- les approches socio-économiques : qui utilisent des moyens financiers ou des incitations des techniques pour favoriser le transfert modal
- les approches socio-techniques : qui utilisent les ressources techniques pour gérer l'heure de départ du déplacement
- et les approches techniques : qui utilisent des moyens techniques pour gérer le trafic.

La classification est présentée dans la Figure 7. Ainsi, les mesures appartenant au domaine social peuvent être des échelonnements des temps de travail. Les mesures appartenant au domaine socio-économique sont déclinées selon différents moyens d'action tels que la tarification ou la planification urbaine. Les mesures appartenant au domaine socio-économique sont des informations sur les déplacements. Enfin les mesures appartenant au domaine technique sont déclinées en : mesures d'ingénierie du trafic, mesures de hiérarchisation du réseau et en mesures propres aux performances du véhicule.

Social Approaches
- Staggered Work Hours
- Shortened Work Weeks

Socio-Economic Approaches
- Pricing and Regulatory Mechanisms
  - Road Pricing
  - Parking Controls
- Restricting Access
  - Traffic Cells
  - Auto-Free Zones with Facilities for Pedestrians
- Land Use Planning
  - New Towns
  - Planned Communities
  - Planned Neighborhoods
  - Zoning and Building Codes
- Marketing
  - Incentives to Off-Peak Travel and Usage of Facilities
  - Incentives to Mass Transit Usage
- Carpooling and Other Forms of Ride-Sharing Approaches

Socio-Technical Approaches
- Communications in Lieu of Travel

Technical Approaches
- Traffic Engineering Techniques
  - Freeway Surveillance and Control
  - Traffic Simulation Models
  - Maximum Use of Existing Facilities
- Transit Operations
  - Extended Area Services
  - Priority Systems: Expressways and Freeways
  - Priority Systems: Arterials
  - Circulation Systems
- Vehicle Design Factors

Figure 7 Classification des mesures selon (Rosenbloom, 1978)

Cette classification est très spécifique car elle n'intègre que les mesures permettant de réduire les périodes de congestion. En outre, elle ne traite que des mesures permettant de gérer le trafic de véhicules particuliers et n'aborde pas les mesures propres aux autres modes de transports alors qu'on peut imaginer que des mesures permettant le transfert modal vers les transports en commun peuvent réduire les périodes de congestion. Cette classification est de faible intérêt pour notre application.

3.2. Classification proposée dans le cadre de l'évaluation de l'impact des mesures sur les émissions de polluants

La classification proposée est alimentée par les observations faites sur les classifications existantes et par l'analyse de la description des mesures. Un tableau synthétisant les mesures et leurs critères est présenté en Annexe 3. Rappelons que celle-ci doit nous permettre de rationnaliser nos réflexions sur l'évaluation des mesures en envisageant des problématiques par catégorie de mesures. Nous recherchons une classification regroupant des mesures assez homogènes, ayant des effets du même type et du même ordre de grandeur, ayant des problématiques communes (sur les échelles spatio-temporelles d'impact, sur les leviers d'action, …)…

Au premier niveau de classement, nous avons distingué l'**objet** (ou la cible d'action de la mesure) concerné par la mesure. Cette première distinction, entre les mesures concernant les **marchandises** d'un côté et de l'autre le **voyageur**, a été définie pour chaque mesure grâce au critère d'analyse que nous avions défini (cibles d'action -> usage). Elle permet de séparer deux branches de mesures qui sont indépendantes par plusieurs aspects. Les mécanismes d'actions sont en effet différents. Alors que le transport de voyageurs est directement relié à une demande de déplacements entre un point d'origine et un point de destination, le transport de marchandises est une demande liée à la distribution des biens largement organisée sous forme de tournées. D'autre part, alors que le choix du mode de transport dépend de l'individu selon différents critères, le choix de mode de transport des marchandises est principalement économique et celui-ci est effectué par les entreprises. Les leviers d'actions sont ainsi largement différents.

Les mesures peuvent s'attacher à modifier les caractéristiques des véhicules : les **mesures technologiques** ou à modifier les caractéristiques du système de transport : les **mesures organisationnelles**. Ces deux types de mesures se distinguent par leurs actions. Les mesures technologiques concernent le parc de véhicules, le prix du carburant, la réglementation en termes d'émissions des véhicules … Les mesures organisationnelles sont principalement rassemblées dans les Plans de Déplacements Urbains et concernent les déplacements, le réseau de transport et le trafic indépendamment du type de véhicule. Cette classe est assez hétérogène mais nous verrons par la suite qu'il est possible de la décliner en sous-classes.

Comme cela est fait dans de nombreuses classifications citées en partie 3.1.4, nous proposons de classer les mesures selon **les leviers d'action**. Ces leviers d'actions sont : la **réglementation,** l'**incitation**, la **tarification**, la **sensibilisation**. Ce critère est largement pris en compte dans la littérature pour son côté opérationnel.

Nous avons donc ensuite décomposé les mesures organisationnelles en sous-classes plus homogènes. Ainsi, celles-ci permettent de modifier la **quantité de déplacements** en fonction de leur nombre, leur distance, leur localisation, et donc de la demande de déplacements. Les mesures faisant partie de cette sous-classe agissent principalement sur l'organisation spatiale de la ville. D'autres mesures plus spécifiques incitent à organiser les déplacements dans le temps ou à trouver des solutions alternatives au déplacement comme la flexibilité des horaires de travail au sein des entreprises ou la pratique de la mobilité virtuelle. Les mesures organisationnelles permettent ensuite de modifier **la manière d'effectuer ces déplacements**. Elles concernent essentiellement l'offre (et sa restriction) de transport, sa gestion, l'étalement de l'offre, son adaptation à la demande, la hiérarchisation ou le maillage des réseaux. Les mesures peuvent être classées selon leur mode de déplacements comme dans la classification de (PROSPECTS, 2001) en intégrant les modes classiques que sont les TC et la voiture par exemple ainsi que les modes alternatifs comme la multimodalité, le covoiturage, le transport à la demande… Enfin, les mesures organisationnelles permettent de modifier **les conditions du déplacement.** Elles concernent essentiellement les mesures permettant de gérer, d'orienter et de contrôler le trafic comme la baisse de la vitesse sur des voies rapides urbaines, le jalonnement directionnel, la gestion dynamique des flux sur le périphérique, la mise en place d'ondes vertes. Elles ont un effet immédiat, dès leur mise en œuvre, sur le trafic. On retrouve cette distinction entre les mesures de gestion des déplacements (que nous avons décliné en deux classes ici) et les mesures de gestion du trafic dans (Taylor, et al., 1998), cité dans la partie 3.1.1.

Enfin, on peut distinguer les **mesures principales** et les **mesures secondaires** comme dans (AIUTO, 1999). Cette distinction est assez aisée à réaliser au vu des retours d'expérience de chaque mesure. Cela s'apparente à une hiérarchisation des mesures selon leurs effets. Elle permet en outre de cibler les moyens à mettre en œuvre pour l'évaluation des mesures. Des moyens plus importants pourront être investis pour évaluer les mesures principales.

On pourrait, en complément, mener une réflexion sur l'acteur de la mesure. Dans la plupart des cas la collectivité ou l'entreprise est acteur de la mesure car c'est elle qui la met en place.

Cependant, certaines mesures sont contraintes : l'individu est obligé de la respecter sous peine de sanction. C'est le cas par exemple des mesures de tarification ou de réglementation. Dans d'autres cas, comme les mesures d'incitation ou de sensibilisation, l'individu est l'acteur principal car il a le choix d'effectuer un transfert modal par exemple. Cette distinction est intéressante car les effets dans le cas où l'individu est le principal acteur et dans le cas où la collectivité est le principal acteur ne seront pas identiquement prévisibles. Dans le premier cas, il faudra faire appel à des probabilités permettant de définir quelle part de la population sera sensible à cette mesure alors que dans le deuxième cas les effets sur la vitesse seront plus aisément connus.

Un tableau de synthèse (Tableau 3) présente des exemples de mesures pour chaque type de mesures identifié. Nous avons décliné les mesures organisationnelles et les mesures technologiques. On constate que les critères tels que l'objet et les leviers d'action peuvent être sortis de la classification car ils s'appliquent à chaque mesure.

Types	Sous-types	Exemples de mesures
Mesures organisationnelles	Quantité des déplacements	Contrat d'axe : voyageurs / incitation
	Manière d'effectuer les déplacements	Mise en Place d'un système de Covoiturage / voyageurs / sensibilisation / Mode VP
		Tarification du stationnement : voyageur / coûts / Mode VP
		Augmentation de l'offre en TC : voyageur / incitation / Mode TC
		Gestion des livraisons de marchandises : marchandises / réglementation
	Conditions du déplacement	Onde verte : voyageurs / réglementation
		Réduction vitesse autoroute : voyageur ou marchandises / réglementation
Mesures technologiques		Réglementation des niveaux d'émission : voyageur ou marchandises / réglementation
		Prime à la casse : voyageur / incitation

Tableau 3 Classification proposée

Les principaux avantages de cette nouvelle classification par rapport à la problématique de leur évaluation sont présentés ci-après.

La prise en compte de deux systèmes différents que sont le transport de marchandises et le transport de voyageurs, n'ayant pas les mêmes mécanismes d'actions, pas les mêmes contraintes, et faisant intervenir des acteurs différents (entreprises, secteur économique par rapport à l'individu) permet d'envisager des problématiques d'évaluation propres à chaque système (problématiques des tournées pour le transport de marchandises, problématiques de la localisation des lieux de vie pour le transport de voyageurs). Il faut néanmoins considérer que ces deux systèmes sont en interrelation au niveau du trafic.

Cette classification permet de mettre en parallèle l'offre de transport et la demande de déplacements. Il est ainsi plus aisé de mettre en adéquation les deux types de mesures. De plus, en termes d'évaluation, il est possible d'évaluer les choix des individus en fonction de l'offre et notamment en fonction de la distinction entre les différents modes de transport.

Les mesures qui atteignent directement les véhicules auront un impact direct sur les émissions de polluants alors que les mesures liées aux déplacements ou au trafic auront un impact indirect induit par le type et l'intensité des modifications apportées sur ceux-ci. La distinction entre ces deux types de mesures laisse percevoir des méthodes ou des outils d'évaluation différents.

Enfin, la décomposition des mesures en mesures principales et secondaires est utile dans le cadre de leur évaluation car on peut ainsi envisagé une évaluation de ces deux types de mesures avec des outils ayant des niveaux de sensibilité différents. Dans le cas contraire, les impacts des mesures secondaires pourraient être masqués et pourraient apparaître comme inefficaces.

Conclusion

Cette mise à plat des mesures par une méthode systématique de recherche des objectifs, des impacts attendus, des cibles d'action… nous permet d'avoir un premier aperçu :

- des mesures influençant les caractéristiques de mobilité et les déplacements,
- de leurs caractéristiques
- et dans certains cas de retours d'expérience permettant de quantifier les impacts de ces mesures.

On recense une quarantaine de mesures pouvant être mises en œuvre sur un territoire urbain. Les mesures se distinguent de part leurs échelles spatiales et temporelles d'application, les leviers d'action mis en œuvre, les cibles d'action et les moyens de transport concernés… Les retours d'expérience des impacts de ces mesures font apparaître des impacts variés en termes d'intensité, d'échelles spatiales et temporelles, de localisation, de contributeur (nombre de déplacements trafic, composition du parc de véhicules…)… Cette première analyse permet d'orienter les réflexions sur l'évaluation et de faire émerger différentes problématiques comme l'évaluation des différents effets (et des phénomènes associés) d'une mesure, la représentation des différents échelles temporelles et spatiales, la variété des retours d'expérience pour une même mesure suivant les territoires…, nous développerons ces problématiques dans les chapitres suivants.

Ces mesures peuvent ensuite être classées selon leurs objectifs (baisse de vitesse, restriction de circulation), les leviers ou mécanismes d'actions (prix, infrastructures), les modes affectés (TC, VP)… Nous avons répertorié un ensemble de classifications issues de la littérature. Nous avons pu recenser des critères intéressants comme les leviers d'action, la hiérarchisation des mesures, la distinction entre mesures principales et mesures secondaires. Néanmoins, la majorité des classifications ne prend en compte qu'un panel restreint de mesures, certaines d'entre elles présentent des classes très hétérogènes et d'autres ne sont pas assez développées pour être utilisables.

L'objectif de la dernière partie du chapitre a donc été de proposer une classification alimentée par les observations faites sur les classifications existantes et par l'analyse de la description des mesures. Celle-ci a pour but de rationnaliser nos réflexions sur l'évaluation des mesures en envisageant des problématiques par catégorie de mesures. Elle doit également regrouper des mesures assez homogènes, ayant des effets du même type et du même ordre de grandeur, ayant des problématiques communes (sur les échelles spatio-temporelles d'impact, sur les leviers d'action, …)…

Nous avons défini différentes classes permettant de distinguer : les mesures concernant le voyageur et celle concernant les marchandises, les mesures techniques et les mesures organisationnelles, les différents leviers d'action, les mesures principales et les mesures secondaires. De plus, nous avons décliné les mesures organisationnelles en mesures permettant de modifier la quantité des déplacements, celles permettant de modifier la manière d'effectuer ces déplacements et enfin celles permettant de modifier les conditions de déplacements.

Différents avantages propres à cette classification et relatifs à l'évaluation des mesures ont été relevés. Elle permet d'appréhender des problématiques différentes suivant les classes (par exemple dans le cas de la distinction entre les mesures concernant le voyageur et celles concernant les marchandises), elle permet de mettre en parallèle l'offre et la demande de déplacements (ce qui est un paramètre essentiel pour l'efficacité d'une mesure), elle distingue les mesures ayant des impacts directs sur les émissions de polluants et celles qui ont un impact indirect via des modifications sur les déplacements ou le trafic.

Nous avons donc dans ce premier chapitre tenté de définir les caractéristiques, effets et impacts de chacune des mesures (traits bleus dans Figure 8) puis nous avons tenté de rassembler les mesures sous différents types (traits pointillés bleus).

Maintenant que nous avons une vision d'ensemble des différentes mesures, et des effets qu'il est souhaitable d'évaluer, une première réflexion devra porter sur les différentes méthodes d'évaluation existantes. Elle nous permettra de cibler les bonnes pratiques et les inconvénients de chacune d'entre elles par rapport aux connaissances des mesures que nous avons établies dans ce premier chapitre. L'état de l'art de ces méthodes nous permettra ainsi de caractériser le domaine d'application de chacune d'elles. Cette réflexion est développée dans le chapitre 2.

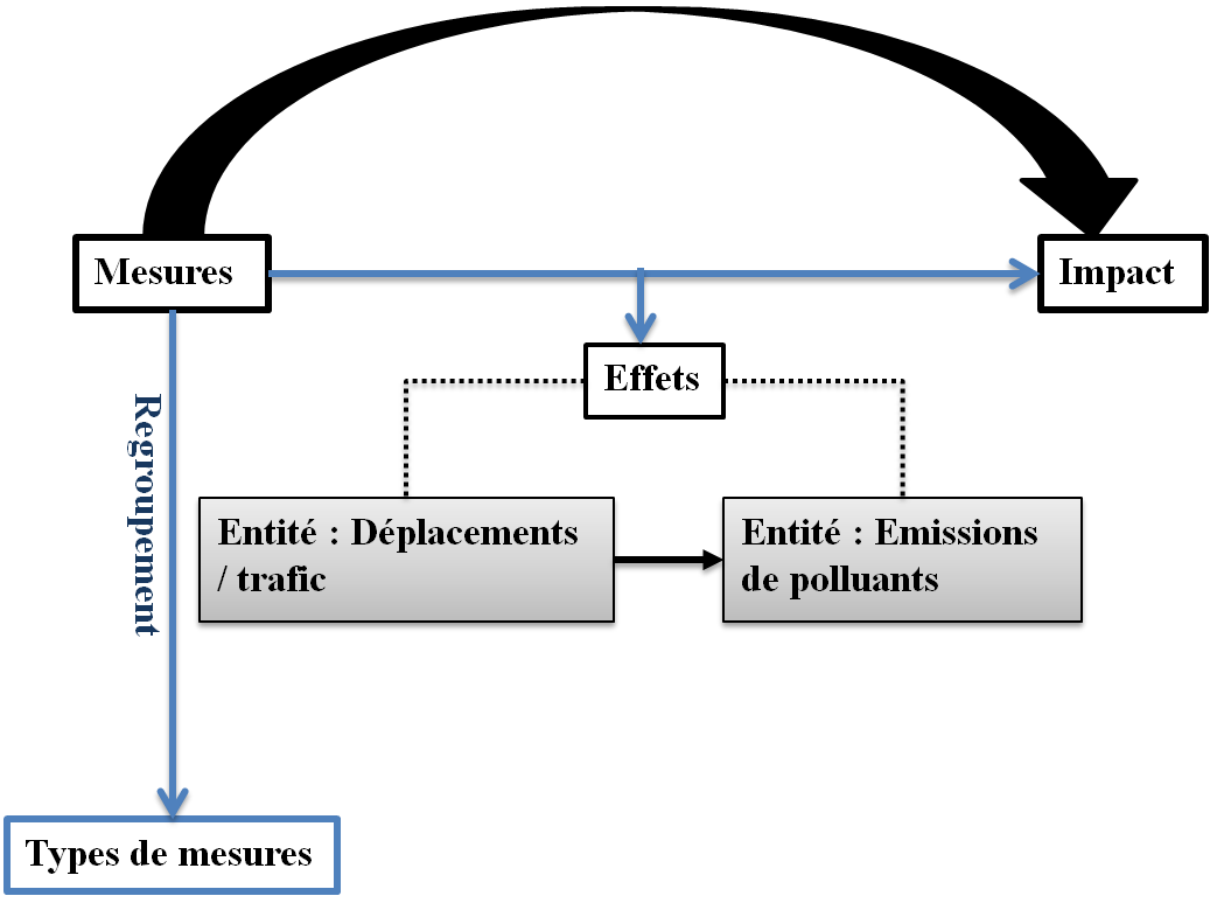


Figure 8 Illustration de l'approche développée dans le premier chapitre

Chapitre 2 Les méthodes d'évaluation de l'impact des mesures de gestion des déplacements et du trafic sur la qualité de l'air

Introduction

Le premier chapitre présente une large palette de mesures. Ces mesures sont décrites et nous avons tenté de caractériser leurs effets grâce à des retours d'expérience. Afin d'évaluer une mesure, il est nécessaire de prendre en compte l'ensemble de ces effets. Dans cette partie, nous analysons donc les différentes méthodes d'évaluation environnementale existantes. Nous cherchons à identifier les avantages et les bonnes pratiques de chacune d'entre elles par rapport à la prise en compte des différents effets et de leur particularités en termes d'échelles spatio-temporelles d'application ou d'effet, de données utilisées, de polluants évalués, de scénarios pris en compte …

Les évaluations des mesures sont principalement réalisées, en France, dans le cadre des Plans de Déplacements Urbains en France (PDU). Nous nous focalisons donc sur les différentes méthodes mises en œuvre dans ce cadre car l'accès à ces documents est assez aisé.

Une première partie introductive nous permettra de définir les objets à évaluer au sein des PDU et d'analyser les informations présentes dans les documents de PDU sur lesquels pourront se baser les évaluations environnementales (objectifs, impacts attendus, données disponibles…).

Plusieurs méthodes sont utilisées pour l'évaluation des mesures. Celles-ci diffèrent selon les mesures évaluées, le contexte (évaluation globale ou mesure individuelle), les périmètres, les échelles temporelles et les scénarios considérés. Nous présentons ensuite rapidement les différentes méthodes que nous avons pu identifier.

En dernier lieu, nous présentons une analyse critique plus détaillée des évaluations environnementales des PDU décrits dans la première partie. Nous tentons de relever les bonnes pratiques, les incohérences ainsi que d'identifier des recommandations.

1. LES PDU ET LES PROBLEMATIQUES ENVIRONNEMENTALES 71

1.1. QU'EST-CE QU'UN PDU ? 72
1.2. LE CADRE REGLEMENTAIRE DU PDU 72
1.3. COMMENT LES PDU PRENNENT EN COMPTE LES PROBLEMATIQUES ENVIRONNEMENTALES : CONSTAT 73
1.3.1. Pré-diagnostic et diagnostic 73
1.3.2. Enjeux et Axes centraux 73
1.3.3. Objectifs environnementaux 74
1.3.4. Scénarios 74
1.3.5. Actions 75
1.3.6. Suivi 75
1.3.7. Evaluation environnementale 75
1.4. UNE EVOLUTION DEPUIS LA MISE EN PLACE DES EVALUATIONS ENVIRONNEMENTALES ? . 76
1.5. CONCLUSION 77

2. LES METHODES D'EVALUATION ENVIRONNEMENTALE ET LEUR POTENTIELLE APPLICATION DANS LE CADRE DES EVALUATIONS ENVIRONNEMENTALES DES MESURES 79

2.1. LA PRISE EN COMPTE DE LA POLLUTION DE L'AIR, DU BRUIT, ET DE LA CONSOMMATION D'ENERGIE DANS LES PDU (CERTU, 1999) 79
2.2. LA METHODE D'EVALUATION ENVIRONNEMENTALE DES PLANS ET PROGRAMMES D'INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT (MICHEL & MONIER, 2001) 80
2.3. NOTE METHODOLOGIQUE SUR LES ETUDES D'ENVIRONNEMENT DANS LES PROJETS ROUTIERS (CERTU, 2001A) 80
2.4. BILAN DES PRATIQUES SUR L'EVALUATION ENVIRONNEMENTALE DES PLANS ET PROGRAMMES DE TRANSPORT EN FRANCE (INGEROUTE, AVRIL 2000) 81
2.5. LES OBSERVATOIRES DES PDU : DE LA METHODE AUX INDICATEURS (CERTU, OCTOBRE 2001) 81
2.6. LA CIRCULAIRE DU 12/04/06 RELATIVE A L'EVALUATION DE CERTAINS PLANS, SCHEMAS, PROGRAMMES ET AUTRES DOCUMENTS DE PLANIFICATION AYANT UNE INCIDENCE NOTABLE SUR L'ENVIRONNEMENT (CIRCULAIRE, 12/04/06) 82
2.7. LE DEED 84
2.8. LE BILAN CARBONE 84
2.9. L'EVALUATION QUALITATIVE 85
2.10. CONCLUSION 86

3. ANALYSE CRITIQUE DES EVALUATIONS ENVIRONNEMENTALES DES PDU 87

3.1. L'ORGANISME REALISANT L'EVALUATION ENVIRONNEMENTALE 87
3.2. L'ECHELLE SPATIALE DE L'EVALUATION 88
3.3. LE DIAGNOSTIC OU ETAT INITIAL 90
3.4. LA DEFINITION DES OBJECTIFS EN TERMES D'AMELIORATION DE LA QUALITE DE L'AIR, DE CONSOMMATION D'ENERGIE ET DE DIMINUTION DES EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE 93
3.5. L'ELABORATION DE SCENARIOS ET LES HYPOTHESES ENONCEES 94
3.6. LES DONNEES UTILISEES DANS L'EVALUATION ENVIRONNEMENTALE 96
3.6.1. Les données de déplacements et de trafic 96
3.6.1.1. L'exploitation des résultats de l'enquête Ménages Déplacements 96
3.6.1.2. L'exploitation de l'enquête Cordon 98
3.6.1.3. Les autres sources de données du trafic et des déplacements 98
3.7. LES DONNEES SUR LA QUALITE DE L'AIR 99
3.7.1. Les émissions de polluants 99
3.7.2. Les concentrations de polluants 99
3.7.3. Les données sur les gaz à effet de serre 99
3.7.4. Les données sur la consommation d'énergie 100
3.8. LES GAZ A EFFET DE SERRE 100
3.9. LA CONSOMMATION D'ENERGIE 102
3.10. L'ECHELLE TEMPORELLE DE L'EVALUATION 103
3.11. LES INDICATEURS 103
3.12. CONCLUSION 105

CONCLUSION 107

1. Les PDU et les problématiques environnementales

Dans (Ademe, Certu, DTT, & Gart, 2002), une première analyse sur la prise en compte de la pollution atmosphérique et de la consommation énergétique dans les PDU de 1ère génération avait été réalisée. Les principaux constats étaient les suivants :

- *une évaluation insuffisante en matière de pollution de l'air,*
- *le début d'une prise en compte de l'environnement, avec des objectifs rarement quantifiés,*
- *une démarche d'évaluation trop peu souvent engagée et un suivi environnemental rarement proposé,*
- *des mesures environnementales de lutte contre les pollutions atmosphérique peu ambitieuses et des faiblesses en matière de méthode.*

Cette étude avait été réalisée sur des PDU de 1ère génération[6], en adéquation avec les 6 objectifs (Annexe 1) de la LAURE (Loi, 30/12/96). Mais le cadre réglementaire des PDU a évolué dans le sens d'une plus grande intégration des problématiques environnementales dans ses objectifs et enjeux avec d'une part, la loi SRU (Loi, 13 décembre 2000 qui incite à : développer l'offre multimodale, organiser le stationnement et les transports de marchandises), et d'autre part, la circulaire relative à l'évaluation de certains Plans et Programmes (Circulaire, 12/04/06) qui rend obligatoire la réalisation d'une évaluation environnementale du PDU avant son adoption. Il nous parait donc intéressant d'enrichir cette analyse en observant l'évolution produite par ce nouveau cadre réglementaire et de s'interroger sur les raisons des difficultés de prises en compte de ces problématiques au sein des PDU.

Ce travail s'est appuyé sur l'analyse de 15 PDU : Lille (Lille Métropole Communauté Urbaine, juin 2000), Reims (Reims Métropole, 20 février 2007), Montbéliard (Pays de Montbéliard, 2009), Nantes (Communauté Urbain de Nantes, 2000), Saint Nazaire (CARENE, 20 juin 2006), Rennes (Rennes Métropole, 5 juillet 2007), Sophia Antipolis (Communauté d'Agglomération Sophia Antipolis, 5 mai 2008), Brest (Communauté Urbaine de Brest, 22 mars 2002), Grenoble (SMTC, 15 décembre 2008), Lens (SMT, 30 novembre 2007), Lyon (SYTRAL, 2 juin 2005), Nancy (Grand Nancy, 2006), Nice (Communauté Nice Côte d'Azur, 28 janvier 2008), Orléans (L'agglo Orléans Val de Loire, 3 juillet 2008) et Saint Etienne (Saint-Etienne Métropole, 17 mai 2004). Ces Plans sont relatifs à des agglomérations ou aires urbaines de tailles variées. Ce sont des PDU révisés ou des premiers PDU. Cela permettra de constater des approches différentes (ou pas) de prise en compte des problématiques environnementales. Cet échantillon de PDU regroupe des Plans assez récents qui, pour certains, possèdent une évaluation environnementale. Les PDU de Lille et de Nantes ont été analysés, bien que ce soient des PDU de 1ère génération. Le PDU de Lille a fait l'objet d'un projet de recherche relatif à son évaluation environnementale, il nous semblait donc intéressant d'inclure le travail réalisé dans notre analyse. Quant au PDU de Nantes, celui-ci constitue la matière première du projet EvalPDU, les données relatives à ce PDU nous sont donc accessibles. Il nous est donc apparu pertinent de conserver ces deux PDU dans notre échantillon.

Après un bref aperçu de la définition des PDU et de leur cadre réglementaire, nous analyserons comment les PDU abordent les préoccupations environnementales. Nous ferons un constat sur les pratiques. Les différentes étapes du PDU seront analysées (diagnostic, axes « politiques », objectifs, scénarios, actions, suivi environnemental, annexes : chartes spécifiques, évaluation environnementale). Nous étudierons ensuite l'évolution entre les PDU de 1ère génération et les PDU de 2ème génération dans leur prise en compte des problématiques environnementales. Nous tenterons aussi de comprendre pourquoi les problématiques environnementales sont abordées de manière très

[6] Les PDU réalisés avant la loi SRU (13 décembre 2000) sont couramment appelés les PDU de 1ère génération, alors que les PDU réalisés après sont appelés les PDU de 2ème génération

contrastée d'un PDU à un autre. Enfin notre réflexion portera sur les causes de la difficulté d'aborder ces problématiques environnementales dans les PDU.

1.1. Qu'est-ce qu'un PDU ?

Créé par la LOTI (Loi d'Orientation sur les Transports Intérieurs), le Plan de Déplacements Urbains est un outil de planification obligatoire pour les communes de 100 000 habitants. Il définit un projet global d'organisation et de gestion des déplacements. Il doit donc permettre de rationaliser l'organisation des transports, de la circulation et du stationnement.

Le PDU doit être évalué au bout d'une période de cinq ans. Au terme de cette évaluation, il peut faire l'objet d'une révision. Les PDU analysés étant réalisés à des périodes différentes, ils peuvent être : en création, en application ou en révision. À cause des différents états d'avancement, les démarches et méthodes d'évaluation sont parfois dissemblables.

De part son objectif de gestion des déplacements et son principe de suivi et d'évaluation, le PDU est un cadre d'application idéal de planification de mesures permettant de maîtriser la qualité de l'air, les émissions de gaz à effet de serre et la consommation d'énergie dans les grandes agglomérations.

La démarche de constitution d'un PDU, explicitée dans (CERTU, 1996), fait apparaître cinq étapes principales. L'étape de **pré-diagnostic** a pour but de rassembler les acteurs du territoire, de définir les objectifs de chaque acteur en matière de déplacements, de faire le point sur les grands projets en cours pouvant avoir une incidence forte sur l'organisation des transports, de recenser les études existantes et de détecter les principaux dysfonctionnements en termes de déplacements. La phase de **diagnostic** doit permettre de synthétiser les analyses répertoriées dans la phase précédente, *la finalité du diagnostic est de pouvoir éclairer le choix des solutions à mettre en œuvre*. La phase de **définition des scénarios** a pour but de définir les **orientations stratégiques de déplacements** tout d'abord en formalisant et quantifiant les **objectifs** du PDU puis en élaborant, comparant et choisissant des scénarios de PDU. La conception du **projet de PDU** doit *définir un ensemble d'**actions**, répondant aux objectifs précis définis dans le scénario retenu*. La dernière phase consiste en la **mise en œuvre et au suivi** du PDU.

1.2. Le cadre réglementaire du PDU

D'un point de vue législatif, les plans de déplacements urbains sont des outils de gestion urbaine qui doivent assurer un développement durable des transports. Dans les textes officiels orientant la conception et l'élaboration des PDU, de nombreux axes soulignent l'importance de la préservation de l'environnement et notamment de la qualité de l'air. Dans l'article 28 de la LOTI du 30 décembre 1982 puis de la LAURE (Loi n°96-1236 du 30/12/96 sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie), il est mentionné que le plan de déplacements urbains « doit être compatible […] avec le plan régional pour la qualité de l'air s'il existe. […] Il vise à assurer un équilibre durable entre les besoins en matière de mobilité et de facilité d'accès, d'une part, et la protection de l'environnement et de la santé, d'autre part. Il a comme objectif un usage coordonné de tous les modes de déplacements, notamment par une affectation appropriée de la voirie, ainsi que la promotion des modes les moins polluants et les moins consommateurs d'énergie. »

La problématique de la préservation de l'environnement est ainsi mentionnée dans les textes légiférant les PDU. Malgré cela, l'étude du CERTU sur le suivi national des PDU montre que la problématique de la qualité de l'air est très souvent abordée de manière succincte et parfois maladroite (Ademe, et al., 2002). Cette étude précise que l'évaluation en matière de pollution de l'air est insuffisante. À titre d'exemple, le suivi environnemental est réalisé dans seulement un PDU sur trois.

La Circulaire du 12/04/06 relative à l'évaluation de certains plans, schémas, programmes et autres documents de planification ayant une incidence notable sur l'environnement précise la nécessité d'effectuer une évaluation environnementale des PDU.

Il s'agit alors de se demander si les enjeux liés à la pollution de l'air sont désormais clairement explicités dans les PDU.

1.3. Comment les PDU prennent en compte les problématiques environnementales : constat

1.3.1. Pré-diagnostic et diagnostic

Les PDU les plus récents (à partir de 2007) présentent un diagnostic sur la pollution atmosphérique dans leur territoire. Sur les quinze PDU étudiés, seuls trois (Nice, Saint Etienne et Lyon) ne présentent pas de diagnostic et trois (Nancy, Nantes et Sophia Antipolis) ne présentent pas de diagnostic sur l'environnement. Dans le cas des PDU révisés, ce diagnostic correspond au bilan de l'ancien PDU. Les éléments présentés sont relatifs à la qualité de l'air mais rarement aux émissions de gaz à effet de serre et à la consommation d'énergie. À Grenoble et Orléans, le diagnostic est réalisé en analysant le nombre de fois où les valeurs limites ou les objectifs de qualité ont été atteints. Les données chiffrées sur la pollution atmosphérique sont inexistantes dans la plupart des diagnostics. Grenoble, Reims et Orléans illustrent leur diagnostic par des représentations cartographiques des concentrations en polluants. Par ailleurs, Reims expose les nouvelles données acquises en termes de pollution de l'air.

Les diagnostics sur l'environnement sont donc plus généralement issus d'une analyse qualitative. Une meilleure prise en compte des problématiques environnementales dans les PDU les plus récents est à noter.

Nous avons pu relever deux types d'objectifs différents dans les PDU. En moyenne 5 ou 6 objectifs très généraux, permettant de cadrer l'orientation générale du PDU, sont définis. Nous appellerons ces objectifs les « axes centraux » des PDU. Nous appellerons « objectifs » les objectifs détaillés du Plan.

1.3.2. Enjeux et Axes centraux

La lecture des axes et des enjeux indique l'orientation politique générale du PDU. Les thématiques abordées permettent d'avoir un premier aperçu de la manière dont les problématiques environnementales sont abordées. Neuf PDU (Brest, Grenoble, Lens, Lille, Montbéliard, Nancy, Orléans, Rennes et Saint Nazaire) identifient un enjeu relatif à l'environnement. A contrario, seuls quatre PDU (Lens, Lille, Montbéliard et Nancy) font apparaître cette thématique dans leurs axes centraux. Cela peut s'expliquer par le fait que la préservation de l'environnement est un axe transversal aux actions programmées et donc que celui-ci n'apparaît pas dans ces axes centraux.

Parmi les Plans qui spécifient une thématique « environnement » soit dans les enjeux soit dans les axes centraux, on observe, néanmoins, deux façons de l'aborder. Alors que certains l'orientent dans le sens de la préservation de l'environnement (Nancy : « préserver notre environnement », Montbéliard : « préserver le Pays de Montbéliard des conséquences environnementales » ou Rennes : « préserver un environnement et un cadre de vie de qualité »), d'autres l'abordent dans le sens de la réduction des nuisances (Lens : « limiter les nuisances liées aux activités et au trafic », Brest : « réduction des nuisances et des pollutions »). Cette dernière façon d'aborder les préoccupations

environnementales peut fait apparaître une volonté plus marquée de réduire l'impact des déplacements sur l'environnement.

Les problématiques environnementales sont donc mentionnées comme une problématique forte des territoires. Néanmoins, elles apparaissent peu dans les axes centraux et la prise en compte de ces problématiques ne semble donc pas être un des objectifs majeurs du PDU.

1.3.3. Objectifs environnementaux

Les objectifs relevés sont de deux types : les objectifs « environnementaux » exprimés en émissions de polluants ou en consommation d'énergie et les objectifs « déplacements » exprimés en part modale ou en véhicules.kilomètre. Ces derniers ne sont pas des objectifs directement représentatifs d'une prise en compte des problématiques environnementales et le lien entre ces deux types d'objectif (une baisse de 10 % de la part modale de la voiture permettra une baisse des émissions de polluants par exemple) n'est pas forcément explicité.

Ces objectifs environnementaux sont en général définis qualitativement : limiter les nuisances locales (Rennes), réduire les nuisances liées aux déplacements motorisés (Lens). Les moyens mis en œuvre pour les atteindre sont aussi généralement exposés : transfert vers des modes doux (Rennes), réguler les feux tricolores (Lille). Les objectifs sont dans onze PDU (Lille, Saint Nazaire, Sophia, Nancy, Brest, Nice, Orléans, Lyon, Montbéliard, Rennes et Grenoble) de réduire les niveaux de concentrations des polluants locaux. Mais ils sont rarement quantifiés, seulement cinq PDU (Grenoble, Rennes, Montbéliard, Lille et Nice) annoncent des objectifs chiffrés ou indiquent qu'il faut reprendre les objectifs du Plan de Protection de l'Atmosphère (PPA). Il est à noter que ces objectifs chiffrés, s'ils sont propres au territoire, envisagent une stabilisation des émissions et des consommations d'énergie. Ces objectifs sont majoritairement définis en fonction des objectifs internationaux (Kyoto, OMS) ou des objectifs de programmes existants sur le territoire (PPA, PRQA, Plan Climat local). Ils sont exprimés par des unités très diverses : pourcentage d'émissions, émissions par habitant, masse d'énergie consommée par an, masse par volume de polluants.

Les objectifs sont généralement définis à l'horizon du terme du PDU qui est d'une dizaine d'années. Les objectifs sont, dans tous les PDU, en accord avec les axes centraux du PDU. Ces objectifs sont définis pour l'ensemble du Périmètre des Transports Urbains (PTU).

Alors que les objectifs à atteindre concernant la répartition modale des déplacements sont toujours quantifiés, les objectifs environnementaux ne le sont presque jamais. Cela montre que les problématiques environnementales ne sont pas encore réellement au cœur des Plans de Déplacements Urbains, qui ont pour objectif principal de gérer les transports urbains et non de limiter les nuisances environnementales des déplacements.

1.3.4. Scénarios

Seuls quatre PDU (Montbéliard, Saint Nazaire, Lens et Saint Etienne) formulent les scénarios alternatifs qui ont fait l'objet d'études. Un seul (Lens) parmi ces PDU définit des objectifs environnementaux pour chacun des scénarios mais ces dcénarios ne sont pas comparés d'un point de vue environnemental.

On peut donc penser que les choix des scénarios de PDU ne sont pas réalisés par rapport à l'impact que ces plans ont sur l'environnement. Il est à noter que les réflexions sur les scénarios des PDU ne sont pas toujours exposées dans les documents.

1.3.5. Actions

Le lien entre les actions programmées et les objectifs annoncés de réduction des nuisances est mentionné dans la très grande majorité des PDU. Cependant il est plus ou moins accentué (Reims : « Les opérations en faveur des modes alternatifs à la voiture auraient des impacts indirects positifs sur le climat, la qualité de l'air et par conséquent la santé humaine. »). L'impact de ces actions sur l'environnement est très rarement quantifié. L'impact environnemental de certaines actions, comme la mise en place d'un TCSP dans le PDU de Montbéliard par exemple, est parfois renseigné, mais cela reste exceptionnel.

Les mesures semblent principalement programmées dans le but de réduire les émissions et les consommations dans les centres villes (création de parcs relais, contournement de centres villes) mais l'impact de telles actions sur les zones périphériques n'est pas évalué. À ce sujet, une des conclusions de l'étude de (Noppe, Rotheval, & Vinot, 2002) sur le PDU de Saint Etienne montre que le scénario modélisé avec la mise en œuvre du PDU a pour effet de diminuer légèrement les concentrations dans le centre de Saint Etienne mais de les augmenter au niveau de l'A7 et à l'Est c'est-à-dire dans les zones périphériques. Cela nous laisse penser que les PDU pourraient avoir un impact négatif sur les concentrations de polluants dans les zones périphériques. L'évaluation environnementale devrait donc aussi estimer l'impact du PDU sur les zones périphériques.

Certaines mesures apparaissent parfois incohérentes par rapport aux conclusions du diagnostic. Dans le PDU de Reims, par exemple, le bilan de l'ancien PDU montre que les concentrations ont baissé dans le centre ville mais ont augmenté dans le périurbain. Cependant on retrouve, dans le projet, des actions du type : « construction de rocades dans les zones périurbaines » qui pourraient avoir des impacts sur ces zones. Toutefois, aucune évaluation environnementale ciblée n'est réalisée dans ces zones spécifiques.

Les mesures sont donc majoritairement programmées dans le but de réduire les nuisances causées par les déplacements. Cependant, leur impact sur l'environnement est très rarement quantifié et certaines actions spécifiques nécessiteraient une évaluation environnementale ciblée sur des zones potentiellement impactées.

1.3.6. Suivi

Quatre PDU (Montbéliard, Rennes, Nice et Grenoble) ont défini des indicateurs concernant la qualité de l'air, les consommations d'énergie et/ou les émissions de gaz à effet de serre. Ces indicateurs peuvent être insérés au sein d'un observatoire du PDU ou plus globalement des déplacements. Quatre autres PDU (Reims, Lens, Nancy et Saint Etienne) annoncent que le suivi de l'impact du PDU sur l'environnement est prévu mais aucune définition d'indicateurs ou de méthode de suivi n'est exposée. Enfin deux PDU (Orléans et Sophia Antipolis) ont défini des indicateurs mais aucun ne permet de quantifier directement l'évolution des émissions de polluants ou des consommations d'énergie.

Le suivi de l'impact du PDU sur l'environnement est globalement énoncé. Mais les indicateurs permettant le suivi ne sont que très rarement définis et lorsqu'ils le sont, ils ne traitent qu'une partie de la problématique de la pollution atmosphérique. Dans le PDU de Reims, par exemple, seuls des indicateurs relatifs aux émissions de gaz à effet de serre sont définis.

1.3.7. Evaluation environnementale

Six PDU (Montbéliard, Sophia Antipolis, Lens, Nice, Orléans et Grenoble) ont réalisé une évaluation environnementale. On constate que les évaluations environnementales sont très différentes d'un PDU à un autre autant du point de vue du contenu, de la présentation que de la méthode employée. Alors que certains PDU (Sophia Antipolis, Nice) ne définissent que l'état initial et les mesures de suivi de l'environnement, d'autres (Lens, Montbéliard, Orléans, Grenoble) définissent aussi l'impact du PDU sur l'environnement. La synthèse des impacts du PDU sur l'environnement peut être présentée pour tout le projet (Orléans), par actions (Lens), par enjeux (Montbéliard) ou par type d'infrastructure (Montbéliard). Enfin certains PDU (Lens) mettent en avant que la réduction des émissions et des concentrations de polluants est un objectif du plan donc que l'impact du Plan sera globalement positif pour l'environnement alors que d'autres (Grenoble) font des études plus poussées en estimant les modifications que le PDU pourrait avoir sur les déplacements, le trafic, les émissions et concentrations de polluants par rapport aux mesures programmées.

Globalement les PDU traitent les problématiques environnementales engendrées par les déplacements. Cependant, les méthodes et outils mis en œuvre sont très contrastés d'un PDU à un autre. Cela peut venir du fait que les méthodes existantes sont difficilement applicables, mais aussi du fait que les impacts des PDU sur l'environnement ont du mal à être évalués, de part la variété d'actions qu'ils regroupent, les différentes échelles spatiales et temporelles d'impact, la complexité des composantes environnementales à évaluer (qualité de l'air, émissions de polluants), les différentes composantes du territoire qu'il faut prendre en compte (démographie, urbanisme).

1.4. Une évolution depuis la mise en place des évaluations environnementales ?

Les travaux de (Ademe, et al., 2002) sur le bilan des PDU de 1ère génération intègrent des observations sur la prise en compte des problématiques environnementales. Il s'agit donc d'identifier les évolutions, sachant que les PDU actuels sont soumis à l'obligation de produire une évaluation environnementale.

Ces travaux mettent en évidence que *l'environnement est essentiellement vu dans ses dimensions « qualité de l'air » et « ambiance sonore ». La consommation énergétique et ses conséquences sur l'effet de serre ne sont que trop peu souvent abordées*. Cette conclusion sur la consommation d'énergie est aussi souligné dans le rapport (INGEROUTE, avril 2000) qui fait une analyse critique de l'évaluation environnementale de deux plans de déplacements urbains : Valence et Lille. Les analyses effectuées précédemment sur les PDU récents, indiquent que la consommation d'énergie et l'impact sur l'effet de serre prennent toujours une place importante. Les synthèses de (GART, avril 2010) précise que sur 75 PDU étudiés, le critère de *l'utilisation de l'énergie n'est retenu* pour l'évaluation environnementale que dans *40 % des cas* et que *l'évolution des émissions des gaz à effet de serre est retenue dans 65% des cas*. On peut donc noter une meilleure prise en compte des critères d'émissions de gaz à effet de serre et des consommations d'énergie. L'émergence au niveau international d'enjeux environnementaux climatiques peut expliquer cette évolution. Cependant, alors que les effets néfastes de la pollution sur la santé étaient *souvent repris dans les diagnostics*, on constate d'une part que tous les PDU n'abordent pas ces effets, et d'autre part que la population exposée n'est estimée que dans un seul PDU (Grenoble).

Les objectifs environnementaux sont *très généraux, rarement quantifiés, et consensuels* dans les PDU de 1ère génération et le demeurent dans les PDU les plus récents. Les objectifs fixés sont, la plupart du temps, les orientations définies par la LAURE. Il est d'autre part souligné que *les objectifs des PDU évoquent la plupart du temps des améliorations, sans connaître ni leur ampleur ni l'effet des mesures préconisées. Cela est dû à la nouveauté de la démarche et à la complexité des évaluations.* La complexité de l'évaluation est toujours d'actualité, les méthodes exposées ne présentent pas de détails techniques. La nouveauté de la démarche d'évaluation environnementale ne nous laisse encore pas assez de recul pour estimer son efficacité. Les objectifs évoquent donc toujours des améliorations de la

qualité de l'air, mais qui généralement ne sont pas appuyées par des analyses de la situation initiale, des choix de gestion des déplacements et des évolutions territoriales.

Tous les PDU ont évoqué la qualité de l'air, mais les analyses effectuées alors qu'elles étaient *très souvent succinctes et parfois maladroites,* apparaissent désormais très contrastées d'un PDU à un autre. Alors que certains exposent des analyses cartographiques évolutives présentant des résultats de modélisation du trafic, des émissions ou des concentrations de polluants, d'autres analysent l'évolution de l'indicateur ATMO sur tout le territoire.

Les données des réseaux locaux de surveillance de qualité de l'air étaient *souvent ignorées et mal exploitées* dans le diagnostic et rares sont les PDU récents qui analysent et intègrent ces données.

Le bilan de l'Adème ainsi que le rapport INGEROUTE insistent sur le fait que les différents scénarios ne sont pas évalués d'un point de vue environnemental et que les mesures adoptées vont, de fait, dans le sens d'une réduction des impacts des transports sur l'environnement. Le constat effectué ci-dessus sur les PDU récents est le même. Les scénarios ne sont que très rarement évalués environnementalement et les objectifs du PDU en terme de qualité de l'air constituent souvent le résultat de l'évaluation environnementale.

Globalement, l'effort a porté sur la prise en compte des consommations d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre. Mais les objectifs sont toujours aussi imprécis. Même si les solutions envisagées pour maîtriser le trafic et gérer les déplacements sont toujours plus innovantes (transport à la demande, location de véhicules à la journée…), les problèmes de méthodes pour évaluer l'impact de ces mesures sur la qualité de l'air sont encore bien présents.

1.5. Conclusion

Les problématiques environnementales sont souvent présentées comme un axe transversal qui n'est pas présenté clairement. Cela ne semble donc pas être un objectif majeur des PDU. Les objectifs environnementaux sont rarement quantifiés autant dans les objectifs finaux que dans les objectifs des scénarios. La comparaison de ceux-ci ne semble donc pas avoir été effectuée sur ce critère. L'impact des actions sur l'environnement est très rarement quantifié mais il est quand même régulièrement précisé qu'elles sont programmées dans le but de réduire les nuisances causées par les déplacements. Enfin, rares sont les documents qui définissent des indicateurs environnementaux de suivi. À première vue, les méthodes d'évaluation semblent très contrastées d'un PDU à un autre.

Les problématiques environnementales (concernant essentiellement la qualité de l'air), sont mieux prises en compte dans les PDU les plus récents. Néanmoins, plusieurs points interrogent quant à la qualité et la pertinence de l'évaluation environnementale. Il s'agit notamment de l'absence de définition des objectifs environnementaux au niveau de l'élaboration des scénarios, d'objectifs non quantifiés ou encore de diagnostics environnementaux établis uniquement sur une analyse qualitative.

Cela peut venir du fait que les méthodes existantes sont difficilement applicables, mais aussi du fait que les impacts des PDU sur l'environnement ont du mal à être évalués, de part la variété d'actions qu'ils regroupent, les différentes échelles spatiales et temporelles d'impact, la complexité des composantes environnementales à évaluer (qualité de l'air, émissions de polluants), les différentes composantes du territoire qu'il faut prendre en compte (démographie, urbanisme).

La deuxième partie de ce rapport présente les différentes méthodes d'évaluation utilisées dans un contexte de PDU ou qui paraissent pertinentes pour l'évaluation de mesures de gestion des déplacements et du trafic. Les méthodes sont nombreuses et présentent une grande diversité comme cela avait été soulevé dans cette première analyse.

2. Les méthodes d'évaluation environnementale et leur potentielle application dans le cadre des évaluations environnementales des mesures

L'évaluation environnementale des plans et des programmes trouve son origine dans les textes réglementaires de la LAURE puis de la LOTI. Plusieurs objectifs lui sont attribués : répondre à des exigences réglementaires (européennes), adopter une vision opérationnelle, stratégique, constituer un outil d'aide à la décision.

Dans le cadre d'une démarche PDU, l'évaluation environnementale apparaît à des temps différents. Une évaluation a priori doit être produite en amont du projet afin de justifier l'adoption et la mise en place des actions du PDU. Une évaluation en continu, grâce notamment aux observatoires, permet de suivre l'évolution de la mise en place et des effets des mesures. Enfin, une évaluation a posteriori ou bilan environnemental est réalisée pour déterminer l'état existant. Cette évaluation peut aussi bien être présente dans le cadre d'un diagnostic que dans le cadre d'un bilan cinq ans après l'adoption du PDU ou au terme de celui-ci. Dans la suite de ce chapitre, l'analyse portera principalement sur les évaluations a priori.

Dans cette deuxième partie, nous exposons les différentes méthodes d'évaluation environnementale pour l'évaluation d'un PDU ou pour l'évaluation d'une action particulière. Nous tentons de définir leur applicabilité et leur pertinence dans le cadre d'une évaluation environnementale des mesures de gestion des déplacements et du trafic.

2.1. La prise en compte de la pollution de l'air, du bruit, et de la consommation d'énergie dans les PDU (CERTU, 1999)

Dans ce rapport, deux démarches sont différenciées : la quantification des conséquences environnementales des scénarios et la définition d'objectifs quantifiés grâce à des indicateurs.

Il est conseillé d'utiliser des outils de Système d'Information Géographique (SIG) qui permettent de croiser des informations de sources ou de natures différentes, d'organiser géographiquement les données, de calculer des indicateurs, de formuler des requêtes et analyses spécifiques ainsi que de mettre à jour les données. Ceux-ci favorisent aussi une approche globale et transversale du territoire urbain. Cet outil SIG serait alimenté par des modèles de trafic, d'émissions et de concentrations de polluants. Cette méthode décrit les outils de modélisation à utiliser pour prendre en compte la pollution de l'air et la consommation d'énergie dans les PDU. Elle précise les caractéristiques et limites des modèles de trafic, transport/urbanisme, transport de marchandises, pollution de l'air et consommation d'énergie. Il est d'autre part décrit comment intégrer les problématiques environnementales au sein des étapes d'élaboration du PDU (pré-diagnostic, diagnostic, objectifs, scénarios, projet et suivi). Enfin, une synthèse des impacts des mesures envisageables au sein du PDU est présentée par type de mesure et par type d'impact (pollution locale, régionale, énergie et CO_2).

Cette méthode est très riche et détaillée et aborde de nombreux concepts clés de l'évaluation environnementale (échelle spatiale, temporelle). Néanmoins, elle est assez ancienne (1999). Les outils et les types de mesures évaluées ont évolués.

2.2. La méthode d'évaluation environnementale des plans et programmes d'infrastructures de transport (Michel & Monier, 2001)

Cette méthode définit deux étapes essentielles : identifier les enjeux environnementaux (richesse, fragilité et potentialités des territoires concernés) et évaluer les effets des scénarios envisagés afin d'orienter le choix vers le scénario le plus favorable. La définition d'enjeux doit partir d'un *diagnostic* qui permet de définir des *objectifs* en fonction de *critères réglementaires* (seuil de concentration par exemple). Les différents indicateurs d'impact peuvent être quantitatifs (comparaison avec des seuils et objectifs fixés nationalement ou internationalement) ou qualitatifs (compatibilité avec des enjeux environnementaux majeurs). Dans cette méthodologie, les auteurs différencient des *indicateurs d'enjeux* (seuils et état initial) et des *indicateurs d'effet* (impact des différents scénarios en masse de polluants ou consommation). Ils définissent quatre enjeux majeurs : *maintenir la biodiversité, préserver une ambiance sonore de qualité, préserver la qualité des eaux superficielles et souterraines* ainsi que *maintenir la qualité de l'air*. Pour l'évaluation environnementale des PDU, ils conseillent de réaliser une *modélisation très simplifiée […] selon une approche très pragmatique*. Il recommandent d'évaluer seulement les émissions et concentrations de NO_x et CO_2. L'estimation des flux de la plupart des autres polluants caractéristiques du trafic routier (poussières, O_3 et COV) n'est pas recommandée du fait des problèmes de quantification et de métrologie. L'évaluation des consommations d'énergie primaire est aussi recommandée. Ils proposent de comparer l'*état initial* et l'*état final* du territoire représentés par les émissions et les consommations totales tous secteurs confondus. Le protocole d'évaluation se déroule en 4 étapes : 1. Calcul de trois indicateurs : trafic x émissions unitaires (ou consommation d'énergie par km), trafic additionnel x émissions unitaires (ou consommation d'énergie par km) et émissions et consommations d'énergie de toutes les autres activités anthropiques. 2. Définition des seuils et des objectifs établis au niveau national et international. 3. Comparaison des valeurs des indicateurs avec les seuils et objectifs. 4. Classement des scénarios en fonction des résultats des étapes précédentes et choix d'un scénario.

Cette méthode est intéressante par la prise en compte des critères environnementaux dans la comparaison des scénarios. Néanmoins, elle est adaptée pour l'évaluation des plans ou programmes nationaux car elle utilise des données de trafic et d'émissions agrégées qui permettent de représenter des impacts importants à une large échelle.

2.3. Note méthodologique sur les études d'environnement dans les projets routiers (CERTU, 2001a)

Cette méthodologie énumère une série de recommandations pratiques sur l'échelle spatiale et temporelle d'analyse. Les différents polluants qu'il est recommandé de prendre en compte sont les oxydes d'azote, le monoxyde de carbone, les COV, le benzène, les particules émises par la circulation des véhicules et le dioxyde de soufre. De plus, le CO_2 permettra d'appréhender l'effet de serre et la consommation énergétique. Les différents indicateurs à évaluer sont (suivant la quantité de trafic, les estimations des émissions de polluants et de la consommation énergétique) : la quantification de l'état initial par des mesures in situ ainsi que l'estimation des concentrations dans la bande d'étude autour du projet. Des cas particuliers d'aménagement ou de configuration de voirie font l'objet de recommandations supplémentaires.

Il est conseillé d'établir un *état initial* présentant la situation actuelle du territoire qui s'appuye sur des données existantes ou des données obtenues en réalisant des campagnes de mesures spécifiques. Puis une étape devra présenter une série de modélisations (trafic, émissions, consommations d'énergie et éventuellement dispersion) afin de comparer les différentes *variantes* du projet.

Cette méthode est appropriée pour l'évaluation environnementale d'un aménagement spécifique sur voie urbaine (corridor, boulevard) par exemple.

2.4. Bilan des pratiques sur l'évaluation environnementale des plans et programmes de transport en France (INGEROUTE, avril 2000)

Malgré l'intitulé de ce rapport, une méthodologie détaillée y est exposée. Elle présente les différentes étapes de l'élaboration d'un PDU : pré-diagnostic, diagnostic, scénarios, projets, suivi et évaluation. Cette méthodologie précise pour chacune de ces étapes, les aspects environnementaux qu'il est nécessaire d'insérer.

Dans l'étape de pré-diagnostic, il est conseillé de mettre en place un *système d'évaluation des effets des caractéristiques du futur PDU sur l'environnement*, et de définir un nombre limité d'indicateurs. Le CO_2, les NO_x, les particules fines en suspension, le linéaire total des voies de communication et la consommation de pétrole sont les exemples cités. Il n'est pas précisé s'il s'agit des concentrations ou des émissions. L'étape de diagnostic est présentée comme un état des lieux de ce qui se passe au niveau du territoire (parmi les exemples cités : évolution spatiale, points noirs et potentialités du réseau pour les nuisances) et comme une étape de sélection des données pertinentes relatives à l'environnement. Il est ensuite recommandé de proposer des scénarios. Différents types sont cités comme les scénarios : de référence, du cas le plus défavorable ou encore à options environnementales fortes. Puis il est nécessaire d'évaluer les indicateurs ainsi que de comparer les scénarios *en fonction de différents thèmes de l'environnement*. Les outils proposés sont les SIG et l'analyse multicritère. Dans l'étape de projet, aucune recommandation particulière n'est formulée. Enfin, dans l'étape de suivi et d'évaluation, il est conseillé de *s'équiper en moyens de mesures* afin de *suivre les évolutions des pollutions*.

Au sein de cette méthodologie, une série de conseils est énoncée sur les thèmes à considérer pour la prise en compte de l'environnement. Il est notamment recommandé de comparer les indicateurs produits par les scénarios avec les objectifs du PRQA, de prendre en compte l'évolution de la demande en déplacement, les modifications des infrastructures, les améliorations technologiques sur les véhicules et sur les carburants et de considérer plusieurs hypothèses de parcs roulants.

2.5. Les observatoires des PDU : de la méthode aux indicateurs (CERTU, OCTOBRE 2001)

Ce rapport expose une méthode pour la réalisation du suivi du PDU. Une partie de ce rapport aborde la thématique de la pollution atmosphérique et de la consommation d'énergie. Il est recommandé de prendre en compte des données (provenant des AASQA pour la qualité de l'air et d'enquêtes spécifiques, de l'ADEME, l'INRETS, les CETE et DDE pour les émissions) qui couvrent l'aire urbaine, en priorité sur des sites de fond et des sites de proximité pour l'analyse d'actions spécifiques. Il est conseillé d'actualiser les indicateurs de qualité de l'air tous les ans et ceux d'émissions et de consommation d'énergie tous les cinq ans lors de la réactualisation du PDU. Une série d'indicateurs est listée indiquant l'objectif, la disponibilité et l'universalité de chaque indicateur. Pour la pollution atmosphérique et la consommation d'énergie, ces indicateurs sont : *la moyenne annuelle des concentrations en NO_X, PM_{10}, Benzène, les émissions annuelles de NO_X, PM_{10}, Benzène dues aux déplacements motorisés (kg/an), les émissions annuelles de CO_2 dues aux déplacements motorisés (kg/an), l'existence et la mise en œuvre d'un plan de circulation destiné à préserver le(s) centre(s), le nombre de véhicules de transports collectifs « propres » par type de motorisation, le nombre de poids lourds en transit sur les axes sensibles, le nombre de véhicules de livraison « propres » en activité sur l'agglomération, le nombre total de véhicules-kilomètres de TRM* (transport

routier de marchandises) *dans l'agglomération, le taux de chargement des véhicules de TRM, le taux de livraison par semaine et par employé des établissements les plus fortement générateurs de livraisons*.

2.6. La circulaire du 12/04/06 relative à l'évaluation de certains plans, schémas, programmes et autres documents de planification ayant une incidence notable sur l'environnement (CIRCULAIRE, 12/04/06)

Cette circulaire décrit la procédure et le contenu de l'évaluation environnementale. Il est précisé que cette évaluation est effectuée sur un document qui ne présente pas forcément des projets localisés et détaillés. Cette démarche doit donc être synthétique et *adaptée au contenu et au degré de précision du plan*. Elle doit être constituée d'une *analyse de l'état initial de l'environnement et des perspectives de son évolution*. La connaissance de cet état permettra de connaître *les caractéristiques des zones susceptibles d'être touchées de manière notable par le projet de plan*. Les effets probables du plan sur l'environnement et notamment sur la qualité de l'air doivent être analysés. Ces effets doivent être de plusieurs types : effets à *court/long terme*, *permanents/temporaires*, *secondaires*, *cumulatifs*, et les effets *positifs/négatifs*. D'autre part, les raisons pour lesquels le projet présenté est celui retenu au regard des objectifs (internationaux, nationaux et communautaires) de protection de l'environnement doivent être justifiées. Les autres options envisagées du plan doivent aussi être présentées (effets positifs, négatifs…). Pour pallier les effets négatifs, des mesures compensatoires doivent être exposées. Enfin, des mesures de suivi doivent être mises en place pour vérifier si les effets du plan sont conformes aux prévisions. Les deux exemples cités sont : la mise en place d'indicateurs et le renseignement d'observatoires existants. Enfin, il est demandé de décrire les méthodes qui ont été employées pour pouvoir apprécier la qualité des informations exposées.

La circulaire du 12/04/06 relative à l'évaluation de certains plans, schémas, programmes et autres documents de planification ayant une incidence notable sur l'environnement rend obligatoire la réalisation d'une évaluation environnementale dans le cadre de la mise en place des PDU. Elle présente la procédure d'élaboration et le contenu de l'évaluation environnementale. Le document du CERTU (CERTU, 2008) propose quant à lui une méthode pour évaluer les effets des déplacements sur les émissions de GES et la pollution de l'air. De nombreux points sont similaires dans ces deux textes. Nous les présentons donc ensemble tout en précisant les spécificités de chaque texte.

État initial :

Les méthodologies préconisent l'établissement d'un état initial. Il doit exposer les données et outils disponibles sur le territoire. Les zones impactées par le PDU (fond urbain, proximité automobile…) doivent être renseignées. Le périmètre de la zone prise en compte pour l'évaluation environnementale doit être justifié. Il est d'autre part conseillé dans (CERTU, 2008) de prendre en compte deux niveaux de diagnostic : une analyse de la connaissance de la réalité des émissions de gaz à effet de serre, de la qualité de l'air et de la consommation d'énergie sur la zone d'étude et la définition des principaux enjeux, l'analyse des responsabilités et des causes (qui pollue et où ?). Plusieurs échelles territoriales de diagnostic sont aussi conseillées. Pour la pollution à effet global ou régional et la consommation d'énergie, il faut prendre en compte des indicateurs globaux. Pour la pollution à effet local il faut prendre en compte le périmètre du PDU voire celui des plans régionaux de surveillance de la qualité de l'air. Le périmètre des transports urbains est aussi généralement pertinent pour évaluer l'exposition des personnes. Enfin, l'élaboration de l'état initial du territoire doit se faire en relation avec les associations en charge de la qualité de l'air sur le territoire.

Articulation avec d'autres plans :

La circulaire et la méthodologie indiquent que l'articulation avec les autres plans au niveau international (protocole de Kyoto…), national (Plant Climat…), régional voire local (PRQA…) doit être précisée dans l'évaluation environnementale.

Objectifs :

Une présentation des objectifs est à effectuer, le CERTU précise à ce sujet que les objectifs doivent être quantifiés et datés.

Scénarios :

Une présentation des différents scénarios envisageables sera réalisée. Les motifs du choix du scénario seront exposés. Les effets directs et indirects (positifs ou négatifs) du PDU sur la santé humaine et sur l'air seront précisés aux différentes échelles spatiales et temporelles.

Mesures compensatoires :

Il sera nécessaire d'exposer les mesures compensatoires prévues si nécessaire.

Suivi :

Les méthodologies préconisent de mettre au clair dès la phase de conception du PDU. Les mesures nécessaires pour effectuer le suivi (indicateurs, observatoire…). Le CERTU précise qu'il est nécessaire d'effectuer un bilan du suivi au bout de cinq ans.

Outils, méthodes utilisées :

Le CERTU conseille l'utilisation du parc roulant de l'INRETS, le seul parc national existant au moment de la rédaction du document. Il conseille, d'autre part, l'utilisation du logiciel ARTEMIS pour la modélisation des émissions car il se base sur le méthodologie COPERT et permet de déterminer les émissions d'origine automobile à partir des cinématiques moyennes sur des types de voies. Il permet de plus de prendre en compte les facteurs d'émissions à chaud, à froid et par évaporation. Dans tous les PDU analysés, aucun n'utilise ce logiciel, surement parce qu'il nécessite des données sur les cinématiques difficiles à acquérir pour les collectivités territoriales qui sont chargées de l'évaluation. En ce qui concerne la modélisation du transport de marchandises, le CERTU recommande l'utilisation du modèle FRETURB. Il permet d'obtenir des données de trafic pouvant ensuite être utilisées pour obtenir une estimation des émissions de polluants et de consommations d'énergie par zone.

Ce guide présente et conseille, aussi, tout un panel d'indicateurs, qui ne sont, bien évidemment, pas à appliquer pour tous les PDU, mais dont il serait bon de s'inspirer d'autant plus que nous avons constaté que la définition d'indicateurs était légère voire inexistante.

Explication de la méthode :

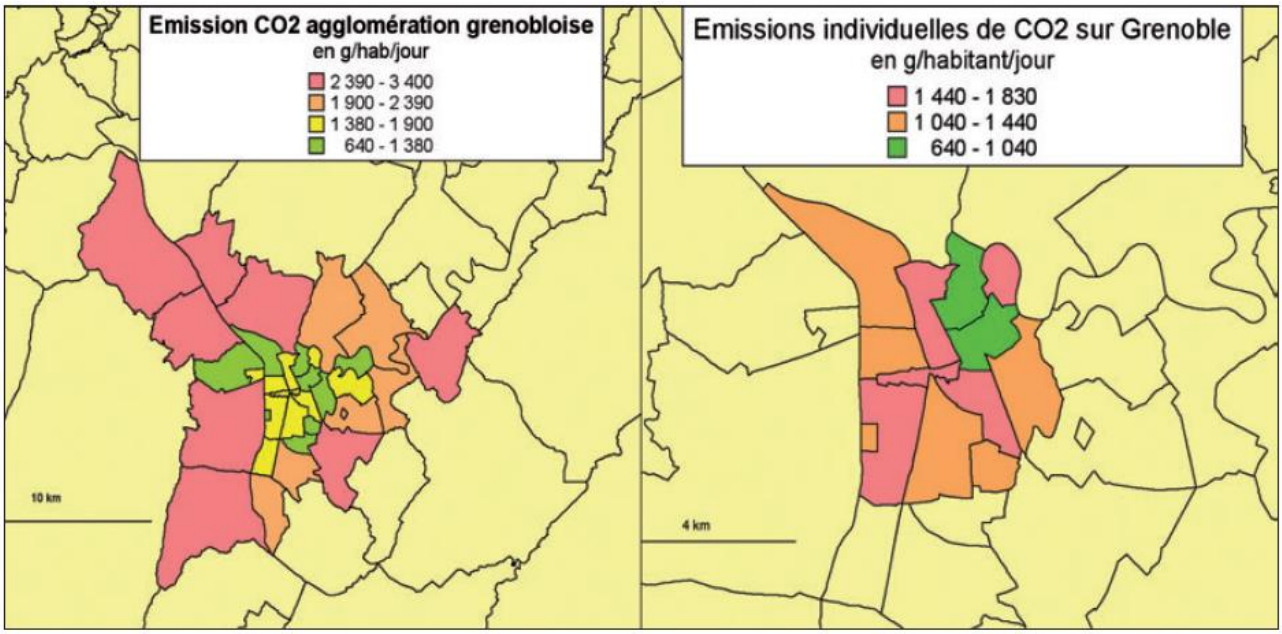
Il est recommandé d'expliquer la méthode utilisée pour effectuer l'évaluation environnementale afin d'avoir une plus grande lisibilité dans les résultats.

Présentation des mesures de gestion du trafic :

Outre des méthodes d'évaluation, le guide CERTU propose des actions qui peuvent aider à réduire les impacts négatifs des transports sur l'environnement : cohérence entre la planification urbaine et l'organisation des déplacements, baisse de la vitesse réglementaire, régulation du trafic, orientation des flux de trafic, restriction de la circulation, promotion des modes et véhicules peu polluants ou peu bruyants, actions sur le stationnement.

2.7. Le Diagnostic Energie Environnement Déplacement (DEED)

Le DEED établit un diagnostic opérationnel des impacts environnementaux des déplacements de personnes d'une agglomération. Mis au point par l'INRETS sur demande de l'Ademe, il a été testé à Lille, Nancy et Nevers. À partir de données relatives à la mobilité des ménages, au contexte géographique et au parc automobile, ce modèle permet de calculer la consommation d'énergie (équivalent pétrole) ainsi que les émissions de polluants réglementés (CO, COV, NO_x, PM_{10}) et de gaz à effet de serre (CO_2) induits par les déplacements des résidents sur une aire urbaine. Cette méthodologie est basée sur le modèle d'émission européen COPERT III. L'intérêt de ce diagnostic est qu'il relie les émissions aux caractéristiques des individus qui les génèrent, tout en prenant en compte des données technologiques, géographiques, urbanistiques et socioéconomiques. Les résultats peuvent être spatialisés par zone (Figure 9).



Emissions par personne ramenées par zone d'habitat sur l'agglomération en 2002
(source Damien VERRY-LET-2006)

Figure 9 : Exemple de résultats de DEED dans le PDU de Grenoble

2.8. Le Bilan Carbone

La méthode Bilan Carbone permet d'évaluer, en ordre de grandeur, les émissions de gaz à effet de serre engendrées par l'ensemble des processus physiques qui sont nécessaires à l'existence d'une activité ou organisation humaine. Le premier objectif de la méthode est de disposer d'une photographie relativement exhaustive de l'ensemble des émissions de gaz à effet de serre pour une activité, un territoire, un projet d'aménagement, etc, ceci dans la mesure où l'entité qui fait cette évaluation possède des données d'activités suffisamment fines et exhaustives pour renseigner les tableurs.

Le Bilan Carbone est un diagnostic coûteux mais qui peut permettre de cibler les mesures de gestion du trafic à entreprendre vers les activités, les secteurs ou les ménages qui émettent le plus de gaz à effet de serre. Il permet de réaliser un diagnostic mais pas d'établir des prospectives d'évolution.

2.9. L'évaluation qualitative

Les évaluations qualitatives de l'impact des PDU sur la qualité de l'air, les consommations d'énergie et les émissions de GES sont effectuées grâce à des données sur la situation actuelle de ces thèmes environnementaux. Les évolutions futures prévues en fonction des différents projets de PDU exposés sont réalisées à partir de déductions et d'hypothèses d'évolution de la population et du trafic. Ces évaluations sont à moindre coût. Leur temps de réalisation est réduit, les résultats présentent des impacts clairs des évolutions attendus. Le Tableau 4 montre les résultats de l'évaluation réalisée pour le PDU de Béthune. Des critères d'impact sont attribués à chaque mesure et thématique analysée. Un bilan global de l'impact de l'ensemble des mesures sur chaque thématique est ensuite déduit.

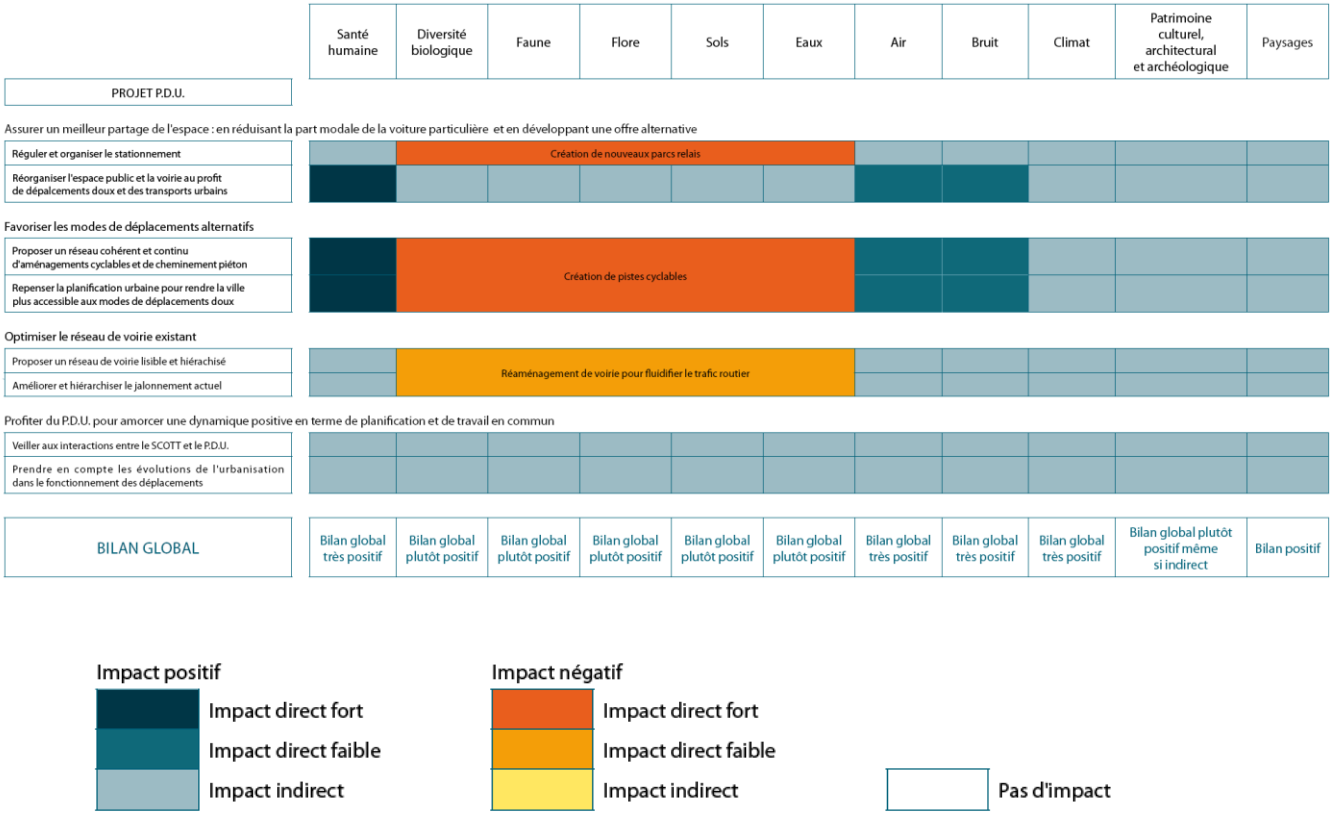


Tableau 4 Evaluation qualitative du PDU de Béthune

Nous notons de multiples inconvénients : pas de lisibilité des évolutions annoncées, non prévision des évolutions de trafic et des reports de trafic, une évaluation imprécise, des résultats souvent déduits des objectifs des PDU en termes de protection de la qualité de l'air.

L'évaluation de l'impact des mesures sur l'environnement réalisée par une analyse qualitative reste donc imprécise et ne permet pas de quantifier les impacts. Il est donc difficile d'afficher des objectifs quantifiés et ensuite d'évaluer a posteriori les effets du PDU par rapport à ces objectifs. Mais cette analyse reste un premier aperçu de cet impact qui ne nécessite pas beaucoup de moyens et dont le coût est moins élevé qu'une évaluation environnementale réalisée grâce à une chaîne de modélisations complexe.

2.10. Conclusion

L'ensemble de ces méthodes a permis d'identifier des approches pertinentes pour l'évaluation des mesures. On a pu relever l'intérêt de la comparaison de l'impact potentiel de différents scénarios (basés sur la mise en place de différentes mesures). Certaines méthodes présentent également une liste d'indicateurs potentiellement utilisables. Enfin, il est préconisé de prendre en compte l'évolution de la demande de déplacements ou l'amélioration technologique sur les véhicules par exemple, ce qui semble pertinent dans le cadre d'une évaluation des mesures.

Néanmoins, le principal désavantage de l'ensemble de ces méthodes est d'être applicable à des échelles larges (au niveau de l'agglomération voire d'un pays). Celles-ci prennent ainsi en compte des données de trafic et d'émissions qui sont très agrégées et qui ne permettent donc pas de représenter l'effet de mesures locales. Il est donc impossible de traiter l'ensemble des mesures que nous avons répertoriées dans le 1er chapitre car elles induisent pour la plupart des effets qui ne sont observables qu'à des échelles fines et qui sont localisées sur des périmètres spécifiques (la rue, le quartier, les zones périphériques, le centre ville…).

Nous retenons cependant que les méthodes quantitatives se basent essentiellement sur des outils de modélisation qui permettent de spatialiser les impacts. Ils semblent ainsi les mieux adaptées pour évaluer des mesures variées appliquées à différentes échelles spatiales. D'autre part, l'utilisation de ces outils permet de présenter des résultats chiffrés et pouvant être comparés. Ils semblent donc qu'ils soient des outils pertinents.

3. Analyse critique des évaluations environnementales des PDU

Une analyse des évaluations environnementales des PDU permet de dégager les inconvénients et les avantages des différentes méthodes. L'analyse sur les outils de modélisation n'est pas présentée dans cette partie mais dans la partie suivante sur les outils de modélisation.

3.1. L'organisme réalisant l'évaluation environnementale

Le bilan sur la prise en compte des impacts environnementaux des mesures de gestion du trafic dans les PDU de 1ère génération (avant la mise en place de la circulaire du 12/04/06), réalisé dans (Frere), constate une faible prise en compte des problématiques environnementales. Il est mentionné que cela peut s'expliquer entre autre par la « faible représentation des professionnels de l'environnement » dans la procédure. Nous avons donc observé si les professionnels de l'environnement étaient mieux représentés dès lors que l'évaluation environnementale des PDU est obligatoire. Nous nous sommes demandés qui effectue cette évaluation et si cela a une relation avec les différents moyens utilisés et la qualité de l'évaluation environnementale.

Dans les PDU observés, les AOTU (Autorité Organisatrice de Transports Urbains) sont de deux types différents : les Syndicats Mixtes des Transports pour Béthune et des Transports en Commun pour Grenoble d'une part, et les EPCI (établissement public de coopération intercommunale) pour les autres PDU (Niort, Sophia-Antipolis, Lille, Montbéliard, Reims, Saint-Nazaire, Angers et Nice) (Tableau 5). Nous n'avons trouvé aucune relation particulière entre le type d'AOTU et la manière d'aborder l'évaluation environnementale.

	Bureau d'études	AOTU	Organisme spécialisé en Qualité de l'Air	Projet de recherche (PREDIT)
Béthune		X		
Niort			X	
Lille				X
Sophia-Antipolis		X		
Grenoble	X			
Montbéliard	X			
Reims	X			
Nice		X		
Rennes		X		
Saint-Nazaire		X		
Angers			X	
Saint Etienne	X			

Tableau 5 Les organismes et cadres de réalisation de l'évaluation environnementale

Cependant, nous remarquons une certaine relation entre les AOTU qui délèguent l'évaluation environnementale à un organisme compétent sur la thématique de l'environnement et les AOTU qui la réalisent eux mêmes. Dans ce dernier cas, l'évaluation est souvent plus succincte et moins de moyens et d'outils sont à disposition.

Dans le cas où les AOTU délèguent à un autre organisme, différentes coopérations sont observées. Certaines avec des organismes publics, d'autres avec des organismes privés du type bureau

d'études. Enfin, dans certains cas, l'évaluation environnementale a bénéficié de la mise en place d'un programme de recherche (PREDIT).

Les recommandations :

Il pourrait être pertinent de confier le volet évaluation environnementale à des organismes spécialisés. À ce sujet, (CERTU, 2001a) précise : « l'interprétation des données de la qualité de l'air doit être confiée au réseau agréé de surveillance de la qualité de l'air, voire à un groupe d'experts locaux (réseau de surveillance de la qualité de l'air + DRIRE + CETE + Météo France) compte tenu de l'influence des facteurs climatiques, de l'influence des sources fixes ou diffuses des polluants (industries, chauffage urbain, etc.)». On peut citer à ce sujet le modèle anglo-saxon qui est caractérisé par des liens étroits entre les laboratoires de recherche et les collectivités territoriales en charge des évaluations.

Cependant, l'évaluation environnementale des PDU ne se cantonne pas à la modélisation des concentrations des polluants dans l'atmosphère (qualité de l'air). L'évaluation environnementale comprend : la modélisation du trafic, la modélisation des émissions, la modélisation des concentrations et enfin la modélisation de l'exposition des personnes. Les organismes spécialisés en qualité de l'air ne sont généralement pas compétents pour réaliser d'une part la modélisation du trafic et d'autre part la modélisation de l'exposition des personnes. Il est donc nécessaire que les AOTU délèguent l'évaluation environnementale, que les quatre étapes différentes de l'évaluation environnementale soient effectuées par trois organismes différents chacun spécialisé dans un domaine particulier (trafic, émissions/concentrations de polluants, sanitaire).

3.2. L'échelle spatiale de l'évaluation

L'échelle spatiale d'évaluation à adopter fait l'objet de quelques recommandations dans les documents méthodologiques. Dans (CERTU, 2001b), il est dit que « le périmètre pertinent [de l'évaluation] est plus large que le périmètre des transports urbains et s'étend à l'aire urbaine où une grande partie de la population est susceptible de subir les effets des pollutions liées aux déplacements». Dans (CERTU, 2001b), il est recommandé que le périmètre d'étude soit adapté d'une part au projet que l'on doit étudier, et d'autre part, au type de pollution dont on doit évaluer les impacts. Il y est défini traditionnellement quatre échelles spatiales dans le domaine de la pollution atmosphérique (trois nous intéressent) :

- L'échelle locale (10 m à 1 km), adaptée pour étudier les effets sur la santé, la végétation et les bâtiments à proximité des sources de pollution (routières ou industrielles) ;
- L'échelle urbaine (1 à 50 km), adaptée pour étudier les effets sur la santé, la végétation et les bâtiments sur l'ensemble d'une zone urbaine, en prenant en compte plusieurs sources de pollution et les paramètres climatiques et topographiques,
- L'échelle globale (au-delà de 5000 km), adaptée pour étudier les effets sur le climat et l'ozone stratosphérique.

Il est aussi recommandé d'adapter l'aire d'étude pour inclure l'ensemble du réseau routier subissant une modification (augmentation ou réduction) des flux de trafic de plus de 10% du fait de la réalisation du projet (travaux …), et du projet lui-même.

Nous avons relevé les périmètres adoptés pour l'évaluation environnementale et nous nous sommes demandés si l'échelle était adaptée suivant la thématique évaluée (exposition des personnes, gaz à effet de serre, polluants locaux…).

Les bonnes pratiques :

- **Evaluation à différentes échelles spatiales pour la modélisation des concentrations et des émissions :** Elle permet de prendre en compte différentes dimensions spatiales du

territoire. Une évaluation à l'échelle continentale est utile pour décrire la pollution de fond résultant du transport à longue distance des polluants. Une évaluation à l'échelle de l'agglomération permet de se rendre compte de la teneur et de l'évolution de la pollution de fond. Une évaluation par zone ou district permet de voir l'impact local des différents scénarios. Enfin, une évaluation au niveau de la rue ou le long des axes urbains est essentielle pour évaluer l'exposition de la population et la pollution à proximité de ces axes (généralement très élevée). Les PDU de Grenoble, Saint Etienne et Lille ont réalisé tout ou partie de cette approche multi échelle.

- **Élargissement du périmètre d'évaluation en fonction du périmètre des données utilisées :** Le périmètre des données disponibles est parfois différent de celui du PDU. Il est, dans ce cas, pertinent d'adapter le périmètre de l'évaluation au périmètre des données et non du PDU. Le PDU de Lille a, par exemple, élargi l'aire d'étude à l'arrondissement de Lille car les données d'enquêtes sur les déplacements (enquête ménages et enquête cordon notamment) ont été recueillies sur le périmètre de l'arrondissement de Lille.
- **Modélisation à différentes échelles dans la chaîne de modélisation :** La chaîne de modélisation est constituée de la modélisation du trafic, de la modélisation des émissions, de la modélisation des concentrations et de la modélisation de l'exposition des personnes. Ces quatre modélisations sont à effectuer à des échelles différentes. Dans le PDU de Lille, par exemple, le trafic régional, c'est-à-dire les déplacements entre agglomérations, ont été pris en compte dans la modélisation du trafic. La modélisation des concentrations et des émissions a été réalisée au niveau de l'agglomération avec des données de pollution de fond régionale et continentale. Enfin, la modélisation de l'exposition des personnes est aussi réalisée à l'échelle de l'agglomération.

Les incohérences :

- **Évaluation mono-échelle :** Cette seule évaluation fait abstraction des impacts du PDU sur les autres échelles spatiales (régionales, communales…). Elle est donc incomplète. L'évaluation environnementale du PDU d'Angers (faite au niveau de la rue) ne prend donc pas en compte l'évolution des concentrations en polluants à d'autres échelles. D'autre part, les concentrations en polluants ne sont modélisées que dans des rues canyon qui ont des caractéristiques homogènes en termes de largeur de la rue et d'orientation. Cela ne représente que 31 km de rue dans toute l'aire du PDU. Les concentrations en polluants à proximité des grands axes routiers comme les périphériques ne sont donc pas modélisées alors que l'on sait qu'elles peuvent être élevées. À l'inverse, dans le PDU de Béthune, l'évaluation environnementale se cantonne à l'échelle de l'agglomération.
- **Prise en compte du périmètre du PDU pour l'évaluation environnementale :** Dans les cas de Sophia-Antipolis et de Montbéliard, où plus d'un tiers de la population habite à l'extérieur du PDU et travaille à l'intérieur du PDU, la non prise en compte d'une aire plus large que le périmètre du PDU est critiquable. En effet, l'impact du trafic sur la qualité de l'air n'est pas limité au seul périmètre du PDU, l'évaluation environnementale peut donc être faussée surtout si les phénomènes de péri urbanisation persistent et s'intensifient.
- **Inadéquation entre le périmètre des données utilisées et le périmètre d'étude :** Si le périmètre de recueil des données est différent du périmètre évalué, cela peut engendrer des incohérences au niveau de l'interprétation des données. Dans le PDU de Saint-Nazaire, par exemple, l'enquête ménages est la principale source de données sur les déplacements mais le zonage n'est plus en adéquation avec le périmètre du PDU. Ces données sont tout de même utilisées.

Les recommandations :

- **Échelles différentes suivants les polluants évalués :** il faut distinguer les polluants à effet local (PM_{10}, Benzène, NO_x) et les polluants à effet global (CO_2, principalement). Les échelles d'évaluation seront différentes, dans le cas des polluants à effet local, les échelles régionale, communale et au niveau de la rue (et dans certains cas continental) seront à

prendre en compte alors que dans le cas des GES, l'échelle mondiale sera à prendre en compte.

Pour les polluants locaux, différentes échelles d'évaluation environnementale doivent être envisagées :

  - Au niveau de la rue (PDU d'Angers) : il est précisé dans (Air pays de la Loire, 2006) que la sensibilité aux modifications du PDU est plus importante au niveau de la rue qu'au niveau de l'agglomération. D'autre part, la réglementation *(Directives européennes 1999/30/CE et 2000/69/CE)* indique que la surveillance de la qualité de l'air doit notamment fournir des renseignements dans les endroits où s'observent les plus fortes concentrations de polluants atmosphériques auxquelles la population est exposée. Or ces plus fortes concentrations s'observent la plupart du temps dans les rues canyon.
  - Au niveau de la commune
  - Au niveau de l'agglomération (Montbéliard, Sophia-Antipolis)
  - Au niveau continental, pour la modélisation de la pollution de fond.
- **Échelles différentes suivant les étapes de la chaîne de modélisation :** Suivant la modélisation effectuée, le périmètre doit être différent :
  - Trafic : régional
  - Emissions : local, régional, continental
  - Météo : continental
  - Exposition : local (au niveau de la rue)
- **Cohérence entre le périmètre d'étude et les données** : Le périmètre d'évaluation doit correspondre au périmètre de recueil des données, ou alors, les données doivent être harmonisées pour réaliser une évaluation environnementale cohérente.
- **Différencier le périmètre d'étude et le périmètre d'action** : Le périmètre d'étude est le périmètre sur lequel est réalisée l'évaluation environnementale et le périmètre d'actions est le périmètre du PDU. Ces deux périmètres ne sont pas toujours identiques, cela varie suivant les contextes régionaux.

Pour conclure, la problématique de l'échelle spatiale d'évaluation semble cruciale. Nous pouvons synthétiser les différents périmètres à prendre potentiellement en compte :

- Périmètre à définir en fonction des données disponibles
- Périmètre adapté au projet, à l'objet d'étude, éventuellement à la mesure
- Périmètre adapté au type de pollution étudiée (qualité de l'air, effet de serre)
- Périmètre administratif à questionner : celui-ci ne correspond en effet que rarement à l'aire d'attraction de l'agglomération et ne permet pas d'englober, dans une démarche coordonnée de planification, la totalité des déplacements concernés, en particulier pour les trajets domicile/travail (Cour des comptes, 2005). Le phénomène d'étalement urbain agrandit sans cesse le périmètre d'impact du PDU.
- Périmètre de l'impact de la mesure : impact en terme d'exposition de la population par exemple

L'ensemble de ces périmètres peut être intégré dans des évaluations environnementales car ceux-ci permettent d'identifier des enjeux différents.

3.3. Le diagnostic ou état initial

Comme nous l'avons exposé dans la première partie, la réalisation d'un état initial est une partie intégrante de l'évaluation environnementale. Il influe sur le contenu de l'évaluation environnementale et permet de connaitre les données dont on dispose ainsi que le recueil de données qui sera nécessaire.

Nous présentons dans cette partie, la manière dont est réalisé le diagnostic du territoire en termes de qualité de l'air, de consommation d'énergie et d'émissions de GES dans les PDU. Nous relèverons les polluants pris en compte, les méthodologies adoptées. Enfin, nous nous interrogerons sur la place de ce diagnostic au sein du PDU (dans l'évaluation environnementale ou dans le texte central du PDU) et analyserons les conséquences de cette localisation sur sa prise en compte dans l'évaluation environnementale.

Tout d'abord, le guide (CERTU, 2008) récapitule une méthodologie pour effectuer un état initial (air et santé) dans les études d'impact d'infrastructures routières. Il explique que l'état initial est la « pierre angulaire de la modélisation des concentrations, à la fois comme donnée d'entrée (conditions aux limites, pollution de fond) et comme indicateur de la validité des résultats de cette modélisation ». Le diagnostic permet donc de définir des objectifs adéquats et réalisables. Il y est aussi précisé qu'il doit être fiable et représentatif. Enfin, il présente les données à acquérir et les méthodes d'acquisition pour la qualité de l'air, la connaissance de la météorologie, la connaissance de la population et la connaissance de l'état sanitaire de la population.

Une liste des principaux fournisseurs de données est répertoriée dans (CERTU, 2001b) :

- Données des réseaux de surveillance
- Plan Régional pour la Qualité de l'air et inventaires d'émissions par source
- Plan de Protection de l'Atmosphère
- Inventaires d'émissions et de consommations énergétiques liées au trafic routier
- Campagnes de mesures in situ spécifiques
- Population concernée
- Modélisation ou modèles informatiques

Cette liste est utile pour rassembler les données disponibles.

Les bonnes pratiques :

- **Présentation des nouvelles données acquises lors de la révision d'un PDU :** Cela permet d'avoir la possibilité de calculer de nouveaux indicateurs, d'observer d'autres évolutions, de créer une évaluation environnementale itérative et de prendre connaissance de nouvelles réalités et de nouveaux impacts du PDU. Le PDU de Reims, par exemple, présente les nouvelles données acquises entre la réalisation du PDU et sa révision.
- **Inventaire des données disponibles** : Dans un PDU nouvellement créé, il est indispensable, comme le précise le guide du CERTU de répertorier les données disponibles. Cet inventaire permet de décider le suivi d'indicateurs mesurables. Dans le PDU de Saint Etienne, un inventaire de toutes les données disponibles (trafic, émissions, météo …). avec leurs sources est exposé.
- **Présentation des indices de qualité de l'air :** Les indices de qualité de l'air sont souvent présentés dans l'état initial, cet indice permet d'avoir une vision synthétique de la qualité de l'air sur le périmètre de l'étude. Le problème réside dans le fait qu'il est rarement expliqué (Montbéliard, Angers, Sophia-Antipolis). Il est donc très difficile de faire des observations et de construire une stratégie d'évaluation en se basant sur cet indice.
- **État initial en fonction des objectifs de qualité de l'air** : Le fait de présenter l'état initial en fonction des objectifs de qualité de l'air, comme dans le PDU de Niort, permet de voir clairement quels seront les objectifs à privilégier.
- **Présentation des objectifs de qualité de l'air des autres plans appliqués sur le territoire** : Cette présentation permet de présenter des objectifs pour le PDU en accord avec ces autres plans. Dans le PDU de Nice, les objectifs du PPA et du PRQA et les indicateurs capables de les mesurer sont présentés.
- **Différenciation entre polluants locaux et polluants globaux** : Il est très important de différencier les polluants locaux des polluants globaux dès la phase de diagnostic puisque

les méthodes d'évaluation sont différentes pour ces deux indicateurs. Le PDU de Niort a réalisé, par exemple, un état initial de la pollution de fond et de la pollution de proximité.

- **Inventaire des outils disponibles** : Les outils disponibles pour réaliser l'évaluation environnementale doivent être connus dès la phase de diagnostic car les indicateurs et les données qui seront suivis seront fonction de ces outils. Dans le PDU de Sophia-Antipolis, un recensement des outils disponibles pour analyser la qualité de l'air est réalisé. Il en ressort que peu d'outils sont à disposition, cela permet aussi de justifier la faiblesse de l'évaluation environnementale.
- **Diagnostic de la situation initiale (pour les PDU révisés)** : Les PDU révisés doivent indiquer les indices et les données de qualité de l'air relevés à la fin du PDU en application. Ces résultats constitueront l'état initial du PDU révisé. Dans la révision du PDU de Reims, un diagnostic de la situation au terme du PDU est présenté.
- **Présentation des fournisseurs de données** : L'ensemble des PDU analysés citent les réseaux locaux de surveillance de la qualité de l'air qui leur fournissent des données. Ces méta-données sont indispensables pour la validité de l'évaluation environnementale.
- **État initial des GES** : Ce diagnostic est effectué, par exemple, dans le PDU de Béthune, car le territoire possède un tissu industriel important et cela est donc une préoccupation importante pour la population. Le PDU de Grenoble présente quant à lui le poids de CO_2 émis au cours de l'année. Ce diagnostic devrait être effectué dans tous les autres PDU.

Les incohérences :

- **Pas d'état initial sur le nombre de personnes exposées** : L'état initial de l'exposition n'est jamais indiqué. Pour connaître l'impact du PDU sur l'exposition des personnes, il est néanmoins nécessaire de se baser sur un état initial.
- **Présentation des émissions multi-sources :** Dans le cadre de l'évaluation environnementale des PDU, il est nécessaire de connaître les émissions directement issues des transports. La présentation des émissions multi-sources, comme dans le PDU de Montbéliard, n'est pas pertinente puisque l'on ne sait pas la part des émissions attribuée aux transports.
- **Pas d'état initial :** L'absence d'état initial, comme dans le PDU de Lille pose des problèmes pour construire des objectifs et pour évaluer ensuite l'impact a posteriori du PDU.
- **Pas d'état initial pour tous les polluants réglementés :** Tous les polluants réglementés (SO_2, NO_2, PM_{10}, $PM_{2,5}$, O_3, CO, Benzène) ne sont pas analysés dans l'état initial de tous les PDU. Le PDU de Montbéliard, par exemple, n'observe que le SO_2, les PM_{10}, le O_3, le NO_2. Les polluants non réglementés ne sont quant à eux jamais analysés.

Les interrogations :

- **Comparaison avec la qualité de l'air dans d'autres agglomérations :** Le PDU de Béthune fait apparaître dans son diagnostic sur la qualité de l'air, des comparaisons de la qualité de l'air avec d'autres agglomérations françaises. On se pose la question de la pertinence d'une telle comparaison puisque les contextes environnementaux, industriels et d'infrastructure sont différents d'une ville à une autre.
- **Localisation de l'état initial :** La question est de savoir où faire apparaître l'état initial de la qualité de l'air dans le document du PDU. Est-il plus pertinent d'intégrer l'état initial dans le PDU ou dans l'évaluation environnementale ? En effet, si l'état initial est réalisé dans l'évaluation environnementale on peut se demander s'il a servi de base dans la construction des objectifs. L'état initial est souvent présenté dans le document de l'évaluation environnementale (Niort, Béthune) après l'exposition des méthodes de modélisation ou d'évaluation or il est préférable de présenter les données et les outils dont on dispose pour ensuite choisir un modèle qui correspond le mieux à ce que l'on veut

chercher à quantifier et aux données et outils disponibles. Dans le cadre d'une révision de PDU, l'état initial étant le bilan des actions du précédent PDU, il est généralement présent dans le document central du PDU (Grenoble).

Les recommandations :

- **Polluants réglementés** : L'analyse de tous les polluants réglementés est indispensable.
- **GES et consommation d'énergie :** Il est nécessaire d'établir l'état initial des émissions, des concentrations de polluants locaux et de GES, de la consommation d'énergie et de l'exposition des personnes.
- **Données et outils :** l'inventaire des données et outils disponibles est indispensable.
- **Harmonisation :** Une harmonisation de la méthodologie de la réalisation de l'état initial serait très utile. En effet, les diagnostics de l'état initial sont réalisés très différemment d'un PDU à l'autre (présentation spatialisée des données, présentation graphique ou présentation des données brutes).

Globalement les diagnostics initiaux sur la qualité de l'air sont très restreints (dans le PDU de Saint-Nazaire, par exemple, la synthèse du diagnostic des nuisances liées aux déplacements est la suivante : « la pollution atmosphérique épargne pour l'instant la région nazairienne »), voire inexistants (PDU de Lille). Les polluants réglementés sont rarement tous présentés, ils ne présentent pas une synthèse des données disponibles. Une nette amélioration de la méthodologie de l'état initial est donc à envisager.

3.4. La définition des objectifs en termes d'amélioration de la qualité de l'air, de consommation d'énergie et de diminution des émissions de gaz à effet de serre

Nous avons regardé, pour chaque PDU, quels étaient les objectifs environnementaux définis. Nous avons principalement observé si ces objectifs étaient quantifiés et si ceux-ci permettaient de diminuer les niveaux actuels de concentration ou de consommation ou alors de les maintenir au niveau actuel.

Les bonnes pratiques :

- **Axe dédié aux préoccupations environnementales** : Malgré la transversalité de ces objectifs, leur intégration, dans un axe spécifique, précise l'orientation environnementale du PDU. Le PDU d'Angers, par exemple, comporte un axe dédié à la sécurité, la santé et l'environnement ; la qualité de l'air et la consommation d'énergie sont clairement abordées.
- **Objectifs en adéquation avec les autres plans :** Les objectifs de qualité de l'air doivent être en adéquation avec les objectifs environnementaux des autres plans applicables sur le territoire. Dans le PDU de Nice, il est, par exemple, précisé que les objectifs doivent respecter les objectifs de qualité de l'air du PRQA.
- **Objectifs quantifiés pour les GES :** Le PDU de Grenoble précise comme objectif de stabiliser les émissions de gaz à effet de serre. Cet objectif est repris pour le secteur des transports dans l'agglomération à savoir une stabilisation à un total d'émissions de 682 000 tonnes par an de CO_2. Cet engagement, particulièrement ambitieux, nécessite de maîtriser le trafic automobile. En effet, les émissions de CO_2 sont directement proportionnelles au volume de trafic automobile, les évolutions technologiques des véhicules ne permettant quasiment aucun gain dans ce domaine. Cet objectif est donc clairement quantifié.

Les incohérences :

- **Objectifs environnementaux non quantifiés** : Les objectifs environnementaux sont en général définis (limiter les nuisances locales (Rennes), réduire les nuisances liées aux déplacements motorisés (Béthune), diminuer les émissions polluantes sur l'A36 en traversée urbaine (Montbéliard), réduire les nuisances (bruit, pollution,…) en particulier liées aux circulations automobiles et des poids lourds (Saint-Nazaire)). Les moyens pour y arriver sont quelques fois définis (transfert vers d'autres modes doux (Rennes), réguler les feux tricolores (Lille)). Mais ces objectifs sont rarement quantifiés (Rennes, Béthune, Montbéliard, Grenoble, Lille). Seul le PDU de Sophia-Antipolis envisage de respecter la norme de concentration pour le NO_2 (40ug/m3).
- **Contradiction entre les objectifs et les actions :** Dans certains PDU il peut y avoir une incompatibilité entre les objectifs environnementaux définis en faveur d'une réduction du trafic et des émissions et les objectifs économiques. Le PDU de Sophia-Antipolis souhaite, par exemple, maintenir le rythme de croissance de l'agglomération à 0,8% par an. On se demande si cela est compatible avec une baisse de trafic.

Nous avons donc relevé deux principaux problèmes. D'une part, les objectifs sont très rarement quantifiés. La conséquence de ce problème est la difficile réalisation de l'évaluation environnementale. En effet, il sera compliqué d'analyser si les mesures mises en place permettront d'obtenir les objectifs énoncés. D'autre part, les objectifs sont trop souvent de maintenir les niveaux de concentrations et de consommation à leur niveau actuel, ils sont rarement de les diminuer. Les objectifs ne sont alors pas assez ambitieux.

3.5. L'élaboration de scénarios et les hypothèses énoncées

L'élaboration de scénarios est une phase obligatoire suivant la procédure d'élaboration de l'évaluation environnementale inscrite dans la circulaire du 12/04/06. Ces scénarios sont toutefois parfois inexistants et, lorsqu'ils existent, souvent très différents d'un PDU à un autre.

Les PDU qui élaborent des scénarios présentent en général un scénario au fil de l'eau (ou scénario tendanciel), qui représente la situation si le PDU n'est pas appliqué et deux ou trois scénarios avec des tendances définies.

Les bonnes pratiques :

- **Scénarios présentant des projets d'infrastructures différents** : Les PDU de Toulouse, Saint Etienne, Niort et Béthune présentent différents scénarios comprenant des projets d'infrastructures différents. Les scénarios ne s'appuient donc pas sur différents objectifs en termes de part modale ou de volume de transport mais sur des actions concrètes du type : réalisation d'un TCSP, réalisation d'une voie de contournement… Cela permet d'observer l'impact sur l'environnement de chaque type de mesure.
- **Évaluation environnementale des scénarios :** Le principal intérêt de construire des scénarios est d'observer l'impact de chacun d'entre eux sur le trafic ainsi que sur l'environnement. Dans les PDU de Saint-Etienne, Lille et Angers, une évaluation environnementale est réalisée pour chaque scénario. Le cas de Saint-Etienne est un exemple pertinent. L'analyse est réalisée à plusieurs échelles spatiales (agglomération, district), pour différents modes de transport et à différentes échelles temporelles (comparaison des émissions à l'heure de pointe du soir). Enfin l'analyse est aussi réalisée sur l'impact sanitaire de chaque scénario.

Les incohérences :

- **Absence de scénarios :** Certains PDU (Rennes, Reims, Nice, Sophia-Antipolis) n'ont pas élaboré de scénarios. Il n'y a donc pas de comparaison entre plusieurs projets envisagés.
- **Scénarios élaborés suivant des grandes orientations :** Les scénarios basés sur des grandes orientations (par exemple : augmentation de la part modale des transports en commun), sont très difficiles à évaluer environnementalement. Dans le PDU de Montbéliard, par exemple, trois scénarios sont présentés avec des grandes orientations mais aucune action concrète n'est mentionnée. Il est ainsi précisé : « chacun des trois scénarios étant peu détaillé, leurs incidences sur les différentes dimensions de l'environnement ne peuvent être appréciées avec précision ». L'impact des différents scénarios sur les émissions n'est donc pas calculé, il y a seulement une évaluation globale et approximative : « faible réduction du trafic et des nuisances compensant les augmentations de trafics » ou « réduction de 4% environ des émissions de CO_2 ». Cela soulève le problème de la pertinence d'une telle évaluation environnementale.
- **Évaluation environnementale d'un seul scénario :** Dans le PDU de Grenoble, il n'y a qu'un seul scénario qui est évalué d'un point de vue environnemental. La création du scénario a été effectué tout au long de la démarche de création du PDU. Les choix des caractéristiques de ce scénario ont été réalisés au fur et à mesure mais ne sont pas présentés. Il est donc impossible de juger de la pertinence du choix du scénario.
- **Pas d'évaluation environnementale des scénarios :** Les PDU de Béthune et Saint-Nazaire ne présentent pas d'évaluation environnementale de leurs scénarios. Les actions du PDU ne sont donc pas choisies par rapport à des problématiques environnementales.
- **Manque de lisibilité dans les objectifs des différents scénarios :** Dans le PDU d'Angers, par exemple, les caractéristiques des différents scénarios ne sont pas exposées suivant les mêmes critères (certaines en part modale, d'autres en nombre de déplacements totaux, ou encore hypothèses énoncées sur la période 1998/2015 et d'autres sur la période 2002/2015). Il est alors impossible de comparer les différents scénarios entre eux.

Les recommandations :

- **Objectifs en part modale, nombre de déplacements ou nombre de véhicules.kilomètres) :** Lorsque les objectifs sont présentés par rapport à des parts modales, il est difficile de se rendre compte des variations en termes de déplacements. À Saint-Nazaire, par exemple, dans le scénario 3, les déplacements en voiture augmentent par rapport à la situation actuelle alors que la part modale de la voiture baisse. On peut alors se demander si le trafic va diminuer et si les émissions et consommations vont diminuer sachant que les déplacements vont augmenter. Nous suggérons d'utiliser les véhicules.kilomètres, qui représentent la distance parcourue par tous les véhicules, cette unité est plus représentative des déplacements (longueur et nombre) totaux.

L'évaluation environnementale des scénarios est rarement réalisée. Elle serait pourtant un paramètre à prendre en compte dans le choix du scénario. Un manque de méthodologie de cette évaluation est sans doute en cause.

L'objectif initial de l'élaboration de ces scénarios, présenté dans la circulaire du 16/04/06, était d'être un outil d'aide à la décision lorsque plusieurs possibilités de projet pouvaient être discutées, afin de justifier le choix de la solution adoptée. Dans les faits, on remarque que les scénarios sont construits après l'adoption du projet final dans le but de justifier la mise en place du PDU ainsi adopté. Des aberrations peuvent ainsi être remarquées, comme des PDU composés d'une multitude de mesures très coûteuses et qui ne seront donc jamais réalisés, des PDU sans changement de comportement de la part des individus, des PDU sans évolution du parc automobile. Ces scénarios ne sont pas réalistes et ne sont plus des outils d'aide à la décision, mais sans doute perçu comme un élément qu'il est nécessaire d'inclure dans le rapport pour avoir son approbation. Par ailleurs, il semble difficile pour

une AOTU de scénariser toutes les idées de projet qui ont été décidées souvent après des phases de concertation extrêmement longues et faisant intervenir un nombre très important d'acteurs. On se pose donc la question de l'utilité de l'élaboration de ces scénarios, dans l'état actuel, qui deviennent parfois des analyses de sensibilité des modèles utilisés (variation des paramètres du modèle : parc de véhicules d'une année antérieure par exemple).

3.6. Les données utilisées dans l'évaluation environnementale

Les données utilisées dans l'évaluation environnementale sont présentées ci-dessous. On relève des incohérences communes à l'ensemble des types de données :

Les incohérences :

- **Incompatibilité d'échelle temporelle entre les données :** Du fait de la faible quantité de données et du coût élevé d'acquisition de celles-ci, les modèles fonctionnent souvent avec des données de différentes années. À Grenoble, par exemple, le scénario de 2004 est réalisé en utilisant des données de l'enquête ménages déplacements de 2002 et des données du parc automobile de 2004. On remarque un problème de cohérence entre les données, qu'il est nécessaire de préciser et de prendre en compte. On se demande aussi si cela a un impact sur les résultats obtenus suivant le type de données. Par exemple, un parc automobile de l'année précédente est-il utilisable, cela a-t-il un impact fort sur les résultats ou finalement est ce que l'évolution est minime pour que les résultats soient tronqués ? Alors que l'utilisation d'une enquête ménages qui date de plus de 10 ans générera peut être plus d'erreurs dans les résultats.
- **Incompatibilité des sources de données :** Dans le PDU de Montbéliard, les données sur la qualité de l'air sont fournies par l'association ARPAM et l'ASQAB, on peut se demander si les deux organismes fournisseurs de données s'entendent sur les paramètres de mesure de données par exemple.

3.6.1. Les données de déplacements et de trafic

3.6.1.1. L'exploitation des résultats de l'enquête Ménages Déplacements

Les enquêtes ménages déplacements cherchent à quantifier et qualifier les déplacements réalisés par les habitants d'une agglomération ou d'une aire urbaine, un jour moyen de semaine.

Sur un échantillon important (plusieurs milliers de ménages), on enquête toutes les personnes du ménage, en recueillant le maximum de déplacements de la veille, si petits soient-ils, quel que soit le mode ou le motif. L'enquête permet donc de croiser des informations de nature différente : ce que les gens sont (variables socio-économiques), ce que les gens font (leur mobilité quotidienne effective, leurs habitudes de déplacements) et ce que les gens pensent (les questions d'opinion, de satisfaction sur les problèmes d'actualité de la ville étudiée) (CERTU, 1996).

Les résultats les plus classiquement utilisés sont : les flux par mode, par motif, les « parts de marché » selon les modes ; les profils des clientèles des transports publics; l'étude de la mobilité de zones spécifiques (développement social des quartiers, périurbain…), de catégories sociales spécifiques ; l'étude de l'attractivité des centres-villes ainsi que les effets d'un investissement lourd pour les transports publics ou les véhicules particuliers (métro, tramway, rocade).

Les données ainsi produites peuvent donc être utiles pour l'élaboration d'un modèle de trafic et pour la formulation d'objectifs et d'hypothèses quantifiés. Elles constituent selon (Cour des comptes, 2005) la base la plus fiable et la plus intéressante pour établir une situation de référence des plans de déplacements urbains. Toutefois, un quart seulement des agglomérations disposait, au moment de l'élaboration de leur plan, des résultats d'une enquête ménages de moins de cinq ans. Dès lors, beaucoup d'agglomérations n'ont pas une connaissance précise de la situation des déplacements antérieure à la mise en œuvre du PDU, ce qui rendra difficile l'évaluation future de ses effets.

Cette enquête est réalisée au niveau d'une aire urbaine par l'INSEE à des intervalles de quatre ou cinq ans.

Selon le CERTU, l'application de cette méthode harmonisée permet une comparaison des résultats entre agglomérations et entre les différentes enquêtes organisées dans une même agglomération.

Nous analysons dans cette partie comment est prise en compte l'enquête ménages déplacements dans l'évaluation environnementale et notamment comment les données issues de cette enquête sont exploitées.

Les bonnes pratiques :

- **Harmonisation des données** : L'enquête ménages déplacements permet d'avoir un standard de récolte des données pour toutes les agglomérations, on peut donc les comparer entre elles.
- **Évolution entre deux enquêtes :** Elle permet de pouvoir établir une comparaison entre plusieurs enquêtes sur la même agglomération.
- **Données d'entrée du modèle de trafic :** Les données ainsi récoltées constitueront les données d'entrée du modèle de trafic.

Les incohérences :

- **Adéquation entre la date de collecte des données et la date d'exploitation des données** : On constate un problème récurrent d'adéquation entre la date de collecte des données et la date d'utilisation des données (Saint-Nazaire, Angers, Grenoble). Le PDU de Grenoble par exemple s'est référé à des données anciennes extraites de l'enquête déplacements de 1992 pour évaluer les parts de marché de chacun des modes de déplacements en 2000 alors que pour la détermination des objectifs, il s'est référé explicitement à une estimation des parts de marché élaborée à partir des données de 1997 plus proches de la réalité de 2000 (Cour des comptes, 2005). Comme pour le problème d'incompatibilité des échelles temporelles, on se demande, suivant le type de données, si cela peut avoir un impact fort sur les résultats obtenus. Il est aussi nécessaire de préciser l'évolution prise en compte des données dans les limites du modèle.
- **Données sur un jour moyen de semaine :** Les données de déplacement produites par les enquêtes ménages sont des données sur un jour moyen de semaine. Cela ne permet pas de connaître les déplacements des week-ends, des jours fériés et des vacances scolaires. Cela qui représente 50% des jours de l'année comme le précise l'évaluation environnementale de Lille. Une solution est apportée à ce problème, l'enquête ménage déplacement corrélée avec l'enquête cordon permet d'obtenir un nombre de déplacements par heure pour un jour moyen ouvré. Grâce à un coefficient de passage calculé à partir des données de comptages automatiques et appliqué aux déplacements des heures moyennes du Jour Moyen Ouvré, ils obtiennent les déplacements des heures moyennes de l'année entière.
- **Déplacements seulement dans l'aire urbaine :** À Grenoble, la commission d'enquête (Cour des comptes, 2005) a souligné le biais introduit par la méthode de l'enquête ménages

qui ne prenait en compte que les déplacements internes des résidents de l'agglomération et négligeait les déplacements d'échanges.

- **Une seule enquête n'englobe souvent pas tout le périmètre du PDU :** Plusieurs enquêtes ménages sont donc souvent utilisées pour la même évaluation environnementale alors qu'elles ne sont pas réalisées à la même date.

Les PDU de Saint Etienne, Niort, Nice, Saint-Nazaire, Lille, Angers, Grenoble, Reims, Montbéliard et Sophia-Antipolis se sont servis des résultats de l'enquête ménages déplacements pour estimer leur trafic. Plusieurs remarques sont à relever. Tout d'abord, lorsqu'aucune enquête ménages déplacements n'est disponible, la modélisation du trafic est difficilement réalisable. D'autre part, cette enquête est une source de données intéressante afin d'obtenir les caractéristiques des déplacements mais elle doit être complétée avec d'autres informations et elle doit être actualisée régulièrement. Enfin, l'enquête doit être utilisée en connaissant les limites des résultats obtenus.

3.6.1.2. L'exploitation de l'enquête Cordon

L'enquête cordon a pour objectif de quantifier les flux entrants et sortants d'une zone prédéfinie. Elle constitue un des recueils de données nécessaires à la bonne connaissance des déplacements. Les données recueillies sont le taux d'occupation du véhicule, le motif du déplacement, la fréquence du déplacement, l'origine-destination…

Les PDU de Béthune, Angers et Lille ont utilisé les résultats d'une enquête Cordon pour leur évaluation environnementale.

Les bonnes pratiques :

- **Connaissance du trafic de transit et d'échange :** Cette enquête permet de mieux connaître les déplacements automobiles qui ne font que transiter dans l'aire d'étude ou qui n'ont qu'une de leurs extrémités inclue dans cette aire (trafic d'échange).
- **Diagnostic :** Les principaux résultats de l'enquête cordon peuvent être exposés dans le diagnostic du PDU.

Les recommandations :

- **Complément d'information :** L'enquête Cordon doit être un complément d'information, elle est appliquée sur une échelle spatiale limitée. Elle ne peut pas constituer la seule source d'information sur les déplacements dans le périmètre du PDU.

3.6.1.3. Les autres sources de données du trafic et des déplacements

Différentes autres sources de données sont utilisées pour caractériser le trafic. Des données socio-économiques fournissent par exemple, des informations sur le taux de motorisation ou la localisation des zones d'habitat, industrielles (PDU de Dax, Grenoble, Montbéliard, Perpignan) et aident à comprendre les mobilités futures par rapport aux nouvelles zones. Les données des réseaux de transports en commun (Bus, Métro, Tramway, TER) ou d'autoroutes donnent des informations sur leur fréquentation (Montbéliard, Société des Autoroutes Paris Rhin Rhône) et conduisent à mesurer les montées et les descentes aux arrêts de l'ensemble des lignes, sur une journée moyenne dans le cas des transports en commun (Niort, Lille). Les observatoires des transports fournissent une synthèse des données disponibles sur tout le territoire par rapport aux déplacements. Ils sont chargés de mesurer et d'analyser l'impact des politiques de déplacement sur la base d'indicateurs permettant de vérifier la

mise en œuvre des actions et d'évaluer le degré d'atteinte des objectifs définis (Rennes, Nice, Montbéliard). Une enquête Origine Destination permet de déterminer quels types de flux existent sur une voie, ligne, rue, ou d'en définir la charge. Elle peut être faite pour les véhicules, les poids lourds, les lignes de transports en commun (Dax), les vélos… Des données DDE et des dossiers de voirie d'agglomération fournissent des informations sur le réseau de voiries et les nouveaux aménagements d'infrastructures (Niort, Perpignan). Les données des Recensements Généraux de la Population (RGP) permettent d'avoir des informations sur les déplacements domicile-travail (Perpignan, Dax). Des données provenant des autres projets du territoire (Scot, ancien PDU…) sont utilisées pour caractériser le trafic et observer son évolution (Béthune). Les données de comptages automatiques sont utilisées pour calibrer les modèles et pour caractériser le trafic (Lille). Enfin, les données issues d'une modélisation permettent à la fois de modéliser le trafic actuel et le trafic futur (Angers, Dax, Grenoble, Lille, Saint Etienne).

3.7. Les données sur la qualité de l'air

3.7.1. Les émissions de polluants

Les données relatives aux émissions de polluants peuvent provenir d'une modélisation réalisée dans le cadre du PDU, des données EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme) (Lille) et/ou de l'inventaire des émissions du CITEPA (Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique) (Saint Etienne, Toulouse). Les types de données obtenues sont des cadastres d'émissions pour un territoire donné (Lille, Montbéliard, Niort, Montbéliard), la part des émissions relatives au transport (Grenoble), les émissions pour les différents scénarios (Niort, Grenoble) et les émissions par type d'émetteurs (VP, VUL, PL, 2 roues, bus et car) (Lille). Les émissions de CO, NO_x, SO_2 et PM sont généralement disponibles.

3.7.2. Les concentrations de polluants

Les données des concentrations de polluants proviennent de différentes sources. Les réseaux de stations de mesures, pilotées par les ASQA fournissent des données souvent exploitables dans la réalisation de l'état initial et la calibration des modèles (Amiens, Dax, Grenoble, Lille, Montbéliard, Niort, Perpignan, Saint Etienne, Saint-Nazaire, Sophia Antipolis, Toulouse). Ces réseaux sont constitués de stations de mesures fixes, qui mesurent la qualité de l'air en continu et des stations de mesures occasionnelles. La méthodologie (Ademe, et al., 2002) conseille l'implantation des stations de mesures en fonction des concentrations que l'on veut étudier. L'évaluation environnementale du PDU de Lille s'est servie de cette méthodologie. Les indices de qualité de l'air (indice ATMO) sont souvent utilisés pour caractériser les concentrations en polluants (Béthune, Dax, Montbéliard, Nice, Perpignan, Sophia-Antipolis). Les données issues des modélisations sont aussi exploitées pour réaliser l'évaluation environnementale et pour la comparaison des différents scénarios (Angers, Grenoble, Lille, Perpignan, Saint Etienne, Toulouse). Les données modélisées sont la plupart du temps des concentrations horaires (Angers, Grenoble, Saint Etienne) pour les différents scénarios. Les principaux polluants mesurés et modélisés sont les PM_{10}, CO, NO_2, NO_x et SO_2.

3.7.3. Les données sur les gaz à effet de serre

Les principales données sur les GES concernent le CO_2 et l'Ozone. Elles sont obtenues par mesures et modélisation. Les mesures relèvent des concentrations. Les modélisations produisent des données relatives aux concentrations ou aux émissions horaires ou mensuelles pour les différents

scénarios. Les indices ATMO, présentés comme une donnée d'évaluation dans la plupart des PDU, comprennent les concentrations en ozone. Des particularités sont à relever : le PDU de Grenoble présente un Diagnostic Energie Environnement Déplacements qui permet de calculer les émissions de CO_2 et le PDU de Nice présente le résultat du bilan carbone qui permet de caractériser l'évolution des quantités d'émissions (tonne équivalent carbone).

3.7.4. Les données sur la consommation d'énergie

Les données sur la consommation d'énergie sont le plus souvent exprimées en Mtep (Megatonne équivalent pétrole). Elles sont quelques fois exprimées en litres pour les consommations de carburants. Elles sont fournies : par l'ADEME (Béthune), déduites à partir des résultats de l'enquête ménages, fournies par le réseau de surveillance de la qualité de l'air ou alors simulées par le logiciel Impact ADEME ou par le Diagnostic Energie Environnement Déplacement (Montbéliard, Perpignan, Grenoble). Elles sont présentées selon les différents secteurs d'activité, suivant les modes de transports et/ou suivant le carburant utilisé.

3.8. Les gaz à effet de serre

Les principaux gaz à effet de serre émis par le transport sont le CO_2 et le N_2O. L'ozone, quant à lui, ne provient pas directement du trafic routier mais ce sont ses précurseurs qui proviennent principalement du trafic routier (NO_x). Comme l'impact des transports sur les GES est difficilement quantifiable car l'impact n'est pas observable à une échelle locale mais à une échelle globale, cette évaluation est souvent évincée. À titre d'exemple, le PDU d'Angers mentionne simplement cette phrase : « Lutter contre la dérive de l'effet de serre » !

Nous analysons donc comment sont prises en compte les émissions des gaz à effet de serre dans l'évaluation environnementale des PDU.

Les bonnes pratiques :

- **Impact des GES à l'échelle globale** : Il est nécessaire que l'impact environnemental global (augmentation des températures, hausse du niveau des mers et des océans, modification du régime des précipitations, ...) des GES soit rappelé (Grenoble). Dans le PDU de Niort, il est précisé que « le changement d'échelle géographique des enjeux liés aux émissions de gaz à effet de serre a conduit les experts internationaux à développer des méthodes de quantification intégrant le caractère global du changement climatique. […] Dans le cas des GES, les résultats produits par le cadastre des émissions doivent être considérés comme une première approximation. Toute politique locale de réduction des émissions de gaz à effet de serre devra s'appuyer sur des investigations plus poussées, intégrant le cycle du carbone et le bilan carbone des actions, menées en partenariat avec l'ADEME. »
- **Accord avec les objectifs du protocole de Kyoto :** Dans le protocole de Kyoto, la France s'est engagée à une stabilisation des émissions de CO_2 en 2010 par rapport à 1990. Les transports étant les principaux émetteurs de GES en France, il est important que les PDU soient en accord avec ces objectifs. Les PDU de Montbéliard, de Béthune et de Grenoble font référence à ces objectifs.
- **Accord avec les objectifs du Plan Climat :** Le Plan Climat 2004 fixe, pour la France, l'objectif de diviser par 4 les GES à l'horizon 2050. Le PDU de Montbéliard fait référence à ce plan. Il est important que les objectifs de ce plan soient rappelés dans les PDU pour que l'adéquation entre les plans soit cohérente. Les objectifs des Plans Climat locaux (plan d'actions visant à intervenir sur les émissions de GES et les consommations d'énergie sur un territoire donné) doivent aussi être mentionnés pour que les différents objectifs soient

concordants ou alors que les difficultés à réaliser les objectifs soient relevées. Le PDU de Grenoble précise par exemple d'une part que la politique des déplacements vise à répondre aux objectifs environnementaux fixés par ce plan et d'autre part que les objectifs du plan climat local sont difficiles à respecter car ils impliquent une non augmentation de la circulation automobile d'ici 2012.

- **Utilisation du PRG :** Le Potentiel de réchauffement Globale (PRG) est exprimé en équivalent CO_2 (eq-CO_2), il permet de comparer entre eux les effets des différents gaz. Le PRG du N_2O est de 320 eq-CO_2, ce qui signifie que son action sur l'effet de serre est 320 fois supérieure à celle du CO_2. Le PDU de Niort s'est servi de cette unité pour l'évaluation de l'état initial des émissions dans le périmètre du PDU.
- **Différenciation entre les polluants locaux et les GES :** Cette différenciation est utile car l'évaluation environnementale ne doit pas être abordée sous le même angle puisque les impacts sont totalement différents. Dans le PDU de Niort, la différenciation entre polluants locaux et globaux est bien mise en valeur notamment dans la présentation des scénarios.
- **Suivi des GES :** Les indicateurs de suivi des GES sont rarement indiqués dans le PDU. Le PDU de Grenoble propose des indicateurs de suivi :
    - Estimation des émissions de gaz à effet de serre annuelles pour le transport : pour l'ensemble des communes du PTU, par habitant
    - Nombre de véhicules à moteur essence ou diesel substitués par : l'acquisition de véhicules électriques ou GNV, ou le transfert modal des habitudes de déplacement,
    - Taux d'utilisation de biocarburants
    - Part des déplacements non concernés par des véhicules à émissions de gaz à effet de serre
- **Réalisation d'un DEED :** Le DEED est un bon indicateur de suivi des GES.

Les incohérences :

- **Non prise en compte des GES :** Dans certaines villes, l'impact du PDU sur les GES n'est pas mentionné (Sophia-Antipolis, Saint-Nazaire). Il est souvent simplement rappelé que le CO_2 contribue à l'effet de serre, mais aucune analyse et évaluation n'est réalisée (Saint-Etienne).
- **Confusion entre les différentes émissions (GES et polluants locaux) :** Dans les différents PDU, on peut remarquer une fréquente confusion entre les émissions de GES et les émissions de polluants locaux alors que ceux-ci ont un impact bien différent (Béthune, Lille). L'évaluation de l'impact des PDU sur ces polluants ne doit pas être réalisée de la même manière.

Les observations :

- Les principales actions prévues pour maîtriser les émissions de GES sont:
    - Report vers les modes alternatifs de la voiture individuelle (Grenoble)
    - Développement et aide au développement des véhicules propres (Grenoble)
    - Développement du réseau de tramway (Grenoble)
    - Réintroduction du trolley bus (Grenoble)
    - Recours aux énergies renouvelables (Béthune)
    - Maîtrise des consommations d'énergie (Béthune)
    - Réduire la vitesse (Rennes)

Les émissions de gaz à effet de serre sont rarement prises en compte dans l'évaluation environnementale. Ceci est dû à la difficulté d'évaluer un phénomène qui a un impact global mais une

source locale. Il est nécessaire que les AOTU aient des moyens et des méthodologies adéquates pour évaluer l'impact des émissions des GES.

3.9. La consommation d'énergie

Nous analysons comment est prise en compte la consommation d'énergie dans l'évaluation environnementale des PDU.

Les bonnes pratiques :

- **Objectifs quantifiés sur la consommation d'énergie** : Il est important que les objectifs en terme de consommation d'énergie soient quantifiés. Deux types de quantification sont observés. D'une part on retrouve une quantification par rapport à une mesure de gestion du trafic. Dans le PDU de Montbéliard, il est par exemple mentionné que la diminution de la part modale de la voiture particulière de 68% à 61% au profit des transports collectifs engendrerait une diminution de l'ordre de 7% des consommations énergétiques. D'autre part, on retrouve une quantification globale pour toutes les actions du PDU. Le PDU de Grenoble mentionne, par exemple, comme objectif, une stabilisation à 219000 TEP d'énergie consommée sur l'année.
- **Calcul de la consommation d'énergie :** L'utilisation du logiciel Impact-ADEME (distribué par l'ADEME) peut être une bonne méthode pour évaluer l'impact des mesures de gestion du trafic sur la consommation énergétique (Perpignan, Montbéliard). Ce logiciel permet en effet de calculer les consommations d'énergie liées à la circulation des véhicules. Les données d'entrée nécessaires sont des données sur le trafic, le parc automobile et les facteurs d'émissions. Les données simulées sont des consommations d'énergie en grammes.
- **Comparaison des scénarios en terme de consommation d'énergie :** Pour faire le choix du scénario, il est important d'avoir effectué l'évaluation environnementale en terme de consommation d'énergie. Cela est rappelé dans le PDU de Niort : « l'aspect énergétique est important dans l'analyse comparative des impacts des différents scénarios qui seront envisagés dans la suite du PDU. En effet, si l'appréciation de ces aspects en valeur absolue n'est pas très riche d'enseignement au stade du diagnostic, elle constitue un élément déterminant dans le choix d'une politique de déplacements. » Il est aussi précisé que même si les données relatives à la consommation d'énergie dans les déplacements n'est pas disponible, un travail d'analogie et d'extrapolation peut permettre de dégager les grandes masses.

Les incohérences :

- **Non prise en compte de la consommation d'énergie :** Les PDU de Saint-Nazaire, de Reims, de Nice, de Saint Etienne, de Sophia-Antipolis et de Lille ne mentionnent jamais la préoccupation de la maîtrise de la consommation d'énergie.

Les observations :

- **Les principales actions prévues pour maîtriser la consommation d'énergie** :
    - Mesures pour faciliter les déplacements de courte distance en lien avec l'évolution des services de proximité dans les communes (Rennes)
    - Adaptation de la vitesse (Rennes)

L'analyse de la consommation d'énergie est très importante dans l'évaluation environnementale. On remarque par ailleurs, que cela est plus ou moins facilement réalisable et qu'il

existe des méthodes adaptées. D'une part les simulations avec le logiciel Impact ADEME sont assez simples et applicables quel que soit le territoire. Et d'autre part, les consommations d'énergie peuvent être déduites des émissions. Un plus grand nombre de PDU pourrait donc facilement prendre en compte l'évaluation de la consommation d'énergie dans leur évaluation environnementale.

3.10. L'échelle temporelle de l'évaluation

La définition de l'échéance à prendre en compte est complexe car les résultats de l'évaluation dépendent de l'échéance prise en compte. Les impacts d'une mesure peuvent s'observer au moment de la mise en service de la mesure dans le cas d'une modification d'un carrefour à feux en carrefour giratoire par exemple puisque l'effet est immédiat ou une dizaine d'années plus tard dans le cas de politique liant urbanisme et transport. Dans ce dernier cas, il est difficile de déterminer l'échéance à laquelle les effets de la mesure se stabilisent ainsi que d'isoler l'effet propre de cette mesure en excluant les effets d'autres mesures ou d'évolutions socio-économiques observées sur le même territoire. Les échelles temporelles d'observation peuvent varier selon le type de pollution observée. (Joumard & Nicolas, 2010) précisent par exemple que les indicateurs d'émissions liés à la qualité de l'air locale (CO, d'HAP, de NO_2 et les particules fines) sont à observer à une échelle spatiale de l'ordre du kilomètre et à une échelle temporelle de l'ordre de l'heure alors que les indicateurs d'émissions liés à la qualité de l'air régionale (COV et de NO_x) sont à observer à une échelle spatiale de l'ordre du millier de kilomètres et à une échelle temporelle de l'ordre du jour. Les échéances classiquement prises en compte sont l'échéance du PDU ou alors des échéances à 10, 15 ou 30 ans. Elles ne permettent donc pas de représenter les impacts qui ont des variabilités sur des écelles temporelles plus courtes.

3.11. Les indicateurs

Les indicateurs permettent de caractériser, de mesurer l'état des caractéristiques du territoire (trafic, émissions de polluants, qualité de l'air, sécurité…)… Ils servent à synthétiser les résultats bruts. Une sélection pertinente d'indicateurs est donc indispensable pour identifier et suivre les principaux enjeux du territoire.

Des listes d'indicateurs peuvent être présentées dans la littérature (Annexe 4). Nous relevons celle constituée dans (AIUTO, 1999) particulièrement intéressante car elle présente les outils et les données nécessaires au calcul des indicateurs (Tableau 6).

Indicators	Possible way of estimate	Input data
CO emissions	Air pollution (emission) models	Traffic flows, vehicle categories percentage
NO_x emissions	Air pollution (emission) models	Traffic flows, vehicle categories percentage
CxHy emissions	Air pollution (emission) models	Traffic flows, vehicle categories percentage
Dust emissions (from Diesel engines)	Air pollution (emission) models	Traffic flows, vehicle categories percentage
Population involved in air pollution (at a level that exceeds the law threshold)	socio-economic data	Pollutants emissions
TEP (Tons of equivalent petroleum used by road traffic and other modes)	Energetic models	Traffic flows, vehicle percentage
Time spent on the transport networks	Assignment model	O/D matrices, supply
Occupancy (passengers*km/offered seats*km)	Assignment model, supply model	O/D matrices, supply
Length of congested links (private transport)	Assignment model, supply model	O/D matrices, supply
Flow/capacity ratio	Assignment model, supply model	O/D matrices, supply
Accessibility	Demand model, supply model	O/D matrices, supply
Average speed of each system	Supply, assignment model	O/D matrices, supply
Car kilometrage	Supply, assignment model	-
Number of car trips	Mode choice model	-
Number of public transport trips	Mode choice model	-
Travel time ratios between modes	Assignment model, supply model	-
Travellers kilometrage	Assignment model	-
Number of participants to company based traffic management	-	-
Presence of co-ordination centre	-	-
Car occupancy	Mode choice model	-
Number of car poolers	-	-
Number of car pool facilities	-	-
Car kilometrage by travel purpose	Assignment model	-
Number of car trips by purpose	Generation model - surveys	O/D matrices - socio-economic data
Level of service (ratio between travel time and minimum possible travel time)	Mode choice model	O/D matrices
Accessibility of a zone (generalized cost for each origin zone to reach the other zones)	Supply, assignment model, demand models	O/D matrices, supply
Walking time to nearest station or stop	Supply model	-
Number of transfer during a trip	Mode choice, assignment choice	-
Number of links that become congested (and their localization)	Assignment model, supply model	O/D matrices, supply
User costs (travel time, charges)	Supply, assignment models	Supply, fares, Value of time (for different users)
Cash flow (referred to the whole system)	External data and assignment models (for exercise costs)	debit and credit for each transport system
Standard deviation of a set of accessibility indicators	(Multi-user) supply, assignment models	(Multi-user) supply, fares, Value of time (for different users)
Comfort (for each system). It could be a qualitative indicator	Qualitative indicator (high, middle, low)	-
Seated passengers*km/total passengers *km	supply, assignment model	number of seats per vehicle, total capacity of each vehicle.
Number of public transport runs that never overcomes capacity	Assignment model	number of seats per vehicle, total capacity of each vehicle.

Tableau 6 Caractéristiques de chaque indicateur issues de (AIUTO, 1999)

Les indicateurs peuvent être classés selon l'impact qu'ils apprécient :

- Les caractéristiques de la demande : le nombre de déplacements par personne, les déplacements internes, les déplacements par motif, par catégorie de population, par horaire de déplacements, le nombre de véhicules disponible par personne, le type de véhicule … L'ensemble de ces indicateurs permet de caractériser les évolutions des caractéristiques de mobilité.
- La répartition modale : cet indicateur est très souvent utilisé comme objectif et comme indicateur de performance dans les PDU (efficacité du PDU). En effet, il permet de caractériser les évolutions dans les modes de déplacements utilisés.
- Le trafic : les indicateurs du trafic peuvent être des indicateurs de congestion, la vitesse, le trafic (veh.km), ils permettent de caractériser l'état du réseau.
- Les émissions des différents polluants
- La qualité de l'air : les concentrations dans l'atmosphère des différents polluants

Les échelles spatiales et temporelles de l'évaluation, que nous avons tentées de définir dans les parties précédentes, doivent se retrouver dans les indicateurs :

- Les indicateurs globaux sont nécessaires pour identifier des grandes tendances sur l'ensemble du territoire étudié. Par contre pour identifier les enjeux, il est nécessaire d'aboutir à des indicateurs plus ciblés
- Les indicateurs peuvent être calculés à l'échelle de l'agglomération ainsi qu'à une échelle plus locale qui peut être l'échelle de l'impact de la mesure
- La localisation géographique des indicateurs est indispensable pour que les effets du PDU soient observés sur les différentes zones (centre ville, périphérie, zone de mise en place de la mesure…)

Enfin, la définition du mode de calcul des indicateurs permet de rendre les indicateurs pertinents :

- Indicateurs par km de voirie par exemple, ou par surface, par habitant, pour éviter toute distorsion
- Indicateurs relatifs : nombre de tronçons modifiés (linéaire ou surfacique modifié) / le nombre de tronçons total, part d'émissions VP/ part d'émissions PL
- …

3.12. Conclusion

Dans la pratique, on constate que les évaluations sont réalisées de manières très variables selon les PDU. L'hétérogénéité des méthodes et des applications démontre un manque de cadrage et des approches qui ne sont pas nécessairement adaptées pour l'évaluation de l'ensemble des mesures.

L'évaluation repose généralement sur une pluralité de disciplines (trafic, émissions, etc.) nécessitant des compétences variées. Il est fortement souhaitable que des organismes spécialisés soient impliqués dans leur champ de compétence respectif afin que chacun des domaines soit traité de manière pertinente et que des échanges soient effectués sur les données produites par chacun.

Les échelles d'évaluation et les périmètres pris en compte sont uniques pour chaque plan de déplacements urbains. Néanmoins, suivant le type de mesures et le type de polluants étudiés, les effets et les impacts ne seront pas observables sur les mêmes échelles. D'autre part, ces échelles sont largement contraintes par des aspects techniques comme la disponibilité des données. Il est donc important de définir quelles sont les mesures évaluées et celles qui ne le sont pas en fonction du matériel dont on dispose.

Une bonne connaissance de l'état du territoire avant la mise en place des mesures permet d'établir un état initial qui pourra être comparé avec différents scénarios. Ces étapes de diagnostic ou d'état initial sont cependant souvent insuffisamment renseignées.

Les objectifs environnementaux sont très rarement quantifiés. On ne retrouve donc pas de lien entre les mesures mises en place et leur efficacité pour réduire l'impact environnemental de la mobilité. D'autre part, les objectifs sont trop souvent de maintenir les niveaux de concentration et de consommation à leur niveau actuel, ils sont rarement de les diminuer. Les objectifs ne sont alors pas assez ambitieux.

On observe malheureusement des écarts trop importants entre la formulation d'un PDU au travers de nombreuses mesures, et des modélisations souvent réalisées pour que les résultats atteignent des objectifs acceptables. La représentation des effets des mesures dans les modèles est ainsi faiblement discutée.

On remarque globalement que les scénarios sont construits après l'adoption du projet final dans le but de justifier la mise en place du PDU ainsi adopté. Certains scénarios présentés ne sont pas réalistes et ne permettent pas d'aider au choix des mesures à mettre en œuvre. On se pose donc la question de l'utilité de l'élaboration de ces scénarios, qui tendent parfois à être des analyses de sensibilité des modèles utilisés (variation des paramètres du modèle : parc de véhicules d'une année antérieure par exemple).

Enfin, un problème crucial de l'évaluation semble être la disponibilité des données comportementales, de mobilité, de trafic, etc., et leur cohérence par rapport aux échéances et objectifs de l'évaluation. La construction des nombreuses hypothèses introduites dans les outils (choix modal, déplacements, etc.) repose principalement sur ces données, qui sont peu disponibles de par leur coût d'obtention.

Conclusion

L'évaluation environnementale des PDU, plans et programmes, projets routiers, etc. est l'objet de nombreux travaux, recommandations, directives, etc., ce qui montre à quel point elle nécessite d'être encadrée. L'évaluation est en effet très complexe car les phénomènes en jeu sont multiples (trafic, émissions, dispersion, transformations physico-chimiques, influence forte et variabilité de la météorologie, etc.). La mise à plat d'un ensemble de méthodes a permis d'identifier des approches pertinentes pour l'évaluation des mesures. On a pu par exemple relever l'intérêt de l'utilisation des scénarios ou des exemples pertinents d'indicateurs. Néanmoins, le principal désavantage de l'ensemble de ces méthodes est d'être applicable à des échelles larges (au niveau de l'agglomération voire d'un pays). Celles-ci prennent ainsi en compte des données de trafic et d'émissions qui sont très agrégées et qui ne permettent donc pas de représenter l'effet de mesures locales. Il est donc impossible de traiter l'ensemble des mesures que nous avons répertoriées dans le 1er chapitre car elles induisent pour la plupart des effets qui ne sont observables qu'à des échelles fines et qui sont localisées sur des périmètres spécifiques (la rue, le quartier, les zones périphériques, le centre ville…). Généralement un PDU est évalué à l'échelle de l'agglomération ou d'un territoire large sur lequel il est mis en œuvre et sur des périodes longues (journée entière, année). À ces échelles, les impacts sont souvent très faibles (et souvent qualifiés d'insignifiants), compte tenu des nombreuses autres contributions et du caractère très local ou très temporel de nombreuses mesures. Il conviendrait donc sans doute d'évaluer les différentes mesures à des échelles beaucoup plus locales qui seraient celles de leur périmètre d'influence par exemple.

On constate que les évaluations sont réalisées de manières très variables selon les PDU. L'hétérogénéité des méthodes et des applications démontre un manque de cadrage des approches qui ne sont pas nécessairement adaptées pour l'évaluation de l'ensemble des mesures. Cela peut venir du fait que les impacts des PDU sur l'environnement ont du mal à être évalué, de part la variété d'actions qu'il regroupe, les différentes échelles spatiales et temporelles d'impact, la complexité des composantes environnementales à évaluer (qualité de l'air, émissions de polluants), les différentes composantes du territoire qu'il faut prendre en compte (démographie, urbanisme). On peut en conclure que l'évaluation d'un PDU peut être abordée de deux manières : au niveau global pour l'ensemble des mesures du PDU ou en considérant des mesures individuelles. Dans le premier cas, la difficulté est accrue par l'interaction complexe entre les différentes mesures et l'évolution globale du contexte urbain. Dans le second cas la difficulté tient en l'identification de l'impact propre d'une mesure en faisant abstraction de l'évolution au fil de l'eau du territoire et de l'incidence d'autres mesures.

Les outils de modélisation permettent ainsi de spatialiser les impacts et de présenter une synthèse des différents impacts sur un même territoire. Ils semblent ainsi les mieux adaptés pour évaluer des mesures variées appliquées à différentes échelles spatiales. Différents outils de modélisation du trafic et des émissions de polluants existent. Ils ont des échelles spatiales et temporelles d'application spécifiques qui peuvent être adaptées pour l'évaluation de certains types de mesures. Nous détaillons une partie de ces outils dans le chapitre suivant afin d'envisager leur utilisation pour l'évaluation des mesures.

Chapitre 3 Les outils de modélisation (déplacements, trafic et émissions de polluants)

Introduction

L'état de l'art des méthodes nous démontre les intérêts d'utiliser des outils de modélisation des phénomènes influençant la pollution de l'air induite par le trafic (données spatialisées sur l'ensemble du territoire, évolutives). Ceux-ci paraissent essentiels pour mettre en place des stratégies de régulation du trafic et de la mobilité efficaces.

La modélisation de la pollution atmosphérique induite par le trafic prend en compte les émissions de polluants des véhicules et les phénomènes physico-chimiques permettant de caractériser la dispersion des polluants dans l'atmosphère. La modélisation de ces phénomènes prend en compte les conditions météorologiques, la pollution de fond… L'ensemble de ces paramètres perturbe la caractérisation de l'impact d'une ou plusieurs mesures de gestion du trafic et des déplacements sur la qualité de l'air. Par ailleurs, l'étude de ces phénomènes dépasse le cadre des travaux de cette thèse. Nous cherchons donc dans le cadre de notre étude à caractériser l'évolution des émissions de polluants issues du trafic.

La somme des émissions de polluants émis sur la zone d'étude peut être synthétisée par :

Σ émissions = Σ Trafic x FE + autres émissions

Le principe général des modèles d'émission est simple : il s'agit de coupler un facteur d'émissions (FE) et une quantité de trafic (Trafic). Le trafic peut représenter une distance parcourue par un véhicule, une durée, un nombre de trajets, et le facteur d'émission est l'émission spécifique.

Les facteurs d'émissions sont des valeurs unitaires d'émissions, données par les modèles et logiciels associés, correspondant à un polluant, un type de véhicule, une technologie, des conditions particulières de circulation et d'utilisation des véhicules, de comportements de conduite, etc. Ils s'expriment le plus souvent en g/km.

La quantité de trafic s'exprime généralement en véhicules x km (mais aussi véhicules x h, nombre de démarrages, etc.). Elle doit être déclinée selon les caractéristiques des véhicules (principaux paramètres des émissions) et les conditions diverses de circulation et d'usage. Elle doit être également distribuée de manière spatio-temporelle si l'on souhaite étudier en détail les émissions et leur devenir. Les données d'activités (description des parcs et conditions d'utilisation) s'appuient sur des études statistiques nationales ou locales de mobilité et de motorisation. Le trafic peut être dérivé de mesures in situ, d'enquêtes sur les origines - destinations des déplacements, de modèles de trafic.

L'objectif principal des modèles de trafic est d'estimer le volume et les caractéristiques du trafic sur un réseau. Les caractéristiques modélisées (vitesse, accélération, débit…) ainsi que le type de réseau modélisé (agglomération, quartier, rue…) dépendent du modèle utilisé.

Différents modèles permettent de simuler chacun de ces phénomènes. La première partie de ce chapitre présente un état de l'art des modèles de déplacements et de trafic. On essayera dans cet état de l'art de préciser les limites des hypothèses de modélisation effectuées et les difficultés de mise en œuvre. Après un bref aperçu des émissions de polluants émis par le trafic (partie 2), nous exposerons un état de l'art sur les modèles d'estimation des émissions de polluants (partie 3). Nous évoquerons ensuite dans la 4ème partie les couplages possibles de ces différents modèles afin d'avoir une approche intégrée.

1. LES MODELES D'ESTIMATION DES DEPLACEMENTS ET DU TRAFIC 113

1.1. LES MODELES STATIQUES DE TRAFIC 114
1.1.1. Principes généraux des modèles de déplacements 114
1.1.2. La génération de la demande de déplacements 114
1.1.2.1. Principe de l'étape 114
1.1.2.2. Choix des modèles mathématiques et hypothèses du modèle 115
1.1.2.2.1. Les données 115
1.1.2.2.2. Les segmentations 115
1.1.2.2.3. Les potentiels d'attraction des déplacements 115
1.1.2.3. Les problèmes liés à cette étape 116
1.1.2.3.1. La pertinence du zonage 116
1.1.2.4. Les limites de l'étape de génération 116
1.1.3. La distribution des déplacements 117
1.1.3.1. Principe de l'étape 117
1.1.3.2. Choix des modèles mathématiques et hypothèse du modèle 118
1.1.3.3. Les problèmes liés à cette étape 118
1.1.4. La répartition modale 119
1.1.4.1. Principe de l'étape 119
1.1.4.2. Choix des modèles mathématiques et hypothèses du modèle 119
1.1.4.3. Les problèmes liés à cette étape 120
1.1.5. L'affectation des déplacements 120
1.1.5.1. Principe de l'étape 120
1.1.5.2. Choix des modèles mathématiques et hypothèses du modèle 120
1.1.5.2.1. Les méthodes d'affectation du trafic 121
1.1.5.3. Les courbes debit vitesse 121
1.1.5.4. Les problèmes liés à cette étape 123
1.1.6. Calage 123
1.1.6.1. Principe 123
1.1.6.2. Choix des processus de calage 123
1.1.6.3. Les problèmes liés à cette phase 123
1.1.7. Les modèles d'affectation dynamique 124
1.1.8. Les principaux intérêts et limites des modèles statiques pour l'évaluation environnementale des mesures 124
1.2. LES MODELES DYNAMIQUES DE TRAFIC 125
1.2.1. Les modèles macroscopiques 125
1.2.2. Les modèles microscopiques 126
1.2.3. Les modèles mésoscopiques 128
1.2.4. Les modèles dynamiques de zone 128
1.2.5. Les principaux intérêts et limites des modèles de trafic dynamique pour l'évaluation environnementale des mesures 128
1.3. CONCLUSION 129

2. LES EMISSIONS DE POLLUANTS ISSUES DU TRAFIC 130

2.1. LES POLLUANTS 130
2.2. APPROCHES DE CALCUL DES EMISSIONS DE POLLUANTS 135
2.3. LES PHENOMENES D'EMISSIONS 136
2.3.1. Émissions à l'échappement ou liées à la combustion 137
2.3.2. Émissions par évaporation de carburant 137
2.3.3. Les émissions par usure et abrasion 138
2.3.3.1. Emissions liées aux équipements automobiles 138
2.3.3.2. Emissions liées aux pneumatiques 138
2.3.3.3. Emissions liées à l'infrastructure routière 138
2.3.4. Émissions par remise en suspension des particules 138
2.3.5. Autres émissions 139
2.3.6. Conclusion 140

3. LES MODELES DE CALCUL DES EMISSIONS DE POLLUANTS DU TRAFIC ROUTIER 141

3.1. MODELES BASES SUR LES CONSOMMATIONS DE CARBURANT 142
3.1.1. Intérêts et limites des modèles basés sur les consommations de carburant pour l'évaluation environnementale des mesures 143
3.2. LES MODELES UTILISANT DES FACTEURS D'EMISSION AGREGES 143
3.2.1. Intérêts et limites des modèles utilisant des facteurs d'émissions agrégés pour l'évaluation environnementale des mesures 144
3.3. MODELES DESAGREGES BASES SUR LES VITESSES MOYENNES 144
3.3.1. Le Modèle COPERT 145

3.3.1.1. Émission à chaud 146
3.3.1.2. Surémission à froid 147
3.3.1.3. Émissions par évaporation 147
3.3.1.4. Les émissions non échappement de particules 148
3.3.1.5. Données d'entrées de Copert 149
3.3.1.6. Résultats de Copert 149
3.3.1.7. Limites de la méthode et de l'outil COPERT 149
3.3.2. Outils nationaux intégrant la méthode Copert 150
3.3.2.1. Impact-ADEME 150
3.3.2.2. Circul'Air 150
3.3.2.3. CopCETE 150
3.3.3. Intérêts et limites des modèles désagrégés basés sur les vitesses moyennes pour l'évaluation environnementale des mesures 151
3.4. MODELES S'APPUYANT SUR UNE DESCRIPTION FINE DU TRAFIC 151
3.4.1. Modèles à situations de trafic ARTEMIS/HBEFA 151
3.4.2. Modèles s'appuyant sur les variables caractéristiques du trafic 154
3.4.3. Modèle avec description fine des conditions de conduite 155
3.4.4. Intérêts et limites des modèles s'appuyant sur une description fine du trafic pour l'évaluation environnementale des mesures 156
3.5. MODELES MODAUX ET INSTANTANES 156
3.5.1. Modèles instantanés avec matrice vitesse x accélération 157
3.5.2. Modèles instantanés avec matrice régime x charge du moteur 157
3.5.3. Fonctions d'émission selon vitesse et accélération 158
3.5.4. Les modèles instantanés basés sur un calcul de puissance 158
3.5.5. Les modèles modaux d'émission 159
3.5.5.1. MOVES 159
3.5.5.2. Modèle PHEM 159
3.5.6. Intérêts et limites des modèles modaux et instantanés pour l'évaluation environnementale des mesures . 162
3.6. CONCLUSION 162

4. LE COUPLAGE DES MODELES D'ESTIMATION DU TRAFIC ET DES EMISSIONS 164

4.1. MODELE DE TRAFIC STATIQUE COUPLE AVEC UN MODELE DESAGREGE D'EMISSIONS BASE SUR LES VITESSES MOYENNES 164
4.2. MODELE DE TRAFIC DYNAMIQUE MICROSCOPIQUE COUPLE AVEC UN MODELE INSTANTANE D'EMISSIONS 164
4.3. CONCLUSION 165

CONCLUSION 167

1. Les modèles d'estimation des déplacements et du trafic

Très souvent, l'évaluation (pollution de l'air et énergie) des PDU et plus généralement des politiques de transport et environnementales, projets d'infrastructure, etc., fait appel à la modélisation et combine la modélisation des déplacements ou mobilités, la simulation des trafics sur le réseau routier, avant d'envisager le calcul des émissions de polluants, voire l'estimation des concentrations des polluants et l'exposition des personnes. La modélisation des trafics est une étape cruciale dans ce processus, et il convient en conséquence d'examiner en détail les outils qui permettent cette modélisation. On notera également que ces outils n'ont généralement pas été conçus pour être utilisés en articulation avec les outils de calcul des émissions de polluants mais plutôt à des fins de dimensionnement du réseau, ce qui peut entraîner certaines incohérences.

Compte-tenu de l'importance de cette étape, nous présentons différents modèles d'estimation du trafic ainsi que leur application à des fins d'évaluation environnementale.

Différentes classes de modèles peuvent représenter le comportement des véhicules sur un réseau urbain pour diverses applications. On relève trois grandes familles de modèles. Les modèles de simulation statique des déplacements, les modèles dynamiques et les modèles dynamiques agrégés.

Les modèles statiques prennent en compte la localisation des populations et des activités et en déduisent les volumes de trafic moyen. Ils cherchent à quantifier les nombres de véhicules empruntant chaque arc du réseau. Les mouvements des véhicules sont déterminés sur la base de critères tels que la densité d'habitation ou de bureaux sur une zone. Ils sont dits statiques car ils ne prennent pas en compte la dynamique de l'écoulement du trafic. Ces modèles sont généralement utilisés dans un cadre de dimensionnement et d'évaluation de nouvelles infrastructures de transport (Bonnel, 2001). Ces modèles sont simplifiés mais sont utiles pour étudier les flux de véhicules sur de larges échelles spatiales et temporelles.

Le modèle à 4 étapes, apparu dans les années 60, définit le cadre formel de la majeure partie des modèles statiques. Il permet d'estimer la charge du réseau (en voiture, voire en bus et poids lourds) ainsi que les vitesses moyennes sur les différents arcs du réseau. Ce modèle est constitué de 4 étapes : la génération de la demande de déplacements, la distribution des déplacements, la répartition modale et l'affectation des déplacements. Il nécessite au préalable la modélisation du réseau et la spatialisation des populations et des activités (zonage).

Les modèles dynamiques cherchent à décrire les variations temporelles des états de trafic, ils décrivent les conditions d'écoulement dans lesquels s'effectuent les déplacements. Ces modèles fonctionnaient initalement à plus petite échelle mais ils sont de plus en plus appliqués à l'échelle de l'agglomération. Ils sont utilisés dans le cadre de la gestion et de l'exploitation des réseaux.

Le champ des modèles dynamiques est large, ceux-ci peuvent être classés en trois catégories suivant leur prise en compte des caractéristiques du trafic :

- Les modèles macroscopiques initiés par (Lighthill & Whitham, 1955) et (Richards, 1956) utilisent une représentation agrégée et continue du flux de trafic, caractérisée par des grandeurs telles que le débit ou la concentration
- Les modèles microscopiques utilisent une représentation individualisée des véhicules qui sont caractérisés par leurs positions et leurs états cinématiques
- Les modèles mésoscopiques représentent le comportement des conducteurs sans distinguer explicitement leur comportement individuel dans l'espace et le temps de telle sorte qu'ils travaillent à l'échelle de paquets de véhicules.

On propose ci-après une description plus détaillée de ces modèles.

1.1. Les modèles statiques de trafic

1.1.1. Principes généraux des modèles de déplacements

Les modèles statiques cherchent à décrire la quantité moyenne de véhicules empruntant chaque axe du réseau (Bonnel, 2001; GESMAD, 2000; Ortuzar & Willumsen, 1990). Ces modèles sont utilisés pour l'étude des déplacements à grande échelle de temps et d'espace. Ils permettent d'obtenir une représentation implicite et simplifiée de la congestion et sont utiles pour des réflexions à long terme sur l'évolution du réseau (planification).

Le modèle est constitué de quatre étapes :

- La génération de la demande de déplacements consiste à attribuer un pouvoir d'émission et d'attraction de demande de transport à chaque zone du modèle.
- La distribution des déplacements consiste à déterminer la part de la demande de transport de chaque zone émettrice à destination d'une zone réceptrice donnée. La matrice de demande des origines vers les destinations (matrice O/D) est ainsi constituée.
- La répartition modale distribue la demande entre les différents moyens de transport disponibles (TC, marche, voiture particulière…). Autant de matrices OD qu'il y a de modes sont donc calculées.
- L'affectation des déplacements cherche à déterminer les itinéraires pour chaque mode et chaque couple OD, choisis par les usagers. Elle permet de calculer le débit moyen ou quantité de déplacements passant par chaque arc du réseau étudié.

Différents outils et méthodes permettent de définir chacune de ces étapes. Ceux-ci sont détaillés dans les parties suivantes.

Le modèle de déplacements construit et utilisé dans le projet Eval PDU est présenté en détails dans les rapports de (Prado, 2010) et (CETE de l'Ouest, 2011).

1.1.2. La génération de la demande de déplacements

1.1.2.1. Principe de l'étape

L'étape de génération consiste à déterminer le nombre de déplacements réalisés par la population du périmètre d'étude en provenance ou à destination de chaque zone du modèle. Elle permet de construire les marges de la matrice Origine-Destination. Afin de déterminer les émissions de déplacements pour chaque zone, la population est divisée en groupes ayant des comportements de mobilité semblables. Parallèlement, des motifs de déplacements ainsi que des chaînes types d'activités sont définies (Domicile-Travail-Domicile, Domicile-École-Loisir-Domicile,…).

Un *déplacement* est défini comme le mouvement entre deux lieux avec un motif (activité) à l'origine et un motif à la destination. Une *chaîne* est une suite de déplacements issue du domicile ou à destination du domicile, dominée par un motif défini comme principal : exemple une chaîne du domicile vers le travail qui peut être directe ou indirecte, quand s'y intercale un achat ou un accompagnement en cours de route. Une boucle ou sortie est une suite de déplacements comprise entre un départ du domicile et un retour au domicile (Laboratoire d'Economie des Transports, 1997).

Pour chacun des groupes de population, la probabilité de réalisation de chaque chaîne d'activité permet de déterminer le nombre de déplacements générés. Ces probabilités relatives sont estimées à partir de données sur la population provenant d'enquêtes de type « enquêtes ménages » ou

de recensement de la population. Les attractions relatives des zones sont quant à elle définies à partir de données sur les activités disponibles dans chaque zone.

Un élément important de cette phase est la définition du zonage du modèle. Il est généralement défini en fonction des données disponibles. Cette problématique est détaillée dans la partie 1.1.2.3.1.

Les différents modèles diffèrent de par les paramètres pris en compte pour la segmentation, les motifs et les chaînes de déplacement pris en compte ainsi que par les variables explicatives de la génération des déplacements (émissions et attractions).

1.1.2.2. Choix des modèles mathématiques et hypothèses du modèle

1.1.2.2.1. Les données

Les données d'entrée des différents modèles peuvent varier. Différentes définitions des termes déplacements (longueur minimale, manière de comptabiliser le nombre de déplacements…) ou chaîne de déplacements par exemple peuvent être prises en compte et donc représenter différemment une même mobilité, cela est détaillé dans (Bonnel, 2001). De plus, ce sont les données des enquêtes qui déterminent les données d'entrée du modèle, certaines enquêtes fournissant des données sur les ménages et d'autres sur des individus, les hypothèses prises en compte dans le modèle ainsi que les sorties du modèle ne seront pas les mêmes.

Les données de l'EMD sont acquises par enquête sur un échantillon de population. Il est donc considéré que la population enquêtée est représentative de la population globale de l'agglomération.

Dans le modèle de trafic utilisé dans le projet EvalPDU, les segmentations sont réalisées à partir des données de l'EMD de 2002 et ne sont pas modifiées pour la modélisation du trafic en 2008. Une hypothèse sur la stabilité de la composition de la population et sur la stabilité des caractéristiques des déplacements est donc prise.

Les données utilisées sont les recensements de la population RGP 99 et RGP 06 de l'INSEE. Les valeurs pour 2002 et 2008 sont obtenues par extrapolation linéaire. Cette extrapolation induit des incertitudes. D'autre part, le taux de motorisation utilisé pour distinguer les segments motorisés des segments non motorisés est un taux de motorisation issu du RGP de 2006. Quelle est l'évolution de ce taux de motorisation entre le RGP 99 et 06, peut-il avoir un impact sur les résultats de la modélisation ?

L'enquête ménages déplacements couvre les déplacements réalisés par les résidents du périmètre d'étude. De ce fait, une partie des déplacements réalisés au sein de ce périmètre ne sont pas pris en compte par cette enquête. L'enquête cordon permet de compléter ce recueil en repérant les déplacements d'échanges et de transit.

1.1.2.2.2. Les segmentations

Le regroupement de la population en un certain nombre de segments conduit à la formulation d'hypothèses puisque l'on suppose que les personnes constituant un même segment de population ont les mêmes pratiques de déplacements. Les mêmes types d'hypothèses sont émis en ce qui concerne les motifs de déplacement.

1.1.2.2.3. Les potentiels d'attraction des déplacements

La méthode la plus fréquemment utilisée pour le calcul des attractions est une méthode statistique de régression. L'attraction d'une zone est estimée à partir d'une régression linéaire ou multiple, dont les variables explicatives sont tout ou partie, ou des combinaisons ou des transformations des variables zonales (habitat, activité). Le modèle EvalPDU fait appel à des régressions linéaires simples.

À titre d'exemple, dans le modèle de l'agglomération toulousaine (PTV France, 2008), les attractivités sont définies principalement en fonction de régressions linéaires multiples. Les attractions retenues sont indiquées dans le Tableau 7.

Motif	Potentiels d'attraction
Travail	Nombre d'emplois dans les zones
Etudes	Nombre d'élèves
Achat	$A = 0.6 * \frac{S_{com}}{\sum S_{com}} + 0.4 * \frac{Empl\ admin\ zone}{\sum Empl\ admin}$ Où S_{com} = Surfaces commerciales dans la zone et $Empl\ admin$ = Emplois de l'administration
Visites	$A = 0.38 * \frac{Pop\ zone}{\sum Pop} + 0.38 * \frac{Empl\ admin\ zone}{\sum Empl\ admin} + 0.24 * \frac{Nb\ lits\ zone}{\sum Nb\ lits}$ Où Pop= population de la zone, représentant la population que l'on va voir, $Empl\ admin$ = Emplois de l'administration, représentant les visites pour démarches administratives et $Nb\ lits$ = Nombre de lits d'hôpitaux et de maisons de retraire
Loisirs	$A = 0.16 * \frac{F\ zone}{\sum F} + 0.16 * \frac{Nb\ zone}{\sum Nb} + 0.56 * \frac{Pop\ zone}{\sum Pop} + 0.12 * \frac{Empl\ com\ zone}{\sum Empl\ com}$ Où F= fréquentation des équipements culturels, Nb = nombre d'installations sportives, Pop = Population, $Empl\ com$ = emplois du secteur commerce

Tableau 7 Potentiels d'attraction dans le modèle de déplacements de l'agglomération toulousaine - Source : (PTV France, 2008)

Ces potentiels varient donc d'un modèle à un autre.

1.1.2.3. Les problèmes liés à cette étape

1.1.2.3.1. La pertinence du zonage

Le modèle à quatre étapes repose sur un zonage du territoire. La finesse du zonage dépend de l'objectif de l'évaluation mais aussi de la disponibilité des données. D'une manière générale, le découpage comprend de quelques dizaines de zones pour des modélisations à très long terme et à faible spatialisation jusqu'à plusieurs milliers de zones pour les plus grosses agglomérations (Bonnel, 2001).

1.1.2.4. Les limites de l'étape de génération

Les limites de l'étape de génération des déplacements sont principalement dues au caractère séquentiel du modèle à quatre étapes qui ne permet pas d'intégrer des rétroactions entre les étapes. Nous citons ci-dessous différents exemples liés à cette limite.

Deux limites de l'étape de génération sont citées dans (Bonnel, 2001). Il est indiqué d'une part que comme cette étape est traitée de façon indépendante dans le modèle, quelques soient les résultats de congestion, ou les nouvelles infrastructures développées, le calcul des émissions et attractions est inchangé. Le nombre de déplacements vers une zone n'est donc pas modifié si cette zone est particulièrement congestionnée du fait d'une baisse de capacité sur la voirie ou si l'accès à cette zone est facilité grâce à l'augmentation de places de stationnement ou à une desserte en transports en commun plus importante. D'autre part, il est constaté que l'étape de génération dépend uniquement

des activités sur la zone et des caractéristiques des ménages. L'offre en transports n'est donc pas prise en compte alors qu'un phénomène d'induction a été observé suite à la mise en place d'infrastructures comme le montre l'étude du CERTU concernant les transports en commun en site propre.

	Déplacements des usagers TC de référence	**Mobilité induite**	**Reports modaux**			**Ensemble des usagers**
			VP vers TC	Marche à pieds vers TC	2 roues vers TC	
Ligne B du métro de Toulouse	72%	10%	11%	7%		100%
Métro de Rennes	70%	10%	11%	8%	1%	100%
Ligne B du tramway de Strasbourg	66%	9%	15%	10%		100%
Tramway de Montpellier	72%	9%	9%	9%	1%	100%
TVR de Caen	83%	2%	2%	15%		100%
Axe lourd bus de Rennes	90%	5%	5%			100%

Tableau 8 Répartition des différentes catégories d'usagers par rapport à la ligne de TCSP - Source : tableau issu de (CERTU, 2002)

D'autres limites sont relevées. L'utilisation conjointe de données multisources est problématique et nécessite d'effectuer différentes opérations. Les intitulés des occupations des personnes ne sont par exemple pas les mêmes dans le RGP et dans l'enquête ménages, des recoupements doivent donc être effectués. Les zonages des données peuvent aussi être différents. Le manque de données et la non concordance entre les années d'obtention des différentes données implique d'effectuer des opérations d'extrapolation qui dégradent la qualité des données.

L'utilisation d'une segmentation de la population et d'une segmentation des motifs de déplacements qui n'évoluent pas est une hypothèse forte. Les données de l'enquête ménages déplacements de Lyon montrent par exemple une évolution assez nette de la répartition des motifs au cours des 20 dernières années avec la réduction du poids des déplacements contraints et l'accroissement des déplacements secondaires (Bonnel, 2001). Dans le cas de la modélisation sur Nantes, effectuée sur 2002 et 2008, on peut supposer qu'en six ans les caractéristiques de mobilité n'évoluent pas d'une manière significative.

Enfin, il n'existe pas de moyen de valider la matrice Origine Destination, cela nécessiterait des données de mobilité sur l'ensemble de la population. Le modèle n'est donc calé que lors de l'étape d'affectation. Il serait néanmoins intéressant d'avoir une marge d'incertitude de cette matrice OD afin d'analyser la propagation de cette incertitude dans le modèle.

1.1.3. La distribution des déplacements

1.1.3.1. Principe de l'étape

Cette étape consiste à reconstituer les matrices Origine/Destination représentatives des volumes de déplacements tous modes entre chaque couple de zones. On cherche à s'ajuster au mieux à la matrice Origine/Destination observée. Elle permet donc de définir la probabilité qu'un segment de population faisant un déplacement à partir de la zone A aille vers la zone B. On définit généralement un temps généralisé (matrice d'impédance) qui est calculé à partir du temps de parcours entre les deux zones auquel on ajoute un temps de pénalité fonction du coût de déplacement et de la perception du coût du fonctionnement. Cette perception prend la forme d'une valeur de temps qui représente le coût

que l'on attribue à chaque seconde dans un trajet. Un segment à forte valeur de temps aura tendance à prendre un chemin plus rapide, même s'il coûte plus cher, car le coût associé au temps perdu dans un trajet plus long aura un poids important. Typiquement, les segments actifs ont une valeur du temps plus forte que celle des inactifs ou des étudiants.

1.1.3.2. Choix des modèles mathématiques et hypothèses du modèle

De nombreuses méthodes existent afin de déterminer la distribution des déplacements. Nous en citons quelques-unes ci-après.

Les modèles des facteurs de croissance déterminent la distribution des déplacements en extrapolant les flux actuels en fonction de la croissance de la population et des activités, c'est la méthode la plus simple. Deux limites à l'utilisation de cette méthode sont citées dans (Bonnel, 2001). D'une part lorsque des cellules de la matrice ont une valeur nulle, quel que soit le facteur de croissance, le terme de la matrice restera nul. D'autre part, la qualité de la matrice horizon dépend fortement de la matrice de référence.

La méthode des opportunités se base sur l'idée que l'origine et la destination d'un déplacement n'est pas explicitement liée à la longueur de celui-ci mais à l'opportunité de remplir les objectifs de la zone j plutôt que la zone k (en partant de la zone i). Selon cette approche, on range les zones par ordre décroissant de coût. Le trafic entre i et j est fonction du nombre d'opportunité dans la zone j et la probabilité que cette opportunité satisfasse l'usager. Chaque zone se remplit au fur et à mesure de leur éloignement (Morelli).

Le modèle gravitaire, utilisé dans le modèle de Nantes, représente le flux entre deux zones comme proportionnel à la génération (population …) de la zone d'origine, à l'attraction (population, emploi ou autre indicateur) de la zone de destination et décroît avec la distance qui les sépare. C'est le modèle le plus utilisé. Dans cette méthode, le calcul du temps généralisé peut prendre en compte différents paramètres suivant les modèles (coût du stationnement, prix du péage …).

Le modèle entropique est une méthode issue de la théorie de l'information et qui se fonde sur l'analyse combinatoire. L'entropie est donnée par : $W(T_{ij}) = \frac{T!}{\prod_{i,j} T_{i,j}!}$ et représente un nombre de déplacements de zone à zone. Le principe est de maximiser l'entropie W sujette à différents types de contraintes comme :

- des contraintes sur les marges telles que : $O_i - \sum_j T_{ij} = 0 \; \forall i$ et $D_j - \sum_i T_{ij} = 0 \forall j$
- des contraintes issues de comptages.

La principale hypothèse réalisée par le modélisateur est donc le choix du modèle mathématique utilisé. Ce choix peut dépendre des données disponibles, du phénomène étudié, de l'échelle d'observation…

Le choix des valeurs du temps intervenant dans le calcul du temps généralisé et donc aussi présente dans les étapes de répartition modale et d'affectation, est primordial et délicat à évaluer. Les valeurs usuellement prises en compte proviennent du rapport Boiteux (2001).

1.1.3.3. Les problèmes liés à cette étape

La distribution est calculée sur la base de la matrice des temps généralisés voiture compte tenu de la part modale très majoritaire de ce mode. Cependant, suite à la mise en place d'une nouvelle desserte TC par exemple, le nombre de déplacements entre certaines OD va augmenter. Ce processus

n'est donc pas représenté. Par ailleurs, cela suppose que le temps généralisé pris en compte dans le choix de la destination de son déplacement soit toujours le temps généralisé VP, ce qui est certainement faux.

Ce sont les temps à vide qui sont pris en compte dans l'étape de distribution, ce qui rend la distribution indépendante du volume de la demande. Pour effectuer le calcul de la matrice de distribution, on choisit par ailleurs un segment de demande correspondant à un temps généralisé moyen, donc à une valeur de temps moyenne.

L'étape de choix modal prend place après celle du choix de la destination. Il n'est toutefois pas certain que l'individu dans son processus de choix suive toujours cette séquence. On peut penser que le choix de la destination et du mode de transport sont inter-dépendants.

Nous avons pu constater que différentes méthodes permettaient de constituer la matrice OD. Dans quelle mesure le choix de la méthode impacte les résultats de la modélisation ? Une analyse de sensibilité de la matrice OD permettrait de définir d'une part que le choix de la méthode de génération des déplacements est un élément sensible des modèles à 4 étapes et d'autre part de définir des marges d'incertitudes de la matrice OD.

1.1.4. La répartition modale

1.1.4.1. Principe de l'étape

Une fois les déplacements répartis par zone et par segment de population, il est nécessaire de déterminer le mode de transport utilisé pour réaliser le déplacement. Cette étape permet d'éclater la matrice OD en plusieurs matrices OD pour chaque mode. L'étape du choix modal consiste à déterminer la fraction des déplacements qui s'effectue en utilisant chacun des modes possibles pour chaque couple origine destination. Cette représentation par mode s'effectue en fonction de l'offre caractéristique de chaque mode sur chaque couple origine-destination.

1.1.4.2. Choix des modèles mathématiques et hypothèses du modèle

Deux grands types de modèles existent :

Les modèles dits agrégés (appelé aussi grille de partage modal) se basent sur une méthode qui permet de regrouper les zones du réseau en classes selon différents critères (densité de population, importance géographique de la zone, facilités de stationnement, critères d'accessibilités en TC et en VP…,), de calculer la part modale de chacun des modes de transport, observée à une date de référence sur les différentes liaisons entre les zones appartenant à des classes données, puis de projeter à l'horizon de l'étude les variables utilisées pour constituer les classes à la date de référence, et enfin de déterminer à quelles classes appartiendront les différentes zones à cet horizon.

Les modèles dits désagrégés sont basés sur les observations de déplacements déclarés par les individus. Les paramètres du modèle sont estimés sur la base d'observations extraites d'une enquête ménages. Ce sont des modèles probabilistes, basé sur la théorie de l'utilité d'un certain mode pour un déplacement donné (modèle logit). Lorsqu'un individu est confronté à un ensemble d'actions, le choix se porte sur l'action qui maximise sa fonction d'utilité. Seulement, il apparait que la plupart des individus devant réaliser un choix répété entre deux choix similaires, ne vont pas choisir selon les cas la même action. Il est donc nécessaire d'introduire une notion de probabilité. Les modèles logit emboité peuvent être utilisés lorsque les modes sont définis par les mêmes attributs dans la fonction d'utilité (Bonnel, 2001).

Chaque modèle a des caractéristiques différentes, on peut simplement noter l'intégration dans le modèle de Toulouse d'un bonus TCSP, qui permet de représenter une attractivité supplémentaire pour les transports en commun de par leur facilité d'utilisation, leur confort… (PTV France, 2008). Ce bonus est représenté sous forme d'un temps de parcours en moins.

1.1.4.3. Les problèmes liés à cette étape

Dans le modèle de Nantes, le mode vélo n'est pas pris en compte dans la répartition modale. Les déplacements vélo ne sont donc pas modélisés. Ainsi, les mesures mises en place concernant la promotion du mode vélo et donc les objectifs d'augmentation des parts modales vélo ne peuvent pas être évalués grâce à cette modélisation car l'évolution de la part modale n'est pas estimée.

L'intermodalité n'est par ailleurs pas prise en compte comme un mode à part et seuls les trajets VP+ P+R +TC sont représentés.

Les nombreux paramètres utilisés dans le calcul du choix modal (comme la valeur du temps), sont considérés comme des paramètres de calage (GESMAD, 2000). Ils sont donc souvent repris d'une agglomération à une autre. Cependant, des études montrent que ces coefficients ne sont que rarement transposables et qu'une ré-estimation économétrique est nécessaire.

Enfin, il est souligné dans (Leurent, 1997) que les étapes de choix modal et d'affectation semblent être deux étapes fondamentales des modèles à quatre étapes et que les choix du modélisateur ont un impact important sur les résultats en sortie.

1.1.5. L'affectation des déplacements

1.1.5.1. Principe de l'étape

L'étape d'affectation consiste à effectuer le chargement des matrices OD sur le réseau. Il existe plusieurs méthodes d'affectation. Toutefois, cette étape consiste en premier lieu à calculer les coûts ou le temps généralisé de chacun des itinéraires. Afin de réaliser ce calcul, il est nécessaire de définir des courbes débits vitesse (elles seront décrites en partie 1.1.5.3). C'est dans cette étape que sont effectués les calages nécessaires.

Avant de réaliser l'affectation, il est nécessaire de codifier le réseau sur lequel on souhaite affecter le trafic. Une réflexion sur le niveau de précision et de simplification de la description des réseaux et sur sa cohérence avec le niveau de précision du zonage doit donc être envisagée. Ce réseau doit également pouvoir assurer l'écoulement de tous les flux interzonaux selon des itinéraires réalistes. Les tronçons du réseau sont dotés d'attributs permettant de calculer le temps généralisé nécessaire pour parcourir les infrastructures que le lien représente.

Chaque section de route est caractérisée par une courbe de temps de parcours / vitesse paramétrée en fonction de ses principales caractéristiques. Les courbes débits vitesse ont pour intérêt de traduire l'incidence de la congestion sur le choix du trafic.

Les différentes matrices OD constituées dans les étapes précédentes sont ensuite affectées sur le réseau.

1.1.5.2. *Choix des modèles mathématiques et hypothèses du modèle*

1.1.5.2.1. Les méthodes d'affectation du trafic

Il existe de nombreuses approches d'affectation du trafic. Une synthèse détaillée de ces différentes approches est présentée dans (Bonnel, 2001). Une approche déterministe (principe de Wardrop) permet de répartir la demande conformément au premier principe de Wardrop : « Chaque usager choisit son itinéraire de manière à ce que son temps de parcours soit identique à ceux sur les autres itinéraires alternatifs, sachant que chaque changement d'itinéraire augmente son temps de parcours personnel ». Cela suppose que tous les individus ont connaissance de tous les itinéraires possibles et des conditions de trafic sur ces itinéraires.

Différentes procédures d'affectation existent. L'état d'équilibre peut être atteint par calcul itératif jusqu'à la convergence en retenant une affectation par tranches en tant que solution initiale : une partie des matrices est chargée, puis le temps de déplacement est recalculé (temps en charge). Cette méthode comporte différentes limites relatives à la convergence vers l'équilibre et au nombre de tranches choisies, celles-ci sont détaillées dans (Bonnel, 2001). La procédure d'affectation peut être simple c'est-à-dire qu'une seule matrice OD d'un seul système de transport individuel, par exemple VP est affectée ou alors multiclasse : plusieurs OD contenant la demande de déplacements pour un ou plusieurs systèmes de transport individuel, par exemple une matrice VP et une matrice PL, sont affectées simultanément. D'autres algorithmes permettent d'affecter la totalité de la matrice de demande (Bonnel, 2001).

1.1.5.3. Les courbes debit vitesse

Les courbes BPR, développées par le Bureau of Public Road (*Highway Capacity Manual*, 1965), sont traditionnellement utilisées dans les modèles de déplacement (Singh, 1999) (Figure 10).

La courbe BPR est exprimée comme suit :

$$t = t_0\left(1 + a\left(\frac{V}{V_{max} * c}\right)^b\right.$$

Où t est le temps de parcours sur un lien, t_0 est le temps de parcours à vide, V le volume de trafic sur le lien, V_{max} la capacité maximale du lien, $a, b\ et\ c$ sont des paramètres de calage.

La courbe BPR2 permet de distinguer la situation non saturée de la situation saturée. La saturation est ainsi définie par un volume de trafic chargé égal au volume maximum, c'est-à-dire à la capacité (Godinot & Bonnel, 2008).

Différentes limitations de ces courbes ont été relevées dans la littérature. (Singh, 1999) remarque que la BPR entraîne une surestimation de la vitesse pour une saturation >1 et sous-estime les volumes pour une saturation < 1. D'autre part, il est souligné dans (National Cooperative Highway Research Program, 1999) qu'il n'est pas pertinent que le temps de parcours de la BPR soit une fonction du temps de parcours à vide et donc de la longueur du lien lorsque la demande excède la capacité car dans ces conditions, celui-ci augmente avec la durée de la congestion (nombre de véhicules dans la file d'attente et taux de décharge de la voie).

D'autres fonctions peuvent être utilisées comme la fonction Akcelik (Figure 10). C'est une extension de la fonction de Davidson qui est basée sur la théorie des files d'attente (Akçelik, 1991). Ces courbes décomposent le temps de parcours sur le tronçon par la somme du temps de parcours aux intersections et du temps de parcours pour parcourir le tronçon.

$$t = t_0 + \frac{3600}{4}T\left[(x-1) + \sqrt{(x-1)^2 + \frac{16J * L^2 * x}{T^2}}\right]$$

Où

t = temps de parcours sur un lien (min), t_0= temps de parcours à vide (min), T= période d'analyse (h), x= degré de saturation, Q= capacité, J = paramètre de retard

Cette forme particulière de la courbe Akcelik est développée dans le HCM 2000 chapitre 30 (*Highway Capacity Manual*, 2000). Plusieurs travaux comme (Dowling, Singh, & Cheng, 1998) ou (Singh, 1999), montrent que ces courbes produisent de meilleurs résultats que les courbes BPR. (Dowling & Skabardonis, 1992) montrent que les courbes BPR ne fournissent pas des vitesses suffisamment précises pour les études environnementales et notamment de pollution. Il démontre que les courbes basées sur la théorie des files d'attente sont plus pertinentes. D'autre part, la comparaison des courbes BPR et Akcelik dans (Meead & Figliozzi, 2011) montre que les temps de parcours estimés par les courbes BPR sont plus élevés que ceux estimés par les courbes Akcelik excepté pour des taux de saturation proche de 1. Ces travaux montrent que les temps de parcours estimés par les courbes BPR pour des taux de saturation supérieurs à 1 augmentent de façon non linéaire alors qu'avec les courbes Akcelik, ils augmentent de façon linéaire.

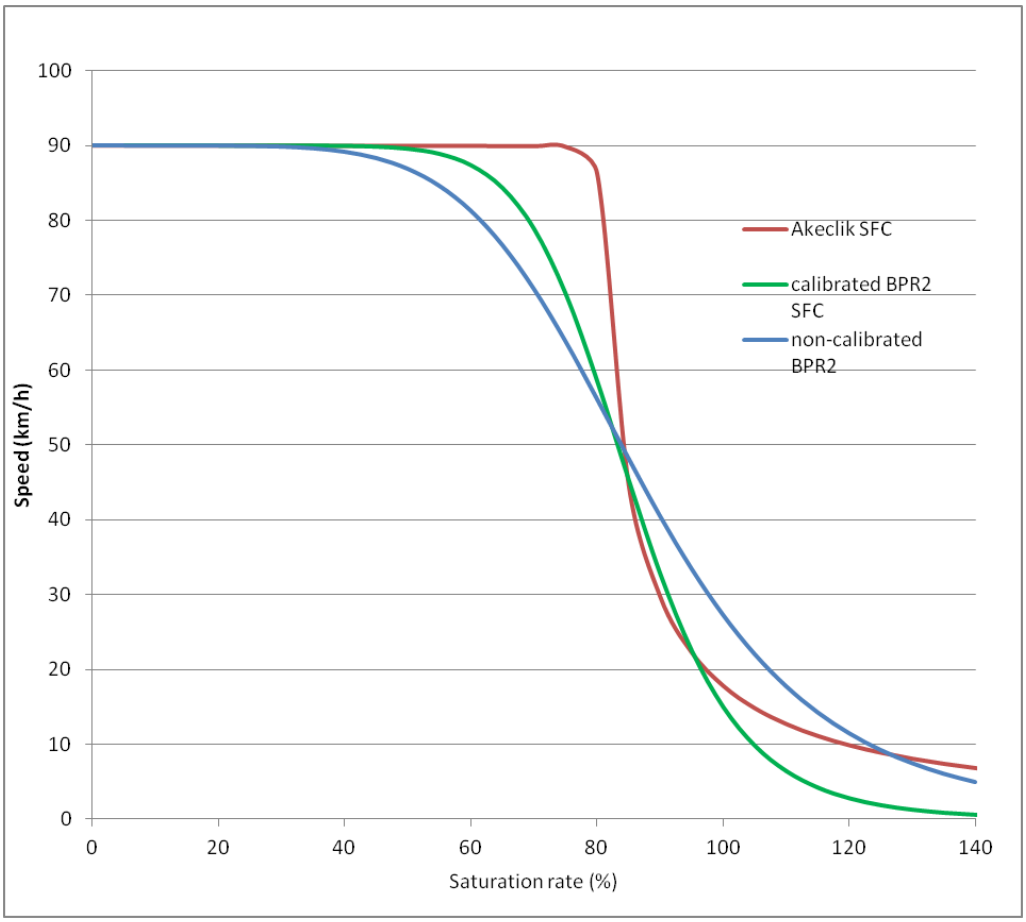


Figure 10 Comparaison des différentes formes de courbes débit/vitesse

D'autres courbes sont utilisées plus exceptionnellement dans les modèles de déplacements tels que les courbes linéaire, logarithme, DAVIS, polynominale…

Un modèle de type goulot d'étranglement a par ailleurs été développé dans (Arnott, De Palma, & Lindsey, 1993). Ce modèle a recours, en cas de saturation ; à des files d'attentes et modélise le fait que les usagers peuvent décaler leur heure de départ afin d'éviter la congestion. La schématisation à l'extrême du fonctionnement de l'infrastructure sous la forme d'un goulot permet d'étudier le problème de l'étalement de l'heure de pointe en fonction du nombre d'usagers. Par rapport au modèle

débit-vitesse, on abandonne donc le mode d'ajustement par l'intermédiaire du temps de parcours, et l'on introduit un mode d'ajustement plus lié au comportement des usagers, susceptibles d'adapter leur heure de départ pour éviter de circuler en période de trop forte congestion.

Le calage de ces courbes est très délicat. Il est nécessaire de disposer de données de comptage à des pas de temps relativement courts sur les différents types de voiries afin d'obtenir des courbes empiriques représentatives des pratiques du territoire et des voies (Godinot & Bonnel, 2008). En général, ce type de données n'est pas disponible pour l'ensemble des voies. Des comptages SIREDO sur autoroutes ou voies rapides peuvent être plus facilement réalisés car la vitesse peut être considérée comme uniforme sur des sections suffisamment longues.

1.1.5.4. Les problèmes liés à cette étape

Dans le modèle EvalPDU, le trafic intrazonal ainsi que le trafic des véhicules de transports en commun ne sont pas affectés sur le réseau. La gêne occasionnée par ces véhicules dans le flux total n'est donc pas prise en compte dans le calcul des temps généralisés. Par ailleurs, le trafic circulant en réalité sur les voies non modélisées circule, dans le modèle, sur le réseau modélisé.

En ce qui concerne les processus d'affectation, deux remarques peuvent être faites. D'une part, l'équilibre de Wardrop, utilisée dans la modélisation de Nantes suppose que : les usagers ont une connaissance parfaite des conditions sur le réseau, que chaque usager minimise son temps de parcours et que le temps de parcours d'un tronçon est le même pour tous. Ce qui est en réalité faux. (Morelli) souligne que ces principes sont en fait bien adaptés au milieu urbain et en période de pointe. D'autre part, une étude réalisée par (Nicolas, 1996) présente une analyse de sensibilité d'un modèle de déplacements par rapport aux types d'affectation (Wardrop et algorithme du plus court chemin). Il en résulte une variation de 10 à 12% sur les trafics obtenus. Mais selon l'auteur, ce type d'affectation n'a pas d'importance vu l'échelle globale (agglomération) à laquelle a lieu l'évaluation.

1.1.6. Calage

1.1.6.1. Principe

Le calage sert à reconstituer au mieux la situation observée. Il s'agit de rapprocher les volumes de trafics estimés par le modèle aux mesures obtenues sur les points de comptage. Cela consiste donc à déterminer les valeurs d'un certain nombre de paramètres pour permettre au modèle de s'adapter à la zone étudiée. Un paramètre est une grandeur qui intervient dans les formules intervenant dans le fonctionnement du modèle et qui est utilisée soit pour décrire le réseau modélisé (vitesse à vide, débit par type de voie...), soit pour ajuster les équations du modèle à la réalité (courbe débit vitesse…). Il est ensuite possible de mesurer la qualité du calage effectué en comparant les résultats réels des résultats simulés.

1.1.6.2. Choix des processus de calage

Différents indicateurs peuvent être analysés pour effectuer le calage (débit en nombre de véhicule par heure, vitesse moyenne, temps de parcours sur plusieurs tronçons, GEH…) et différents paramètres peuvent être ajustés.

1.1.6.3. Les problèmes liés à cette phase

Les processus de calage permettent d'ajuster des paramètres mais cela ne permet pas d'identifier les processus réels mis en œuvre. Si les corrections sont trop brutales, la sensibilité du modèle ainsi que les résultats du modèle dans des scénarios prospectifs seront faussés.

1.1.7. Les modèles d'affectation dynamique

Dans un modèle d'affectation dynamique, les paramètres et les entrées du modèle varient dans le temps. L'objectif de ces modèles est de modéliser comment l'écoulement du trafic modifie la répartition des usagers sur le réseau. Ils permettent donc de prendre en compte l'impact des variations des conditions de trafic sur le coût des itinéraires (le temps de parcours augmente lorsqu'il y a une congestion).

L'affectation en situation dynamique nécessite l'agencement de plusieurs modèles. Il est nécessaire d'avoir un modèle d'écoulement du trafic permettant de reproduire l'impact d'une matrice OD variable sur les temps de parcours des différents itinéraires. Les coûts calculés sont alors utilisés par le modèle d'affectation pour répartir le trafic sur le réseau. À l'inverse de la situation statique, il est nécessaire de recalculer les coûts des itinéraires dès que la demande ou l'affectation varie. Cette étape alourdit et ralentit fortement le calcul.

1.1.8. Les principaux intérêts et limites des modèles statiques pour l'évaluation environnementale des mesures

Ces modèles statiques sont bien appropriés pour l'étude du réseau d'une agglomération, à but prospectif : pour prévoir quel sera le volume de trafic devant emprunter une infrastructure en projet (rocade de contournement, nouveau pont, création d'une ligne de tram…), pour étudier la rentabilité et le dimensionnement ou pour définir des politiques de déplacements urbains.

Mais les modèles à 4 étapes ne peuvent souvent pas prendre en compte les caractéristiques des politiques de transports actuelles telles que la demande induite, les politiques d'utilisation du sol alternatives, les émissions des véhicules, le trafic PL et les déplacements non motorisés. Les modèles à 4 étapes ont des difficultés à représenter les changements à petite échelle, les effets dynamiques, et des changements dans les comportements de mobilité … Certaines politiques spécifiques sont identifiées comme difficiles à représenter dans un modèle à 4 étapes : le moment du déplacement, le comportement de déplacement suite à la mise en place de routes payantes, de programmes de télécommunication, le trafic de transit et le contrôle d'occupation du sol, les déplacements non motorisés, les volumes de trafic et la vitesse à un moment spécifique, les déplacements des PL et VUL et des véhicules commerciaux (Transportation Research Board of The National Academies, 2007).

Ces modèles ne peuvent pas représenter les phénomènes de congestion et donc d'arrêt et de redémarrage des véhicules induisant des quantités d'émissions de polluants plus importantes qu'une conduite en situation fluide. La non-représentation de ces phénomènes implique un manque d'information évident dans l'objectif d'évaluer l'impact environnemental de mesures de gestion des déplacements.

Ces modèles éprouvent d'autre part certaines difficultés à représenter les comportements de déplacements des individus et donc les changements d'itinéraires des usagers suite à la mise en place d'une mesure par exemple. Le modèle permet d'estimer les déplacements effectués par les individus d'une zone À à une zone B, mais ne permet pas de connaître l'influence des caractéristiques socio-démographiques sur les déplacements, ainsi que l'inter-connectivité avec le temps et l'espace (McNally & Rindt, 2007). De plus, selon (Virignia Department of Transportation, 2009), les modèles à quatre étapes présentent certaines difficultés à représenter le moment du déplacement, la sensibilité des déplacements par rapport à certaines politiques, telles que la tarification routière, les titres de

transport et les contrôles de l'utilisation du sol, les déplacements non-motorisés, les volumes de circulation et la vitesse à des moments spécifiques, les déplacements des véhicules de marchandises.

D'autres types de modèles permettent de pallier cette dernière limite. Les modèles basés sur les activités par exemple ont l'avantage d'analyser à un degré beaucoup plus fin les déplacements des individus, ce qui permet d'apercevoir les différences entre chaque ménage ou individu plutôt que par segment de population. Les analyses sont donc davantage précises. De plus, en connaissant les déplacements des ménages et des individus, il devient donc possible de déterminer les facteurs sociodémographiques influençant les décisions prises au niveau des déplacements, que ce soit l'âge, le sexe, la taille du ménage, la distance du centre ville. Les modèles d'activités soutiennent des analyses beaucoup plus près de la réalité permettant de mieux comprendre les comportements de mobilité des personnes. Il est possible avec ces types de modèles de voir les liens entre les activités principales et les activités secondaires dans la chaîne, ainsi que l'interaction avec différents facteurs, tels que l'heure de départ, la séquence des déplacements, le choix modal … (Valiquette, 2010). Mais ces modèles nécessitent de disposer de données plus fines que celles disponibles dans les EMD et les processus de calage de ces modèles sont bien plus complexes.

1.2. Les modèles dynamiques de trafic

Les modèles dynamiques cherchent à décrire les variations temporelles des états de trafic, ils représentent explicitement la congestion et décrivent les conditions d'écoulement dans lesquels s'effectuent les déplacements.

Le champ des modèles dynamiques est large. Les modèles ayant un intérêt particulier et des applications spécifiques dans l'évaluation environnementale des mesures de gestion des déplacements sont présentés.

1.2.1. Les modèles macroscopiques

Le principe général de ces modèles est que le trafic est traité comme un flux homogène et sans vide. Le comportement des véhicules est donc reproduit de manière collective. Les interactions entre les véhicules sont étudiées d'une manière globale en considérant que l'écoulement du trafic est similaire à l'écoulement d'un fluide dans un réseau. Les équations de Euler et Navier-Stokes de dynamique des fluides décrivant l'écoulement d'un fluide peuvent aussi décrire les mouvements des véhicules sur une route. Ces modèles ont été explicités dans les articles fondateurs de (Lighthill & Whitham, 1955) et (Richards, 1956).

Les trois variables macroscopiques fondamentales sont : le débit Q (nombre N de véhicules passant pendant une période Δt en un point x, rapporté à la durée de la période), la concentration K (nombre M de véhicules situés entre x et $x + \Delta t$ à un instant t, rapporté à la longueur de la voie) et la vitesse V.

Elles sont reliées par des lois d'écoulement dont l'équation de conservation :

$$\frac{\partial K}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

Elle exprime le fait que le nombre de véhicules présents dans une section à un instant $t + dt$ est égal au nombre présents à l'instant t, plus le nombre de véhicules entré pendant dt, moins le nombre de véhicules sortis pendant dt

Le diagramme fondamental traduit la relation existant à l'équilibre entre le débit et la concentration (Figure 11).

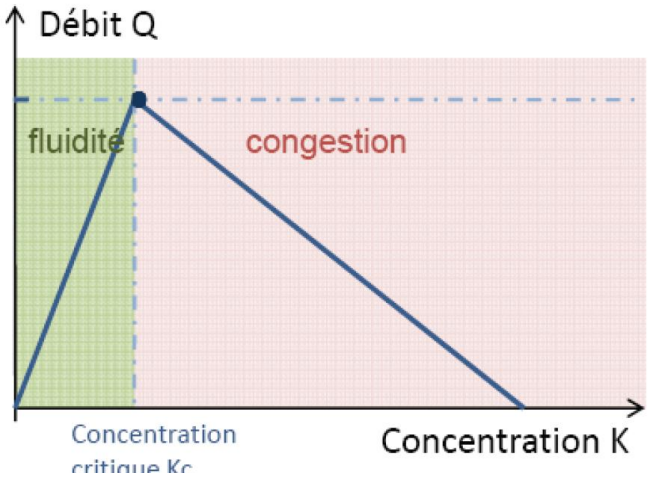


Figure 11 Exemple de digramme fondamental issu de (CERTU, 2010)

Les modèles de 1er ordre ou modèle LWR considère que le trafic est toujours à l'équilibre, i.e. vérifie le diagramme fondamental. Les transitions sont décrites comme des passages instantanés d'un état d'équilibre à un autre.

Les hypothèses du modèle de base (véhicules identiques, pas de contrainte sur les capacités d'accélération ou de décélération, pas de distinction des voies, pas de gestion des conflits aux intersections…) peuvent limiter sa pertinence en milieu urbain, mais de nombreuses extensions ont été développées ces dix dernières années comme la prise en compte : de l'accélération bornée pour améliorer la reproduction de la cinématique des véhicules, l'identification de véhicules à comportement spécifique (véhicules de transport en commun par exemple) et plus généralement la prise en compte des classes des véhicules, la gestion différenciée des voies et la modélisation des changements de voie, la représentation du comportement du trafic aux intersections, l'utilisation conjointe sur un réseau des représentations Eulérienne (représentation de la vitesse) et Lagrangienne (représentation des trajectoires).

Des modèles plus compliqués ont été proposés pour essayer de reproduire les phases transitoires et les états hors équilibre. Une grande variété de modèles de ce type existe sous l'appellation modèle du 2ème ordre.

Les avantages des modèles du 2ème ordre sont qu'ils modélisent l'apparition et l'évolution de phénomènes transitoires qui apparaissent dans la réalité lorsque le trafic subit des variations de son état. Ces variations peuvent se traduire par l'apparition de perturbations qui ne sont pas forcément liées à une saturation des capacités de la voie : formation d'ondes d'arrêt et de redémarrage ou regroupement de véhicules en paquets, qui se propagent ensuite à l'intérieur du flux. Le modèle de 1er ordre ne peut pas modéliser ces phénomènes car pour lui, une variation des conditions de trafic entraîne juste un repositionnement d'un état d'équilibre vers un autre, sans effets complémentaires. Par contre, il n'existe pas d'extension pour la modélisation des phases transitoires d'accélération et de décélération, ces modèles sont complexes et difficiles à maîtriser. De plus, ils ne permettent pas de modéliser les discontinuités des caractéristiques du réseau. En effet, la formulation de ces modèles ne tient pas compte de la possible dépendance, en x ou en t, de la vitesse d'équilibre. Or, la modélisation des discontinuités est très importante en milieu urbain où les variations du nombre de voies sont nombreuses et où il peut être utile d'étudier l'impact d'obstacles sur la chaussée (chantiers, véhicules de livraison,…).

Les logiciels CORFLO ou METACOR par exemple sont basés sur un modèle macroscopique.

1.2.2. Les modèles microscopiques

Le principe général des modèles microscopiques est que les véhicules sont individualisés. Ils considèrent les interactions individuelles des véhicules avec les autres véhicules et avec le réseau. L'écoulement de ces véhicules est défini par deux modèles principaux : une loi de poursuite, décrivant l'avancée du véhicule en fonction des véhicules l'environnant sur sa voie, et une autre modélisation destinée à représenter les changements de voie ou dépassements (d'autres modèles spécifiques existent dans la modélisation microscopique de l'écoulement pour préciser comment sont gérés la génération des véhicules, le fonctionnement de diverses intersections ou encore la réponse des conducteurs aux systèmes de régulation du trafic tels qu'un feu tricolore ou un régulation des vitesses). Ces modèles permettent donc de calculer les positions successives des véhicules en fonction du comportement des véhicules autour d'eux, leurs états cinématiques ainsi que leurs accélérations.

Les lois de poursuite contenues dans les modèles microscopiques sont fondées sur le principe suivant : les conducteurs réagissent, dans leurs actions de conduite, aux stimuli générés par le ou les véhicule(s) environnant(s). Cette réaction se fait avec un certain décalage temporel, correspondant au temps de réaction des conducteurs, et selon une certaine sensibilité à la stimulation.

Un modèle qui utilise la loi de poursuite peut être formulé d'une manière déterministe ou stochastique, suivant qu'il modélise la réaction du conducteur par une variable à valeur constante ou par une variable aléatoire.

La résolution analytique des modèles microscopiques est très difficile à cause de la complexité des équations et du temps de décalage induit par le temps de réaction des conducteurs. Les modèles de ce type font donc essentiellement l'objet d'une résolution numérique par discrétisation temporelle. A chaque pas de temps, l'accélération, la vitesse et la position de chaque véhicule sont calculées, après intégration des stratégies de direction (changement de files pour atteindre une direction donnée, dépassements…).

Les modèles microscopiques à loi comportementale : Ils étudient localement le processus d'interactions entre deux véhicules successifs. La trajectoire de chaque véhicule est décrite par un modèle de poursuite (plusieurs modes opératoires existent suivant les auteurs). Les principes de ce modèle sont, pour chaque véhicule (CERTU, Décembre 2000):

- Lorsque sa distance au véhicule qui le précède est supérieure à une certaine valeur, il cherche à atteindre une vitesse maximale dite vitesse désirée (l'accélération est alors maximale ou nulle selon la vitesse) si l'infrastructure le permet ;

- En deçà de cette valeur, son accélération sera fonction de différentes variables : la différence des vitesses et la distance entre les véhicules, la vitesse du véhicule, etc.

Par ailleurs, toute modification de l'accélération est affectée d'un temps de réaction. Ce temps de réaction, la vitesse désirée et sa distribution, les bornes limitant l'accélération et quelques autres coefficients d'ajustement constituent les paramètres du modèle.

À la loi de poursuite est ajoutée : un modèle de génération stochastique (qui permet d'introduire des véhicules, dont on connait certaines caractéristiques dont la vitesse, sur le réseau, selon des lois probabilistes), un modèle de dépassement (qui permet de gérer les dépassements s'il y a des véhicules de natures différentes, en fonction du nombre de voies et du trafic sur la voie en sens inverse), un modèle de contrôle (qui simule la réponse des véhicules à des systèmes de régulation comme un feu tricolore) et un modèle d'intersection (qui gère les conflits et les priorités à l'intérieur des carrefours).

Ces modèles fournissent, à chaque instant, la position, la vitesse et l'accélération des véhicules présents sur le réseau.

L'existence d'une série d'aspects stochastiques dans les modèles d'écoulement microscopiques rend nécessairement non représentatifs les résultats obtenus à partir d'un seul calcul, car ils ne représentent qu'une réalisation unique d'un phénomène aléatoire. La prise en compte de la

distribution d'une variable autour d'une valeur moyenne (aléa) ne peut être correctement faite que si un nombre significatif de valeurs est tiré au moyen d'un générateur de nombres pseudo-aléatoires.

Les modèles microscopiques à loi macroscopique : c'est une résolution Lagrangienne des modèles macroscopiques. Le comportement de ces modèles est le même que pour les modèles macroscopiques. Il est en effet dicté par la loi de comportement utilisée et non par le mode de résolution.

Les logiciels VISSIM, AIMSUN et PARAMICS par exemple sont basés sur des modèles microscopiques.

1.2.3. Les modèles mésoscopiques

Ces modèles constituent un intermédiaire entre les modèles d'approche macroscopique et microscopique. Les entités du trafic sont décrites à un niveau de détails suffisamment fin tout en reproduisant leur comportement avec des lois agrégées.

Deux représentations différentes des véhicules existent :

- Soit par paquets de véhicules, un paquet agit comme une seule entité. La vitesse des paquets sur chaque tronçon de voies est dérivée du diagramme fondamental.
- Soit par véhicules individuels, leurs positions successives sont calculées en fonction du comportement du flux autour d'eux.

Ces modèles fournissent des trajectoires très simplifiées des véhicules ou des paquets de véhicules (instants d'entrée et de sortie des tronçons, temps de parcours entre deux réseaux).

Les changements de voie, les phases de décélération et d'accélération ne sont pas prises en compte.

Les logiciels CONTRAM ou DYNASMART par exemple sont basés sur des modèles mésoscopiques.

1.2.4. Les modèles dynamiques de zone

Les modèles dynamiques de zone représentent explicitement la congestion en décrivant l'évolution temporelle des états de trafic tout en simplifiant fortement la représentation du réseau (agrégation spatiale) ce qui permet de travailler à l'échelle de l'agglomération. Ces modèles sont basés sur le modèle de Daganzo (Daganzo, 2007; Daganzo & Geroliminis, 2008) qui produit des déplacements par unité de temps sur le réseau. Il est ensuite possible d'en déduire les vitesses moyennes et le degré de congestion de l'infrastructure en fonction du temps. Dans le cas d'une modélisation avec découpage de l'agglomération en différentes zones, les flux interzones peuvent également être évalués. Ils permettent aussi d'évaluer le niveau de congestion. La modélisation d'une agglomération entière dans un but d'évaluation et de simulation de politique de transport à l'échelle urbaine peut être envisagée. Enfin, en définissant différentes zones, la dynamique du modèle permet le couplage avec des modèles d'émission (impact réel de la congestion sur les vitesses des véhicules et donc sur les émissions).

Par contre, l'application de ce type de modèle est encore dans le domaine de la recherche, il n'y a donc pas d'implémentation logicielle commerciale.

1.2.5. Les principaux intérêts et limites des modèles de trafic dynamique pour l'évaluation environnementale des mesures

Ces modèles fonctionnent à petite échelle. Ils sont utilisés dans le cadre de la gestion et de l'exploitation des réseaux et sont particulièrement adaptés pour évaluer des stratégies de régulation dynamique.

Les modèles dynamiques de zones sont pertinents pour des stratégies de régulation ayant un impact diffus important au niveau d'une agglomération (péage urbain, régulation d'accès par zones,…). Les modèles de 2ème ordre sont mieux adaptés pour prévoir l'évolution de phénomènes se produisant sur les autoroutes ou sur les voies rapides urbaines que pour modéliser la cinématique des véhicules en milieu urbain.

1.3. Conclusion

Les modèles statiques sont les plus largement utilisés par les bureaux d'études, CETE, agences d'urbanisme… pour les évaluations environnementales des mesures à l'échelle de l'agglomération (Bonnel, 2001). Ils sont en effet adaptés à l'étude de réseaux sur des échelles relativement larges et permettent de prendre en compte la localisation des activités (habitats, emplois, etc.), l'évolution des réseaux, l'évolution démographique et prospective, etc. Ces modèles n'ont cependant pas comme objectif premier (et ne devraient sans doute pas être utilisés à cet effet) d'évaluer finement les conditions de trafic dans la rue. Ils présentent également des limites quant à la représentation des comportements, la prise en compte du trafic de marchandises, etc.

Les modèles dynamiques de trafic seraient plus appropriés pour une simulation détaillée des conditions de circulation à des échelles fines. Leur mise en œuvre (données d'entrée, validation de terrain, calibration…) est cependant plus complexe. Utilisables sur des périmètres plus restreints et pour l'étude de la gestion du trafic, ils ne permettent par contre pas d'appréhender des évolutions lourdes (mobilités, démographie, etc.) et sont difficilement applicables à l'échelle d'une agglomération.

Les émissions de polluants dépendant fortement du volume de trafic et des conditions de trafic, la qualité de la reproductibilité du trafic dans les modèles est un élément important à intégrer dans notre réflexion sur la chaîne de modélisation. La deuxième partie de ce chapitre permet d'identifier la qualité nécessaire des indicateurs de trafic pour chaque type de modèle d'émissions.

2. Les émissions de polluants issues du trafic

2.1. Les polluants

Le trafic automobile contribue à la pollution atmosphérique à la fois par l'émission directe de polluants liée à l'utilisation des véhicules (polluants primaires), et par les polluants dérivés ou secondaires formés par réaction chimique dans l'atmosphère (comme l'ozone par exemple).

Les polluants se classent en deux grandes catégories : les particules ou aérosols (émises à l'échappement ou issues de l'usure des véhicules et de la chaussée, etc.), et les polluants gazeux (échappement et évaporation des carburants).

Ces polluants ont différentes implications dans la pollution atmosphérique : contribution à l'effet de serre (CO_2, CH_4, N_2O, certains COV, particules), à la pollution photochimique (COV, NO_x, CO), acidification de l'eau et des pluies (SO_2, NO_x), impacts sur la santé des populations (PM, SO_2, CO, COV, HAP, dioxines et furanes, métaux), impacts sur la faune (idem santé) et la flore (NO_x, NH_3), obscurcissements (particules), etc. (Goger, 2006).

On trouvera ci-après les principaux polluants dus au trafic routier, leur provenance, leur toxicité, leur réglementation, leur évolution jusqu'en 2010 ainsi que la part d'émissions du secteur des transports routiers (Tableau 9).

Polluants		Provenance	Toxicité	réglementation	Evolution des émissions de polluants (source CITEPA[7]) en 2010	part du secteur des transports routiers dans les émissions totales en France
Oxydes de carbone	CO_2	produit de la combustion des carburants fossiles	gaz peu toxique à faible dose / effet de serre	non réglementé	forte hausse depuis 1960 (+481% entre 1960 et 2010 et +9% entre 1990 et 2010) à cause de l'augmentation du trafic routier (+717% entre 1960 et 2010 et +31% entre 1990 et 2010) entre 2001 et 2004, stabilisation puis légère diminution entre 2005 et 2007 (-1,8% sur cette période), décroissance encore plus marquée en 2008 (-5% par rapport à 2007) suite à la baisse de la consommation de carburant du fait : du recours accru aux biocarburants, de la mise en place de la prime à la casse qui a permis d'accélérer le renouvellement du parc automobile par des véhicules moins énergivores, de la flambée des prix du carburant au cours du premier trimestre 2008, léger regain en 2010 dû à la reprise de l'activité économique	32%
	CO	produit d'une combustion incomplète sous certaines conditions de température et pression		réglementé	baisse progressive à cause des normes environnementales imposées sur les véhicules routiers au début des années 1970 puis par la mise en place de pots catalytiques à compter de 1993 pour les véhicules essence et 1997 pour les véhicules diésel	17% dont 7,6% pour les voitures particulières essence catalysées et 2,9% pour les deux roues
Oxydes et composés de l'azote	NO_x	oxydation de l'azote de l'air à des températures de combustion élevées (les moteurs diésel en rejettent deux fois plus que les moteurs à essence catalysés)	toxique	réglementé	baisse depuis 1993 due au renouvellement du parc de véhicules et l'équipement progressif des véhicules en pots catalytiques	55%
	N2O		gaz à effet de serre	non réglementé	augmentation depuis 1990 (+38%) suite à l'induction des pots catalytiques, baisse en 2009 du fait de la diminution du taux de soufre dans les carburants, légère hausse en 2010 (+5%) à cause de l'augmentation du trafic	2%

[7] http://www.citepa.org/fr/

	NH3		faible impact sanitaire	non réglementé	niveau très faible mais a augmenté entre 1993 et 2001 suite à l'introduction des premiers véhicules catalysés en 1993. La baisse observée depuis 2002 dans ce secteur s'explique par l'introduction dans le parc roulant (véhicules particuliers et véhicules utilitaires légers) de véhicules de type Euro 3 et Euro 4 depuis cette date	1%
Composés soufrés	SO2	lié à la concentration en soufre dans le carburant diesel et dans une moindre mesure dans les essences		réglementé	divisé par 20 depuis les années 50, baisse du taux de soufre dans le gasoil depuis 1996 avec la baisse de la teneur en soufre de l'essence et du diésel	émissions induites par le trafic négligeables
Composés organiques volatils	COVNM	résultat du processus de combustion imparfaite et de l'évaporation du carburant (réservoir ou au niveau du moteur)		réglementé	baisse de -90% entre 1988 et 2010 suite principalement à l'équipement des véhicules essence en pots catalytiques depuis 1993 qui deviennent de plus en plus performants mais aussi à la part croissante de véhicules diésel moins émetteurs de COVNM	13%
	Benzène	polluant émis majoritairement par les véhicules à motorisation essence	cancérigène	réglementé		
Hydrocarbures aromatiques	HAP		très toxiques / cancérigènes	non réglementé	augmentation continue depuis 1990 à cause de la croissance du trafic et de la diésélisation du parc	31%
Dioxines et furanes				non réglementé	diminution depuis 1990	2%
Particules	PM	combustion, nucléation secondaire, abrasion (pneumatiques, freins, chaussée, etc.), remise en suspension		PM_{10} : réglementé $PM_{2,5}$: non réglementé	Les émissions liées à l'abrasion des freins et des pneus évoluent comme le trafic routier depuis 1990 alors que les émissions liées à l'échappement sont en régression depuis 1994 suite à la mise en œuvre des différentes normes limitant les émissions de particules	9%
Métaux lourds	Cu	issus des carburants et lubrifiants (additifs), de l'usure des pneumatiques, garnitures de frein, disques d'embrayage et autres pièces métalliques, de l'infrastructure routière		réglementé	hausse depuis 1990 due à l'accroissement du trafic	24%

	Pb	consommation d'une partie de l'huile dans les moteurs contenant des traces de plomb		réglementé	très forte baisse depuis 1990	2%
	Zn	id		non réglementé	baisse depuis 1990	32%
	Cd			réglementé	faibles émissions totales, stagnation	13,50%

Tableau 9 Caractéristiques des principaux polluants émis par le secteur du transport routier

2.2. Approches de calcul des émissions de polluants

Les polluants induits par le trafic routier peuvent être classés selon leur mode de calcul dans les modèles d'émission.

De nombreux polluants ne sont mesurés et connus que sous forme d'« agrégats » (NO_x regroupant NO et NO_2, HC totaux, COV, particules). La quantification d'espèces individuelles (NO_2 par exemple ou certains COV toxiques, ou particules selon leur taille ou leurs propriétés) dépend donc de relations ou de spéciations établies à partir de travaux expérimentaux moins courants, et qui ne permettent pas d'envisager les mêmes niveaux de précision ou de fiabilité des estimations.

Les approches européennes distinguent quatre groupes de polluants :

- Groupe 1 : les polluants pour lesquels des fonctions d'émission ont été établies à partir de nombreuses mesures sur banc d'essai. Les émissions sont donc approchées en tenant compte des conditions de circulation (le plus souvent la vitesse moyenne) et/ou de fonctionnement du moteur (régime et couple moteur pour les véhicules lourds, température, voire charge). Ce groupe inclut notamment les COV ou HC totaux, et également la consommation de carburant, dont seront dérivées les émissions de polluants des autres groupes (Tableau 10).
- Groupe 2 : les polluants pour lesquels peu de données existent (métaux) ou pour lesquels la conversion est immédiate (SO_2, CO_2). Les émissions sont estimées à partir de la consommation de carburant. Ce sont notamment tous les métaux (issus des carburants, des lubrifiants et de l'usure interne du moteur), ainsi que le contenu en CO_2 (Tableau 11).
- Groupe 3 : les polluants pour lesquels peu de données existent, et pour lesquels les émissions ne sont généralement pas connues selon les conditions de fonctionnement ou de circulation, mais seulement par grande famille de véhicules et de carburants (Tableau 12).
- Groupe 4 : les COV individuels ou par famille, qui sont estimés selon une spéciation i.e. leur proportion respective dans l'ensemble des COV non méthaniques. Bien que les COV totaux soient approchés selon les conditions de fonctionnement et les catégories détaillées des véhicules, les composés individuels ou familles de COV ne devraient pas être évalués de manière aussi détaillée car on dispose de très peu de spéciations (par grande famille de véhicule et de carburant, sans distinction des conditions opératoires) (Tableau 13).

Pollutant	**Equivalent**
Carbon monoxide (CO)	Given as CO
Nitrogen oxides (NO_x: NO and NO_2)	Given as NO_2 equivalent
Volatile organic compounds (VOCs)	Given as $CH_{1.85}$ equivalent (also given as HC in emission standards)
Methane (CH_4)	Given as CH_4
Non-methane VOCs (NMVOCs)	Given as VOCs (or HC) minus CH_4
Nitrous oxide (N_2O)	Given as N_2O
Ammonia (NH_3)	Given as NH_3
Particulate matter (PM)	The mass of particles collected on a fliter kept leblow 52°C during diluted exhaust sampling. This corresponds to $PM_{2.5}$. Coarse exhaust PM (i.e.>2.5 µm diameter) is considered to be negligible, hence PM=$PM_{2.5}$.
PM number and surface area	Given as particle number and particle active surface per kilometre, respectively

Tableau 10 Polluants connus selon les vitesses et conditions de fonctionnement (groupe 1)

Pollutant	**Equivalent**
Carbon dioxide (CO_2)	Given as CO_2
Sulphur dioxide (SO_2)	Given as SO_2
Lead (Pb)	Given as Pb
Cadmium (Cd)	Given as Cd
Chromium (Cr)	Given as Cr
Copper (Cu)	Given as Cu
Nickel (Ni)	Given as Ni
Selenium (Se)	Given as Se
Zinc (Zn)	Given as Zn

Tableau 11 Polluants calculés à partir des consommations de carburant (groupe 2)

Pollutant	**Equivalent**
Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and persistent organic pollutants (POPs)	Detailed speciation, including indeno(1,2,3-cd) purene, benzo(k)fluoranthene, benzo(b)fluoranthene, benzo(g,h,i)perylene, fluoranthene, benzo(a)pyrene
Polychlorinated dibenzo dioxins (PCDDs) and polychlorinated dibenzo furans (PCDFs)	Given as dioxins and furans respectively

Tableau 12 Polluants HAP et POP donnés sous forme de spéciations (groupe 3)

Pollutant	**Equivalent**
Alkanes (C_nH_{2n+2}):	Given in alkanes speciation
Alkenes (C_nH_{2n}):	Given in alkenes speciation
Alkynes (C_nH_{2n-2}):	Given in alkynes speciation
Aldehydes ($C_nH_{2n}O$)	Given in aldehydes speciation
Ketones ($C_nH_{2n}O$)	Given in ketones speciation
Cycloalkanes (C_nH_{2n})	Given as cycloalkanes
Aromatic compounds	Given in aromatics speciation

Tableau 13 Polluants COV donnés sous forme de spéciation (composition) (groupe 4)

2.3. Les phénomènes d'émissions

On distinguera quatre types d'émissions de polluants dans les transports routiers : les émissions à l'échappement (ou liées à la combustion), les émissions par évaporation de carburant, les émissions par usure et abrasion, et les émissions par remise en suspension de particules.

2.3.1. Émissions à l'échappement ou liées à la combustion

Les émissions à chaud (Joumard & Lambert, 1991) sont produites par les véhicules en conditions normales de fonctionnement et sont principalement liées à la combustion et aux phénomènes chimiques qui en découlent. Les émissions à chaud sont la principale contribution des NO_x, du CO_2 et des PM (Lacour, 2003), quoique pour ces dernières, le phénomène de resuspension peut être prédominant (cf. émissions non-échappement). La plupart des polluants sont émis à chaud : CH_4, N_2O, NH_3, SO_2, HAP et POP (polluants organiques persistants). Les émissions à chaud sont principalement liées aux technologies, motorisations, dispositifs de dépollution, et surtout des conditions de circulation (niveau et dynamique de la vitesse), d'utilisation du véhicule (charge, trajets), et de fonctionnement du moteur (liées également au comportement de conduite).

On distingue généralement les surémissions à froid (ou de démarrage), liées à la mise en température du moteur (et des dispositifs de dépollution) après le démarrage et jusqu'à sa température de fonctionnement normal (généralement autour de 80°C), ou plus simplement jusqu'à stabilisation des émissions au niveau des émissions dites à chaud. En général, les surémissions à froid dépendent de la technologie de véhicule et des dispositifs de dépollution, de la vitesse, de la météorologie (principalement la température), de la distance parcourue jusqu'aux conditions normales, et du temps d'arrêt du véhicule (Favez, Weilenmann, & Stilli, 2009) (Weilenmann, Favez, & Alvarez, 2009). Les surémissions de démarrage concernent principalement le CO, les PM et les COV (certains COV étant émis quasiment uniquement lors de cette période). Alors que les surémissions à froid peuvent être négligeables sur de longs trajets routiers ou autoroutiers, elles peuvent être majoritaires sur de courts trajets urbains.

On trouvera également à l'échappement les métaux lourds contenus dans le carburant et le lubrifiant, et produits par usure du moteur et du catalyseur.

Selon les outils de calcul, la climatisation automobile, les équipements électriques, la charge à bord du véhicule sont quelquefois considérés (facteurs de surémissions et de surconsommation).

2.3.2. Émissions par évaporation de carburant

Ces émissions concernent les rejets dus à l'évaporation du carburant au niveau du réservoir ou par les différents organes du moteur. On les décompose (et les analyse) en trois phases : 1- lors de la circulation du véhicule (driving losses), 2- après un trajet le moteur étant alors encore chaud (hot losses) et 3- lors du stationnement, l'évaporation étant alors liée au cycle diurne d'évolution de la température extérieure (diurnal losses) (Joumard & Lambert, 1991). Les polluants concernés sont les COV (certaines familles les plus volatiles et naturellement présentes dans le carburant) et le benzène. Le Tableau 14 donne un exemple de répartition des émissions par échappement et par évaporation. Les émissions par évaporation représentent un volume relativement limité et très faible sur le seul benzène. Les évaporations de carburant ne représentent en conséquence pas un réel enjeu de pollution de l'air au niveau d'une agglomération.

	COV (%)	Benzène (%)
Echappement	90,7	97,8
Evaporation	9,3	2,2

Tableau 14 Estimation des émissions par évaporation (COV, benzène seulement) (M André, et al., 2012)

2.3.3. Les émissions par usure et abrasion

Les émissions par usure et abrasion sont principalement des émissions de particules et de métaux lourds.

2.3.3.1. Émissions liées aux équipements automobiles

Les émissions liées à l'utilisation des freins du véhicule dépendent des matériaux utilisés ainsi que du style de conduite. D'après (Thorpe & Harrison, 2008), les freins sont composés de fibres (métaux, carbone, verre, etc. entre 6 et 35% en masse), d'abrasifs (oxydes d'aluminium et de fer, quartz, zircon, autour des 10% en masse), de lubrifiants (graphite, sulfures métalliques, entre 5 et 29% en masse), de charge (baryte, calcite, mica, entre 15 et 70% en masse) et de liants (phénoplastes, entre 20 et 40% en masse). Au final, les principaux rejets dus au freins sont le Cuivre et le Zinc (Sternbeck, Sjödin, & Andreasson, 2002).

2.3.3.2. Émissions liées aux pneumatiques

Les pneus des véhicules légers sont composés à 75% de styrène-butadiène, à 15% de caoutchouc naturel et à 10% de polybutadiène (EMEP/EEA, 2009b). D'un point de vue des composants chimiques, on a des hydrocarbures sous forme de gomme (47-55%), du carbone (22-30%), des huiles d'hydrocarbures (5%) des résines (5%), des activateurs (3-5%) et des additifs (2-10%) (Thorpe & Harrison, 2008). L'usure des pneus dépend du style de conduite, de la position des pneus, de la configuration de la traction, des propriétés du matériau, de l'usure préalable du pneu et de la route, de l'âge des pneus, de l'âge de la route et du temps.

2.3.3.3. Émissions liées à l'infrastructure routière

Les émissions par abrasion de l'infrastructure sont liées au revêtement, composé en grande majorité d'asphalte (plus de 95%), et dont le liant principal est le bitume (entre 500 et 50000 composants). On a alors des HAP, de l'oxygène, de l'azote, du soufre et quelques métaux. Dans cet asphalte, les composés aromatiques tels que le benzène et les furanes représentent entre 40% et 60% de la composition.

On pourrait également citer l'usure d'autres éléments de l'infrastructure comme les glissières de sécurité. Les émissions liées à l'infrastructure sont sans doute relativement mal connues, mais sont surtout omises par les outils traditionnels de calcul d'émission.

2.3.4. Émissions par remise en suspension des particules

La resuspension est la remise en état de volatilité de particules préalablement déposées sur le sol sous forme de poussières. Cette resuspension représente une bonne part des émissions de particules dans le trafic routier, entre 5 et 50% selon les études et les conditions météorologiques (Lenschow, et al., 2001) (Omstedt, Bringfelt, & Johansson, 2005) (Patra, et al., 2008).

On notera que la resuspension des particules est relativement mal connue, mais surtout qu'elle est généralement négligée par les outils de calcul d'émission.

2.3.5. Autres émissions

D'autres émissions peuvent être considérées :

- les émissions par fuite de fluide frigorigène (climatisation), par fuite d'autres fluides,
- les émissions par évaporation de carburant aux stations de remplissage,
- les émissions par les matériaux (plastiques, etc.),
- les émissions indirectes liées à la production d'énergie (notamment lorsqu'il s'agit d'établir des comparaisons entre des motorisations électriques ou hybrides et thermiques ou entre carburants et biocarburants)
- les émissions liées au cycle de vie des véhicules et des infrastructures.

Ces émissions sont rarement évaluées ni disponibles au travers des modèles classiques.

2.3.6. Conclusion

On observe une très grande diversité de polluants atmosphériques émis par les transports routiers, et qui sont produits au travers de différents phénomènes.

Ces phénomènes ne sont pas tous également connus, et émergent, actuellement, des enjeux de recherche autour de la remise en suspension de particules, de la caractérisation et spéciation de familles de polluants afin d'évaluer certains composés individuels à impact avéré, de l'identification de polluants nouveaux liés à l'évolution des carburants, aux technologies de plus en plus complexes de dépollution et de motorisation.

L'état des connaissances et les outils de calcul sont certainement en décalage par rapport à ces enjeux, et des travaux expérimentaux de caractérisation fine des émissions sont certainement nécessaires.

3. Les modèles de calcul des émissions de polluants du trafic routier

Différentes revues des modèles d'émissions peuvent être trouvées dans (Boulter, McCrae, & Barlow, 2007), (Smit, 2006), etc.. Sept classes de modèles peuvent être distinguées selon leurs principes, les données d'entrée, les échelles spatiales et temporelles et les polluants considérés :

- Les modèles basés sur les consommations de carburant : AGO (1998) et IPCC (1996) utilisent des données de consommations (vente de carburant par exemple) et les catégories de véhicules. De tels modèles ne sont utilisés qu'à large échelle (nationale par exemple),

- Les modèles utilisant des facteurs d'émission agrégés (NAEI par exemple) afin de représenter une catégorie de véhicules et des conditions types de conduite pour des inventaires régionaux et nationaux. Les facteurs d'émissions (en masse de polluants par distance parcourue ou par unité de consommation) sont établis à partir de mesures effectuées sur des véhicules.

- Les modèles d'émissions utilisant des fonctions de la vitesse moyenne (pour les émissions à l'échappement). Ces modèles (COPERT, MOBILE, EMFAC, DMRB), reposent sur des mesures d'émissions par catégories détaillées de véhicule et selon des cycles de conduite représentatifs des conditions de circulation et décrits par leur vitesse moyenne. Ces modèles sont les plus exhaustifs (émissions à l'échappement à chaud et à froid, par évaporation et certains phénomènes d'usure) et couvrent la plupart des polluants d'intérêt.

- Les modèles s'appuyant sur une description plus fine de l'état du trafic (HBEFA, ARTEMIS) utilisent des facteurs d'émissions « discrets » pour des situations de trafic prédéfinies (e.g. stop-and-go, saturated, heavy, free flow). Ils permettent d'estimer un nombre assez conséquent de polluants réglementés et non réglementés, émis à l'échappement à chaud et à froid ainsi que par évaporation du carburant. Ces outils ont été développés pour des échelles locales telles que la rue (André, Fantozzi, & Adra, 2006), mais requièrent la connaissance des trafics parcourus selon les situations détaillées.

- Les modèles s'appuyant sur les variables caractéristiques du trafic issues de modèles de trafic (e.g., TEE, Matzoros) telles que la vitesse moyenne, le débit, la longueur des files d'attente et la programmation des feux. Ces modèles utilisent une correction de la vitesse moyenne pour représenter les effets du trafic sur les émissions de polluants (Smit, 2006).

- Les modèles avec description fine des conditions de circulation (MESURE, VERSIT+) sont basés sur des tests réalisés sur différents cycles de conduite, caractérisés par des paramètres détaillés décrivant les conditions de circulation (la vitesse moyenne, le nombre d'arrêts au km, l'accélération positive moyenne, etc.). Pour chaque polluant et catégorie de véhicules, un modèle de régression calcule valeurs d'émissions en fonction des caractéristiques de conduite. Ces modèles requièrent des informations détaillées sur la cinématique des véhicules (vitesse instantanées, accélération).

- Les modèles modaux et instantanés (PHEM, MODEM, CMEM, VETESS) représentent explicitement les émissions des véhicules par phases de fonctionnement. Les modèles modaux considèrent des modes triviaux (croisière, accélération, décélération, ralenti), et l'émission d'une catégorie de véhicule est calculée selon les durées passées dans chacun des modes. Les modèles instantanés prennent en compte la puissance du moteur, la vitesse et l'accélération à chaque seconde, mais ne calculent généralement que les émissions à chaud. Ils peuvent être couplés avec des modèles de trafic dynamiques.

Les principales caractéristiques des différents types de modèles sont synthétisées dans le Tableau 15.

Modèles	Echelle d'application	Données d'entrée	Sorties et application	Logiciels
Basés sur les consommations de carburant	Pays	Consommation des différentes catégories de véhicule	Inventaire d'émissions (Métaux, PM, CO, NO_x, SO_2, Pb, 4 HAP, COVNM)	IPCC
Utilisant des facteurs d'émission agrégés basés sur un kilométrage moyen annuel	Pays Région	Nombre de véhicules Kilométrage moyen	Inventaire d'émissions (Métaux, PM, CO, NO_x, SO_2, Pb, 4 HAP, COVNM)	NAEI HUGREL
Basés sur les vitesses moyennes	Ville	Vitesses moyennes	Inventaire d'émissions Modèle de dispersion Tous les polluants	COPERT EMFAC
S'appuyant sur une description plus fine de l'état du trafic	Ville quartier	Vitesses moyennes Situation de trafic	Inventaire, dispersion La plupart des polluants sauf non-échappement	HBEFA ARTEMIS
S'appuyant sur les variables caractéristiques du trafic	Quartier	Cycle de conduite	Emissions échappement Modèle de dispersion	TEE Matzoros
Avec description fine des cycles de conduite	Intersection Quartier	Cycle de conduite	Emission échappement Modèle de dispersion	VERSIT+ MESURE
Modaux et instantanés	Intersection Quartier	Cycle de conduite Données du véhicule	Emissions échappement Détails pour les échelles spatiale et temporelle	VeTESS PHEM

Tableau 15 Caractéristiques des différents types de modèles de calcul des émissions de polluants du trafic routier

3.1. Modèles basés sur les consommations de carburant

Ces modèles (niveau 1 de la méthodologie européenne) s'appuient sur les données de consommation de carburant par grande catégorie de véhicules (Tableau 16) et donnent les émissions à l'échappement selon l'équation :

$$E_i = \sum_j \left(\sum_m (FC_{j,m} \times EF_{i,j,m}) \right)$$

avec

E_i l'émission de polluant i [g],

$FC_{j,m}$ la consommation de catégorie véhicule j utilisant carburant m [kg],

$EF_{i,j,m}$ l'émission spécifique de consommation de carburant de polluant i par catégorie de véhicules j et carburant m [g/kg]. (Ces facteurs sont calculés par la méthode Copert 4, www.emisia.com/copert)

Les catégories des véhicules considérées, sont les voitures, les véhicules utilitaires légers, les camions et bus, et les deux roues motorisés. Les carburants incluent l'essence, le diesel, GPL et gaz

naturel. La méthode repose donc sur 8 catégories et propose autant de séries de facteurs d'émission pour chacun des polluants. La consommation peut être déterminée par la vente de carburant.

Category	Fuel	NOx (g/kg fuel)			PM (g/kg fuel)		
		Mean	Min	Max	Mean	Min	Max
PC	Gasoline	14.5	6.00	35.0	0.0370	0.0300	0.0450
	Diesel	11.0	9.00	14.0	1.70	0.700	4.00
	LPG	15.5	6.00	40.0	0.000	0.000	0.000
LDV	Gasoline	24.0	14.0	40.0	0.030	0.020	0.045
	Diesel	15.0	13.0	18.0	2.80	2.00	4.00
HDV	Diesel	37.0	30.0	45.0	1.20	0.700	2.00
	CNG (Buses)	13.0	5.50	30.0	0.020	0.010	0.036
Two-wheel	Gasoline	9.50	11.0	8.00	2.70	1.50	5.00

Tableau 16 Facteurs d'émissions spécifiques agrégés pour les NO_x et les PM du trafic routier (Guidebook, 2009, Niveau 1)

D'autres logiciels basés sur les consommations de carburant peuvent être cités :

- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), développé par le Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC), il permet de calculer les émissions de gaz à effet de serre des transports (catégorie « Fuel Combustion Activities » pour l'exploitation).
- le Bilan carbone (ADEME) permet de « comptabiliser les émissions de gaz à effet de serre de toute organisation : entreprises…, collectivités, territoire. » Les facteurs d'émission sont fournis en standard et peuvent être enrichis pour chaque objet ou activité. Le bilan carbone est utilisé dans certaines évaluations des PDU.

3.1.1. Intérêts et limites des modèles basés sur les consommations de carburant pour l'évaluation environnementale des mesures

Ces modèles peuvent seulement être utilisés à très grande échelle, pour des inventaires nationaux qui estiment les polluants : CO, COVNM, NOx, N2O, NH3, SO2, Pb, PM. On notera que cette approche est la seule qui permet d'évaluer les polluants dont les facteurs d'émissions ne sont connus que par rapport à la consommation de carburant (HAP - Benzo (a)pyrène, Benzo (b) fluoranthène, Benzo (k)fluoranthène, Indèno (1-2-3,cd)pyrène -, métaux lourds - As, Cr, Cu, Ni, Se, Zn, Cd, et Hg). Malgré leur niveau très macroscopique, ils peuvent permettre d'identifier des activités ou des catégories de population fortement consommatrices d'énergie et par conséquence identifier des enjeux particuliers. Cet outil pourrait être utilisé afin de réaliser le diagnostic du territoire en termes d'émissions de polluants.

Comme nous l'avons mentionné dans le chapitre 2, les Bilans Carbone peuvent être utilisés dans les évaluations environnementales des PDU.

3.2. Les modèles utilisant des facteurs d'émission agrégés

Selon les modèles, différents niveaux d'agrégation peuvent être envisagés : par grandes catégories de véhicules (camions, bus, véhicules légers, etc.), par motorisations (essence, diesel).

L'approche agrégée niveau 2 du Guidebook propose une classification relativement détaillée selon les catégories et types de véhicules, et les réglementations des émissions de polluants, soit 89 types différents (et autant de séries de facteurs d'émission). Les facteurs d'émission sont alors constants selon les conditions d'utilisation (pas de variations selon la vitesse ou les conditions de fonctionnement). Les données nécessaires aux calculs d'émissions sont les nombres de véhicules par catégorie et leur kilométrage annuel.

$$E_{i,j} = \sum_k (N_{j,k} \times M_{j,k} \times EF_{i,j,k})$$

avec

$N_{j,k}$ nombre de véhicules de catégorie j et de technologie k

$M_{j,k}$ kilométrage annuel moyen des véhicules j et de technologie k [km/veh],

$EF_{i,j,k}$ émission spécifique du polluant i pour les véhicules j de technologie k [g/veh-km]

Les facteurs d'émission sont élaborés pour un type de véhicule, et des conditions types de température et de conduite (urbain, rural, autoroute), généralement à partir de modèles désagrégés comme COPERT. Ils concernent alors tous les polluants gérés (CO, COVNM, NO_x, N_2O, NH_3,Pb, PM ($PM_{2.5}$), et quatre HAP). Les métaux lourds As, Cr, Cu, Ni, Se, Zn, Cd, et Hg) sont calculés à partir des consommations.

D'autres modèles agrégés (NAEI, UK, et (Hugrel & Joumard, 2006), FR) sont proposés à des niveaux supérieurs de classification des véhicules (par grandes catégories : voitures, véhicules utilitaires, camions, bus/cars, etc., ou même pour l'ensemble du trafic routier), et permettent des analyses macroscopiques aisées, généralement à large échelle (région, pays, année).

3.2.1. Intérêts et limites des modèles utilisant des facteurs d'émission agrégés pour l'évaluation environnementale des mesures

Malgré les limites de cette catégorie de modèles (large échelle, facteurs d'émission agrégés…), ceux-ci peuvent être utiles dans le cadre de l'élaboration d'un diagnostic par exemple ou dans le cas où l'organisme effectuant l'évaluation environnementale dispose de peu de moyens.

3.3. Modèles désagrégés basés sur les vitesses moyennes

Les modèles à vitesse moyenne sont les plus fréquents (MOBILE (US), EMFAC (US), COPERT (EU), DMRB (UK), NAEI (UK) et QGEPA (Australie)). Ils sont tous basés sur des mesures réalisées sur banc d'essai de véhicule (et de moteur pour les véhicules lourds), à partir de cycles de conduite représentatifs, et par catégories détaillées de véhicules. Cette approche correspond également au niveau 3 du Guidebook (EMEP/EEA, 2009a).

Les émissions totales sont calculées par sommation sur les catégories détaillées de véhicules, des différents phénomènes d'émissions (échappement chaud et froid, et évaporation), chacun résultant de produits de facteurs d'émission par une donnée d'activité (par exemple, véhicules-km). Les émissions non échappement ne sont pas toujours comptabilisées. Les émissions du véhicule dépendant

fortement des conditions de circulation (et de fonctionnement du moteur), on différentie également les émissions en zones urbaine, rurale et autoroute.

$$E_{total} = E_{chaud} + E_{froid} + E_{évaporation}$$

$$E_{total} = E_{Urbain} + E_{rural} + E_{autoroute}$$

Les fonctions d'émission sont exprimées selon la vitesse moyenne à partir de mesures sur différents cycles de conduite et pour chaque catégorie de véhicules (Figure 12).

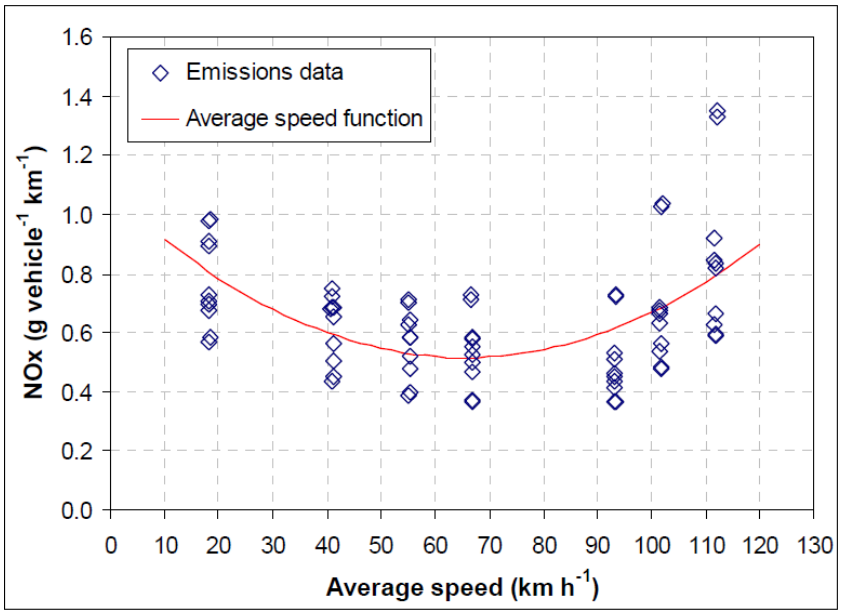


Figure 12 Fonction d'émission NO_x, voiture diesel <2.0 litres, Euro 3 issue de (Barlow et al, 2001)

3.3.1. Le modèle COPERT

COPERT (Computer Programme to calculate Emissions from Road Transport) est un outil[8] dont la méthode est principalement explicitée dans la méthodologie européenne d'inventaire (Guidebook, documents EMEP/EEA 2009) qui distingue les émissions à l'échappement, les émissions par évaporation de carburant, par usure de pneumatiques et des freins, et par abrasion de la route.

COPERT4 (2007, mise à jour 2011 v4.9) s'appuie sur des mesures d'émission sur cycles d'essai représentatifs et concerne l'ensemble des polluants atmosphériques des différentes catégories de véhicules routiers. Il permet de réaliser un inventaire d'émissions agrégé sur un territoire, en distinguant les milieux « urbain », « rural » et « autoroute », à partir des véhicules x kilomètres selon ces milieux et des vitesses de circulation représentatives, et calcule :

- les émissions à chaud pour les véhicules légers (voitures, véhicules utilitaires légers, 2-roues) et lourds (camions, autobus et autocars) ;
- les surémissions à froid pour les véhicules légers ;
- les surémissions liées à la pente et au chargement pour les véhicules lourds ;
- les corrections liées aux améliorations des carburants ;
- les corrections liées au vieillissement des catalyseurs et leur maintenance ;

[8] http://www.emisia.com/copert/

- les émissions par évaporation des véhicules légers (essence) ;
- l'émission non échappement (usure des freins et pneumatiques seulement).

Tous les calculs de la méthodologie COPERT4 sont accessibles et paramétrables (surémissions à froid, évaporations, corrections liées aux spécificités des carburants, corrections liées à l'ancienneté et l'entretien des véhicules).

Les véhicules sont subdivisés en 242 types (63 VP, 14 VUL, 99 PL, 46 bus, 20 deux roues) selon le carburant utilisé, la taille du moteur ou le poids du véhicule, la technologie, les réglementations émissions.

3.3.1.1. Émission à chaud

L'émission à chaud dépend de la distance parcourue par chaque type de véhicule, de sa vitesse (ou le type de route), son âge (dégradation), la taille du moteur ou le poids du véhicule. Pour une période de temps (heure, jour, an) et un type de véhicule, elle s'exprime comme suit :

$$\text{Emission [g]} = \text{FE [g/km]} \times \text{N [veh]} \times \text{Km [km/veh]}$$

- FE facteur ou fonction spécifique d'émission (fonction de la vitesse de circulation)
- N nombre de véhicules
- Km kilométrage (annuel) par véhicule

Par conséquent, la formule est applicable pour le calcul des émissions à chaud des polluants des groupes 1 et 3 (Tableau 10 et Tableau 12).

$$E_{chaud;i,k,r} = N_k \cdot M_{k,r} \cdot e_{chaud;i,k,r}$$

avec

- $E_{chaud\ ;i,k,r}$ émission à chaud du polluant i, produit dans la période concernée par véhicule de technologie k sur la route de type r (ou milieu urbain, rural, autoroute),
- N_k nombre de véhicules ayant une technologie k,
- Mk,r kilométrage des véhicules de la technologie k [km/veh] sur la route de type r,
- $e_{chaud\ ;i,k,r}$ facteur spécifique d'émission [g/km] pour le polluant i, la technologie k, le type de route r.

Cette formule est également utilisée pour calculer la consommation de carburant.

Les fonctions d'émission variant fortement selon la vitesse des véhicules, on considérera des vitesses moyennes représentatives pour chaque type de route (urbain-20 km/h, rural-60 km/h et autoroute-100 km/h), ou alternativement des distributions de vitesses. Ces fonctions sont de la forme générale suivante :

$$EF = (a + c \times V + e \times V^2)/(1 + b \times V + d \times V^2)$$

les coefficients a, b, c, d, e étant déterminés par régression sur les données expérimentales d'émission et les caractéristiques des cycles de conduite (Tableau 17).

Pollutant	Emission Standard	Engine capacity	Speed Range (km/h)	R^2	a	b	c	d	e
CO	Euro 1	All capacities	10–130	0.87	1.12E+01	1.29E-01	-1.02E-01	-9.47E-04	6.77E-04
	Euro 2	All capacities	10–130	0.97	6.05E+01	3.50E+00	1.52E-01	-2.52E-02	-1.68E-04
	Euro 3	All capacities	10–130	0.97	7.17E+01	3.54E+01	1.14E+01	-2.48E-01	
	Euro 4	All capacities	10–130	0.93	1.36E-01	-1.41E-02	-8.91E-04	4.99E-05	
HC	Euro 1	All capacities	10–130	0.82	1.35E+00	1.78E-01	-6.77E-03	-1.27E-03	
	Euro 2	All capacities	10–130	0.95	4.11E+06	1.66E+06	-1.45E+04	-1.03E+04	
	Euro 3	All capacities	10–130	0.88	5.57E-02	3.65E-02	-1.10E-03	-1.88E-04	1.25E-05
	Euro 4	All capacities	10–130	0.10	1.18E-02		-3.47E-05		8.84E-07
NO_x	Euro 1	All capacities	10–130	0.86	5.25E-01		-1.00E-02		9.36E-05
	Euro 2	All capacities	10–130	0.52	2.84E-01	-2.34E-02	-8.69E-03	4.43E-04	1.14E-04
	Euro 3	All capacities	10–130	0.80	9.29E-02	-1.22E-02	-1.49E-03	3.97E-05	6.53E-06
	Euro 4	All capacities	10–130	0.71	1.06E-01		-1.58E-03		7.10E-06

Tableau 17 Coefficients des fonctions d'émission à chaud de Copert4

3.3.1.2. Surémission à froid

Cette surémission n'affecte que les milieux urbain et rural, les véhicules particuliers et utilitaires légers, et ne varie pas avec l'âge du véhicule. Pour un polluant donné, l'équation s'écrit :

$$E_{froid,j,V} = \beta \times E_{chaud,j,Vurbain} \times (e_{surémission,j} - 1)$$

avec :

- $E_{froid,j,V}$ = surémission à froid pour les véhicules de type j circulant à la vitesse V
- β = fraction des kilomètres parcourus à froid par les véhicules de type j (dépend de la température ambiante et la distance moyenne du déplacement)
- $E_{froid,j,V}$ = surémission à froid pour le véhicule de type j circulant à la vitesse V
- $e_{surémission,j}$ = coefficient de surémission à froid pour le véhicule de type j (dépend aussi de la température ambiante)
- $E_{chaud,j,Vurbain}$= émission à chaud pour le véhicule j circulant à la vitesse V_{urbain}
- V_{urbain}= vitesse de circulation en milieu urbain (valeur unique pour l'ensemble du réseau dans COPERT, < à 50km/h)

3.3.1.3. Émissions par évaporation

L'émission (véhicules essence seulement) est fonction de la cylindrée, des volumes du réservoir et du dispositif de piégeage (canister ou filtre à charbon) des vapeurs de carburant, des conditions de température et des caractéristiques du carburant (volatilité). Le calcul distingue 3 facteurs d'émission selon l'équation suivante :

$$E_{voc} = \sum_{s} D_s \times \sum_{j} N_j \times (HS_j + e_{d,j} + RL_j)$$

avec,

- E_{VOC} = l'émission de COV par évaporation sur une période (année, etc.)
- D_s = le nombre de jours pour lesquels le facteur d'émission saisonnier doit être appliqué
- N_j = le nombre de véhicules à essence de type j

et les facteurs d'émission par évaporation :

- HS_j = la moyenne quotidienne des évaporations après arrêt moteur chaud du véhicule de catégorie j [g/jour], fonction du nombre de trajets journaliers
- $e_{d,j}$ = la moyenne des évaporations journalières dues aux variations de température ambiante pour le véhicule de type j en stationnement [g/jour]
- RL_j = la moyenne quotidienne des évaporations de véhicule j en marche [g/jour].

Les facteurs d'émissions sont fonctions du type de véhicule, de la saison, de la température, de la taille de l'absorbeur de vapeur du carburant, de la taille du moteur et de la pression de vapeur saturante.

$$HS_j = x \{c [p\ e_{s,hot,c} + (1 - p)\ e_{s,warm,c}] + (1 - c)\ e_{s,hot,fi}\}$$

$$RL_j = x \{c [p\ e_{r,hot,c} + (1 - p)\ e_{r,warm,c}] + (1 - c)\ e_{r,hot,fi}\}$$

Ces facteurs d'émissions sont donnés dans le Guidebook (EMEP/EEA) (Tableau 18).

	summer		winter		summer		winter		summer		winter	
T. variation (°C)	20–35	10–25	0–15	-5–10	20–35	10–25	0–15	-5–10	20–35	10–25	0–15	-5–10
Fuel DVPE (kPa)	60	70	90	90	60	70	90	90	60	70	90	90
	Gasoline passenger cars < 1.4 l — uncontrolled				Gasoline passenger cars 1.4–2.0 l — uncontrolled				Gasoline passenger cars > 2.0 l — uncontrolled			
e_d (g/day)	3.90	2.35	1.74	1.24	4.58	2.76	2.04	1.45	5.59	3.36	2.49	1.77
$e_{s,hot,fi}$ (g/proced.)	0.10	0.07	0.04	0.04	0.10	0.07	0.04	0.04	0.10	0.07	0.04	0.04
$e_{s,warm,c}$ (g/proced.)	8.48	5.09	3.75	2.63	10.01	6.01	4.42	3.10	12.29	7.38	5.43	3.80
$e_{s,hot,c}$ (g/proced.)	11.93	7.16	5.27	3.69	14.08	8.45	6.22	4.36	17.31	10.39	7.65	5.35
$e_{r,hot,fi}$ (g/trip)	0.13	0.08	0.06	0.04	0.13	0.08	0.06	0.04	0.13	0.08	0.06	0.04
$e_{r,warm,c}$ (g/trip)	1.84	1.11	0.81	0.53	2.15	1.30	0.95	0.67	2.62	1.58	1.15	0.81
$e_{r,hot,c}$ (g/trip)	10.05	6.03	4.44	3.11	11.85	7.12	5.24	3.67	14.56	8.74	6.43	4.50

Tableau 18 Facteurs d'émission par évaporation des véhicules particuliers

3.3.1.4. Les émissions non échappement de particules

Les particules (PM) sont produites à la suite de l'interaction entre les pneus d'un véhicule et la surface de la route, et également lorsque les freins sont utilisés pour ralentir le véhicule. Dans les deux cas, la génération de force de cisaillement par le mouvement est le principal mécanisme de production de particules. Un mécanisme secondaire consiste à l'évaporation du matériau de surface aux hautes températures.

Deux méthodes sont proposées dans le Guidebook 2009, mais COPERT en utilise une troisième non explicitée. La première méthode exprime l'émission en fonction du nombre de véhicules

de différentes catégories, le kilométrage moyen pendant une durée définie et le facteur spécifique d'émission du véhicule de type j pour chaque polluant i.

$$TE = \sum_{j} N_j \times M_j \times EF_{i,j}$$

La deuxième méthode considère aussi les facteurs de fraction de masse (TSP) qui peuvent être attribués à une classe de taille de particule et un facteur de correction de la vitesse moyenne (S_s).

$$TE = \sum_{j} N_j \times M_j \times EF_{TSP,s,j} \times f_{s,i} \times S_s(V)$$

3.3.1.5. Données d'entrées de Copert

Les données d'entrées demandées sont :

- pour chacun des 242 types de véhicule (selon technologie, carburant, taille et réglementation pollution) :
  - Les nombres de véhicules, kilométrages annuels [km/an] et totaux cumulés [km],
  - La distribution du kilométrage annuel selon les milieux urbain, rural et autoroute,
  - La vitesse de circulation selon ces milieux (avec cependant des limites basses -10km/h pour les véhicules légers, 12 km/h pour les véhicules lourds -, et hautes)
  - La taille du réservoir et de l'absorbeur
  - le type d'injection
- Les températures (max/min) et la tension de vapeur mensuelles,
- Les spécifications des différents carburants (teneurs en métaux lourds, soufre, HC, OC mg/kg)
- Les distances moyennes de déplacement et les nombres de trajets journaliers
- Pour les véhicules lourds, l'indication de la pente de la route (-6 à +6% par pas de 2%) et du chargement (0, 50 ou 100% en poids)
- L'affectation de l'évaporation selon les milieux urbain/rural/autoroute.

3.3.1.6. Résultats de Copert

Les résultats du modèle COPERT couvrent la plupart des phénomènes d'émission (échappement, évaporation, non-échappement) et des polluants importants. Les résultats sont complètement déclinés par type d'émission (chaud, froid, évaporation, climatisation, non-échappement), par milieu (urbain/rural/autoroute) et pour tous les types de véhicules. Seules les spéciations de COV et de HAP / POP ne sont pas détaillées par types de véhicule et d'émission.

3.3.1.7. Limites de la méthode et de l'outil COPERT

Principalement adaptée pour le calcul à échelles macroscopiques (agglomération, région, pays, heure, journée, année), l'approche COPERT est très largement utilisée par les Etats pour les inventaires nationaux d'émissions de polluants, et également pour des estimations et études d'impact à échelles régionales ou d'agglomération.

Cependant, les facteurs d'émission, basés sur la vitesse moyenne et des cycles de conduite représentatifs, ne tiennent pas compte de la dynamique des conditions de circulation (accélérations, arrêts, etc.) qui peut avoir un impact sur les émissions. De même, la donnée de la mesure (à l'échelle

d'un cycle d'essai équivalent d'un trajet) qui permet leur élaboration, n'autorise guère des analyses à des échelles plus fines que plusieurs minutes ou plusieurs centaines de mètres.

De fait, l'approche n'est pas vraiment appropriée pour des calculs à échelles plus locales (rue, tronçons) ou fines d'un point de vue temporel, ni pour une approche par tronçons de voies, si ceux-ci sont envisagés à des échelles relativement microscopiques, et l'outil COPERT propose un cadre d'analyse agrégé et macroscopique en 3 milieux urbain / rural / autoroute (sans spatialisation et à échelle annuelle), non adapté pour une analyse détaillée d'un réseau routier par exemple.

Pour ces raisons, de nombreux outils sont développés à partir de la méthode COPERT / Guidebook, pour des applications locales, et intégrant généralement de nombreuses hypothèses nationales (parcs automobiles, données de météo, longueur des trajets, etc.).

3.3.2. Outils nationaux intégrant la méthode Copert

De nombreux outils nationaux sont développés pour intégrer la méthode Copert et les données nationales, et permettent d'avoir une approche à l'échelle d'un réseau routier. En France, c'est le cas d'Impact-Ademe, de COPCETE (études d'impact d'infrastructures et projets routiers), de Circul'Air, Mocat, Heaven utilisés par les agences de surveillance de la qualité de l'air en articulation avec les modèles de dispersion.

3.3.2.1. Impact-ADEME

C'est un logiciel développé par l'ADEME à partir des algorithmes COPERT III et intégrant le parc automobile français (1970-2025) élaboré par l'INRETS en 2003. Il existe en version « Parc » (s'appliquant à un cas d'étude agrégé) et en version SIG (pour des études de réseaux routiers, d'aménagement, etc.). Les échelles d'application sont le kilomètre et l'heure. Cet outil n'est plus maintenu actuellement et sera remplacé par un outil dérivé de HBEFA (Cheynet, 2011).

3.3.2.2. Circul'Air

Circul'Air a été développé par l'ASPA de Strasbourg (agence de surveillance de la qualité de l'air), et propose une adaptation de Copert 4 (mise à jour 7 et éléments méthodologiques du Guidebook) pour l'articulation avec d'une part les outils de simulation du trafic et les données observées (comptages, etc.), et d'autre part les outils permettant de modéliser la qualité de l'air (ADMS-Urban, SIRANE, etc.). Il intègre également le parc automobile français (mis à jour annuellement par le CITEPA). Il comporte de nombreuses hypothèses et lois d'interprétation des données de trafic (classification des voies, courbes débit-vitesse, distribution horaire annualisée du trafic, déclinaison selon les catégories de véhicules, hypothèses de démarrage à froid et évaporation, etc.) basées sur un retour d'expérience, ce qui en fait un outil très opérationnel s'adaptant à la (non-) disponibilité des données de terrain.

Cet outil est mis en œuvre dans le cadre du projet Eval-PDU pour l'essentiel des simulations d'émission et de qualité de l'air (Schmidt, 2012).

3.3.2.3. CopCETE

CopCETE est développé par le CETE Centre, et propose un outil relativement simple de mise en oeuvre et intégrant l'ensemble des fonctionnalités de COPERT (version 4.9) plus certains facteurs d'émissions spécifiques dérivés de travaux français. Il intègre le parc automobile français élaboré par

l'Ifsttar-LTE (version 2011) et permet l'introduction de parcs alternatifs. Cet outil n'envisage que le calcul des émissions (pas d'articulation directe avec les modèles de trafic ou de dispersion des polluants). C'est un outil relativement ouvert, permettant des simulations de parcs différents, et l'ajustement de nombreux paramètres. Cet outil sera mis en œuvre dans le cadre de ces travaux, car il permet une grande souplesse de paramétrage pour des études de sensibilité par exemple.

3.3.3. Intérêts et limites des modèles désagrégés basés sur les vitesses moyennes pour l'évaluation environnementale des mesures

Ces modèles ont l'avantage de pouvoir évaluer l'impact des mesures pour un large panel de polluants en couvrant la plupart des phénomènes d'émission (échappement, évaporation, abrasion, usure…). Ils permettent aussi d'intégrer un parc de véhicules, ce qui permet de représenter l'effet des mesures par catégorie de véhicules. Ce sont d'ailleurs les plus utilisés pour les évaluations environnementales de mesures à l'échelle de l'agglomération.

Les échelles spatiale et temporelle macroscopique (agglomération, région, pays, heure, journée, année) des résultats semblent être adaptée pour représenter des effets à cette échelle. Néanmoins, ces modèles demandent la définition de nombreuses hypothèses de parc, données météorologiques, longueur de trajets…

Ces modèles ne sont en revanche pas adaptés pour l'évaluation des mesures de gestion du trafic (gestion des feux, zone 30…) car ils ne prennent pas en compte la dynamique du trafic (des conditions de circulation) comme les accélérations, décélérations, arrêts. D'autres part, ils ne permettent pas d'estimer la différence entre les quantités de polluants émises en régime fluide et en régime congestionné, ainsi ils seront peu pertinent pour évaluer l'impact environnemental d'une stratégie de régulation modifiant le niveau de congestion (Can & Leclercq, 2009).

3.4. Modèles s'appuyant sur une description fine du trafic

Pour une description plus fine du trafic, certains modèles proposent une structure en situations détaillées des conditions de circulation. D'autres envisagent une description des cinématiques au travers d'indicateurs directement liés au trafic, ou plus riches que la seule vitesse moyenne.

3.4.1. Modèles à situations de trafic ARTEMIS/HBEFA

Les modèles s'appuyant sur des « situations de trafic » proposent des facteurs d'émission discrets pour chacune de ces situations, déclinées en type de voies et conditions de circulation. Ainsi, à la différence des modèles basés sur les vitesses de parcours moyennes, ces modèles approchent plus précisément l'état local du trafic. En entrée du modèle, il est nécessaire d'estimer le nombre de kilomètres parcourus par les véhicules pour chacune des situations et conditions de trafic. Il faut noter qu'il n'y a pas une définition universelle des situations de trafic.

Les travaux du projet de recherche ARTEMIS ont permis l'élaboration d'une classification des voies et conditions de trafic européennes et abouti à la définition d'un schéma en plusieurs centaines de situations de trafic croisant zones (urbains / rurales), types de voies (hiérarchie du réseau), vitesses limites réglementaires et conditions de trafic. Le caractère sinueux ou montagneux des milieux était également envisagé en zone rurale (Tableau 19, et (André, et al., 2006)). Cette classification se retrouve quasiment inchangée dans HBEFA (sauf l'aspect sinuosité et pentes).

												Sinuosity/Gradient				Level of Service				Total
Area	Road level and categorie		Speed limit (km/h)									Flat, non-sinuous	Hilly straight road	Hilly, sinuous	Mountainous, sinuous	Free-flow	Heavy traffic	Saturated traffic	Stop and go	Total
Urban	5a	National / regional motorway	130	120	113/110											√	√	√	√	12
	5b	National / regional trunk road	100	97/90	80											√	√	√	√	12
	4a	City or urban motorway	130	120	113/110	100	97/90	80	70	60/64						√	√	√	√	32
	4b	City primary road, major arterial	100	97/90	80	70	60/64	50/48								√	√	√	√	24
	3	Districts distributor, inter district	100	97/90	80	70	60/64	50/48								√	√	√	√	24
	2	Local distributor	80	70	60/64	50/48										√		√	√	12
	1	Local access	50/48	40	30											√		√	√	9
Rural	5	National / regional motorway	> 130	130	120	113/110	100	97/90	80	70	60/64	√	√	√	√	√	√	√	√	144
	4	National / regional trunk road	113/110	100	97/90	80	70	60/64	50/48			√	√	√	√	√	√	√	√	112
	3	Distributor, inter village road	100	97/90	80	70	60/64	50/48				√		√	√	√		√	√	54
	2	Local distributor, through village r	80	70	60/64	50/48						√		√	√	√		√	√	36
	1	Access road	50/48	40	30											√		√	√	9
																			total	480

Tableau 19 Classification en « situations de trafic » développée dans le cadre du projet de recherche ARTEMIS

Traffic condition and description		Indicative speed range (km/h)	
		110 km/h motorway	50 km/h road
1	**Free-flow** conditions, low and steady traffic flow. Constant and quite high speed.	90 - 120	45 - 60
2	Free flowing with **heavy traffic**. Constraint but quite constant speed.	70 – 90	30 - 45
3	Heavy and unsteady flow quite **saturated traffic**. Variable intermediate speeds, with possible stops.	30 – 70	15 - 30
4	**Stop and go**. Heavily congested flow, stop and go or gridlock. Variable and low speed and stops.	5 - 30	5 - 15

Tableau 20 Conditions de trafic définies dans le cadre du projet de recherche ARTEMIS et vitesses illustratives pour 2 cas

Les conditions de trafic ont été définies par l'analyse de différentes classifications existantes et des pratiques de terrain (Tableau 20) selon quatre niveaux de trafic : fluide, trafic chargé ou dense, trafic proche de la saturation, et stop &go ou congestionné.

Les outils Artemis (développés dans le cadre du projet mais non maintenus ensuite) et HBEFA (qui hériteront de la plupart des résultats et sont l'objet de mises à jour périodiques) proposent des facteurs d'émissions pour l'ensemble de ces situations (M. Keller, 2010). Ces facteurs sont de fait majoritairement calculés au moyen de modèles désagrégés (selon la vitesse moyenne) ou instantanés (PHEM) sur la base de courbes de vitesses représentatives des différentes situations de trafic, enregistrées au cours de plusieurs programmes expérimentaux de suivi in situ de véhicules (Figure 13).

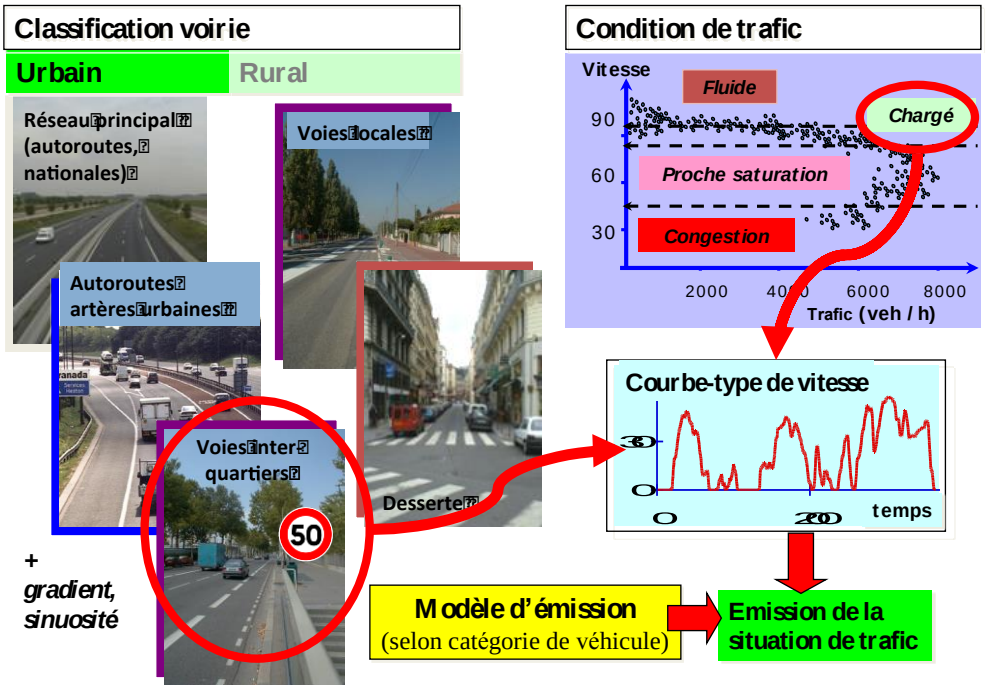


Figure 13 Schéma de principe de détermination des facteurs d'émission pour chacune des situations de trafic (outils Artémis ou HBEFA)

Ces facteurs d'émission (en g/km) doivent donc être combinés avec les nombres de véhicules de chacune des catégories détaillées (classification similaire à celle de Copert) et les distances parcourues selon ces situations de trafic. Le principal avantage de cette approche réside dans la prise en compte possible de la dynamique du trafic à travers les quatre conditions.

Les outils HBEFA offrent un cadre très intégré de calcul des émissions, incluant toutes les catégories de véhicules, la plupart des phénomènes d'émissions (échappement, évaporation mais pas usure) et des polluants. Les bases structurelles des outils et les données d'émissions sont très similaires à celles mises en œuvre pour Copert. Les deux groupes de travail se sont d'ailleurs rejoints afin de partager les données expérimentales et certaines approches de modélisation (évaporation par exemple). Ceci devrait garantir une certaine cohérence entre les deux méthodes européennes à l'avenir.

Les polluants traités sont en conséquence très similaires, sauf certains polluants non-réglementés (COV, HAP) qui avaient été l'objet de travaux approfondis dans le cadre du projet ARTEMIS, et d'autres non couverts par HBEFA mais traités dans Copert. Il faut noter que ces outils intègrent l'effet de la climatisation et des filtres à particules sur l'émission des polluants. Le modèle HBEFA calcule également l'émission de NO_2 et les émissions échappement et non échappement de certains métaux (Zn, Cd) et PM, en utilisant des ressources de (BAFU/FOEN).

Les outils HBEFA permettent une désagrégation et déclinaison très importante des hypothèses de calcul et des cas d'application. On peut par exemple proposer des distributions de longueurs de trajet variant éventuellement selon l'heure ou la journée, des distributions horaires du trafic, des températures, etc. L'approche permet également de construire des situations de trafic composites (à partir d'une distribution selon les différentes situations individuelles). On peut élaborer de nombreux scénarios de calculs et gérer des cas d'application « agrégés » (non spatialisés) ou par liens (pour décrire un réseau complexe sur lequel pourront circuler des trafics de compositions différentes, selon des conditions de circulation variables, etc.), ou encore combiner des liens et des zones, etc.

Les outils HBEFA existent sous deux formes :

- une version publique, incluant les données de parcs automobiles nationaux de plusieurs pays (prochainement la France), mais ne permettant pas de changer ces hypothèses de parc. Cette

version se présente donc comme une calculatrice ou un générateur de facteurs d'émission à tous les niveaux d'agrégation possibles (depuis le niveau d'une situation de trafic et un type détaillé de véhicule, jusqu'à un trafic composite et un ensemble de situations de trafic pondérées), facteurs d'émission qui seront ensuite utilisés séparément sur des cas d'application.

- une version dite « experte », totalement ouverte, comme les outils Artemis, mais donc très complexe, et qui permet de simuler différents parcs, et cas d'applications. Cette version n'est pas publique.

Les outils Artemis et HBEFA sont élaborés à partir de bases de données Access compilées. La gestion des données d'entrée et des résultats bénéficie en conséquence de la souplesse liée à ces outils. De très nombreuses agrégations des résultats sont proposées, par catégorie du véhicule, technologie, type de carburant, concept d'émission, ainsi que selon différents niveaux d'agrégation spatiales (par zones, liens, etc.).

3.4.2. Modèles s'appuyant sur les variables caractéristiques du trafic

Dans ces modèles (TEE, Matzoros) les facteurs d'émission sont définis par des variables de trafic telles que la vitesse moyenne, la densité du trafic, la longueur des files d'attente, issues généralement des modèles de trafic macroscopiques et microscopiques (Smit, Ntziachristos, & Boulter, 2010).

Le modèle Matzoros (Matzoros & Dan Villet, 1992) estime les variations des files d'attentes à chaque type d'interaction (feu, interaction à priorité ou rond-point) à l'aide du modèle de trafic SATURN. Ces données sont utilisées pour déduire le temps passé dans chacun des quatre modes fondamentaux : vitesse stationnaire, accéléré, décéléré et à l'arrêt. Une matrice de facteurs d'émission selon ces modes donne la distribution des émissions le long de la route.

Le modèle TEE [Negrenti, 1996] utilise une correction de la vitesse moyenne (dérivée du modèle Drive-Modem selon la vitesse et l'accélération) afin de traduire les effets de la variabilité du trafic sur l'émission, à partir des durées des feux, de la longueur des tronçons et de la densité du trafic. Les facteurs d'émission selon la vitesse moyenne (Copert3) sont ajustés selon ces corrections. Les conditions de trafic sont explicitées en durées passées dans chacun des modes de conduite (croisière, décélération, accélération et attente) et le modèle construit les profils de vitesse/temps en considérant l'effet congestion (cf. Figure 14, pour deux situations de trafic).

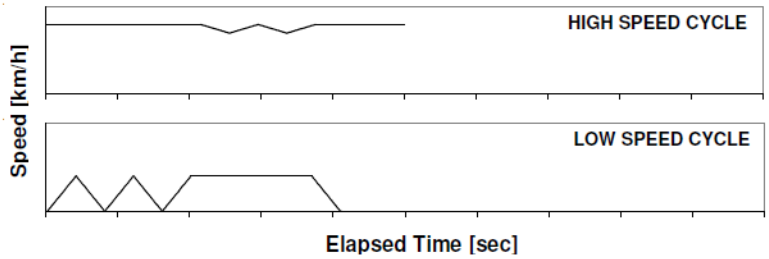


Figure 14 Exemple de génération de profils vitesse/temps

Cette approche semble intéressante car le modèle construit des profils cinématiques à partir de données de trafic. Toutefois, (Smit, 2006) souligne que cette reconstitution grossière ne prend pas bien en compte l'impact de la congestion.

3.4.3. Modèle avec description fine des conditions de conduite

Dans ces modèles (MESURE, VERSIT+), les émissions des véhicules ont été établies selon les caractéristiques détaillées des différents cycles de conduite (nombre d'arrêts, vitesse, accélération) à résolution temporelle (seconde ou minute). Ces modèles exigent des descriptions détaillées des mouvements du véhicule (vitesse instantanée, accélération et gradient de route), qui peuvent être issues de données enregistrées à bord de véhicules ou de modèles de trafic microscopiques.

Le logiciel VERSIT+ (Université de Delft, Pays–Bas) vise à simuler l'émission de polluant des véhicules légers sous différentes situations de trafic. Il est basé sur un grand nombre de mesures d'émissions sur banc d'essai avec plusieurs cycles de conduite (12 000 tests d'émission pour 153 profils vitesse/temps ou mode de conduite). La construction par régression linéaire multiple des lois d'émission est décrite dans (Smit, Brown, & Chan, 2008). Il s'agit de déterminer une relation empirique entre facteurs d'émission, profils de vitesse et les paramètres descriptifs des catégories détaillées de véhicules (246 types, selon carburants, technologies d'injection, de dépollution). L'outil permet de travailler à différentes échelles géographiques (rue à nationale)…

A partir de courbes vitesse/temps, VERSIT+ estime des grandeurs caractérisant le trafic sur lesquelles s'appuie l'estimation de l'émission, telles que : la fréquence et la durée des arrêts, les durées en accélération et décélération, les vitesses moyennes et maximales, les accélérations / décélérations moyennes et maximales, ainsi que 6 paramètres décrivant les variations d'accélération (fréquence des changements accélération - décélération, etc.). Idéalement, ces données doivent être recueillies in situ, mais des cycles représentatifs peuvent s'avérer suffisants. La modélisation microscopique ou dynamique du trafic peut être envisagée.

La structure de VERSIT+ est présentée Figure 15. Les données d'entrée sont les courbes de vitesse/temps, les caractéristiques des véhicules, les kilomètres parcours par véhicule, la composition du trafic, la proportion de démarrage à froid et des informations sur l'utilisation de la climatisation. Le cœur du modèle fournit les facteurs d'émission en (g/km).

$$E^{F}_{j,k,l} = \left(E_{j,k,l} + E_{j,k,l}(CF_{airco} - 1)\, P_{airco} + E_{j,k,l}(CF_{age,hr} - 1)\right) + \frac{C_{j,k}\, n_{cold}\, CF_{age,cs}}{d}$$

avec

- $E^{F}_{j,k,l}$ est le facteur moyen d'émission pour le polluant j (CO, HC, NO_x, CO_2, PM_{10}), la catégorie du véhicule k et le profil vitesse/temps l,
- $E_{j,k,l}$ est le facteur d'émission à chaud,
- CF_{airco} est le facteur de correction de climatisation,
- P_{airco} est la distance relative avec utilisation de la climatisation,
- $CF_{age,hr}$ est le facteur de correction selon l'âge du véhicule,
- $C_{j,k}$ représente le facteur de démarrage à froid,
- $CF_{age,cs}$ est le facteur de correction du démarrage à froid selon l'âge du véhicule,
- n_{cold} est le nombre de démarrages à froid,
- d est la longueur moyenne des trajets.

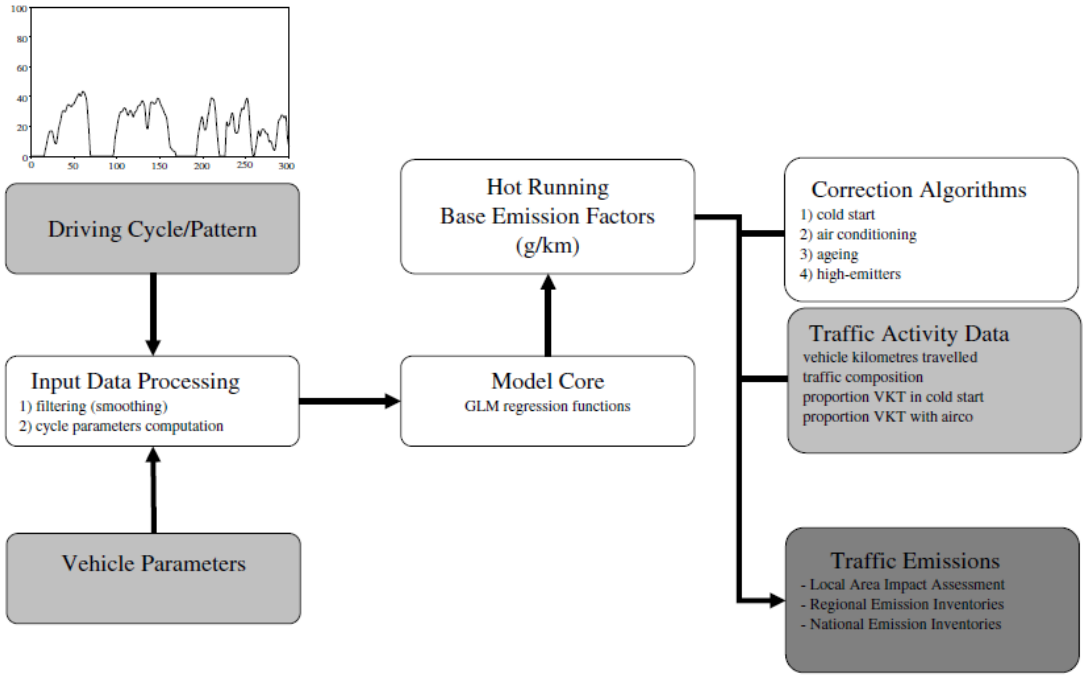


Figure 15 Structure de modèle VERSIT+

L'émission totale d'un trafic pour le polluant j (TE_j, g/h) s'obtient selon l'équation :

$$TE_j = \sum_{k,m} \left(E^F_{j,k,l} \times TV_{k,m} \times L_m \right)$$

où $TV_{k,m}$ est le volume de trafic pour un type de véhicule (véhicule/heure), sur une route m de longueur L_m (km), avec le profil vitesse/temps l.

Le modèle a été validé par méthode inverse (Reynolds & Broderick, 2000), avec des écarts maxima moyens de ±15% et une certaine stabilité (Smit, Poelman, & Schrijver, 2008). Une comparaison avec COPERT IV démontre que l'outil permet d'apprécier des variations d'émissions pour une vitesse donnée et des situations de trafic différentes.

3.4.4. Intérêts et limites des modèles s'appuyant sur une description fine du trafic pour l'évaluation environnementale des mesures

Le principal avantage de cette approche réside dans la prise en compte possible de la dynamique du trafic à travers les quatre conditions et notamment la différence en termes d'émissions entre une situation congestionnée et une situation fluide. Ces modèles permettent donc d'évaluer les mesures ayant un effet sur les états du trafic.

Néanmoins, il est relativement difficile d'affecter en entrée de ces modèles quelle proportion du trafic est soumise à chacun des niveaux de congestion décrits. La description de la congestion reste statistique. Mais selon (Can & Leclercq, 2009), ce type de modèle ne permet pas de prendre précisément en compte l'impact environnemental de variations de l'état du trafic.

3.5. Modèles modaux et instantanés

Les modèles modaux et instantanés tentent de représenter explicitement les conditions de fonctionnement des véhicules (puissance du moteur, vitesse) au travers de modes de fonctionnement ou à chaque seconde. Ils visent à déterminer les émissions et consommations instantanées des véhicules à partir de cycles de conduite (ou courbe de vitesse) représentatives des conditions de circulation.

Il faut remarquer que le plus souvent, les modèles instantanés ne sont pas valides à l'échelle de la seconde à laquelle ils produisent les résultats, en raison des fortes simplifications dans l'élaboration des facteurs d'émission, de la grande variabilité des émissions, ou encore de par une discrétisation qui n'autorisent pas cette précision.

On notera également que lors d'essais en laboratoire, la mesure de l'émission est en décalage (retard) par rapport aux conditions de fonctionnement du véhicule (temps de réponse du véhicule lui-même par le volume de l'échappement, et du dispositif de prélèvement de type CVS et d'analyse). De nombreux modèles « statistiques » ne tiennent pas compte de ces retards (Modem, PHEM-véhicules lourds, selon (Boulter, et al., 2007)). D'autres (PHEM-véhicules légers) proposent un ajustement.

A l'inverse des modèles agrégés et désagrégés selon la vitesse moyenne, les modèles modaux et instantanés ne traitent généralement que peu de polluants (CO, HC, NO_x, CO_2, PM) et de phénomènes d'émissions (émission à chaud).

3.5.1. Modèles instantanés avec matrice vitesse x accélération

Typiquement, le modèle urbain Drive-Modem (Joumard, Jost, Hickman, & Hassel, 1995) donne pour une courbe de vitesse en fonction du temps, la quantité de polluant émise et la consommation énergétique à chaque seconde (en g/s), en fonction de la vitesse et de l'accélération. Les facteurs d'émission sont définis sous la forme d'une matrice croisant vitesse (de 0 à 90 km/h par pas de 10km/h) et accélération ou accélération x vitesse (de -15 à +15 avec incrément de 5 m^2/s^3).

Compte-tenu des pas assez larges de discrétisation (10 km/h), les facteurs d'émission sont relativement moyennés, et le modèle ne permet en fait qu'une simulation pseudo-instantanée, qui n'a pas de validité à l'échelle de la seconde (ou de faibles distances).

3.5.2. Modèles instantanés avec matrice régime x charge du moteur

Ces modèles calculent l'émission instantanée (g/s) d'un moteur selon son régime de rotation et sa charge (couple). Un modèle complémentaire de simulation du fonctionnement d'un véhicule est utilisé pour déterminer la charge et la vitesse du moteur selon une courbe de vitesse du véhicule, la pente de la route et les changements de rapports de boîte de vitesse. Les modèles VeTESS et PHEM sont basés sur ce principe.

Les cartographies d'émission du modèle VETESS (Vehicle Transient Emissions Simulation Software, Figure 16 , (Pelkmans, Debal, Hood, Hauser, & Delgado, 2004)) relient l'émission à un instant donné, à la vitesse et à l'accélération du véhicule, reliées au régime et couple moteur par un modèle de simulation du véhicule. Les polluants estimés sont les CO, HC, NO_x, CO_2 et PM.

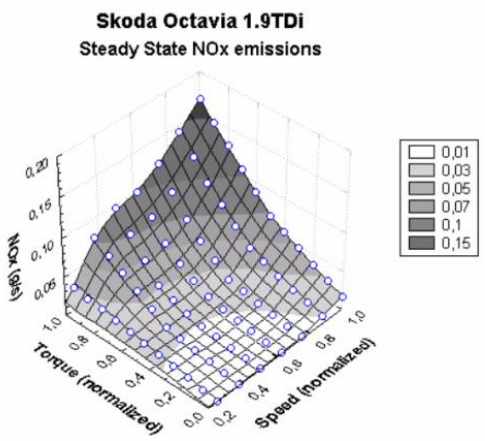


Figure 16 Cartographie d'émission du modèle VeTESS

3.5.3. Fonctions d'émission selon vitesse et accélération

Certains modèles ((Cernuschi, Giugliano, Cemin, & Giovannini, 1995; In't Panis, Broekx, et al., 2006), modèle VT-Micro) proposent des fonctions analytiques ou empiriques, qui donnent l'émission instantanée de polluant et la consommation énergétique en fonction de la vitesse et de l'accélération, pour différents cycles de conduite.

Le modèle VT-Micro repose sur des travaux expérimentaux (60 véhicules légers et camions sous différentes combinaisons de vitesse d'accélération, ORNL Oak Ridge National Laboratory). Les temps de réponse entre variables opérationnelles du véhicule (vitesses, accélération, etc.) et les émissions sont pris en compte [(Rakha & Ahn, 2004) et (Ahn, Rakha, Trani, & Van Aerde, 2002)]. Ce modèle estime les émissions (HC, CO, NO_x, et CO_2) pour six catégories de véhicule particulier et trois types de véhicule utilitaire léger, en fonction de la vitesse (0 à 121km/h, pas de 0,3 m/s) et de l'accélération instantanées (-1,5 à 3,7 m/s^2 , pas de 0,3 m/s^2). Le modèle VT-MICRO a été validé en grâce à des mesures en laboratoire. Les erreurs de prédiction sont de 17 %.

3.5.4. Les modèles instantanés basés sur un calcul de puissance

Dans ces modèles (CVEM, CSIRO, CMEM (Barth & Boriboonsomsin, 2009), (Barth, Scora, & Ypunglove, 1999)), les émissions de polluant et la consommation de carburant sont déterminées après un calcul analytique de la puissance instantanée du véhicule (équation de la dynamique, aérodynamique, roulement, accélération, gravité, etc.) et du fonctionnement du moteur.

Le modèle CMEM (Comprehensive Modal Emission Model, USA) a été développé pour évaluer l'impact de stratégies de gestion locale du trafic. Il peut être utilisé à différentes échelles (seconde ou trajet complet). Les lois CMEM donnent la consommation énergétique et l'émission (CO, CO_2, HC, NO_x) en g/s, pour une vitesse et une accélération données. La pente de la route et l'utilisation d'accessoires tels que la climatisation peuvent être considérés. Le modèle articule différents modules (puissance, vitesse du moteur, ratio air / carburant, catalyseur, Figure 17), et tient compte des différents états de fonctionnement des véhicules et moteur (fonctionnement normal, à froid, catalyseur détérioré, conditions de démarrage, (An, Barth, Scora, & Ross, 1999)). Le modèle a été élaboré à partir de plus de 350 véhicules légers, répartis en 28 catégories selon le carburant, la technologie, la réglementation des émissions, le rapport puissance/poids, et distinguant les « high emitters » (véhicules fortement polluants ou en dysfonctionnement). L'outil dispose d'une interface graphique (Barth, An, Younglove, Scora, & Levine, 2000).

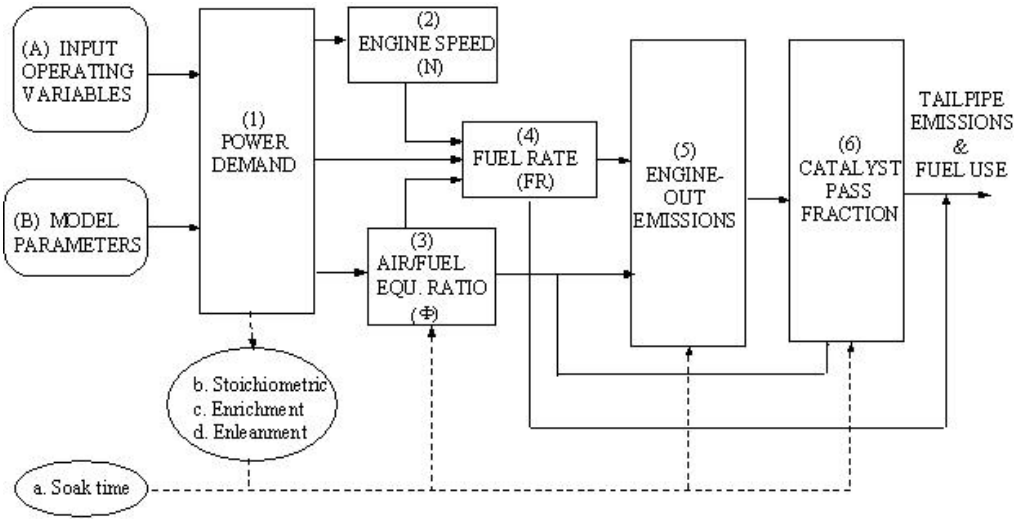


Figure 17 Structure de modèle d'émission CMEM

3.5.5. Les modèles modaux d'émission

L'idée est d'expliciter un parcours donné sous forme de modes de fonctionnement pour lesquels on dispose de fonctions d'émission. Un modèle modal peut alors être couplé à un modèle de trafic pourvu que celui-ci permette de déterminer la distribution selon les différents modes, à partir de la vitesse, du nombre d'arrêts, etc.

3.5.5.1. MOVES

MOVES (Motor Vehicle Emission Simulator, de l'US-EPA *Environmental Protection Agency*) calcule les émissions des sources mobiles routières et autres (aérien, ferroviaire, maritime) pour les inventaires d'émission des années actuelles et futures (1999-2050). Il succède ainsi au modèle MOBILE (modèle agrégé reposant sur des cycles de conduite). MOVES reprend une structure modulaire équivalente à CMEM et analyse l'activité en modes de conduite. Les émissions peuvent être calculées à différentes échelles, une interface graphique facilite la gestion de données locales.

Les données d'entrée incluent les paramètres d'échelles (année, mois, jour, heure) et d'application (type de route urbain, rural inclus l'autoroute), la description du parc automobile selon les catégories de véhicule (VP, VUL, PL, Motocycle, bus et car) et en âge, les distances parcourues par véhicule, le contrôle technique (I/M inspection/maintenance), les paramètres caractérisant le carburant et les différents processus (échappement, évaporation, l'usure des pneus et freins, les pertes au niveau du carter, le démarrage et l'arrêt, etc.), la météorologie, et les vitesses.

L'outil permet un calcul de consommation et d'émission sur une période et un périmètre donnés, ou la construction de facteurs d'émission agrégés, pour HC (hydrocarbure total, NMHC, COV et gaz organique total), CO, NO_x (NO, NO_2), NH_3, SO_2, PM_{10} (sulfate) $PM_{2.5}$ (carbone organique, carbone élémentaire, sulfate, usure des freins, usure des pneus), N_2O, CH_4, CO_2. La mise à jour future de MOVES estimera également les HAP.

3.5.5.2. Modèle PHEM

Le modèle PHEM (passenger car and Heavy-duty Emission Model) calcule l'émission et la consommation de carburant instantanées (seconde par seconde) selon le régime et la puissance du moteur au cours d'un cycle de conduite représentatif d'une situation de trafic donnée. L'outil concerne les véhicules lourds et légers européens. Il utilise des cartographies d'émission par type de véhicules, établies à partir de mesures sur des bancs d'essais de moteurs pour les poids-lourds ou de bancs d'essais de véhicules et de mesures in situ pour les véhicules légers. Ces cartographies ont été obtenues par interpolation des données expérimentales des projets ARTEMIS et HBEFA (Zallinger, Hausberger, Ajtay, & Weilenmann, 2005; Zallinger, Le Anh, & Hausberger, 2005)

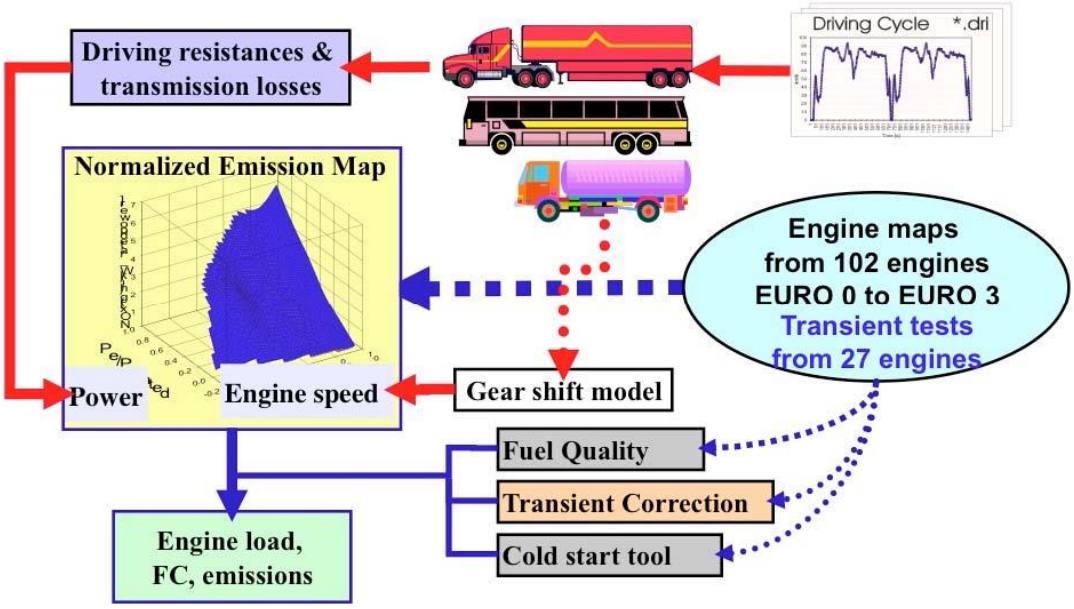


Figure 18 Structure du modèle PHEM (cas des véhicules lourds)

La structure du modèle est illustrée Figure 18. Les données d'entrée (cycle de conduite et caractéristiques du véhicule) permettent le calcul de la puissance et du régime moteur (Rexeis, et al., 2005) selon l'équation :

$$P = P_{rolling\ resis\,tance} + P_{air\ resis\,tance} + P_{acceleration} + P_{road\ gradient} + P_{transmission\ losses} + P_{auxiliaries}$$

Les caractéristiques détaillées du véhicule nécessaires aux calculs doivent être définies (catégorie et réglementation EURO, masse, charge, coefficient de traînée aérodynamique, section transversale, coefficients de résistance au roulement, poids et diamètre des roues, puissance et inertie du moteur, paramètres de transmission, etc.). Le régime du moteur est calculé à partir de la vitesse du véhicule, du diamètre des roues et des rapports de transmission, le rapport de boîte de vitesse étant déterminé par un modèle comportemental à 3 options : (i) rapide, (ii) économique, (iii) moyen.

Les cartographies d'émission des véhicules lourds ont été obtenues à partir de mesures sur banc d'essai de moteurs, en stabilisé pour 118 moteurs de types et tailles différents. Elles sont ensuite adimensionalisées (selon les paramètres de puissance et de régime) afin d'être utilisables pour la grande diversité des moteurs de véhicules lourds et de leurs conditions d'utilisation (Figure 19, (Rexeis, et al., 2005)). Ces cartographies ne donnent cependant que des émissions en régime stabilisé. Une fonction de correction en régime transitoire a donc été élaborée à partir de mesures en dynamique sur 27 moteurs et des paramètres caractérisant la dynamique du cycle d'essai (Zallinger, Hausberger, et al., 2005; Zallinger, Le Anh, et al., 2005) et (User guide PHEM 2010).

Les moteurs récents (Euro IV, EURO V et VI) sont testés et introduits progressivement dans les mises à jour, en considérant différentes approches d'amélioration des technologies (combustion,

EGR, SCR, etc.). De même, l'émission de démarrage à froid a été également modélisée par un algorithme reposant sur les transferts thermiques entre moteur et gaz d'échappement.

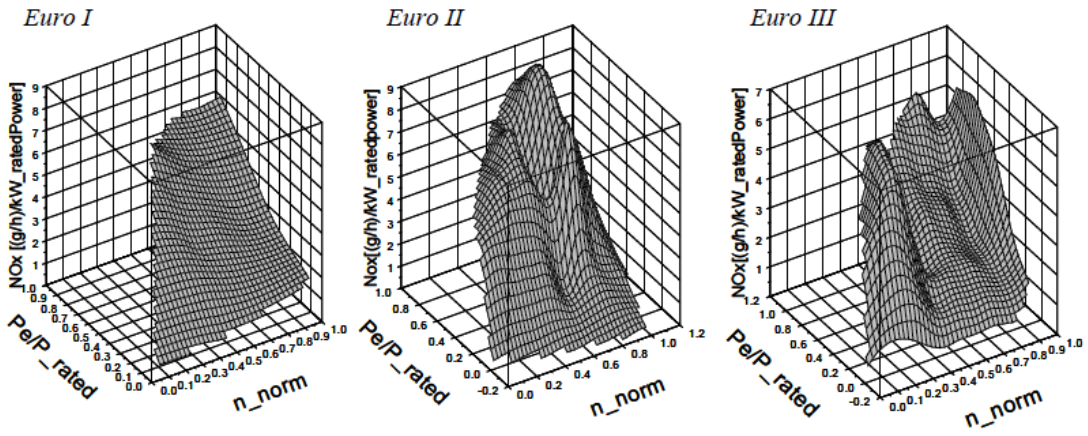


Figure 19 Cartes d'émission de moteurs de camions Euro I, II, III

En sortie, le modèle donne en instantané la puissance du moteur, le régime du moteur, la consommation de carburant et les émissions de CO_2, NO_x, NO_2, HC, CO, PN et les particules (PM), ainsi que des valeurs cumulées sur l'ensemble du cycle de conduite (Figure 20).

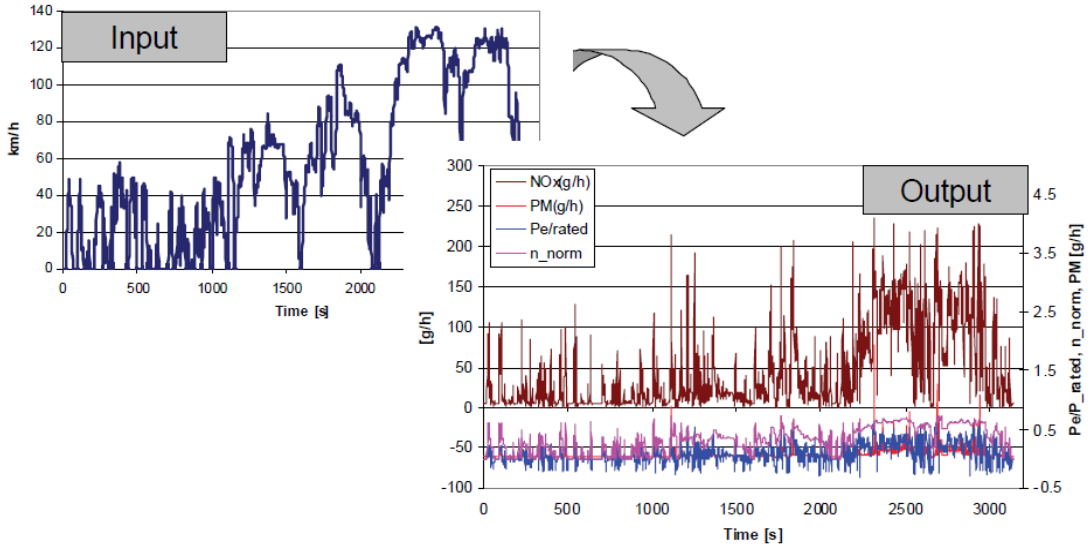


Figure 20 Données d'entrée et de sortie du modèle PHEM [PHEM User Guide 2010]

Des tests de validation pour différentes routes et pentes sont décrits dans (Hausberger, Rexeis, Zallinger, & Luz, 2009). Les résultats agrégés sur un parcours pour les véhicules diésel sont très précis pour la consommation de carburant et l'émission de NO_x et satisfaisants pour HC, CO et les particules en masse, même sans correction. Les véhicules à essence EURO 3 montrent une simulation précise de la consommation, CO et HC, mais les estimations de NO_x sont peu satisfaisantes (Figure 21).

On notera cependant, que comme pour l'ensemble des modèles dits instantanés, il n'y a pas de validation à des échelles fines, mais seulement au niveau de l'intégration des résultats sur un trajet.

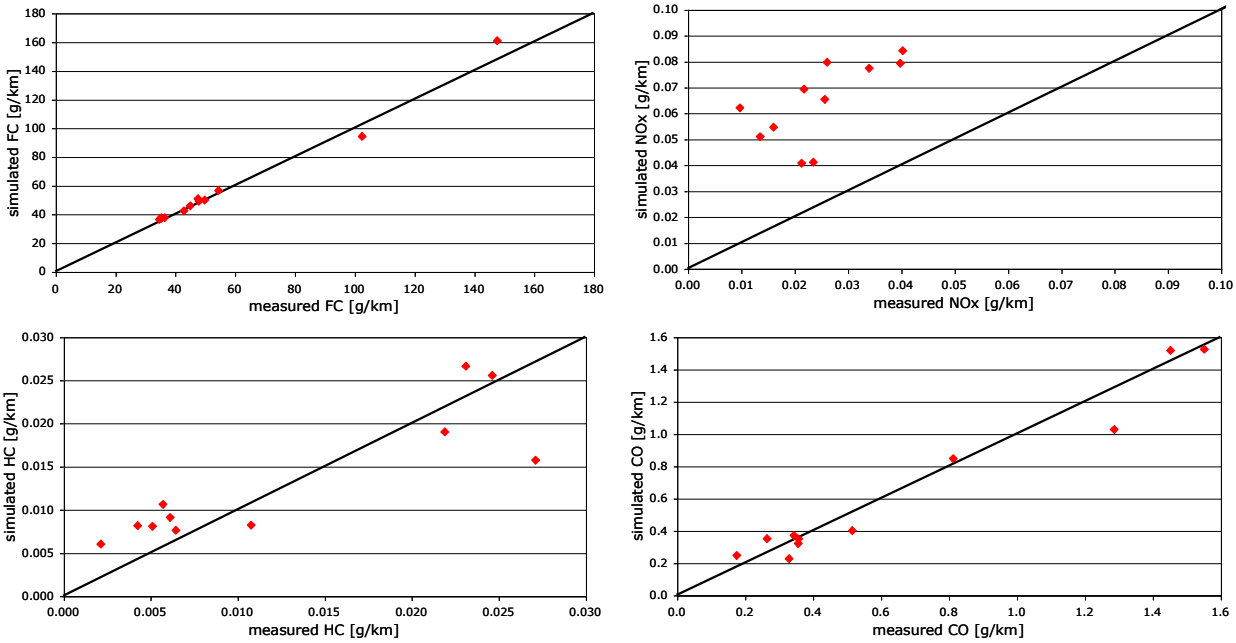


Figure 21 Simulation des émissions et consommation du carburant (FC) de véhicule essence EURO III par le modèle PHEM

Le modèle PHEM a été utilisé pour générer les facteurs d'émission des polluants (CO_2, NO_x, NO_2, HC, CO, PM, PN) du modèle HBEFA, pour 19 classes de véhicules lourds (en poids), 9 technologies (pre-Euro à Euro IV, EGR (recirculation des gaz d'échappement) et SCR (réduction catalytique sélective des NO_x)), plusieurs centaines de situations de trafic, ainsi que différents niveaux de pentes (-6% à 6%) et de chargement du véhicule (0%, 50%, 100%). Il a été également utilisé pour déterminer les facteurs d'émission des véhicules particuliers (diésel, essence, pre-Euro à Euro 6, avec et sans filtre à particules) pour les mêmes situations de trafic.

Le modèle PHEM permet de simuler un véhicule, ou un trafic selon une composition détaillée. Il offre également une interface avec les modèles de trafic.

3.5.6. Intérêts et limites des modèles modaux et instantanés pour l'évaluation environnementale des mesures

Les modèles modaux (MOVES, UROPOL, IVE) semblent les plus adaptés pour tenir compte d'une évolution des comportements de conduite, imposés par exemple par des modifications d'infrastructure (remplacement d'un feu de signalisation par un rond-point, mise en place d'une zone 30km/h, etc.).

Cependant, leur échelle d'application spatio-temporelle est très limitée car ils nécessitent des données d'entrée très fines et complexes.

3.6. Conclusion

Cet état de l'art permet d'identifier différents types de modèles applicables à différentes échelles, représentant différemment les phénomènes du trafic et notamment la congestion et

nécessitant des données d'entrée particulières. Les intérêts et limites de chaque type de modèle permettent d'identifier les types d'effet et de mesure qui peuvent être évalués par ces modèles.

L'approche Copert est certainement la plus étayée car elle s'appuye sur les mesures d'émission effectuées dans la plupart des laboratoires et qu'elle synthétise l'ensemble des connaissances européennes et de l'approche méthodologique des inventaires du Guidebook dont elle est dérivée. Ces outils constituent un cadre privilégié pour le calcul des émissions de polluants car ils prennent en compte l'ensemble des polluants et des phénomènes d'émission qu'il est possible de simuler. Néanmoins, cette approche ne repose que sur des données agrégées qui ne permettent pas des analyses fines ou locales et sur des vitesses moyennes qui ne permettent pas de décrire finement les conditions de trafic.

Les outils HBEFA et PHEM constituent une alternative pour l'estimation des émissions des véhicules européens car ils intègrent les mêmes niveaux de connaissances, et permettent des analyses plus fines spatialement voire en instantané, même si les calculs ne sont certainement pas valides à ce niveau. Leur mise en œuvre est cependant plus complexe et se heurtent à la difficulté d'élaboration des données d'entrée.

Les modèles les plus complexes ne sont pas forcément les plus pertinents suivant les effets que l'on veut représenter. (Smit, et al., 2010) montre par exemple qu'il n'est pas évident que plus le modèle est complexe plus les marges d'erreurs sont faibles. En fait, les modèles complexes ont le potentiel de fournir des prédictions plus précises car ils prennent en compte plus de variables. Cependant, ils requièrent aussi des données d'entrée plus détaillées qui peuvent être difficilement disponibles pour l'utilisateur du modèle (des simplifications et hypothèses doivent être faites) ou peuvent être disponibles mais avec une qualité inconnue. D'autre part, la pertinence des modèles peut être différente suivant les polluants étudiés. Les modèles les moins complexes seraient ainsi plus performants pour l'estimation des émissions de PM par exemple (Smit, et al., 2010). Alors que pour les émissions de CO_2 et de l'estimation de la consommation, une comparaison des différents modèles Artemis, Copert et d'un modèle instantané montre que les trois modèles sont équivalents. En ce qui concerne les autres polluants et notamment les émissions de CO et de NO_x, les écarts peuvent devenir importants (du simple au double pour ces derniers) (Chevallier & Chanut, 2009).

Le choix du modèle doit donc dépendre de l'objet à évaluer (gestion du trafic, gestion des déplacements) et d'autres contraintes plus techniques comme la disponibilité des données ou le temps de calcul.

La disponibilité des données est généralement directement liée aux données de sortie des modèles de trafic mis en œuvre sur le territoire analysé. La partie suivante permet de dresser un état de l'art des pratiques de couplages entre ces deux types de modèle.

4. Le couplage des modèles d'estimation du trafic et des émissions

L'état de l'art des modèles de trafic et d'émissions a permis de cibler les champs d'application, les données d'entrée et de sortie de chaque type de modèle. Les possibilités de couplage sont directement liées à ces caractéristiques. Il existe dans la littérature des études couplant ces deux types de modèles afin de réaliser des évaluations environnementales. Suivant le type d'action évaluée, les couplages sont classiquement du type modèle de trafic statique/modèle d'émissions désagrégées de type COPERT (comme c'est le cas dans le projet EvalPDU) ou modèle de trafic dynamique/modèles d'émissions modaux et instantanés. Des questionnements sur la propagation des incertitudes sont abordés dans (Smit, et al., 2010), sur la problématique de la finesse du modèle de trafic désiré dans (Leclercq, Can, & Nadji, 2009) et plus largement sur les données d'entrée des modèles d'émissions de polluants et de sortie des modèles de trafic comme les vitesses ou les conditions de trafic dans (Smit, Brown, et al., 2008) .

A travers différents retours d'expérience, nous relevons les domaines d'application et les problématiques associées aux différents types de couplage.

4.1. Modèle de trafic statique couplé avec un modèle désagrégé d'émissions basé sur les vitesses moyennes

Un modèle de trafic statique permet de déterminer le trafic moyen et la vitesse moyenne du flux de véhicules sur un tronçon pendant une plage horaire généralement. Ces modèles sont utilisés pour une simulation du trafic à l'échelle d'une ville ou d'une agglomération. Ces modèles sont fréquemment couplés avec des modèles agrégés d'émissions qui nécessitent des données de trafic et de vitesses moyennes. Ce couplage a été effectué dans le projet EvalPDU ou encore dans (CETE Nord Picardie, 2009) afin d'estimer l'impact des scénarios d'un PDU en terme de réduction de la pollution issue du trafic.

Ce type de couplage présente les mêmes contraintes d'application que celles des modèles statiques de trafic. Il ne permet pas de prendre en compte la relation entre la dynamique du trafic et les émissions de polluants. Son utilisation permet d'évaluer des mesures ayant des impacts à l'échelle de l'agglomération sous réserve d'une prise en compte suffisante des « micro-effets ».

La principale problématique liée à ce couplage est la représentation de la vitesse moyenne dans les deux modèles. Le modèle de trafic produit une vitesse de déplacements sur un tronçon. Elle représente la vitesse moyenne des véhicules sur ce tronçon. Alors que dans les modèles d'émissions, la vitesse moyenne est une moyenne des vitesses effectuées par un véhicule sur un parcours. Dans le couplage, les vitesses sont néanmoins supposées représenter la même réalité.

Les couplages entre des modèles statiques de trafic et agrégés d'émissions sont très largement utilisés par les organismes chargés de réaliser des évaluations environnementales de plans, contrats, grands projets d'aménagement, d'infrastructures…

4.2. Modèle de trafic dynamique microscopique couplé avec un modèle instantané d'émissions

Les modèles dynamiques de trafic permettent de déterminer les trajectoires (états cinématiques) de chaque véhicule. Leur couplage avec des modèles instantanés d'émissions permet de

représenter les variations de la dynamique du trafic ainsi que la relation entre la dynamique du trafic et les émissions de polluants.

Ce type de couplage est utilisé pour évaluer l'impact d'un système ISA d'éco-conduite (In't Panis, Broekx, et al., 2006) (Barth & Boriboonsomsin, 2009), de l'augmentation de la capacité d'un réseau en créant une voie supplémentaire sur une autoroute (Quddus & Noland, 2004), du remplacement d'un carrefour à feux par un carrefour giratoire et plus globalement pour les nombreuses mesures de gestion du trafic. L'échelle d'application de ces modèles est locale (au niveau du véhicule ou d'un tronçon routier) car ils nécessitent une grande quantité de données, difficilement disponible à une échelle plus large (Smit, Poelman, et al., 2008).

Les modèles modaux d'émission nécessitent une description très précise de l'écoulement du trafic qui peut s'avérer problématique lorsque l'on souhaite les coupler à un modèle de trafic. Les modèles de trafic microscopiques sont en réalité difficilement capables de déterminer avec exactitude les vitesses et les accélérations des véhicules à chaque instant, en l'état des connaissances (Can & Leclercq, 2009). Ils reproduisent une cinématique mais les modèles sont validés à l'échelle du flux et pas à l'échelle individuelle. On ne sait donc pas par exemple si les distributions d'accélération sont conformes à la réalité.

Une autre difficulté identifiée avec ce type de couplage est l'écart entre les résultats obtenus en comparant différents modèles. Cependant, cela autorise, avec certaines précautions, une analyse relative des impacts de politiques de déplacements par l'utilisation de la même méthode sur différents scénarios (Chevallier, 2005).

Enfin, comme les modèles instantanés d'émissions ne calculent que l'émission à l'échappement, l'ensemble des émissions de polluants d'un véhicule n'est pas représenté avec ce type de couplage. Néanmoins, plusieurs phénomènes d'émissions ne sont pas calculés selon les conditions de trafic et peuvent donc être simplement ajoutés comme « constants ».

La mise en œuvre de ce type de couplage est principalement effectuée dans le domaine de la recherche car les modèles d'émissions ont été élaborés avec des trajectoires réelles et non avec des trajectoires simulées qui sont nécessairement simplifiées.

4.3. Conclusion

Le couplage des modèles de calcul des trafics et d'estimation des émissions soulève plusieurs questions : la cohérence des informations entre les deux modèles (description des vitesses notamment) et la pertinence des modèles de trafic et modèles d'émission pour l'évaluation des différentes mesures. Par exemple, des mesures qui se traduiraient par une influence sur la dynamique du trafic (fréquence des arrêts et accélérations, stabilité des vitesses, etc.), ou sur les comportements de conduite (accélérations modérées, vitesses limitées, etc.) ne seraient pas correctement évaluées par des modèles élaborés à partir des conditions de trafic ou de comportements de conduite qui n'incluent pas cette sensibilité.

Le couplage entre les modèles statiques de trafic et les modèles d'émissions désagrégées basés sur les vitesses moyennes semblent plus adaptés pour la représentation de mesures ayant des impacts à l'échelle de l'agglomération. Cependant les limites soulevées quant à la représentation différente de la vitesse dans les deux modèles posent des questions quant à la validité des valeurs d'émissions modélisées pour l'évaluation d'une mesure.

Le couplage entre les modèles dynamiques de trafic et les modèles d'émissions instantanés semblent adaptés pour la représentation des mesures ayant des effets à l'échelle de l'émission du véhicule ou à l'échelle d'un tronçon. Le nombre important de données sur les trajectoires des

véhicules ainsi que le manque de validation de ces modèles à l'échelle individuelle sont les principales limites pour l'utilisation de ce type de couplage afin d'évaluer des mesures.

Conclusion

Différents modèles de trafic et d'émission de polluants ont été présentés et classés. La pertinence de ces modèles pour évaluer l'impact environnemental des mesures est analysée en fonction des échelles spatio-temporelles d'application, des données d'entrées, des types de polluants estimés…

L'approche par vitesse moyenne (trafic statique et modèle désagrégé d'émissions) est la plus utilisée pour les évaluations environnementales car les modèles couvrent souvent la plupart ou tous les phénomènes d'émission et des polluants, tandis que les modèles instantanés peuvent ne considérer que l'émission d'échappement ou à chaud de certains polluants (CO, HC, NO_x, CO_2, PM). L'approche est cependant frustre car elle ne repose que sur des données agrégées qui ne permettent pas des analyses fines ou locales, et sur la vitesse moyenne qui ne permet pas de décrire finement les conditions de trafic. Il est clair qu'une analyse plus fine selon les conditions détaillées et locales de circulation serait nécessaire dans une approche d'évaluation de la qualité de l'air, très sensible à ces conditions et à la proximité des voiries. Malheureusement, les modèles qui permettraient ces analyses sont encore plus en décalage avec les enjeux sanitaires (peu de polluants traités), et ne sont vraisemblablement pas validés à des échelles très fines. Mais le principal obstacle à cette analyse fine et localisée réside certainement dans la difficulté et faisabilité de modéliser le trafic aux mêmes échelles : la spatialisation du trafic par les modèles de déplacement et sa simulation (en flux et vitesses) par les modèles statiques, horaires, ne permettent sans doute pas d'apprécier la dynamique du trafic aux échelles pertinentes ; la connaissance de la composition des parcs in situ, et les hypothèses diverses de calcul des émissions ne sont sans doute pas au niveau de précision que demanderaient ces analyses. Cette approche est donc la plus à même pour évaluer des mesures qui ont des effets et des impacts à l'échelle de l'agglomération, pour lesquelles une estimation du trafic sous la forme de vitesse moyenne pourrait être suffisante pour déterminer les effets sur les déplacements (distribution, répartition modale) à cette échelle et pour lesquelles il est possible de négliger les effets des mesures sur les conditions fines de trafic (accélération, décélération, congestion…). L'ensemble de ces mesures est regroupé dans les deux sous-types « mesures organisationnelles permettant de modifier la quantité de déplacements et la manière d'effectuer ces déplacements » définis dans le premier chapitre.

Les modèles instantanés d'émissions, modaux et à description fine des cycles de conduite sont plus appropriés en théorie, et facilement compatibles avec des modèles dynamiques de trafic, car ces deux modèles s'appuient le plus souvent sur des estimations par pas de temps fin. Ils sont plus adaptés pour des études à l'échelle du quartier, car les résultats dépendent de la cinématique du véhicule avec une bonne précision d'échelle spatio-temporelle. Par contre, à l'échelle de la ville, ils sont plus difficilement utilisables en pratique, car ils impliqueraient des volumes de données trop importants. Ces modèles s'appuient sur des grandeurs, telles que les vitesses instantanées des véhicules, que les modèles de trafic estiment difficilement, ce qui peut occasionner des erreurs importantes sur les émissions instantanées. Comme nous l'avons remarqué, ces outils sont appropriés pour des mesures locales, qui ont un impact sur la dynamique du trafic. L'ensemble de ces mesures est regroupé sous le type « mesures organisationnelles permettant de modifier les conditions de déplacement » que nous avons défini dans la classification proposée dans le premier chapitre.

Cette analyse par champ d'application et de validité nous permet de définir des outils adaptés pour l'évaluation de deux des types de mesures que nous avons définis dans le premier chapitre. Cette constatation nous mène à creuser cette analyse afin d'essayer d'identifier des types d'outils applicables pour l'évaluation des autres types de mesure.

Les mesures du type « technologique», n'agissent pas sur les phénomènes de trafic. Elles n'affectent que la composition du parc de véhicules. Les outils de modélisation du trafic et des déplacements ne sont donc a priori pas utiles pour l'évaluation de cette classe de mesures. Les outils appropriés de calcul des émissions devraient être capables d'intégrer des parcs de véhicules à l'échelle

de l'agglomération et de couvrir un large ensemble de polluants (les différents véhicules n'émettant pas les mêmes polluants). Les modèles adaptés seraient donc des modèles agrégés basés sur les vitesses moyennes.

La déclinaison des mesures selon les leviers d'action ne permet par contre pas de distinguer différents types d'outils applicables pour les différents types de mesures.

Pour conclure, alors que le premier chapitre nous permettait de définir pour un type de mesures, l'effet principal ou le plus global de celui-ci, nous avons pu déterminer dans ce chapitre les outils de modélisation adaptés ou les plus utilisés pour représenter pour chaque type de mesure cet effet principal.

Néanmoins, même si ces trois premières parties ont permis de classer les mesures et les outils de modélisation, les limites que nous avons soulevées pour la classification des mesures demeurent. Cette approche par les méthodes ou par les mesures ne nous a donc pas permis de déterminer et de caractériser les mécanismes entre les mesures et l'ensemble de ses effets.

L'ensemble de ces limites nous conduit à envisager une autre approche que nous allons développer dans le chapitre suivant.

Chapitre 4 La représentation du trafic et des émissions de polluants dans les modèles

Introduction

Les deux premières approches, présentées dans les trois premiers chapitres et basées principalement sur le recensement des mesures, l'analyse des retours d'expérience ainsi que l'état de l'art des outils de modélisation présentent certaines difficultés que nous avons pu relever dans le chapitre précédent. On se propose alors d'enrichir ces analyses par la caractérisation des mécanismes d'action survenant lors de la mise en place d'une mesure.

Nous avons identifié deux entités particulières qui sont impactées : les déplacements et le trafic ainsi que les émissions de polluants. Chacune de ces entités peut être analysée séparément. Néanmoins, de nombreuses interactions interviennent entre elles. Les composantes de l'une peuvent ainsi influencer les composantes de l'autre (la vitesse de déplacement influe sur les émissions de polluants par exemple). Les composantes représentant l'ensemble des caractéristiques qui composent les entités, nous nous attacherons dans ce chapitre à les décrire.

Parallèlement, l'analyse de la retranscription de ces composantes dans les outils de modélisation nous semble intéressante dans le cadre de l'utilisation de ces outils pour l'évaluation des mesures.

Ces composantes sont multiples. Il nous a paru préférable dans un premier temps de tenter de les définir en analysant un échantillon de mesures représentant chaque classe de mesures définies dans le premier chapitre. La traduction des effets et des impacts des mesures dans les outils nous permettra donc dans un premier temps d'identifier les différentes composantes des entités.

La traduction des effets et des impacts des mesures dans les modèles n'est pas évidente (report modal, évolution de la fréquentation des TC…). Ces effets et impacts peuvent être traduits de deux manières possibles :

-soit au travers de la modification directe des paramètres des modèles comme des lois de comportement (par ex. le prix du stationnement modifie le coût généralisé du mode véhicule particulier)

-soit au travers d'études ciblées qui visent à estimer les effets des actions par exemple par des enquêtes de terrain ou par des analyses de retours d'expérience pour des situations similaires (cette option implique donc une phase amont à la modélisation).

Nous avons donc cherché à identifier ces différentes retranscriptions.

Néanmoins, l'analyse de cet échantillon ne nous permet pas d'avoir une vision exhaustive de l'ensemble des composantes de chaque entité. L'analyse menée à partir des mesures en masque certaines qui ne sont pas modifiées lors de la représentation des effets et impacts des mesures.

Nous tentons alors de définir l'ensemble des composantes en focalisant notre analyse sur les deux entités : les déplacements et le trafic d'une part et les émissions de polluants d'autre part.

L'idée est donc de décrire l'ensemble des composantes en partant de questions simples comme : qu'est-ce que le trafic dans la rue, qu'est ce qui le caractérise, comment le définir ? Les mêmes types de questions nous ont permis d'identifier les composantes des émissions de polluants.

La deuxième partie de ce chapitre présente ainsi les différentes composantes du trafic synthétisées dans la phrase suivante (celle-ci répond aux questions précédemment citées). Le trafic observé sur un périmètre (rue, quartier, agglomération…) est ainsi l'expression d'un nombre de déplacements répartis spatialement et temporellement sur un ou des réseaux et réalisés grâce à différents modes de transport.

La troisième partie présente les composantes des émissions de polluants. La somme des émissions de polluants issues du trafic est quant à elle caractérisée par la somme des émissions de chaque véhicule. Chaque véhicule émet des émissions à l'échappement qui sont fonction de la vitesse et des conditions de circulation, de certaines caractéristiques propres à l'environnement dans lequel le véhicule se déplace (pente de la voie, conditions météorologiques), du fonctionnement du véhicule (charge, utilisation d'auxiliaires, composition du carburant, démarrage à froid) et des émissions hors échappement (évaporation du carburant, usure et abrasion des pneus, remise en suspension de particules). Par souci de lisibilité, nous aborderons cette partie en identifiant successivement : les approximations liées aux modèles, les approximations liées aux hypothèses de calcul d'émission, les approximations liées à la quantification du parc, des véhicules, des nombres de démarrage, des trajets, les émissions non échappement et les paramètres associés puis finalement la prise en compte des conditions cinématiques des véhicules (vitesse, conditions de circulation).

Les modèles étant des représentations de la réalité, ces différentes composantes sont représentées dans les modèles par le biais de simplifications, d'hypothèses… Nous tenterons de relever ces différentes simplifications et hypothèses grâce à des retours d'expérience issus de la littérature.

Le principe de l'approche est synthétisé dans la Figure 22 sur le modèle des schémas d'explicitation des approches développées dans les chapitres précédents. Les mécanismes d'action sollicitent ainsi deux entités. Cela est représenté par les pointillés. Ces deux entités peuvent être analysées indépendamment mais des relations de cause à effet existent entre les composantes des déplacements et des émissions de polluants (flèche noire). La première partie de ce chapitre tente de définir les composantes de chaque entité grâce à l'identification de la représentation des effets de chaque mesure dans les outils (flèche violette). Les deuxième et troisième parties tentent d'identifier les composantes de chaque entité et d'analyser leurs représentations dans les outils (flèches violettes).

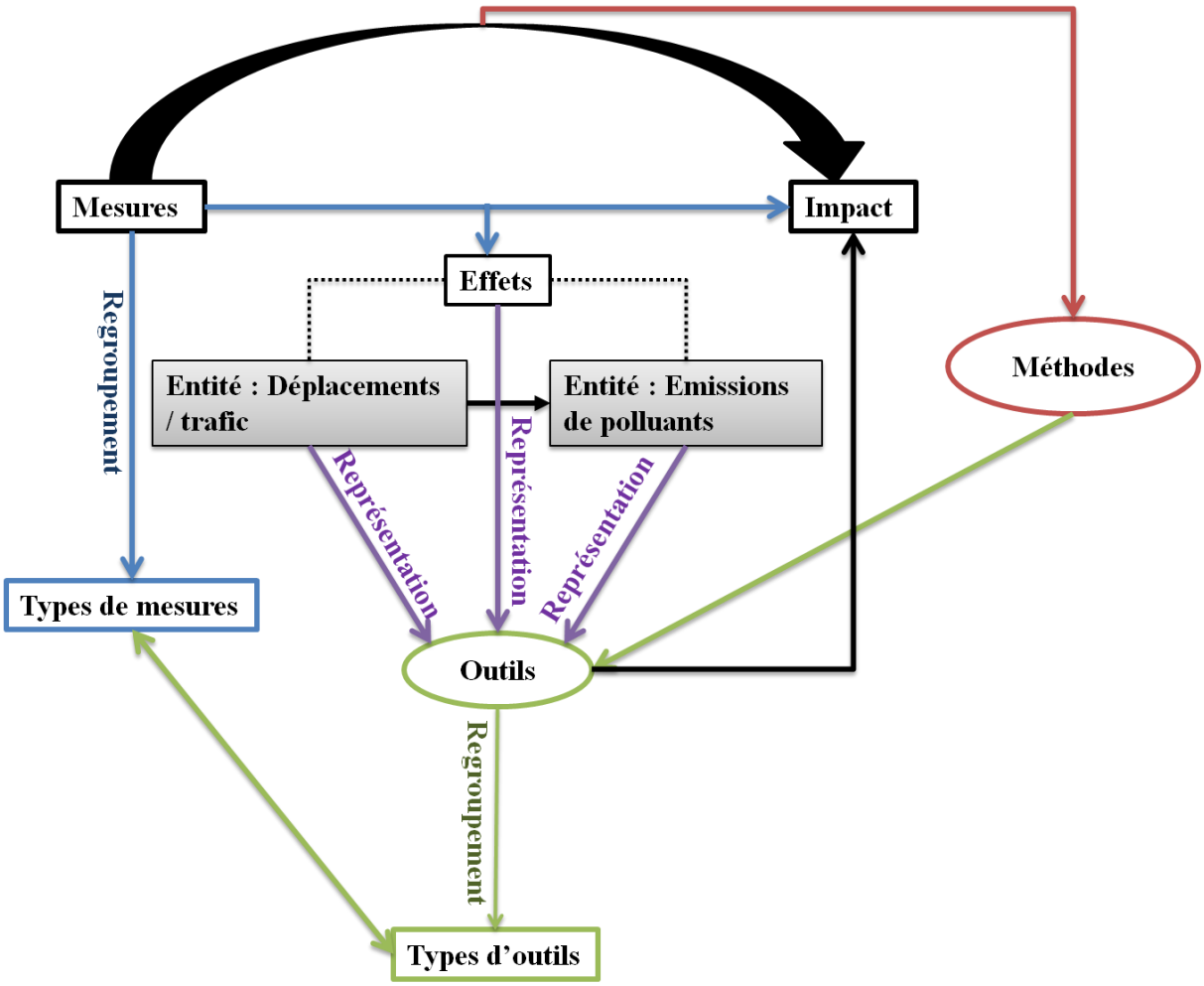


Figure 22 Schéma explicatif de l'approche centrée sur les entités « Déplacement / trafic » et « Emissions de polluants » et leur représentation dans les outils de modélisation

1. REPRESENTATION DES EFFETS ET DES IMPACTS DES MESURES DANS LES MODELES DE TRAFIC ET D'EMISSIONS 176

1.1. LES POLITIQUES CYCLABLES 177
1.1.1. Informations potentiellement disponibles et les sources associées 177
1.1.2. La représentation des effets et des impacts de la mesure dans les outils de modélisation 177
1.1.2.1. Evaluation grâce à l'exploitation d'enquêtes 177
1.1.2.2. Evaluation via des outils de modélisation 177
1.1.2.3. Evaluation basée sur l'estimation de la diminution du trafic routier 178
1.1.3. Les indicateurs 178
1.1.4. Les hypothèses complémentaires 178
1.2. REPRESENTATION DES PRATIQUES D'INTERMODALITE : CAS DES PARCS RELAIS (P+R) 179
1.2.1. Informations potentiellement disponibles et les sources associées 179
1.2.2. La représentation des effets et des impacts de la mesure dans les outils de modélisation 179
1.2.3. Les indicateurs 180
1.2.4. Les hypothèses complémentaires 180
1.2.4.1. Facteurs favorisant les pratiques intermodales 180
1.2.4.2. Effets sur le trafic 181
1.3. LES POLITIQUES DE STATIONNEMENT (HORS P+R) 181
1.3.1. Informations potentiellement disponibles et les sources associées 181
1.3.2. La représentation des effets et des impacts de la mesure dans les outils de modélisation 181
1.3.2.1. Modélisation du trafic 181
1.3.2.2. Analyse de données d'enquêtes 181
1.3.3. Les indicateurs 182
1.3.4. Les hypothèses complémentaires 182
1.4. LES ZONES 30 182
1.4.1. Informations potentiellement disponibles et les sources associées 182
1.4.2. La représentation des effets et des impacts de la mesure dans les outils de modélisation 182
1.4.2.1. Modélisation du trafic et des émissions de polluants 182
1.4.2.2. Evolution des concentrations de polluants dans l'atmosphère 183
1.4.3. Les indicateurs 183
1.4.4. Les hypothèses complémentaires 184
1.5. BAISSE DE VITESSE SUR PERIPHERIQUE 184
1.5.1. Informations potentiellement disponibles et les sources associées 184
1.5.2. La représentation des effets et des impacts de la mesure dans les outils de modélisation 184
1.5.2.1. Modélisation du trafic et des émissions de polluants 184
1.5.2.2. Mesures de qualité de l'air 184
1.5.3. Les indicateurs 185
1.5.4. Les hypothèses complémentaires 185
1.6. CONCLUSION 185

2. LA REPRESENTATION DES DEPLACEMENTS ET DU TRAFIC DANS LES MODELES 187

2.1. LOCALISATION DES ORIGINES ET DES DESTINATIONS DES DEPLACEMENTS 187
2.1.1. Approximation par zone / par points 187
2.1.2. Approche des comportements 187
2.1.2.1. Segmentation de la population 188
2.1.2.2. Agrégation des motifs de déplacements 188
2.1.2.3. Evolution des comportements 188
2.1.3. Chaîne de déplacements 188
2.1.4. Processus de distribution des flux de déplacements entre les différentes zones dans les modèles 188
2.1.4.1. Définition de l'attraction et de l'émission des zones 189
2.1.4.2. Temps de parcours 189
2.2. QUANTIFICATION / NOMBRE DE DEPLACEMENTS 189
2.2.1. Comportements de déplacements des passagers 189
2.2.1.1. Les données sources 189
2.2.1.2. Les déplacements couverts et non couverts 190
2.2.2. Déplacements des véhicules de transports en commun 190
2.2.3. Déplacements des camions 190
2.2.4. Agrégation des données permettant de quantifier les déplacements 191
2.2.5. Evolution prospective 191
2.2.6. Exemples d'études de sensibilité du nombre de déplacements sur le trafic et les émissions de polluants 191
2.3. REPARTITION MODALE DES DEPLACEMENTS 192
2.3.1. Offres de transport 192
2.3.2. Comportements de choix modal 192
2.3.2.1. Sources de données 192
2.3.2.2. Segmentation de la population 193
2.3.3. Processus de choix modal dans le modèle 193

2.3.3.1. La fonction d'utilité 193
2.3.3.2. Choix des critères et de leur valeur 193
2.3.3.3. Validité du processus de choix modal 193
2.4. REPARTITION TEMPORELLE DES DEPLACEMENTS ET DU TRAFIC 194
2.4.1. Comportements de choix d'horaire des déplacements et données source 194
2.4.2. Discrétisation temporelle des comportements de déplacement et des OD 195
2.4.3. Distinction semaine / WE / vacances : saisonnalité 195
2.4.4. Cas des déplacements TC, camions 195
2.4.5. Dynamique du trafic 195
2.5. SPATIALISATION DU TRAFIC 196
2.5.1. Qualité de la modélisation du réseau (couverture), des réseaux (TC, routes, ferroviaires, 2R, etc.) 196
2.5.2. Comportement de choix d'itinéraire : sources de données, segmentation / simplification 196
2.5.3. Processus d'affectation dans les modèles de déplacement 196
2.5.3.1. Nombre d'itérations 197
2.5.3.2. Le temps généralisé 197
2.5.3.1. Le temps de parcours, la courbe débit-vitesse et ses qualités 197
2.5.3.2. Prise en compte de la dynamique du trafic (file d'attente, congestion, capacité, vitesse à vide …). 197
2.6. CONCLUSION 198

3. LA REPRESENTATION DES EMISSIONS DE POLLUANTS DANS LES MODELES 199

3.1. APPROXIMATIONS LIEES AUX MODELES 199
3.1.1. Fonctions d'émissions à chaud, à froid, évaporation etc… 199
3.1.2. Catégories de véhicules 199
3.1.3. Selon les polluants 199
3.1.4. Approximations (charge VP, pente, etc…) 199
3.1.5. Qualité des mesures – couverture des catégories 200
3.2. APPROXIMATIONS LIEES AUX HYPOTHESES DE CALCUL D'EMISSION 201
3.2.1. Conditions climatiques et leur variabilité temporelle 202
3.2.2. Composition des carburants et variabilité spatio-temporelle et non temporelle 202
3.2.3. Conditions et usages des véhicules 202
3.2.4. Utilisation des auxiliaires 202
3.3. APPROXIMATIONS LIEES A LA QUANTIFICATION DU PARC, DES VEHICULES, DES NOMBRES DE DEMARRAGE, DES TRAJETS 203
3.3.1. La composition du parc de véhicules 203
3.3.2. La répartition du trafic suivant les catégories de véhicules 204
3.3.3. La spatialisation des parcs 204
3.3.3.1. Affectation d'un parc automobile type par catégorie de voie (urbain, rural, autoroutier) 205
3.3.3.2. Composition du parc au niveau de la rue 205
3.3.4. Quantification et localisation des démarrages à froid 206
3.3.5. Le volume de trafic, nombre de déplacements 206
3.3.5.1. Volume de trafic dans une rue 206
3.3.5.2. Longueur de trajet 206
3.4. LES CONDITIONS CINEMATIQUES DES VEHICULES (VITESSE, CONDITIONS DE CIRCULATION) 207
3.4.1. Qualité de la représentation des vitesses dans les modèles 207
3.4.2. Variabilité spatio-temporelle des vitesses 207
3.5. CONCLUSION 208

CONCLUSION 209

1. Représentation des effets et des impacts des mesures dans les modèles de trafic et d'émissions

A travers quelques exemples, nous essayons de qualifier cette représentation et d'identifier les méthodes alternatives lorsque les mesures ne sont pas évaluées avec des outils classiques. Nous avons choisi des mesures variées, affectant le trafic et les émissions de polluants à des intensités et des échelles spatiales et temporelles d'impact différentes. Ces mesures sont par ailleurs, fréquemment mises en place et ont donc besoin d'être évaluées. Les mesures analysées sont les politiques cyclables, la mise en place d'une zone 30, les politiques de stationnement, la gestion de l'intermodalité au travers de la mise en place des P+R (de type « mesures organisationnelles permettant de modifier la manière d'effectuer le déplacement»), et une baisse de vitesse sur le périphérique (de type « mesures organisationnelles permettant de modifier les conditions du déplacement»). Nous n'avons pas analysé de mesures de la classe « mesures organisationnelles permettant de modifier la quantité de déplacements». Nous n'avons pas non plus analysé de mesures de la classe « mesures technologiques » car elles concernent essentiellement la composition du parc de véhicules qui sera largement discutée dans la troisième partie.

On identifie ainsi pour chaque type de mesure :

- le type d'informations potentiellement disponibles, et les sources de données associées (observatoire/bilan du PDU, enquêtes spécifiques, mesures de terrain, etc.)
- les différents outils d'évaluation utilisés
- les indicateurs qui peuvent permettre de rendre compte de ces effets et de ces impacts
- les hypothèses complémentaires requises (en particulier pour les effets qui ne seraient pas directement liés à des paramètres de modélisation).

On souligne les mesures qui semblent difficiles à évaluer via les outils existants (en particulier les chaînes basées sur un modèle de trafic statique et un modèle d'émissions agrégées).

Le tableau suivant (Tableau 21) nous donne une première indication sur les mesures classiquement évaluées avec des outils de modélisation (comme l'offre de transport en commun ou la tarification) et les mesures qui sont rarement évaluées comme les politiques cyclables ou la sensibilisation.

Measures/strategies well investigated and (in principle) transferable, e.g.
• Pricing measures, fiscal measures (especially addressing cars) • Public transport improvements (tariff policies, supply extensions) • Telematics (urban traffic management, route guidance, ITS)
Measures/strategies less investigates and (in principle) transferable, e.g.
• Telematics as far as it concerns the relevance of particular elements • Advanced freight systems (multimodal integration, co-operations, data exchange)
Measures/strategies rather unexplored and hardly transferable, e.g.
• Measures addressing people's awareness and attitudes, information campaigns • Measures promoting cycling and walking • Measures covering legal aspects, local development strategies and land use

Tableau 21 Classification des mesures suivant leur évaluation, issue de (CANTIQUE, 1999)

1.1. Les politiques cyclables

1.1.1. Informations potentiellement disponibles et les sources associées

Les Enquête Ménages Déplacements (EMD) permettent de connaître le nombre de déplacements à vélo, les motifs de déplacements, les longueurs de trajet et les caractéristiques socio-économiques des personnes utilisant le vélo comme mode de déplacement. Mais ces enquêtes ne révèlent pas les raisons de l'utilisation du vélo, il est donc difficile de lier des changements de comportement avec la mise en œuvre de politiques cyclables.

Des enquêtes spécifiques concernant la pratique du vélo peuvent être une deuxième source d'informations.

Les bilans des PDE (Plan de Déplacements Entreprise) présentent généralement des données de comptage qui permettent de mieux cibler les changements de comportement même si la population enquêtée dans le cadre de ces bilans de PDE représente une très faible part de la population totale.

1.1.2. La représentation des effets et des impacts de la mesure dans les outils de modélisation

1.1.2.1. Évaluation grâce à l'exploitation d'enquêtes

L'étude de (Ravalet, et al., 2008) présente une comparaison des données de deux EMD, une avant et une après la mise en service des VLS (Vélo en Libre Service) afin de déterminer l'évolution de la mobilité vélo. (AURAN, 2004) présente l'analyse de l'EMD 2002 en ce qui concerne la mobilité à vélo. (Treil, 2005) présente également les résultats de la comparaison entre deux EMD. Cette analyse cherche à comprendre la pratique du vélo à Grenoble. Les conclusions montrent une baisse de la part modale du vélo entre 1992 et 2002 malgré une forte politique en faveur du vélo. Les explications évoquées sont d'une part l'augmentation de la population dans les zones les moins denses donc moins propices à l'utilisation du vélo, et d'autre part une augmentation des distances domicile travail. Dans cette étude, certaines limites de l'utilisation de l'EMD pour l'analyse de la pratique du vélo sont relevées : faible échantillonnage des cyclistes interrogés, les utilisations exceptionnelles du vélo ne sont pas relevées alors que celles-ci sont en augmentation, l'EMD est réalisée en hiver alors que les comptages vélos montrent que la pratique du vélo dépend de la saison et de la météo, les étudiants sont sous représentés dans l'EMD (lié à leur changement fréquent de lieu de vie) alors que c'est la population qui utilise le plus les modes doux.

1.1.2.2. Évaluation via des outils de modélisation

Les déplacements en vélo sont très rarement pris en compte dans les modèles de déplacement à 4 étapes. (Sharples, 1993) en expose les causes. Les modèles d'affectation classiques ne sont en effet pas appropriés pour modéliser des déplacements cyclables car les vélos peuvent se déplacer en situation de congestion, il n'y a pas de conversion possible d'un vélo en UVP. De plus, beaucoup de manœuvres illégales (circulation en sens inverse, sur les trottoirs, pas d'arrêt aux feux rouges…) sont observées et celles-ci sont difficilement modélisables. Enfin, ces déplacements ne sont pas représentés dans la répartition modale car les valeurs du temps sont particulières, le temps de parcours est difficile

à évaluer et les critères de choix de ce mode de déplacement sont spécifiques. On ne peut donc pas évaluer des mesures favorisant le report modal vers le mode vélo.

Dans l'étude précédemment citée, un modèle basé sur des enquêtes de préférences déclarées destinées à des ménages effectuant différentes OD est présenté. Avec une fonction Logit, des probabilités qu'une personne avec certaines caractéristiques adopte le vélo sont définies. Le résultat produit est le total de déplacements en vélo d'une zone i vers une zone j. Le même type de modèle est présenté dans (Larsen & El-Geneidy, 2011). À partir d'une enquête « on line » sur les cyclistes, et d'un modèle Logit et de régressions linéaires, des probabilités d'utilisation ou non des pistes cyclables « off street » et d'une éventuelle déviation de leur route pour leur utilisation sont déduites. Néanmoins, comme l'ensemble des modèles de comportement, ce type de modèles nécessite de nombreuses données d'enquêtes afin de les paramétrer.

On peut citer par ailleurs, un modèle d'estimation de la demande cycliste présenté dans (Ortuzar, Iacobelli, & Valeze, 2000). Il permet de déterminer les populations utilisatrices de ce mode de transport et leurs OD (la demande en déplacements vélo).

1.1.2.3. Évaluation basée sur l'estimation de la diminution du trafic routier

Dans l'étude de (Bussière & Bernard, 2000), l'impact de la pratique du vélo sur les émissions de gaz à effet de serre est évalué grâce au calcul du potentiel de réduction des émissions de CO_2 en fonction d'un transfert modal de la VP vers le vélo ou les TC. Il est démontré que si l'activité cycliste est augmentée de 20% (en remplacement d'une part du trafic VP), les émissions de GES baisseraient de 1,2%.

1.1.3. Les indicateurs

Les indicateurs qui peuvent rendre compte des effets des politiques cyclables peuvent être :

- Aire d'attraction des différents aménagements (parcs vélos, pistes cyclables) en fonction de la distance à parcourir, de la densité du bâti, de la catégorie socio-professionnelle des habitants…
- Indicateur de demande :
  - Nombre de déplacements induits par la mise en place de l'infrastructure Vélo
- Indicateur de trafic :
  - Evolution du trafic en veh.km VP sur la voie concernée par la piste cyclable par exemple
  - Evolution du trafic sur les voies de contournement
- Indicateur de transfert modal tout mode (et détail pour chaque mode) vers vélo :
  - Evolution de la répartition modale
  - Evolution du nombre de déplacements en vélo
- Indicateur relatif aux émissions de polluants :
  - Evolution des émissions de polluants sur la voie concernée
  - Evolution des émissions sur les voies de contournement (impact de la baisse de capacité de la voie concernée à cause de la mise en place d'une voie cyclable)

1.1.4. Les hypothèses complémentaires

Les effets de ces politiques ne sont généralement pas pris en compte dans les outils de modélisation. Les effets sur la répartition modale, même s'ils sont minimes pourraient être pris en compte grâce notamment à la représentation de ce mode dans les modèles. Les effets de la réduction de la capacité de la voirie suite à la mise en place de voies ou de pistes cyclables peuvent aussi être facilement intégrables dans les modèles par des baisses de capacités des tronçons concernés.

1.2. Représentation des pratiques d'intermodalité : cas des Parcs Relais (P+R)

1.2.1. Informations potentiellement disponibles et les sources associées

Les principales sources de données pouvant fournir des informations sur la fréquentation et l'utilisation des parcs relais sont : les EMD, des enquêtes de préférences déclarées, des enquêtes spécifiques localisées au niveau des parcs relais…

1.2.2. La représentation des effets et des impacts de la mesure dans les outils de modélisation

Les pratiques intermodales sont en général mal prises en compte dans les modèles de trafic (Lichère, Raux, & Petiot, juin 2000) car elles nécessitent l'intégration de deux ou plusieurs modes de déplacement pour le même déplacement, alors que la structure des modèles statiques de déplacements ne permet d'attribuer qu'un seul mode pour chaque déplacement. Néanmoins, les modélisateurs ont développé des techniques permettant de contourner cette contrainte.

(Lichère, et al., juin 2000) propose une synthèse sur la prise en compte de l'intermodalité dans les modèles. Cette étude s'appuie sur six logiciels (EMM2, Polydrom, Saturn, TP+, Trips, Visum). Cette synthèse ainsi que les retours d'expérience sur les modèles de Nantes et de Toulouse notamment permettent de faire les observations suivantes. Pour la majorité des modèles, les parcs sont intégrés en tant que zones externes; ils sont connectés à la fois sur les réseaux routier et TC. Le bassin d'attraction (qui fait référence ici au territoire où des habitants sont concernés par la mise en place du parc relais, zone de chalandise) est défini par le modélisateur, il n'est pas basé sur des critères fixes. Les cibles sont parfois limitées de « façon autoritaire à des catégories de population et de déplacements ». En général, l'intermodalité est définie comme un mode à part dans l'étape de répartition modale. La répartition modale est réalisée selon une combinaison de temps et de coûts avec des pénalités de transfert et de stationnement. L'usage effectif du P+R est calculé à partir de ses caractéristiques : capacité, taux de rotation, taux de saturation. Les parties VP et TC des déplacements intermodaux sont affectées par la suite aux matrices monomodales pour l'affectation du trafic. Dans certains modèles, l'intégration des effets des parcs relais n'est effectuée qu'après la répartition modale. Dans ce cas, une part des déplacements circulant sur les voies principales à proximité du P+R est identifiée comme des déplacements intermodaux. Le principe d'affectation reste le même que pour les méthodes avec réalisation d'une répartition modale. Le calage se fait sur les comportements observés et les enquêtes de préférences déclarées.

Les manipulations sont donc possibles, mais assez laborieuses. Elles sont par conséquent moyennement satisfaisantes pour représenter l'intermodalité car elles représentent deux déplacements distincts. Cependant, la fréquentation des P+R ne concerne, très grossièrement, qu'environ 1% des flux d'échange avec le centre de l'agglomération. Les déplacements intermodaux combinant la voiture et le train sont généralement représentés de la même manière.

Mais des pratiques intermodales plus classiques telles que la combinaison de la marche à pied avec les transports en commun sont représentées différemment. Certains modèles représentent le trajet effectué à pied comme un temps supplémentaire au temps de parcours en transports en commun. Ce temps supplémentaire est calculé en fonction de la distance et de la vitesse du déplacement.

Les déplacements des transports de marchandises intermodaux sont le plus souvent liés, en milieu urbain, à la présence d'un centre de logistique urbaine qui permet de distribuer les marchandises à partir de ce centre avec des véhicules adaptés aux caractéristiques urbaines. La plupart des modèles ne représente pas ce changement de mode ou représente deux déplacements distincts. Le modèle Freturb (Toilier, Alligier, Patier, & Routhier, 2005), qui se base sur les opérations de livraison et d'enlèvement ne permet pas d'associer deux modes de déplacements pour le transport de la même charge.

1.2.3. Les indicateurs

Les indicateurs qui peuvent rendre compte de la mise en place des P+R peuvent être :

- Indicateurs sur la fréquentation du parc relais :
  - Taux de remplissage du parc relais
  - Taux de rotation
- Indicateurs sur la fréquentation des transports en commun :
  - La fréquentation des TC
- Indicateurs sur les populations et déplacements cibles de cette mesure :
  - Le type d'usagers qui utilisent le parc relais
  - Les motifs associés
  - La localisation des déplacements
- Indicateurs de trafic :
  - Le taux d'occupation des voiries environnantes
  - La présence d'anciens mono-modaux automobilistes => traduction en évolution de veh.km VP

Plus largement, on peut définir quelques indicateurs généraux permettant de caractériser les pratiques intermodales :

- Indicateurs sur la demande :
  - nombre de déplacements intermodaux
  - nombre et type de modes utilisés
  - les motifs de déplacements principaux
  - caractéristiques des individus (étudiants, actifs…)
- Indicateur de choix modal :
  - Les critères de choix d'un déplacement intermodal (choix contraint : pas d'autres modes de déplacements, efficacité : coût, temps de parcours…)

1.2.4. Les hypothèses complémentaires

1.2.4.1. Facteurs favorisant les pratiques intermodales

L'ensemble des facteurs favorisant les pratiques intermodales (tels que les difficultés de stationnement à destination, le coût monétaire, les conditions de circulation…) est potentiellement intégrable dans une fonction de répartition modale. La paramétrisation d'une telle fonction nécessite cependant un nombre important de données.

1.2.4.2. Effets sur le trafic

L'évolution de l'état du réseau sur les voies d'accès aux P+R n'est jamais intégrée dans les modèles. L'effet de la mise en place des P+R sur le nombre de déplacements en VP et sur leur distance dans la partie amont du P+R n'est pas intégré.

1.3. Les politiques de stationnement (hors P+R)

1.3.1. Informations potentiellement disponibles et les sources associées

Les principales sources de données permettant de déterminer l'impact des politiques de stationnement (tarification et nombre de places) sont les enquêtes de préférences déclarées ainsi que les observatoires pour le suivi des effets des politiques de stationnement.

1.3.2. La représentation des effets et des impacts de la mesure dans les outils de modélisation

1.3.2.1. Modélisation du trafic

Dans les modèles à 4 étapes, l'offre de stationnement est généralement traduite en termes de coût et de temps (temps de parcours et temps généralisé). Ces paramètres sont décrits dans le chapitre 3. D'autres méthodes basées sur la description de l'univers de choix des individus sont développées afin d'évaluer les comportements individuels de déplacement (Teillac, 2010). Les fonctions de choix modal sont généralement paramétrées grâce aux données issues d'enquêtes spécifiques.

La prise en compte des coûts dans le choix modal est traduite par une valeur du temps pour chaque catégorie de population. Le coût du stationnement n'aura donc pas le même impact sur le choix de mode selon les différentes catégories de population.

Des modèles spécifiques pour évaluer l'impact de la tarification sur le report modal ont été développés. Le modèle Supernova (Papon, 1992) par exemple simule l'équilibre entre l'offre et la demande de stationnement sur une petite zone, ce qui permet de connaître l'effet d'une modification de la politique de stationnement (nombre de places, réglementation, tarifs, répression) sur le volume, l'affectation de la demande, la gêne apportée à la circulation, aux autobus et aux piétons.

Enfin, il apparaît que la représentation des effets de ces mesures (paramètres pris en compte et modifiés) varie suivant le type d'outil de simulation utilisé (Boussier, 2007), et de la fonction de choix modal.

1.3.2.2. Analyse de données d'enquêtes

Certaines évaluations sont effectuées grâce à l'analyse d'enquêtes spécifiques. On retrouve par exemple dans la synthèse présentée dans (PREDIT, 2008), différentes études portant sur l'évaluation de l'impact d'une politique de stationnement pour favoriser le stationnement résident. Dans ces études, les enquêtés sont des automobilistes ou des ménages. Ils peuvent être interrogés sur leurs pratiques habituelles de déplacement ou sur leurs intentions de déplacement.

1.3.3. Les indicateurs

Les indicateurs qui peuvent rendre compte des effets d'une politique de stationnement peuvent être :

- Indicateurs sur la fréquentation des places de stationnement :
  - Taux de rotation
  - Durée du stationnement
  - Catégorie de population utilisant les places de stationnement
  - Motifs de déplacements
  - Type de tarifs utilisés (abonnements, tarifs résidents …)
- Indicateurs de trafic :
  - Temps de recherche d'une place
  - Trafic créé lié à la recherche d'une place
- Indicateurs de répartition modale
  - Transfert modal lié aux contraintes de stationnement

1.3.4. Les hypothèses complémentaires

Les effets de la politique parking sur la localisation des destinations des déplacements ainsi que sur le nombre de déplacements sont peu évalués et ne sont généralement pas intégrés dans les outils de modélisation. Même si cet effet est négligeable, il pourrait s'avérer négatif sur le plan écologique s'il devient générateur de mobilité automobile (lié à des changements de destination vers des zones périphériques comportant des zones de stationnement accessibles) et propice à l'étalement urbain (voir 1er chapitre, partie 2.6).

Les effets sur le trafic et notamment sur la distance parcourue pour la recherche d'une place de stationnement ou encore l'induction de trafic liée à des taux de rotation élevés ne sont pas intégrés dans les modèles de déplacements à 4 étapes.

1.4. Les zones 30

1.4.1. Informations potentiellement disponibles et les sources associées

Les principales informations dont nous disposons peuvent être des données de vitesse et de trafic mesurées dans la zone concernée. En terme de qualité de l'air, des mesures de concentration des polluants dans l'air avant et après la mise en place de la zone 30 sont des sources de données intéressantes.

1.4.2. La représentation des effets et des impacts de la mesure dans les outils de modélisation

1.4.2.1. Modélisation du trafic et des émissions de polluants

Alors que la mise en place d'une zone 30 permet un cloisonnement d'une zone propice à un partage de la voirie et à une circulation automobile à faible vitesse qui a pour objectif de favoriser les modes doux dans cette zone, le seul effet représenté dans le modèle est la baisse de la vitesse.

Dans un modèle de déplacements à quatre étapes, la réduction des vitesses est prise en compte dans la définition des vitesses limites sur chaque tronçon. Le type de voie des tronçons ainsi que les courbes débit-vitesse associées peuvent éventuellement être modifiées. Aucune modification spécifique n'est réalisée dans le modèle d'émissions mais, l'émission sera calculée à une vitesse moyenne différente.

Cependant, selon (In't Panis, Broekx, et al., 2006), il est indispensable de prendre en compte les phénomènes d'accélération et de décélération dans la modélisation des effets d'une politique de réduction de vitesse. Or ces phénomènes ne sont pas représentés dans un modèle statique de déplacements. (In't Panis, Broekx, et al., 2006) explique ainsi que les modèles statiques simplifient considérablement les phénomènes physiques. Utiliser des vitesses moyennes sans tenir compte des profils d'accélérations peut se justifier sur une échelle spatiale très large et sur une période de temps longue car les phases d'accélérations sont alors négligeables. Selon les auteurs, en milieu urbain, les arrêts/redémarrages sont très fréquents, élargir la fenêtre temporelle ne modifie donc pas la vitesse moyenne. Mais cela est discutable pour une échelle restreinte comme c'est le cas pour les zones 30.

De plus, les retours d'expériences cités dans le 1er chapitre nous montrent que la réalisation d'aménagements a un impact important sur les effets de la mesure. Il convient donc de les intégrer dans les modèles. Ils ne peuvent pas l'être dans un modèle statique, mais cela est possible dans un modèle dynamique.

Sachant que nous nous intéressons au changement de vitesse sur une faible distance et donc sur une période de temps très courte, il est clair qu'une simulation dynamique est davantage adaptée. Cependant, les données générales disponibles et utilisées sont issues de modèles statiques davantage répandus dans les agglomérations.

1.4.2.2. Évolution des concentrations de polluants dans l'atmosphère

Une des méthodes consiste à comparer des mesures de concentrations de polluants avant et après la mise en place de la zone 30. Dans (Owen, 2005), par exemple, des mesures de concentrations de polluants (NO_2 et benzène) ont été relevées suite à la mise en place de zones à vitesse limitée (20 mph équivalent aux zones 30 françaises). Les résultats ne permettent pas de conclure sur une influence de la mise en place de ces zones. Les différences observées sont du même ordre de grandeur que les erreurs induites par les mesures. Néanmoins, on peut supposer que la superficie de la zone influe largement sur son impact en terme de qualité de l'air.

1.4.3. Les indicateurs

Les indicateurs qui peuvent rendre compte des effets de la mise en place d'une zone 30 peuvent être :

- Caractéristiques de la mesure :
  - Superficie de la zone 30
- Indicateurs de trafic :
  - Vitesses sur les tronçons à 30 km/h
  - Profils de vitesse (phase d'accélération et de décélération)
  - Trafic intrazone et de transit (report de trafic)

- Indicateurs de report modal :
    - Pour les déplacements courts qui s'effectuent à l'intérieur de la zone
- Indicateur de pollution atmosphérique
    - Concentration atmosphérique avant et après mise en place de la zone 30

1.4.4. Les hypothèses complémentaires

La mise en place d'une zone 30 peut avoir un impact sur le partage modal. Certains usagers peuvent se reporter sur un autre mode qui facilite davantage le déplacement. Une modélisation en rebouclant sur le choix modal après l'étape d'affectation permettrait d'estimer la quantité de personnes qui vont changer d'itinéraires suite à la réduction de vitesse. D'autres mécanismes comme la sécurisation de ces voies liée à l'abaissement de la vitesse des véhicules motorisés peuvent engendrer un transfert modal vers des modes doux tels que la marche ou le vélo pour les personnes résidents proche de la zone 30. Ces mécanismes ne sont pas pris en compte dans la modélisation. Comme nous l'avons déjà mentionné, le type d'aménagements réalisés dans la zone 30 ainsi que le respect de la limitation peut largement influencer les effets de cette mesure. Ces paramètres ne sont néanmoins pas pris en compte dans la modélisation.

1.5. Baisse de vitesse sur périphérique

1.5.1. Informations potentiellement disponibles et les sources associées

Les principales informations dont nous pouvons disposer sont des relevés de vitesse, de temps de parcours et de comptage à différents endroits sur le périphérique ainsi que des données de qualité de l'air à proximité de la voie.

1.5.2. La représentation des effets et des impacts de la mesure dans les outils de modélisation

1.5.2.1. Modélisation du trafic et des émissions de polluants

Comme pour la représentation des effets d'une zone 30, la réduction des vitesses sur le périphérique est représentée, dans un modèle statique, par une baisse des vitesses autorisées sur cet axe. Les types de voie, courbes débit-vitesse et vitesses résultantes associées dans les modèles d'émissions peuvent aussi être modifiés du fait de la baisse des vitesses maximales.

Les reports de trafic sur des axes secondaires sont représentés par la modélisation de l'affectation du trafic, directement liée au temps de parcours et donc à la vitesse. La baisse de la vitesse implique une baisse de capacité de la voie, mais comme le modèle d'affectation statique représente mal la congestion, si la baisse de vitesse provoque une saturation du réseau, celle-ci n'est pas représentée.

1.5.2.2. Mesures de qualité de l'air

L'étude de (Dijkema, Van Der Zee, Brunekreef, & Van Strien, 2008) présente une évaluation de l'impact d'une réduction de vitesse sur le périphérique d'Amsterdam grâce à des données de qualité de l'air recueillies à proximité du périphérique. Ces données sont mises en relation avec des données de trafic (débit et vitesse) recueillies aux mêmes endroits. (Keuken, et al., 2010) utilisent aussi des données de qualité de l'air afin d'évaluer l'impact d'une réduction de vitesse sur autoroute. Ils comparent les mesures des concentrations de polluants de fond avec les mesures effectuées au bord de la route. Ils en déduisent, plus ou moins directement suivant les polluants, les émissions produites par le trafic. Cette méthode permet de déterminer des facteurs d'émissions spécifiques pour des conditions de trafic différentes.

La comparaison des concentrations des polluants dans l'atmosphère se heurte à la difficulté de retrouver des conditions météorologiques identiques pour les deux campagnes de mesures. D'autre part, les campagnes ne doivent pas être trop espacées afin de limiter l'influence de l'évolution du parc de véhicules.

1.5.3. Les indicateurs

Les indicateurs qui peuvent rendre compte des effets d'une réduction de vitesse sur périphérique peuvent être :

- Indicateurs de trafic :
  - Flux de trafic
  - Profils de vitesse (phases d'accélération et de décélération)
- Indicateur de pollution atmosphérique
  - Concentration atmosphérique avant et après la mise en place de la réduction de vitesse

1.5.4. Les hypothèses complémentaires

Les phénomènes dynamiques du trafic tels que les accélérations et les décélérations ne sont pas représentés dans les modèles statiques de déplacements car ils produisent en sortie une vitesse moyenne pour l'ensemble des véhicules circulant sur un tronçon. Par contre, ces phénomènes sont reconstitués dans les modèles d'émissions lorsqu'ils prennent en compte des cycles de conduite représentatifs pour des vitesses moyennes et un milieu donnés. Ces cycles de conduite sont moyens pour une vitesse donnée. Les fréquentes accélérations et décélérations dépendant des aménagements et du style de conduite adoptés face aux aménagements mis en place dans cette zone, ne sont sans doute pas représentés dans ces cycles. D'autre part, les phénomènes de congestion caractérisés par son étalement dans le temps et dans l'espace ne sont pas représentés dans ces deux types de modèle.

1.6. Conclusion

Pour chaque mesure nous avons pu analyser, grâce à la littérature, la représentation de leurs effets dans les outils par le biais des paramètres modifiés. Pour certaines mesures, nous avons pu en déduire les composantes qui sont affectées lors de la mise en place d'une mesure mais qui ne sont pas modifiées dans les outils classiques (modèle à 4 étapes et modèle d'émissions désagrégées).

Cependant, nous constatons que le fait d'étudier la représentation des effets de quelques mesures dans chaque classe ne nous permet pas d'identifier l'ensemble des composantes affectées et leur représentation dans les modèles.

Par exemple, l'analyse de la représentation des effets de la mesure « zone 30 » permet de dégager des composantes comme la vitesse et ses caractéristiques dynamiques ou encore la répartition

modale des déplacements. Mais l'analyse des effets ne nous permet pas d'identifier des composantes telles que la localisation des origines et des destinations des déplacements car les effets sur celles-ci sont considérés comme marginaux.

Cette approche tentant d'aborder les différentes composantes des entités déplacements et trafic et émissions de polluants par le biais des effets se heurte donc au fait que l'ensemble des composantes ne peuvent pas être identifiées.

2. La représentation des déplacements et du trafic dans les modèles

L'approche adoptée précédemment, tentant de caractériser les composantes des deux entités par le biais des effets des mesures et de leur représentation dans les modèles n'a pas été concluante puisqu'un certain nombre de ces composantes n'avait pas été identifié. On se propose alors de décomposer les deux entités que sont les déplacements et le trafic ainsi que les émissions de polluants, d'identifier leurs composantes d'une part et d'autre part d'analyser la représentation de chacune de celles-ci dans les outils de modélisation. Cette mise à plat nous permettra d'analyser les hypothèses et les approximations effectuées pour les intégrer dans les outils.

Ainsi le trafic est caractérisé par la localisation des origines et des destinations des déplacements, un nombre de déplacements, leur répartition modale, leur répartition dans le temps ainsi que par la spatialisation du trafic.

2.1. Localisation des origines et des destinations des déplacements

2.1.1. Approximation par zone / par points

Les déplacements sont répartis sur la zone d'étude en fonction de leur lieu d'origine et de destination. On pourrait donc observer sur le territoire presque autant de points d'origine des déplacements que de nombre total de déplacements (deux personnes de la même famille pouvant partir du même lieu de départ). Néanmoins, les lieux d'origine et de destination des déplacements ne sont pas localisés avec exactitude dans les modèles soit par manque d'information (certaines sont disponibles par zone) soit par simplification du modèle. Un zonage est donc construit en tenant compte de la correspondance entre les différentes bases de données et du niveau souhaité de précision des résultats. Ce zonage induit des approximations sur la localisation des origines et des destinations des déplacements, celles-ci étant situées à l'intérieur des zones dans les modèles. Un biais d'agrégation spatiale relatif au zonage est relevé dans plusieurs études (Bonnel, 2001; Bonnel, Chapleau, Lee-Gosselin, & Raux, 1997; Ortuzar & Willumsen, 1990; SETRA, 2010). La localisation des origines et des destinations des déplacements dans des zones influencerait l'estimation de la demande, le choix de mode de transport, l'affectation et donc l'estimation des charges de trafic. (Bonnel, et al., 1997) tentent de quantifier ce biais dans le cas de la représentation des déplacements en transport en commun. Il est montré que lors de la procédure d'affectation, le zonage provoque de nombreuses erreurs pour les transports collectifs. En effet, dans cette étude, 60 % des itinéraires en transport collectif modélisés sont erronés alors que la charge des principales lignes de transport en commun est globalement correcte. Avec une représentation des origines et des destinations des déplacements sous forme de points de l'espace, le nombre d'itinéraires erronés baisse à 20 %.

2.1.2. Approche des comportements

Chaque déplacement a un lieu de départ et un lieu d'arrivée. Le choix de destination du déplacement peut dépendre du motif de son déplacement, du mode utilisé, de la distance entre les lieux d'origine et de destination et du temps de parcours entre les deux lieux, du coût du déplacement… Le lieu d'origine du déplacement peut dépendre de son lieu d'habitation ou du lieu de destination de son précédent déplacement. Chaque individu effectue son déplacement pour un motif particulier qu'il

décide en fonction de ses activités (aller travailler, aller chercher ses enfants à l'école, aller acheter son pain,…). Chaque déplacement est donc effectué suivant un motif.

2.1.2.1. Segmentation de la population

Il est impossible de modéliser le choix de chaque individu. Les modèles regroupent donc souvent des individus qui ont des comportements proches (statistiquement et sur certains critères choisis) afin de leur affecter un comportement unique. Les critères pouvant être choisis pour créer ces différents segments de population sont : la zone de destination, les motifs de destination et les horaires de déplacements. L'approximation due à cette segmentation n'est pas évaluée dans la littérature.

2.1.2.2. Agrégation des motifs de déplacements

Le modèle ne pouvant pas représenter chaque motif de déplacements, on définit des catégories de motifs comme dans les enquêtes de mobilité. Le nombre de motifs est cependant trop important pour qu'ils soient tous intégrés dans le modèle. Des regroupements de certains motifs sont donc effectués selon des critères tels que : la zone de destination du déplacement, le segment de population qui l'effectue et les horaires de déplacement…

2.1.2.3. Évolution des comportements

La segmentation de la population ainsi que l'agrégation des motifs de déplacements peuvent évoluer au cours du temps. Cela veut dire que des individus regroupés au sein d'une même classe ou les motifs de déplacements regroupés au sein d'un même motif, selon certains critères, n'ont plus les mêmes caractéristiques. Cependant, dans la majorité des modèles, cette segmentation n'est pas modifiée lors des exercices de prospective.

2.1.3. Chaîne de déplacements

La majorité des modèles représente l'enchaînement des déplacements entre un départ du domicile et un retour au domicile grâce à une chaîne de déplacements. Ces chaînes peuvent être reconstituées à partir des données des EMD. Elles sont caractérisées par les différents motifs. La chaîne « DTCD » représente par exemple, un déplacement du domicile vers le travail, puis du travail vers un commerce et enfin d'un commerce vers le domicile. L'introduction de ces chaînes dans les modèles nécessite une simplification. Dans l'étude de (Prado, 2010), par exemple, 700 chaînes ont été répertoriées mais seules les 30 les plus fréquentes ont été représentées.

La reconstitution de ces chaînes permet aussi de retirer les chaînes qui ne sont pas logiques (incohérence entre le lieu ou l'horaire de départ du déplacement par rapport au précédent). Ainsi, dans (Prado, 2010), 3% des chaînes sont exclues.

2.1.4. Processus de distribution des flux de déplacements entre les différentes zones dans les modèles

Le choix de la destination d'un déplacement peut dépendre des caractéristiques des zones de destination, du temps de parcours entre les différentes zones … Afin de reconstituer l'ensemble des origines et des destinations des déplacements, il est possible d'utiliser une fonction de distribution.

Elle permet de déterminer les flux entre les zones et ainsi de constituer une matrice Origine Destination. La fonction de distribution appliquée (exponentielle..), les paramètres pris en compte (temps de parcours, émissions, attractions…) ainsi que leurs caractéristiques (temps de parcours à vide, temps de parcours VP…) sont autant d'hypothèses effectuées par le modélisateur.

2.1.4.1. Définition de l'attraction et de l'émission des zones

La localisation de chaque déplacement effectué sur une agglomération est reconstituée, dans les modèles, grâce à des notions d'émission et d'attraction de déplacements pour chaque zone du territoire. Les émissions de déplacements peuvent être fonction du nombre de personnes habitant dans une zone, de leurs catégories socio-professionnelles, de leurs pratiques de mobilité….

Les attractions dépendent en général du motif de déplacement. Des critères permettent d'estimer le nombre de déplacements à destination d'une zone pour un certain motif. À titre d'exemple, le nombre d'emplois peut être utilisé afin de quantifier les déplacements à destination d'une certaine zone, ayant comme motif le travail. Une combinaison de plusieurs critères peut aussi être utilisée.

2.1.4.2. Temps de parcours

Le temps de parcours entre deux zones est aussi un critère permettant de définir la localisation des déplacements. Il est possible de prendre en compte ce temps de parcours de différentes manières. Il peut représenter le temps de parcours réalisé avec un certain mode de transport (la voiture particulière) ou alors le temps de parcours le plus intéressant entre les différents modes de transport (train, TC, voiture…). Le temps de parcours peut être dépendant (temps de parcours en charge) ou indépendant de l'état du réseau (temps de parcours à vide). Dans ce dernier cas, la distribution est indépendante du volume de la demande, c'est-à-dire que la localisation des déplacements ainsi que leur nombre ne dépend pas de l'état du réseau.

2.2. Quantification / nombre de déplacements

2.2.1. Comportements de déplacements des passagers

Les déplacements sont caractérisés par leur nombre. Ce nombre de déplacements varie au cours de la journée, de la semaine, de l'année. Le choix de se déplacer ou pas pour un individu peut dépendre de ses activités, de sa situation socio-économique, de son âge, de la composition de son ménage… La connaissance du nombre de déplacements effectués sur la zone étudiée est déterminante pour représenter le trafic.

2.2.1.1. Les données sources

Le nombre de déplacements n'est pas connu à chaque instant sur l'ensemble du territoire, il est donc généralement estimé, dans les modèles, à partir de données d'enquêtes (Bonnel, 2001) mais aussi à partir de comptages routiers (Arfaoui, 1999). Différentes approximations peuvent être d'une part liées aux données brutes récoltées (définition du terme de déplacement, réponses incohérentes…) et d'autre part à l'exploitation de ces données dans les modèles (représentativité de l'échantillon…). Il est montré par exemple dans (Bonnel, 2001) que deux interprétations différentes du terme

« déplacement » (l'une le considérant à chaque changement d'activité et l'autre pour une chaîne de déplacements) peuvent conduire à des différences de 15 à 20 % des nombres estimés par les enquêtes.

2.2.1.2. Les déplacements couverts et non couverts

Il est souvent nécessaire d'avoir différentes sources de données afin de caractériser tous les types de déplacements. Les Enquêtes Ménages Déplacements, par exemple, principales bases de données utilisées, répertorient tous les déplacements de personnes ayant leur origine et leur destination dans une agglomération ou une aire urbaine. Les déplacements n'ayant ni leur origine ni leur destination (transit) dans la zone étudiée, mais utilisant le réseau de la zone étudiée ne sont donc pas répertoriés. Ceux ayant leur origine ou leur destination hors de la zone (échange) ne sont pas non plus répertoriés. D'autres sources de données sont donc nécessaires (comptages et interviews d'automobilistes in situ).

Un des artifices de la modélisation utilisé dans le projet EvalPDU afin de quantifier les déplacements de transit et d'échange a été de modéliser toute l'aire urbaine de Nantes pour ensuite ne garder que les résultats de la zone de Nantes Métropole. Selon le document (Laurent Fouillé, 2011), la part des mouvements d'échanges dans les déplacements sur Nantes Métropole est de 10,5 % alors que la part des kilomètres parcourus par des déplacements de transit est de 26,5 %. La part relative des déplacements d'échanges et de transit en termes de kilomètres parcourus est donc très importante. L'incertitude liée à leur estimation peut peser dans l'estimation globale des déplacements.

2.2.2. Déplacements des véhicules de transports en commun

Un nombre de déplacements des véhicules de transport en commun est aussi présent sur la zone étudiée. Il équivaut au nombre de véhicules TC programmés pour circuler sur le réseau. Ce nombre est facilement estimable puisqu'on peut connaître précisément le nombre de déplacements des bus et des cars pour chaque jour et chaque heure suivant leurs fiches d'horaires. Certains modèles statiques estiment un nombre de déplacements moyens sur une plage horaire induisant ainsi une approximation du nombre de déplacements en transport en commun.

2.2.3. Déplacements des camions

Le nombre de déplacements de transport de marchandises est appréhendé par des enquêtes routières in situ, des comptages Poids Lourds, les enquêtes Transport Routier de Marchandises, les enquêtes OD routières… Cette estimation paraît néanmoins compliquée dans la plupart des études car les données sur les déplacements de marchandises sont rares et les échantillonnages sont la plupart du temps faibles.

Le modèle FRETURB permet de pallier certaines de ces contraintes en prenant en compte les règles de fonctionnement de la logistique urbaine ainsi que l'occupation de la voirie (stationnement, trafic). Ce modèle n'est pas basé sur les flux de i à j comme dans les modèles à 4 étapes mais sur la représentation des opérations de livraison / enlèvements (mouvements) (Toilier, et al., 2005).

Dans le projet EvalPDU, le trafic PL (qui regroupe les camions, les bus et les cars) représente 8,4 % du trafic total, cette valeur doit être moins élevée si on calcule la part des déplacements, les déplacements PL étant globalement plus longs que les déplacements des particuliers. Néanmoins, les poids lourds émettant globalement largement plus de polluants (un poids lourds émet 10 fois plus de NO_x à 70 km/h qu'un véhicule léger (SETRA, 2009)), la marge d'incertitude de l'estimation du nombre de PL peut peser dans l'estimation globale des émissions de polluants.

2.2.4. Agrégation des données permettant de quantifier les déplacements

Afin d'estimer un nombre de déplacements total sur l'ensemble de la zone étudiée, l'agrégation des données multi-sources (enquêtes ménage déplacements, comptages routiers, enquête OD particulières…) peut induire des biais du fait des différences de zonages des enquêtes, des différents types de données récoltées ou des différences de date des enquêtes…

2.2.5. Évolution prospective

Dans le cadre d'une étude prospective, il est nécessaire d'estimer une évolution de ce nombre de déplacements. Cette évolution peut être liée à l'évolution démographique, aux caractéristiques socio-économiques et de mobilité des individus… L'ensemble de ces évolutions font donc l'objet d'hypothèses. L'étude de (Rodier & Johnston, 2002) qui s'attache à comparer les incertitudes liées à différentes variables d'entrée que sont le taux d'emploi, la population, le revenu des ménages ainsi que le prix du carburant, permet de déterminer les variables qui sont les plus sensibles. Dans cette étude, les auteurs font varier une seule variable à la fois en utilisant différentes sources de données et observent les variations sur les émissions de polluants et le trafic. Leurs résultats montrent que l'incertitude liée aux projections de population et aux taux d'emploi peut induire des résultats contradictoires dans l'évaluation environnementale a priori d'un plan régional de transport. C'est-à-dire que la variation des émissions de polluants induites par le plan régional de transport, telle que modélisée dans l'étude, est comprise dans la marge d'erreur des résultats de simulation. Cette étude est réalisée avec des données prospectives, ils testent donc ici les incertitudes des données d'entrée en prospective.

2.2.6. Exemples d'études de sensibilité du nombre de déplacements sur le trafic et les émissions de polluants

L'étude de (J. Nicolas, 1996) présente une évaluation de l'impact d'une variation du nombre de déplacements (de -30% à + 30 % du nombre estimé pour la situation de référence) sur le trafic et les émissions de polluants. On observe qu'une augmentation du nombre de déplacements de 30% (+46 360 déplacements) induit une baisse de la vitesse moyenne sur les tronçons de 11 km/h et une augmentation générale des émissions de polluants de + 27 % pour les NO_x à +50 % pour le CO_2 et les Poussières. A contrario, une baisse de 30% du nombre de déplacements entraîne une augmentation de la vitesse moyenne de déplacements de 31km/h ainsi qu'une augmentation de la longueur moyenne de déplacements de 1,2 km.

Ces résultats sont néanmoins à prendre avec précaution car ils n'incluent pas les émissions de PL et car le parc de véhicules utilisé afin de simuler les émissions de polluants est le parc de 1990. Or le parc de véhicules évolue (part des véhicules diesel et essence et part des véhicules respectant les différentes normes EURO) et les véhicules nouvellement mis en circulation émettent globalement moins de polluants. Les variations d'émissions de polluants observées dans cette étude ne peuvent donc pas être généralisées à des parcs plus récents.

La variation du nombre de déplacements semble donc impacter largement d'une part le trafic des véhicules et d'autre part les émissions des principaux polluants.

Un deuxième exemple d'étude de la variation du nombre de déplacements est présenté dans (Air Pays de la Loire, 2012; L. Fouillé, 2011). Il est montré qu'une augmentation du nombre de déplacements de 20% modifie faiblement la répartition modale des déplacements sur le périmètre de Nantes métropole (la variation la plus élevée est de 3,2% pour les étudiants effectuant des trajets à

l'intérieur de Nantes). Globalement, la part des véhicules légers baisse alors que la part des TC et de la marche à pied augmente. L'impact est le plus significatif pendant les heures de pointe du matin et du soir car pendant ces plages horaires, le trafic est déjà important sur les grands axes. Une hausse de la demande de déplacements induit une hausse de la circulation automobile et donc une hausse des temps de parcours en VP. Le modèle représente donc des temps de trajet en TC ou en MàP plus compétitifs que les temps de trajet en VP. Le partage modal se fait en faveur de ces modes plus compétitifs. On observe également une baisse de la vitesse moyenne de 53 km/h à 49 km/h au niveau de l'agglomération ainsi qu'une augmentation des distances parcourues de 12,5%. L'impact sur les émissions du secteur routier est compris entre +9% (NO_2) et +18% (C_6H_6) à l'échelle de l'agglomération. Les polluants CO, C_6H_6 et COV sont les plus impactés, en lien avec une dégradation des conditions de circulation (augmentation de la saturation des voies de circulation). L'ensemble des axes routiers est concerné par une augmentation des émissions de NO_x. Cette augmentation est comprise entre 8 et 13% pour le périphérique, globalement inférieure à 10% sur les principales pénétrantes et inférieure à 5% au niveau de l'axe du Busway. La voirie secondaire est plus impactée avec une augmentation globalement supérieure à 15% et pouvant dépasser 25% sur la petite voirie. L'augmentation des émissions la plus marquée au niveau de la voirie secondaire, permet de confirmer un report de trafic lié à la saturation des axes principaux. L'augmentation de la mobilité entraine de nombreux automobilistes à emprunter des itinéraires « bis » de contournement devenant plus attractifs que la voirie principale

2.3. Répartition modale des déplacements

Le nombre de déplacements est réparti suivant les différents modes de transport.

2.3.1. Offres de transport

La première approximation des modèles est de ne représenter qu'un choix limité de modes de transport. Le mode vélo est ainsi rarement représenté dans les modèles et le mode deux roues motorisés est souvent assimilé au mode VL. Ces approximations peuvent avoir une influence sur les parts modales ainsi que sur le processus de choix modal puisque le choix des modes non représentés doit être assimilé au choix d'un autre mode de transport.

2.3.2. Comportements de choix modal

Chaque individu choisit le mode de déplacements qu'il va utiliser pour effectuer son déplacement. Ce choix peut être fonction des modes qui lui sont accessibles, de la comparaison entre les différents temps de trajet pour chaque mode, de la distance à parcourir, du coût du déplacement, du motif de déplacement, de son âge, de sa condition physique, des personnes qui l'accompagnent, de la météo …

2.3.2.1. Sources de données

Les données disponibles permettant de représenter le choix modal des individus sont principalement les enquêtes de préférences déclarées, qui permettent d'identifier les critères pris en compte dans le processus de choix modal. L'analyse de l'EMD permet d'obtenir une répartition modale de tous les déplacements enquêtés. Elle permet par ailleurs de déduire des constantes liées par exemple au motif de destination, à la longueur du déplacement, à la composition du ménage… et ainsi d'appréhender les processus de choix modal.

2.3.2.2. Segmentation de la population

Le modèle ne peut représenter le choix de chaque individu car cela nécessiterait trop de données. Dans certains cas, des groupes d'individus ayant des comportements similaires sont formés. Cette segmentation de la population induit une uniformisation des comportements pour chaque segment de population. Néanmoins, une autre méthode consiste à sélectionner des critères et des combinaisons de critères pour lesquels leurs valeurs sont assimilées à un comportement particulier. Cela permet donc d'avoir une vue désagrégée du choix modal.

2.3.3. Processus de choix modal dans le modèle

2.3.3.1. La fonction d'utilité

Le choix modal peut être représenté sous la forme d'une fonction d'utilité (fonction mathématique) en fonction de la combinaison de plusieurs critères.

2.3.3.2. Choix des critères et de leur valeur

Les critères de la fonction d'utilité peuvent être : les valeurs du temps pour chaque segment de population, le temps de parcours, le coût de déplacements… Le choix de ces critères (le nombre et la nature) est une simplification du modèle qui influence la répartition modale (Bonnel, 2001).

Des études montrent la variabilité des sorties du modèle en fonction de la variabilité des critères utilisés pour l'étape de répartition modale. Il est ainsi largement démontré que les contraintes de stationnement influencent le choix modal. La non prise en compte de variables représentant ces contraintes biaisent donc la répartition modale (Bonnel, 2001). L'étude de (Teillac, 2010) montre à ce sujet une comparaison de différentes méthodes permettant de calculer des pénalités de stationnement servant au calcul du temps généralisé. L'étude ne va pas jusqu'à simuler les parts modales ainsi estimées mais la variation importante (de 0,21 min à 8,51 min pour le scénario de référence par exemple) des pénalités (en durée de parcours) suivant les méthodes laissent penser que l'impact sur les parts modales sera important.

Par ailleurs, nous n'avons pas trouvé d'analyse de sensibilité sur les valeurs du temps qui sont un des critères de la fonction d'utilité. La valeur de temps représente le coût que l'on attribue à chaque seconde dans un trajet. Un segment de population à forte valeur de temps aura tendance à prendre un chemin plus rapide, même s'il coûte plus cher, car le coût associé au temps perdu dans un trajet plus long aura un poids important. Typiquement, les segments Actifs ont une valeur du temps plus forte que celle des Inactifs ou des Etudiants. Or l'étude du (SETRA, 2010) montre que de fortes disparités régionales de ces valeurs peuvent être observées alors que ce sont principalement des valeurs moyennes issues du rapport Boiteux (Boiteux, 2001) qui sont utilisées. Cette étude nous indique par conséquent, que ce paramètre est souvent remanié lors de la calibration des modèles.

2.3.3.3. Validité du processus de choix modal

Afin de déterminer la validité du processus de choix modal pour une situation donnée, il est possible de comparer la répartition modale observée à partir des données de l'EMD avec la répartition modale estimée par l'outil de modélisation. Le Tableau 22 élaboré avec des données produites par le projet EvalPDU présente cette comparaison selon trois périmètres : Nantes, la Communauté Urbaine de Nantes et l'Aire Urbaine comprenant Nantes. On peut remarquer que les parts de chaque mode sont

assez bien représentées. Les variations ne sont pas supérieures à 6%. Afin de tester la sensibilité du processus à la distance et au temps de transport, il est possible de comparer les répartitions modales en fonction des classes de distances parcourues. L'annexe 5 présente une première analyse afin de répondre à cette sensibilité. Les tableaux représentent les répartitions modales observées et estimées en fonction des types de trajet (à l'intérieur de Nantes, Nantes vers l'extérieur de Nantes…). Cependant, ces analyses ne permettent pas de valider le processus de choix modal pour d'autres scénarios. En effet, le choix des critères et leur valeur ont été déterminés pour représenter la situation observée. Ces analyses ne nous permettent pas de définir si les évolutions de comportements pourront être traduites d'une manière pertinente grâce aux critères choisis.

		ENQUETE MENAGES			**ESTIMATION**			**DIFFERENCES**		
		Flux Tot MAP	Flux Tot VP	Flux Tot TC	Flux Tot MAP	Flux Tot VP	Flux Tot TC	Flux Tot MAP	Flux Tot VP	Flux Tot TC
Nantes	Actifs motorisés	26,0%	63,3%	10,7%	23,5%	63,9%	63,9%	-2,5%	0,6%	1,9%
	Inactifs motorisés	34,2%	56,1%	9,7%	34,6%	54,7%	54,7%	0,4%	-1,4%	1,0%
	Etudiants motorisés	20,3%	54,2%	25,5%	20,3%	56,7%	56,7%	0,0%	2,5%	-2,5%
	Nantes tous segments	27,2%	60,5%	11,8%	26,8%	60,4%	60,4%	-0,4%	-0,1%	1,0%
CUN	Actifs motorisés	11,7%	81,5%	6,8%	11,6%	81,3%	81,3%	-0,1%	-0,2%	0,3%
	Inactifs motorisés	22,2%	71,2%	6,6%	24,7%	68,8%	68,8%	2,5%	-2,4%	0,0%
	Etudiants motorisés	11,6%	68,8%	19,6%	15,6%	64,6%	64,6%	4,0%	-4,2%	0,3%
	Nantes tous segments	14,3%	78,2%	7,5%	15,6%	77,0%	77,0%	1,3%	-1,2%	0,0%
AU	Actifs motorisés	10,1%	83,9%	6,0%	11,2%	82,1%	82,1%	1,1%	-1,8%	0,7%
	Inactifs motorisés	19,6%	74,8%	5,6%	25,2%	68,8%	68,6%	5,6%	-6,0%	0,5%
	Etudiants motorisés	10,1%	69,6%	20,3%	15,4%	64,8%	64,8%	5,3%	-4,8%	-0,5%
	Nantes tous segments	12,4%	80,8%	6,7%	15,2%	77,8%	77,8%	2,8%	-3,0%	0,2%

Tableau 22 Comparaison entre les parts modales observées (EMD) et reproduites par simulation des déplacements dans le Projet EvalPDU

2.4. Répartition temporelle des déplacements et du trafic

2.4.1. Comportements de choix d'horaire des déplacements et données source

Chaque individu décide de l'instant à laquelle il quitte le lieu d'origine de son déplacement. Celui-ci dépend principalement du motif du déplacement, de la personne effectuant le déplacement… L'instant de la réalisation du déplacement et donc le trafic sont répartis dans le temps. Les enquêtes Ménages Déplacements récoltent des données sur l'horaire de départ de chaque déplacement enquêté. Le choix des jours d'enquête permet de définir un nombre de déplacement moyen pour un jour de l'année.

2.4.2. Discrétisation temporelle des comportements de déplacement et des OD

Les données de l'EMD ne fournissent pas finement les horaires de départ des déplacements enquêtés, ceux-ci dépendent de la bonne appréciation de l'enquêté. De plus, ces données sont uniquement disponibles pour les déplacements enquêtés. Il est donc difficile de créer des matrices OD dynamiques c'est-à-dire, qui fluctuent à un pas de temps faible (de l'ordre de la minute par exemple) et qui soient représentatives de la réalité.

Les modèles statiques, qui sont appliqués à grande échelle et qui simulent un nombre important de déplacements, intègrent donc des matrices sur des plages horaires plus importantes (de l'ordre de l'heure ou plus suivant les modèles). Ces plages horaires sont constituées à partir de l'analyse des données de l'enquête déplacement. Des plages pendant lesquels la demande de déplacements est relativement homogène peuvent être constituées. Quatre plages horaires peuvent, par exemple, être simulées : l'heure de pointe du matin, l'heure de pointe du soir, l'heure creuse de jour et l'heure creuse de nuit.

2.4.3. Distinction semaine / WE / vacances : saisonnalité

Les données EMD ne permettent pas de représenter une variabilité du nombre de déplacements suivant les jours de la semaine, les jours de week-end, les jours de vacances… Les caractéristiques de ces types de déplacements (déplacements à plus grande distance en famille et pour les loisirs par exemple pendant les vacances) ne sont généralement pas prises en compte.

2.4.4. Cas des déplacements TC, camions

Les fiches horaires des services de transport en commun fournissent précisément la répartition temporelle des déplacements TC sur le réseau. Cependant, dans un souci de simplification et notamment pour une modélisation par plages horaires, les déplacements des TC peuvent être représentés sous forme de cadence moyenne sur la plage horaire.

Le manque de données concernant les déplacements PL et la complexité du schéma de fonctionnement des transports de marchandises (livraisons, tournées…) permettent rarement de définir des matrices PL par tranches horaires à l'échelle d'une agglomération. Les données de comptage PL sur certains axes permettent néanmoins de segmenter la matrice journalière en matrices par plages horaires selon les profils de trafic relevés afin d'évaluer grossièrement la répartition horaire des déplacements PL. Grâce à la prise en compte des mouvements (livraisons et enlèvement des marchandises) le modèle FRETURB permet de définir plus finement la répartition horaire des déplacements par type de véhicules (Toilier, et al., 2005).

2.4.5. Dynamique du trafic

La représentation du trafic par périodes temporelles supérieures à l'heure (plage horaires, 24h…) masque la dynamique du trafic et notamment les phénomènes liés à la congestion. Elle induit donc de fortes approximations. L'étude de (CETE Nord Picardie, 2009) précise à ce sujet, qu'une affectation par plages horaires (2 de pointes et 2 creuses) tend à sous estimer les trafics à l'heure de pointe sur les axes principaux et à surestimer les vitesses, mais les valeurs des variations entre les deux méthodes ne sont pas précisées dans cette étude.

2.5. Spatialisation du trafic

A l'échelle de l'agglomération, les véhicules circulent sur les différents tronçons du réseau. À un instant t, la répartition spatiale du trafic correspond au nombre de véhicules et aux caractéristiques cinématiques de chaque véhicule pour chaque unité de réseau (tronçon, mètre …).

2.5.1. Qualité de la modélisation du réseau (couverture), des réseaux (TC, routes, ferroviaires, 2R, etc.)

Une première approximation est réalisée afin de traduire cette réalité dans les modèles en définissant un réseau routier structurant. Cela est principalement réalisé pour éviter des temps de calculs trop longs. Dans (CETE de l'Ouest, 2011), seuls 25% du réseau est modélisé mais le trafic circulant sur le réseau non modélisé (trafic intrazone et trajets terminaux) ne représenterait que 7% des vehicules.km circulant sur le réseau modélisé. Les individus voient donc la représentation de leur choix d'itinéraires faiblement restreinte (sauf si la capacité du réseau non modélisé est importante). Dans les modèles, la définition du réseau est généralement fonction de l'objectif de l'étude et du découpage zonal. Ce réseau doit pouvoir assurer l'écoulement des flux. Le réseau peut être codé dans l'ordre d'importance décroissante des routes, jusqu'au niveau inférieur au dernier niveau auquel la connaissance des débits affectés présente un intérêt (Leurent, 1997). Dans certains modèles, une réserve de capacité de la voirie du réseau modélisé permet de représenter ce trafic sur le réseau modélisé. La représentation dans le modèle est donc modifiée par rapport à la réalité afin de satisfaire les contraintes du modèle.

2.5.2. Comportement de choix d'itinéraire : sources de données, segmentation / simplification

Chaque individu qui se déplace du lieu A vers le lieu B choisit son propre itinéraire. Généralement dans une agglomération, plusieurs itinéraires sont en effet possibles pour rejoindre deux points de l'espace. Ce choix peut être fait en fonction du temps de parcours, de la connaissance que l'individu a du réseau, de sa connaissance des conditions de trafic, du coût du déplacement (coût d'un péage par exemple), de la longueur des itinéraires…

2.5.3. Processus d'affectation dans les modèles de déplacement

Un seul processus de décision est défini pour tous les individus. Différents principes d'affectation du trafic existent, intégrant des hypothèses différentes. Nous pouvons citer l'étude de (Nicolas, 1996) qui compare deux processus d'affectation : tout ou rien (sans contrainte de capacité sur les voies, c'est-à-dire sans prendre en compte la saturation du réseau) et l'équilibre de Wardrop. Une variabilité de l'ordre de 10-12 % est observée entre les trafics obtenus avec les options d'affectation tout ou rien et ceux calculés avec le principe de Wardrop. Suivant le processus d'affectation pris en compte, les choix d'itinéraires entre chaque O-D sont modifiés, ce qui se traduit systématiquement par des variations de trafic sur chaque arc et, éventuellement, une variation de la longueur des itinéraires. Le nombre ainsi que les origines et destinations des déplacements étant fixés, les baisses de trafics enregistrées sur un arc du fait d'un changement d'option de calcul se traduisent dès lors par une hausse sur d'autres arcs puisque les déplacements doivent de toute façon être réalisés. Les variations locales de trafic se compensent lorsque le bilan au niveau de l'agglomération est effectué. Si on prend comme exemple le scénario qui se rapproche le plus d'une situation réelle

d'heure de pointe dans une grande agglomération française, il est montré que les émissions de plomb, poussières, soufre et CO_2 ont augmenté de 10% dans le cas d'une affectation de Wardrop par rapport à une affectation tout ou rien. Les émissions de NO_x ont diminué de 17% et les émissions de CO et d'hydrocarbures ont augmenté respectivement de 19 et 28%.

2.5.3.1. Nombre d'itérations

Les processus d'affectation nécessitent, généralement, de nombreuses itérations pour que l'équilibre soit atteint, c'est-à-dire dans le cas du processus de Wardrop, que tous les itinéraires entre une origine et une destination aient le même temps de parcours. Ce nombre d'itérations est défini par le modélisateur. (Nicolas, 1996) montre que le nombre d'itérations peut influencer grandement les résultats de modélisation lorsqu'il est faible c'est-à-dire dans son exemple inférieur à 6. Au-delà la variation des résultats est faible. On peut donc considérer que ce paramètre est peu sensible puisqu'un aussi faible nombre d'itérations n'est généralement pas utilisé.

2.5.3.2. Le temps généralisé

Les processus d'affectation se basent généralement, comme c'est le cas dans le principe de Wardrop, sur les temps généralisés des différents itinéraires. Ceux-ci comprennent un temps de parcours et des paramètres liés au coût du déplacement. Ces temps généralisés permettent de comparer les différents itinéraires possibles entre une origine et une destination. L'approximation sur ces temps généralisés induit donc des erreurs sur l'affectation des itinéraires. L'étude (Nicolas, 1996) étudie une partie des approximations de ce temps généralisé en faisant varier un coefficient pénalisant les arcs à fort taux d'encombrement, un facteur distance et un bonus autoroutier, simultanément puis individuellement. Les résultats obtenus ne sont pas sensibles aux paramètres de calcul du temps généralisé. Les écarts des émissions de polluants ne dépassent jamais les 1% sur toute l'agglomération. Par contre, au niveau des tronçons de voirie, les variations d'itinéraires entre chaque OD provoquent des changements de trafic sensibles. La sensibilité à ces paramètres à l'échelle locale est donc plus importante qu'à l'échelle de l'agglomération.

2.5.3.1. Le temps de parcours, la courbe débit-vitesse et ses qualités

La deuxième et principale composante du temps généralisé est le temps de parcours. La courbe débit-vitesse permet de déterminer le temps de parcours en fonction du débit. Différentes formes de courbes existent et sont appliquées dans les modèles. Suivant le choix de cette courbe, les temps de parcours, puis l'affectation seront différentes. Il apparaît que le calage de ces courbes semble être influent (SETRA, 2010), (Bonnel, 2001) dans le calage global du modèle de déplacements.

2.5.3.2. Prise en compte de la dynamique du trafic (file d'attente, congestion, capacité, vitesse à vide …)

Dans les modèles statiques, la congestion est représentée par des situations pour lesquelles des tronçons ou une partie du réseau sont saturés. Mais cette saturation ne se propage ni dans le temps ni dans l'espace. L'étude (Nicolas, 1996) montre ainsi que par rapport à une simple prise en compte de la saturation, la représentation de la création de files d'attente et de la propagation de la congestion sur les voies amonts, pourrait apporter un gain de précision allant de 0 à 20 % suivant le type d'émission considéré.

Dans un modèle statique, la saturation dépend de la capacité de la voie. En effet, la voie ne peut supporter plus de véhicules qu'elle peut en contenir et plus la charge du réseau s'approche de la capacité maximale, plus la vitesse des véhicules baisse. Ce paramètre de capacité maximale est donc très important. Il est, par ailleurs, délicat à déterminer car il peut dépendre de différents critères comme la vitesse maximale autorisée, la largueur de la voirie, la sinuosité de la voie, le comportement des conducteurs…Une actualisation du réseau lillois, à partir de données de comptages, a ainsi permis d'observer une augmentation de la capacité d'une voie sur autoroute de 1800 uvp/h à 2200 uvp/h (CETE Nord Picardie, 2009) due aux évolutions des comportements des conducteurs (variation des écarts inter-véhiculaires par exemple) et à l'amélioration des performances des véhicules (capacité d'accélération plus importante, freinage plus performant).

La saturation dépend aussi des vitesses à vide sur la voie. Mais cette vitesse à vide ne correspond pas toujours à la vitesse maximale autorisée. En zone urbaine, par exemple, où des feux tricolores peuvent être présents, la vitesse à vide est généralement bien inférieure à la vitesse réglementaire.

2.6. Conclusion

L'estimation du nombre total de déplacements (tout mode confondu), la représentation de la congestion ainsi que l'estimation de la demande des véhicules de marchandises (quantification et localisation) et la répartition spatiale et temporelle de leur trafic semble être des composantes déterminantes car leur variation entraine des écarts importants de la vitesse des véhicules et des émissions de polluants.

L'intermodalité, les modes de déplacements doux (marche à pied et vélo), l'évolution des comportements en perspective ainsi que la dynamique du trafic sont des composantes qui sont négligées dans les modèles statiques. Pour différentes raisons liées aux hypothèses du modèle, au manque de données… ces composantes ne sont pas représentées. Les mesures modifiant ces composantes ne pourront donc pas être évaluées grâce à ces outils.

La répartition temporelle des déplacements, la demande de transport de marchandises et le trafic lié à cette demande ainsi que le nombre de déplacements de transit et d'échange sont des composantes que nous avons identifiées comme mal représentées dans les modèles. En effet, les données disponibles pour caractériser ces composantes sont faibles et les hypothèses et approximations prises pour les représenter sont importantes.

Enfin, la spatialisation des déplacements de particuliers effectués à l'intérieur de la zone d'enquête suivant les différentes OD semble bien représentée dans les modèles car le nombre de données (EMD ou INSEE) est important. Mais cela n'est valable que pour la situation représentée par les données des enquêtes. Il en est de même pour la répartition modale globale des déplacements qui semble être bien représentée dans les modèles au vu des faibles écarts entre les données d'enquête et les données reproduites par le modèle. En prospective par contre la validité de la représentation des comportements est difficilement évaluable.

3. La représentation des émissions de polluants dans les modèles

Sur le même schéma que la partie précédente, nous décomposons dans cette troisième partie, l'entité émissions de polluants en différentes composantes.

Afin d'identifier ces composantes, nous analyserons ici :

- Les approximations liées aux modèles
- Les approximations liées aux hypothèses de calcul
- Les approximations liées à la quantification du parc, des véhicules, du nombre de démarrage, des trajets
- Les conditions cinématiques des véhicules

3.1. Approximations liées aux modèles

3.1.1. Fonctions d'émissions à chaud, à froid, évaporation etc…

Afin de représenter les émissions de polluants de chaque véhicule circulant sur un réseau, les modèles définissent une relation entre les émissions, les caractéristiques des véhicules, leurs vitesses et leurs accélérations et décélérations. Cette relation est représentée sous forme de fonctions d'émission.

Les modèles simplifient la relation entre les émissions et certaines caractéristiques du moteur en ne représentant que deux états différents du moteur. La première représente la quantité d'émission produite dans le cas d'un moteur roulant à « froid » et la seconde dans le cas d'un moteur roulant à « chaud ».

3.1.2. Catégories de véhicules

Afin de pouvoir modéliser les émissions de tous les véhicules circulant dans une agglomération, des facteurs d'émissions par type de véhicule ont été définis. Associer un seul facteur d'émission par classe de véhicule induit une approximation surtout pour les classes de larges amplitudes. Ainsi un seul facteur d'émissions est défini pour l'ensemble des véhicules VP Diesel ayant une cylindrée supérieure à 2l.

3.1.3. Selon les polluants

Les relations entre les caractéristiques des véhicules et les émissions sont différentes selon les polluants. Cela est retranscrit dans les modèles par des facteurs d'émission spécifiques pour chacun d'entre eux.

3.1.4. Approximations (charge VP, pente, etc…)

Les relations entre les caractéristiques des véhicules et les émissions dépendent aussi d'éléments environnementaux comme les conditions météorologiques, la pente ou des conditions d'utilisation des véhicules (la charge).

Les modèles, ne pouvant représenter l'ensemble des conditions environnementales, définissent des relations pour des classes discrètes de pente, de conditions météorologiques, de charge du véhicule…

Concernant la charge des véhicules, il s'agit d'une simplification des modèles par rapport aux connaissances sur les facteurs d'émission (méthode Copert). Il n'est par ailleurs pas réaliste de ne considérer qu'un taux unique moyen de chargement pour l'ensemble d'un déplacement PL celui-ci se chargeant ou se déchargeant que ce soit pour le transport de marchandises ou le transport de personnes. Les taux proposés (en particulier la pleine charge) ne sont pas pertinents, le transport de marchandises (et encore plus de passagers) étant le plus souvent rempli en volume et non en poids hormis les véhicules citerne et denrées très lourdes.

L'effet de la charge du véhicule est estimé dans (SETRA, 2009). Les surémissions de NO_x et de CO_2 liées à la charge semblent importantes : un poids lourd vide roulant à 50 km/h émet 40 % d'émissions en moins qu'un poids lourds chargé. L'effet parait moins significatif pour les PM et nul pour les COV.

La charge des véhicules n'est pas toujours intégrée dans les modèles. Alors que la charge des véhicules PL est généralement prise en compte, celle des véhicules particuliers l'est rarement.

Concernant la pente des voies constituant le réseau, leur prise en compte est sommaire dans les modèles, souvent par plage de valeurs alors que l'effet de la pente sur les émissions de polluants peut être significatif. L'étude du (SETRA, 2009) estime par exemple que les émissions de NO_x et de CO_2 d'un poids lourds en montée de 6% sont environ 2 fois supérieures par rapport à une pente nulle et les émissions de PM sont 1,3 à 1,8 fois supérieures.

Il y a sans doute une sous-estimation des émissions par évaporation de carburant dans l'approche avec CopCETE car les émissions produites lors du stationnement des véhicules ne sont pas prises en compte.

3.1.5. Qualité des mesures – couverture des catégories

Les lois d'émissions ont été déterminées pour les véhicules pour lesquels des tests sur banc d'essai et mesures d'émission ont été effectués. Mais pour certains types de motorisation comme pour les véhicules hybrides ou électriques, ces lois d'émissions ne sont pas encore suffisamment expérimentées. Elles ne sont donc pas intégrées dans les modèles. La méconnaissance des facteurs d'émissions pour certains types de véhicules induit donc une approximation. Dans l'outil CopCETE, par exemple, les facteurs d'émissions pour les véhicules hybrides et pour les bus au GNV (Euro 4) sont inexistants alors que les villes ont des politiques volontaristes pour augmenter la part de bus à motorisation alternative.

Les facteurs d'émission ne sont pas tous connus avec la même précision. (Kouridis, Gkatzoflias, Kioutsioukis, & Ntziachristos, 2009) présentent ces marges d'incertitudes pour les facteurs d'émissions issus de la méthodologie COPERT 4 (Tableau 23). Même si ce tableau présente une estimation très générale et qualitative de la précision des facteurs d'émission, il permet de constater que la précision dépend du nombre de tests effectués pour chaque catégorie de véhicules. Il montre aussi que pour la même catégorie de véhicules les facteurs d'émissions pour des polluants différents peuvent être plus ou moins précis. Dans ce tableau, les facteurs d'émission des NO_x, CO, COVNM et CH_4 des véhicules particuliers fonctionnant au diésel, à l'essence et au GPL paraissent les mieux connus. Par contre, les facteurs d'émission à froid paraissent moins bien connus.

Vehicle Category	Pollutant							
	NO_x	CO	NMVOC	CH_4	PM	N_2O	NH_3	CO_2
Gasoline passenger cars								
Without catalyst	A	A	A	A	-	C	C	A
With catalyst	A	A	A	A	-	A	A	A
Diesel passenger cars								
All technologies	A	A	A	A	A	B	B	A
LPG passenger cars	A	A	A	-	-	--	-	A
Without catalyst	A	A	A	A	D	C	C	A
With catalyst	D	D	D	D	D	D	D	A
2-stroke passenger cars	B	B	B	D	-	D	D	B
Light-duty vehicles								
Gasoline	B	B	B	C	-	B	B	A
Diesel	B	B	B	C	A	B	B	A
Heavy-duty vehicles								
Gasoline	D	D	D	D	-	D	D	D
Diesel	A	A	A	B	A	B	B	A
Two-wheel vehicles								
< 50 cm³	A	A	A	B	-	B	B	A
> 50 cm³ 2-stroke	A	A	A	B	-	B	B	A
> 50 cm³ 4-stroke	A	A	A	B	-	B	B	A
Cold-start emissions								
Pass. Cars conventional	B	B	B	-	-	-	-	B
Pass. Cars Euro 1 and later	B	B	B	A	-	-	-	A
Pass. Cars diesel Conv.	C	C	C	-	C	-	-	B
Pass. Cars diesel Euro I	A	A	A	A	A	-	-	A
Pass. Cars LPG	C	C	C	-	-	-	-	B
Gas. Light-duty vehicles	D	D	D	-	-	-	-	D
Diesel light-duty vehicles	D	D	D	-	D	-	-	D

Note:

A: Statistically significant emission factors based on sufficiently large set of measured and evaluated data; B: Emission factors non statistically significant based on a small set of measured re-evaluated data; C: Emission factors estimated on the basis of available literature; D: Emission factors estimated applying similarity considerations and/or extrapolation.

Tableau 23 Précision des fonctions d'émission pour les différentes catégories de véhicules et les polluants (Kouridis, et al., 2009)

Les émissions liées à l'usure et l'abrasion des pneus ainsi que la remise en suspension des particules sont définies par des facteurs d'émission. Dans certains modèles, seules les émissions liées à l'usure des freins et des pneus sont quantifiés (comme dans la méthode Copert). Plusieurs phénomènes d'abrasion /usure (infrastructures routières, embrayage) ne sont pas quantifiées actuellement. Les émissions par usure et abrasion sont assez mal connues.

3.2. Approximations liées aux hypothèses de calcul d'émission

Pour un véhicule, les émissions de polluants dépendent des conditions d'usage du véhicule, des distances parcourues, de l'utilisation des auxiliaires, des conditions climatiques, de la composition du carburant, des conditions de circulation… Ces données constituent les données d'entrée du modèle pour un véhicule.

3.2.1. Conditions climatiques et leur variabilité temporelle

Les conditions météorologiques permettent de corriger les facteurs d'émission à froid en fonction de la température et de définir les émissions liées à l'évaporation. Les données météorologiques sont disponibles à des échelles locales. Mais comme une simulation représente des émissions journalières moyennes sur une année, ce sont généralement des conditions météorologiques moyennes qui sont prises en compte. Cette prise en compte de conditions moyennes de permet pas de représenter les variations saisonnières de température par exemple qui influencent les évaporations. La simulation d'une journée-type d'été (valeurs mensuelles de météo) ferait augmenter les émissions de COV de plus de 35% (M André, et al., 2012).

3.2.2. Composition des carburants et variabilité spatio-temporelle et non temporelle

Les propriétés des carburants (teneurs en PB, S, etc.), leur contenu en CO_2, les proportions en agro-carburants… sont des caractéristiques propres des carburants suivant le lieu d'approvisionnement (les distributeurs) et la période de l'année (été, hiver). La composition des carburants est intégrée, dans les modèles, comme une valeur unique par année et pour tous les véhicules circulant sur la zone étudiée car les statistiques sont peu disponibles. Les émissions semblent peu sensibles au travers des modèles (faute de travaux expérimentaux) mais les teneurs en certains COV et HAP devraient être fortement influencées par les carburants.

3.2.3. Conditions et usages des véhicules

Les conditions d'utilisation des véhicules telles que la longueur de trajet, la charge des véhicules ou encore la pente ont, comme nous l'avons vu dans la partie précédente, une influence sur les émissions de polluants. Ces conditions sont des données d'entrée des modèles.

La connaissance des usages (longueurs de trajet, durée de stationnement…) permet de quantifier les émissions à froid et les évaporations. La connaissance des lieux (origine du déplacement, itinéraire, parking,…) permet de spatialiser ces émissions. Cela nécessite des statistiques spécifiques et si possible locales. Ces données peuvent aussi être issues des outils de modélisation des déplacements. Néanmoins, il est difficile d'obtenir des données pour chaque véhicule circulant sur le réseau.

La charge des véhicules est aussi une donnée d'entrée des modèles qui nécessite des statistiques spécifiques qui sont très rarement disponibles.

Par contre, la pente des voies composant le réseau est une donnée facilement disponible notamment à partir d'un modèle numérique de terrain.

3.2.4. Utilisation des auxiliaires

L'utilisation des auxiliaires est difficilement estimable pour chaque véhicule. Cette utilisation peut être estimée en fonction par exemple de la température extérieure afin de caractériser l'utilisation de la climatisation. D'autres modèles intègrent d'une manière intrinsèque cette utilisation comme une moyenne pour l'ensemble des véhicules.

3.3. Approximations liées à la quantification du parc, des véhicules, du nombre de démarrage, des trajets

Afin de déterminer les émissions de polluants sur un territoire, il est nécessaire de connaître le nombre de véhicules circulant sur le réseau et leurs caractéristiques (longueur et nombre de trajets, nombres d'arrêts et de démarrages)… Ces données permettent de connaître la composition du parc de véhicules roulant sur le territoire.

3.3.1. La composition du parc de véhicules

Pour calculer la quantité de polluant émise sur une zone, il faut donc connaître dans un premier temps la composition du parc automobile. Cette composition est une donnée importante du calcul d'émission, notamment par la distribution entre les différentes catégories de véhicules (véhicules légers, lourds, autobus, autocars, 2 roues) mais aussi et surtout par la répartition entre essence et diésel (émissions très différentes), et selon l'âge qui correspond aussi à l'évolution des réglementations des émissions de polluants des véhicules. Ce dernier paramètre est sans conteste le plus significatif ou explicatif des émissions des véhicules, sans doute devant les paramètres de circulation (vitesse, etc.). Différentes sources de données (les fichiers des immatriculations) permettent de reconstituer une répartition des véhicules immatriculés par catégorie. Cette composition est généralement nationale, et peut être différenciée suivant les types de voies (voir partie 3.3.3). Des sources de données comme le SOeS permettent d'obtenir des données départementales. La comparaison entre les deux compositions de parc permet d'avoir un ordre de grandeur de l'approximation faite en prenant en compte des données nationales. Le Tableau 24 présente une comparaison entre la composition du parc national CITEPA et la composition du parc département des Pays de la Loire. Les variations observées au niveau des catégories de véhicules sont négligeables. Les plus grands écarts, bien que minimes, se situent au niveau des VUL et des PL et peuvent être dus aux différences de définition des catégories de véhicules entre les deux sources de données. Ce tableau ne présente néanmoins que les grandes catégories de véhicules. La comparaison des données détaillées par type de motorisation, poids du véhicules, norme EURO ou encore âge des véhicules n'est pas toujours aisée à cause de la non uniformité des classes suivants les sources et à cause des données assez pauvres au niveau du département. Il a ainsi néanmoins démontré dans une étude sur Lyon, qu'il était possible de reconstituer une composition du parc local (à l'échelle d'une agglomération) à partir des données d'une EMD (Nicolas, et al., 2011).

	2002 Pays de la Loire	2002 National	% 2002 Pays de la Loire	% 2002 National	2008 Pays de la Loire	2008 National	% 2008 Pays de la Loire	% 2008 National
Voitures Particulières	1 680 888	29 126 341	83,2	83,1	1 761 550	30 890 239	83,0	83,0
Véhicule Utilitaires Légers	280 187	5 294 003	13,9	15,1	294 057	5 699 508	13,9	15,3
Poids Lourds	55 185	565 511	2,7	1,6	61 103	564 018	2,9	1,5
Bus/car	4 631	80 003	0,2	0,2	5 044	81 252	0,2	0,2
Total	2 020 891	35 065 858	100,0	100,0	2 121 754	37 235 017	100,0	100,0

Tableau 24 Comparaison des parcs de véhicules en circulation du département des Pays de la Loire (source SOeS[9]) et national (source CITEPA[10])

[9] http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr

[10] http://www.citepa.org

La représentation de l'évolution de cette composition du parc dans les années futures fait intervenir diverses hypothèses sur l'achat de véhicules ou sur la répartition des véhicules en fonction de leur motorisation.

3.3.2. La répartition du trafic suivant les catégories de véhicules

Le nombre de kilomètres parcours par chaque catégorie est une information nécessaire pour déterminer les véhicules circulant effectivement sur le territoire étudié car des véhicules peuvent être immatriculés mais inutilisés ou encore une certaine catégorie de véhicules peut rouler davantage et donc être davantage représentée sur la zone étudiée. Cette information est représentée par des hypothèses assez grossières de kilométrage annuel moyen en fonction de la catégorie et de l'âge du véhicule.

L'étude de (Nicolas, 1996) étudie l'influence de la variation de la composition du parc (en % de vehicules.km) sur les émissions de polluants. Ses résultats montrent d'une part qu'une modification de la part des poids lourds de + ou – 25 % et de + ou – 50 % (le trafic total restant constant) induit des variations très importantes des émissions de Poussières (variation de 15 et 30%) et relativement importantes pour les CO_2, NO_X et SO_2 (variation de 6 et 13%). Et d'autre part qu'une variation de la part des véhicules légers essence par rapport à la part des véhicules légers diesel de + ou – 25% et de + ou – 50% induit des variations de l'ordre de 4 et 8% pour le CO, de 2 et 4% pour les NO_x, de 0,4 et 0,8% pour le CO_2 et de 8 et 17% pour les poussières. Ces résultats sont néanmoins à prendre avec précaution car les données sont anciennes et que la proportion des véhicules diésels était bien inférieure à celle d'aujourd'hui.

Il existe différentes répartitions nationales du trafic suivant les catégories de véhicules comme les parcs CITEPA ou IFSTTAR (André, Roche, & Bourcier, 2012) qui s'appuient sur des hypothèses différentes (lois de survie,...). Une comparaison de l'utilisation de ces deux parcs est réalisé dans (André, et al., 2012). Ils en concluent que les écarts sont insignifiants pour de nombreuses substances mais une influence très significative est observée sur le CO (26%), les COV (8-9%) et les évaporations (-24%). Ces écarts peuvent trouver une justification dans les taux différents de diésélisation des voitures entre les deux parcs (parc Ifsttar 67%, parc Citepa 64,5%), de répartition par âge un peu différente (58,5% de véhicules Euro 3 et suivants contre 59,4% parc Citepa) ou d'autres hypothèses (configuration véhicules lourds).

La prise en compte de l'évolution du parc paraît importante au regard de l'étude du (SETRA, 2009) qui montre que l' « effet évolution du parc » est perceptible pour toutes les courbes d'émissions (sauf pour le CO_2) et aussi bien pour les VL et les PL avec généralement une translation de la courbe d'émissions vers le bas à mesure que le parc évolue dans le temps. Dans (André, et al., 2012) il est montré que la simulation des émissions de polluants en utilisant un parc 2010 (au lieu de 2008) conduit à des diminutions d'émission de 15 à 25 % pour la plupart des polluants, de près de 40% des évaporations et de 80% du SO_2 (abaissement du seuil dans les carburants). Paradoxalement, les NOx et les PM (polluant d'enjeu actuel) décroissent beaucoup moins (cause diésélisation encore en hausse), les consommations et CO_2 ne décroissent pas. À l'horizon 2012, ces décroissances sont quasiment doublées : entre 30% et 48% pour les différents polluants, 60% pour les évaporations, 13 et 20% pour les PM et NOx. Les GES augmentent par contre de 6%.

3.3.3. La spatialisation des parcs

La spatialisation des parcs automobiles (et en amont des trafics) est en lien direct avec la problématique de l'air, en ce qui concerne la pollution locale (polluants à impacts sanitaires, en

proximité de trafic). Elle l'est bien sûr beaucoup moins ou pas du tout pour la consommation d'énergie et les gaz à effet de serre.

Les calculs d'émissions de polluants sont affectés de deux manières par la spatialisation : 1- au niveau de l'affectation de compositions-types du parc automobile (parc urbain, parc autoroutier, etc.), 2- au niveau de l'affectation réelle des trafics des différentes catégories de véhicules (voitures, bus, 2-roues, camions, etc.), qui de fait n'est qu'imparfaitement approchée par la modélisation du trafic.

3.3.3.1. Affectation d'un parc automobile type par catégorie de voies (urbain, rural, autoroutier)

Des compositions de parcs par catégorie de voies sont disponibles, mais elles reposent sur des hypothèses très fragiles (% de kilométrage en ville, route, autoroute). L'affectation de ces parcs suivant les catégories de voie qui sont déterminées par la reconstitution du réseau routier conduit à des écarts importants même par rapport aux estimations dites nationales (Tableau 25) (André, et al., 2012). Ainsi on observe une forte distorsion du parc supposé rouler sur le périmètre de Nantes Métropole par rapport au parc national, avec un quasi doublement de la part autoroutière. La composition du parc autoroutier se distingue d'un parc urbain principalement par les catégories de véhicules : camions de plus fort gabarit, voitures diésel et de grosses cylindrées. Même si ces distorsions sont limitées (et plus limitées par rapport au rural), il est vraisemblable que cette incohérence puisse avoir une incidence sur le calcul d'émission.

Ainsi l'estimation des émissions sur l'heure de pointe du matin, en considérant une composition essentiellement urbaine conduit à majorer les émissions de 7 à 12% (COV, benzène, NH_3, CO), les évaporations de 10%, tout en réduisant les NOx, consommations et gaz à effet de serre de 3%. Ceci s'explique par des véhicules plus petits et plus fréquemment à essence, qui caractérisent le parc urbain.

Répartition des trafics selon les compositions types de parc	Estimation nationale (parc Ifsttar 2008)	Répartition résultant de l'affectation sur Nantes Métropole
Urbain	31,5	36,6
Rural	45,8	20,4
autoroutier	22,7	43,0

Tableau 25 Affectation des compositions de parc automobile (urbain/rural/autoroutier) sur Nantes Métropole, heure de pointe matin et comparaison aux estimations nationales (parc Ifsttar 2008)

Il est fortement possible que le parc de cette agglomération soit plus fortement urbain que ne le prévoit la classification actuelle des voies.

3.3.3.2. Composition du parc au niveau de la rue

La répartition des véhicules selon leur catégorie est appliquée, comme nous venons de le voir, sur l'ensemble d'une catégorie de voies. On peut cependant mentionner une incertitude liée au fait que ces répartitions sont appliquées indépendamment des lieux. Les bus et les TC sont par exemple affectés sur l'ensemble des voies urbaines en fonction du trafic, cependant ceux-ci sont localisés précisément sur le réseau (itinéraires TC). Cette spatialisation induit des incertitudes faibles pour le cas des TC au niveau global car les trafics sont limités mais localement les écarts pourraient être significatifs entre une affectation au prorata et une affectation réelle.

3.3.4. Quantification et localisation des démarrages à froid

Afin de représenter les relations différentes entre la vitesse et les émissions de polluants selon que le moteur fonctionne « à froid » ou « à chaud », il serait nécessaire d'estimer le nombre de kilomètres parcourus pour chaque déplacement, la durée d'arrêt du véhicule depuis son dernier trajet ainsi que la localisation des émissions à froid.

Dans les applications sur un réseau routier, ce problème est généralement contourné en représentant une part de véhicules circulant à froid sur chaque tronçon car nous n'avons plus la description de l'ensemble des déplacements mais nous avons la charge du réseau. Cette représentation induit une approximation du phénomène. Les surémissions à froid par tronçon pourraient dépendre du type de voie, de la localisation… Une méthode d'estimation d'un taux moyen de surémissions est proposée dans (EMEP/EEA, 2009a). Elle prend en compte la longueur moyenne estimée d'un déplacement et la température moyenne.

L'impact de la variation du taux de VL roulant à froid sur les émissions de polluants est analysé dans (Nicolas, 1996). Ce taux évolue de 14% à 41%. Les résultats montrent que lorsque l'on double le taux de VL roulant à froid (de 20% à 41%), les émissions de CO varient de 17%, les émissions de HC de 25%, les émissions de Pb de 10%, les émissions de SO_2 de 6%, les émissions de CO_2 de 5%, les émissions de PM de 3% et les émissions de NO_x de 1%. Il est montré par ailleurs dans (SETRA, 2009) qu'une variation de 40% à 100% (totalité du trajet à froid) de la longueur de trajet à froid induit des variations de 10 % pour les émissions de CO_2 et de NO_x, de 30% des émissions de PM et de presque 100 % des émissions de CO et COV.

Les surémissions à froid varient selon la température extérieure. Pour un mois d'hiver par exemple, les surémissions sont plus conséquentes. Alors que cette saisonnalité est prise en compte par des conditions météorologiques moyennes pour chaque mois de l'année, la variation des températures au cours de la journée n'est généralement pas prise en compte (elle l'est pour certains outils comme HBEFA).

Enfin, ces surémissions ne sont pas intégrées dans le calcul des émissions provenant des poids lourds car il est supposé qu'elles sont moindres à cause de trajets beaucoup plus longs (pour les PL) ou d'une utilisation du véhicule plus intense (pour les Bus).

3.3.5. Le volume de trafic, nombre de déplacements

3.3.5.1. Volume de trafic dans une rue

Ces volumes sont issus de statistiques locales, de campagnes de mesures spécifiques, comptages, observation du trafic, d'enquêtes, de modèle de trafic et de déplacements. Ils ne sont donc qu'une approximation du trafic réel. Les émissions sont largement dépendantes du niveau de trafic et notamment les émissions de CO_2.

3.3.5.2. Longueur de trajet

Les données d'utilisation (longueur de trajets, durée de parking) devraient pouvoir être dérivées de la modélisation du trafic (origine-destination) et surtout des enquêtes OD, cordons, déplacements etc. Mais celles-ci sont généralement prises en compte sous la forme de valeurs moyennes pour l'ensemble des déplacements (pour la longueur de trajets) ou ne sont pas prises en compte (pour la durée du parking qui détermine les démarrages à froid).

3.4. Les conditions cinématiques des véhicules (vitesse, conditions de circulation)

3.4.1. Qualité de la représentation des vitesses dans les modèles

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 3, la vitesse est prise en compte différemment suivant les modèles (vitesse moyenne, cycle de conduite, vitesse instantanée…). (Chevallier & Chanut, 2009) comparent les émissions calculées avec des modèles intégrant des lois d'émissions continues en fonction de la vitesse, des lois d'émissions discrètes en fonction des types d'écoulement, et des lois d'émissions prenant en compte les accélérations et les décélérations. Les modèles sont appliqués sur une voie et non sur un réseau. Pour le CO_2 et la consommation de carburant, les variations sont de l'ordre de 10%, pour les HC et les PM, de 25 à 30% pour le CO et peuvent atteindre 100% pour les NO_x. La qualité de la représentation de la vitesse semble donc être un paramètre très influant dans l'estimation des émissions de polluants.

Par ailleurs, les modèles peuvent induire des approximations en ne proposant pas de facteurs d'émission pour des vitesses très basses ou au contraire très élevées. C'est le cas par exemple dans l'outil CopCETE qui nécessite de remonter systématiquement les vitesses des véhicules à 12 km/h au minimum pour les PL et à 10 km/h au minimum pour les VP.

3.4.2. Variabilité spatio-temporelle des vitesses

Dans les modèles d'émissions basés sur les vitesses moyennes, classiquement utilisés pour les évaluations environnementales, les vitesses sont représentées pour l'ensemble des véhicules sur un tronçon. Néanmoins, dans la réalité, l'ensemble des véhicules ne roulent pas à la même vitesse. La variabilité inter-véhiculaire n'est donc pas représentée. Les vitesses peuvent aussi dépendre de la catégorie du véhicule (différence entre les camions et les véhicules légers par exemple).

Dans ces mêmes modèles, les vitesses prises en compte sont des moyennes sur une heure, la variation des vitesses et des conditions de circulation durant cette heure n'est pas prise en compte.

On peut noter également que les vitesses doivent représenter une moyenne sur l'ensemble des jours de l'année. Les variations saisonnières (liées notamment aux conditions météorologiques) ou les différences de comportement que l'on peut observer entre un jour de semaine et un jour de week-end ou de vacances sont gommées par cette approximation.

Enfin, des variations spatiales de vitesse existent sur l'ensemble d'un tronçon. Ces variations peuvent être dues à la configuration de la voie, aux nombres d'arrêts forcés (stop, feux, passages piétons) ou à la dynamique du trafic (congestion, accélérations, décélérations). De nombreuses études se sont attachées à comparer les émissions de polluants induites par la représentation de la vitesse par une vitesse moyenne ou par une distribution de vitesse (cycle de conduite). (Nicolas, 1996) compare les émissions obtenues grâce à une vitesse moyenne et grâce à une distribution de vitesses. Il en conclut que les variations entre les résultats sont faibles. Comme les autres résultats de cette étude, ils sont à prendre avec précaution puisqu'ils renseignent une situation globale c'est-à-dire une moyenne des variations de tous les tronçons d'un réseau et ne permettent pas de caractériser les variations locales. Une étude à une échelle plus fine (André & Hammarstom, 2000) indique par ailleurs des résultats divergents. Ils comparent aussi les émissions calculées à partir d'une vitesse moyenne et selon une distribution de vitesse. Ils observent des variations d'émissions de CO de -52 à +17% suivant la vitesse moyenne pour un véhicule EURO 1 et de -15 à 10% pour la consommation de carburant. Ces données ainsi que les précédentes sont aussi à prendre avec précaution puisque la

composition du parc évoluant, des véhicules plus récents sont en circulation et les émissions de ces nouveaux véhicules tendent à être moins dépendantes de la vitesse (SETRA, 2009).

3.5. Conclusion

Le volume de trafic et la vitesse des véhicules est la composante déterminante des émissions de polluants, la relation entre ces trois variantes est d'ailleurs largement représentée par le bais des facteurs d'émission. Néanmoins, les composantes déterminantes varient globalement selon les polluants. Ainsi la composition du parc, la longueur de déplacements à froid et la variabilité spatio-temporelle des vitesses semblent des composantes déterminantes pour les émissions de CO au vu des variabilités observées alors que la connaissance des conditions météorologiques semble déterminante pour les émissions de COV. La qualité de la représentation de la vitesse semble influencer largement les émissions de NOx.

Les facteurs d'émission à froid ainsi que la localisation des trajets effectués à froid paraissent mal représentés dans les modèles malgré la part importante des émissions émises à froid.

La spatialisation des parcs de véhicules est mal représentée dans les modèles d'émissions alors que des données issues des modèles de trafic pourraient être exploitées à cette fin.

Enfin, certains facteurs d'émission notamment pour les émissions liées à l'usure et l'abrasion des pneus, des routes… sont mal connus et donc insuffisamment intégrés dans les outils.

Conclusion

Nous avons relevé un ensemble de composantes des deux entités : déplacements /trafic et émissions de polluants.

Nous avons pu identifier des composantes déterminantes communes aux deux entités. Ainsi la variation de la quantification de la demande induit des écarts de trafic et d'émissions de polluants non négligeable alors que cette quantification présente un certain nombre d'incertitudes liées notamment à l'estimation des déplacements de transit, d'échange et des véhicules de marchandises. Les volumes de trafic déduits de cette quantification de déplacements est par ailleurs une composante déterminante de l'entité émissions de polluants. Cette relation est représentée par les facteurs d'émission qui présentent comme nous l'avons vu des approximations plus ou moins élevées suivants les polluants.

La représentation de la vitesse et notamment de la dynamique du trafic est particulièrement négligée dans les modèles statiques de déplacements. Or la variation spatio-temporelle de ces vitesses et la qualité de la représentation des vitesses dans les modèles sont des éléments déterminants pour un certain nombre de polluants.

Enfin, on peut citer des composantes qui ne sont pas représentées dans les modèles ou qui le sont mal comme la localisation du trafic de marchandises, les déplacements en modes doux (vélo, marche à pied), les facteurs d'émission des nouvelles motorisations… alors que celles-ci constituent des leviers d'actions de certaines mesures.

Le point d'entrée « composantes » semble donc trop global, il faudrait trouver un point d'entrée à un niveau plus fin. Nous définissons ces nouveaux points d'entrée comme des actionneurs (Figure 23). Ils permettront de décliner les composantes en différents actionneurs ayant des actions localisées. Nous tenterons de court-circuiter les composantes mal représentées ou négligées dans les modèles en définissant à partir des retours d'expériences, les effets des mesures sur ces actionneurs. Ainsi nous serons à même de déterminer l'impact de la plupart des mesures en décomposant leurs effets sur les actionneurs.

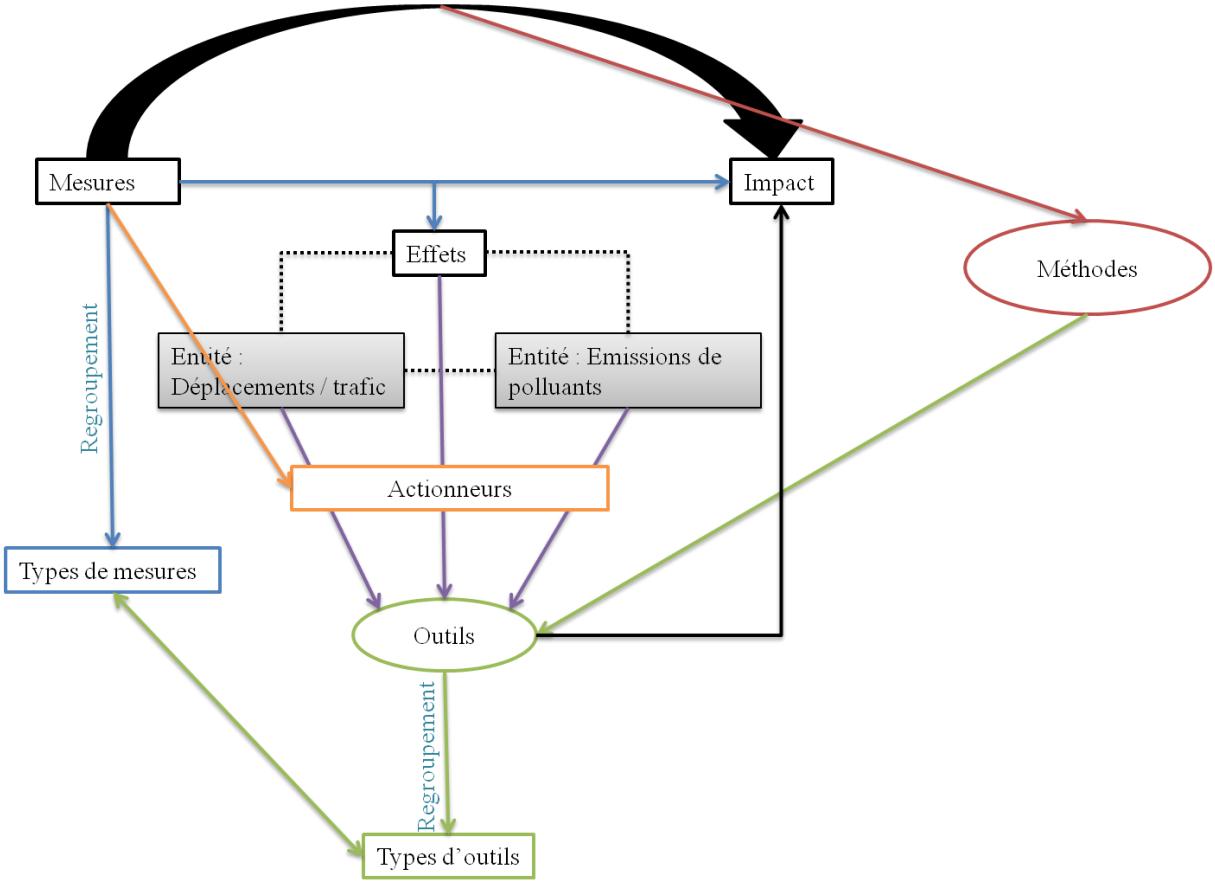


Figure 23 Schéma localisant l'introduction des actionneurs dans la démarche générale

Chapitre 5 De la mise en œuvre des outils (modèles de déplacement et d'émissions de polluants) pour l'évaluation des mesures

Introduction

La caractérisation des mécanismes d'action permettant de définir les impacts des mesures sur les émissions de polluants devrait permettre d'introduire un cadre méthodologique générique pour l'évaluation de l'ensemble des mesures. Deux approches différentes ayant pour but de caractériser et d'identifier ces mécanismes ont été présentées dans les chapitres précédents.

Dans les trois premiers chapitres, nous avons adopté une première approche centrée sur les mesures. L'idée était de définir des classes de mesures présentant des types d'effets, des échelles spatio-temporelles d'application et d'impact similaires et qui puissent être évaluées par des méthodes et des outils pertinents. Nous avons donc essayé de définir le lien entre les mesures et les émissions de polluants par le biais des méthodes. Cette approche nous a permis également d'estimer les effets de certaines mesures grâce aux différents retours d'expérience. Cependant, celle-ci ne nous permet pas de dépasser les limites des méthodes existantes car elle n'analyse généralement qu'un seul effet (qui semble être le plus global) pour un type de mesure, alors que les mesures peuvent avoir plusieurs effets comme cela est montré dans le 1er chapitre. L'utilisation des méthodes existantes conduit donc à masquer tout un ensemble d'effets pour chaque type de mesures.

Nous avons alors testé une deuxième approche, dans le quatrième chapitre, centrée sur les composantes des entités déplacements / trafic et émissions de polluants. Celle-ci a permis d'identifier l'ensemble des composantes des entités et leur représentation dans les modèles, les avantages et les limites de ces représentations, ainsi que l'ensemble des hypothèses. De cette étude des composantes nous avons pu dégager celles qui sont déterminantes, celles qui ne sont pas représentées ou au contraire celles qui sont bien représentées dans les modèles.

Au regard des conclusions des deux approches développées précédemment, nous envisageons de définir des éléments que nous appellerons des actionneurs (stimuli) qui permettront de décliner les composantes suivant la localisation de leur action. D'autre part nous tenterons de court-circuiter les composantes mal représentées ou négligées dans les modèles en définissant à partir des retours d'expériences, les effets des mesures sur ces actionneurs. Ainsi nous serons à même de déterminer l'impact de la plupart des mesures en décomposant leurs effets sur les actionneurs.

Les travaux de (Brutti-Mairesse, Teillac, André, & Leclercq, 2012) correspondent à un premier pas vers la formalisation de cette approche méthodologique (Annexe 6). L'objectif était de déterminer les variations des émissions en fonction de la variation du nombre de déplacements, de la forme de la courbe débit-vitesse et de la composition du parc de véhicules. Une comparaison de l'influence de chacun des paramètres est effectuée mais les conclusions sont délicates car les variations ne sont pas normalisées. Cette analyse nous permet cependant d'estimer la variation des émissions de polluants suivant ces trois paramètres.

Les approches développées dans les chapitres précédents nous ont fourni des états des connaissances riches notamment sur les effets des mesures, les principes des outils d'évaluation ainsi que la représentation des effets dans ces outils. À partir de ces connaissances, nous pouvons proposer une approche qui permet de représenter les mécanismes d'action d'une manière générique pour l'ensemble des mesures et qui adopte un positionnement au niveau d'effets intermédiaires. Ainsi trois points d'entrée des mesures ont été identifiés comme des actionneurs :

- la demande en déplacements VP
- la capacité de la voirie
- le parc de véhicules

Le fait de restreindre l'ensemble des composantes à trois actionneurs principaux nous conduit à réaliser une analyse cause-effet relativement rapide et qui peut représenter les effets de chaque mesure à des échelles différentes.

Les objectifs de cette approche sont donc de :

- définir le cadre théorique d'une méthode simplifiée, facilement exportable, qui permet de pallier certains inconvénients des méthodes actuellement mises en œuvre,
- proposer une évaluation simplifiée mais à faible coût et générique pour une large palette de mesures pouvant ainsi envisager l'évaluation d'un grand nombre de variantes,
- mieux représenter les mécanismes d'action par le biais des actionneurs.

Par ailleurs, grâce au faible nombre d'actionneurs, au faible temps de mise en œuvre et à la structuration de l'analyse, nous pourrons ainsi disposer d'un cadre favorable à l'analyse des incertitudes liées aux effets. Toutefois, nous n'exploiterons pas ce potentiel dans notre analyse.

Dans ce chapitre, nous présentons tout d'abord les principes de l'approche, son objectif et la démarche adoptée.

La description du principe de l'approche nous permet de justifier l'introduction de la notion d' « actionneurs » (stimulus) et de les décrire. Elle permettra aussi de cibler les différents scénarios qui permettront de définir l'impact des mesures suivant les différents types d'actionneurs.

L'analyse des résultats comporte une partie sur la quantification globale (au niveau de l'agglomération) des variations des émissions de polluants suite à la mise en place d'une mesure. Nous avons cherché à identifier une fonction permettant de représenter le processus mis en œuvre pour le cas de la modification de la demande de déplacements. Une deuxième partie présente la localisation des variations des émissions de polluants suivant les scénarios. Avec des critères spatiaux, nous avons pu quantifier la surface d'impact et qualifier la localisation de l'impact.

Au préalable nous tentons de définir des indicateurs permettant de caractériser la validité des différentes simulations. Le calcul de ces indicateurs nous permet d'exclure les simulations que nous considérons en dehors du domaine de validité des modèles.

L'application de la méthode au cas de la mise en place d'un Transport en Commun en Site Propre nous permet de valider celle-ci sur un cas concret, de définir, par l'exemple, ses bénéfices et limites et de présenter un type d'application. Nous comparons l'évaluation effectuée avec la méthodologie adoptée dans le cadre du projet de recherche EvalPDU sur l'agglomération nantaise avec les résultats produits par notre approche.

Nous tenons à préciser que l'ensemble des simulations effectuées grâce au modèle de déplacements a été réalisé en collaboration avec l'équipe de Jacques Bougnol du CETE de l'Ouest. De plus, cette dernière partie a été rédigée en anglais afin d'exploiter plus facilement les résultats dans un article scientifique.

1. OUTLINE OF AN EXPLORATORY APPROACH FOR CHARACTERIZING POLLUTANT EMISSIONS RESPONSE TO MOBILITY / TRAFFIC MEASURES 218

1.1. PRINCIPLES 218
1.2. OBJECTIVES 221
1.3. METHOD 221
1.4. SIMULATION CONFIGURATIONS 223
1.4.1. Stimulus 1: PC Travel demand cases 224
1.4.1.1. S1-Case 1: Global variation of the travel demand 224
1.4.1.2. S1-Case 2: Local variation of the number of trips coming from a specific zone (variation in the trip-generation) 224
1.4.1.2.1. S1-Case2- Sub-Case 1: city-center zones, with high- versus low- travel generation ... 225
1.4.1.2.2. S1-Case2-Sub-Case 2: Surface area of the zone which generate trips 225
1.4.1.2.3. S1-Case2-Sub-Case 3: Outskirt areas 226
1.4.1.2.4. S1-Case2-Specific Sub-Case: the "ile de Nantes" area 228
1.4.1.3. S1-Case 3: Local variation of the number of trips coming to a specific zone (variation in the trips-attraction) 228
1.4.1.4. S1-Case 4: Local variation in the number of PC trips between an origin and a destination 230
1.4.1.4.1. S1-Case4-Sub Case 1: Variations in the number of PC trips between several origin and destination zones 231
1.4.1.4.2. S1-Case4-Sub Case 2: Variations in the number of PC trips which explain 80% of the traffic of the selected link 231
1.4.2. Stimulus 2: Network capacity cases 232
1.4.2.1. S2-Case 1: Global variation in the network capacity 232
1.4.2.2. S- Case 2: Local variation in the network capacity in the central city center 232
1.4.2.3. S2-Case 3: Local variation in the network capacity on the ring roads 233
1.4.2.4. S2-Case 4: Local variation in the network capacity on the arterial road 233
1.4.3. Stimulus 3: Vehicle fleet composition cases 233
1.4.3.1. S3-Case 1: Global variation of the vehicles fleet composition 233
1.4.3.2. S3-Case 2: Local variation of the vehicles fleet composition in the city center and on a specific vehicles category 234
1.4.3.2.1. S3-Case2-Sub-Case 1: Variation in the repartition of vehicle depending on their environmental standard (EURO) 234
1.4.3.2.2. S3-Case2-Sub-Case 2: Variation in the surface area of the EURO standard restricted access 235
1.5. RESULTS 235
1.5.1. Analysis of the Reference Scenario 235
1.5.1.1. Analysis of the number of trips and their localization 238
1.5.1.2. Analysis of the traffic 239
1.5.2. Discussion about the indicators 241
1.5.2.1. General indicators 242
1.5.2.2. Indicators for the quantification and the localization of the impact on the conurbation scale 242
1.5.2.3. Indicators for the specific localization of the impact 242
1.5.2.4. Indicators for the simulation validity 243
1.5.3. Assessment of the simulations validity 243
1.5.3.1. Reference scenario 243
1.5.3.2. Simulations validity 244
1.5.4. Localization and quantification of the emission impact at the conurbation scale – Stimulus 1 246
1.5.5. Mean travel length based relation between stimulus 1 and the emission impact 252
1.5.5.1. Method description 252
1.5.5.1.1. Pertinence of the relation by the comparison with the impact calculated from the traffic and emissions models 253
1.5.5.1.2. Mean trips length estimation depending on the OD matrix and the length between the centroïds of the model zone 253
1.5.5.2. Application of the method 253
1.5.5.2.1. Relevance of the relation 253
1.5.5.2.2. Estimation of the mean length of the added trips from the OD length matrix 255
1.5.5.3. Calculation of the emissions impact from the mean trips length of the added trips 256
1.5.6. Specific Localization of the impact for each simulation – Demand scenarios 258
1.5.6.1. Case 1: Global variation of the PC demand travel 258
1.5.6.2. Case 2: Variations in the trip-generation 264
1.5.6.2.1. Sub-Case 1: City Center: Low travel generation 264
1.5.6.2.2. Sub-Case 1: City Centre: High travel generation 268
1.5.6.2.3. Sub-Case 2: Surface Area 271
1.5.6.2.4. Sub-Case 3 : Outskirt Areas 280
1.5.6.2.5. Specific Sub-Case: Ile de Nantes Area 283

1.5.6.3. Case 3: Variation in the attraction 286
1.5.6.3.1. Sub-Case: City Center 286
1.5.6.3.2. Sub-Case: Suburban Site 289
1.5.6.4. Case 4: Local variation due to travel changes in other places (in the number of PC trips between an origin and a destination) 291
1.5.6.4.1. Sub Case 1: Variations in the number of PC trips between several origin and destination zones 291
1.5.6.4.2. Sub Case 2: Variations in the number of PC trips which explain 80% of the traffic of the selected link 293
1.5.6.5. Conclusion on the different actions of the Stimulus 1: PC travel demand 295
1.5.7. Specific Localization of the impact for each simulation – Stimulus 2: Network Capacity 295
1.5.7.1. Case 1: Global variation in the network capacity (Stimulus 2) 295
1.5.7.2. Case 2: Local variation in the network capacity in the central city center (Stimulus 2) 299
1.5.7.3. Case 3: Local variation in the network capacity on the ring roads (Stimulus 2) 301
1.5.7.4. Case 4: Local variation in the network capacity on the main road RD 723 (Stimulus 2) 303
1.5.7.5. Conclusion on the different actions of the Stimulus 2: Network Capacity 306
1.5.8. Specific Localization of the impact for each simulation – Stimulus 3: Vehicles fleet composition 306
1.5.8.1. Case 1: Global variation of the vehicles fleet composition (Stimulus 3) 306
1.5.8.2. Case 2: Local variation of the vehicle fleet composition in the city center (Stimulus 3) 309
1.5.8.2.1. Sub-Case 1: Variation in the repartition of vehicles depending on their environmental standard (EURO) 310
1.5.8.2.2. Sub-Case 2: Variation in the surface area of the EURO Standard restricted access 312
1.6. CONCLUSION 314

2. MISE EN PRATIQUE DE LA METHODE SUR LE CAS DE LA MESURE « MISE EN PLACE D'UN TCSP + P+R » 315

2.1. REPRESENTATION DE L'IMPACT DE LA MESURE AVEC L'APPROCHE CLASSIQUE 315
2.1.1. Construction des scénarios, hypothèses et paramètres des modèles affectés 315
2.1.2. Effets en termes de trafic 316
2.1.2.1. Effets à l'échelle de l'agglomération 316
2.1.2.2. Effets à l'échelle de l'axe du Busway 316
2.1.3. Impact en termes d'émission 317
2.1.3.1. Analyse de l'impact global – modélisation des émissions de polluants avec COPERT 317
2.1.3.2. Analyse de l'impact local – modélisation des émissions de polluants avec COPERT 318
2.1.4. Conclusion sur l'impact de la mesure 318
2.2. REPRESENTATION DE L'IMPACT DE LA MESURE AVEC L'APPROCHE DEVELOPPEE 319
2.2.1. Les effets relatifs à de la mise en place d'un TCSP + P+R 319
2.2.2. Les stimuli affectés et leurs actions 320
2.2.2.1. Stimulus 1 : demande de déplacements en VP 320
2.2.2.1.1. Action : Variation du nombre de déplacements en VP sur un axe (Case 4 – Sub-Case 2) 320
2.2.2.1.2. Action : variation de l'attractivité d'une zone (Case 3 : Sub-Case : Suburban Site) 321
2.2.2.1.3. Effets non représentés par l'approche et justification 321
2.2.2.2. Stimulus 2 : Capacité du réseau, Action : variation de capacité sur une pénétrante (Case 4) 321
2.2.2.3. Stimulus 3 322
2.2.3. Impact global en termes d'émissions 322
2.3. COMPARAISON DES DEUX APPROCHES 323

CONCLUSION 325

1. Outline of an exploratory approach for characterizing pollutant emissions response to mobility / traffic measures

The environmental assessment of travel / mobility and traffic measures is complex. The large range of the individual measures leads to analyze a variety of impacts (intensity, localization) on the pollutant emissions. The mechanisms, occurring when the measure is set up, are multiple. Some interactions could exist between these ones.

Different methodologies exist. Modeling tools are the most appropriate to represent the impact on the conurbation scale but they are complex and require an important implementation and calculation time. Moreover several measures (such as those concerning bicycles) are not addressed because the components of the traffic/mobility or pollutant emission entities, which are modified by the measures, are not always represented into the tools. Finally, the different effects of these measures are generally reduced to the most important effect and are analysed on a global scale.

These facts conduct to think about a new analysis framework.

The approaches, which are developed in the previous chapters, have allowed to elaborate knowledges about the effects of the measures, the description of the different components of the two entities: traffic/mobility and pollutant emission and their representations into the modeling tools.

From these knowledges, we can propose an approach allowing to represent the different mechanisms in a generic way for the whole measures. This one considers the intermediate effects on determining components. The analysis of these main components, that we will call "stimuli", allows to have specific and limited entry points of the model. The stimulus can have different impact according to the localization of its action.

The key of the approach consists in defining the relation between each stimulus variations and the impact in terms of pollutant emissions.

The advantage of this approach is that a large range of measures can be assessed because we consider the effect of the measure on the stimuli and not on all the components. This characteristic allows to assess the impact of measures which have effects on one or more non-represented components.

1.1. Principles

The general principle of the approach is that a given mobility- or traffic- related measure is associated with a set of determining components which are the stimuli, (see Figure 24). Thus, to assess the impact of a given measure on pollutant emissions, we consider first the effect of the measure on the stimuli and secondly, the emissions pollutants responses related to the variation of the stimuli. The point is to provide a direct connection between the stimuli and the level of emission, based on regression models or pre-calculated functions. Thus, the evaluation of a measure will only need the decomposition over the simuli. The total emission will then simply be the sum of all the stimuli regression.This of course assumes that the correlation between the stimuli is low.

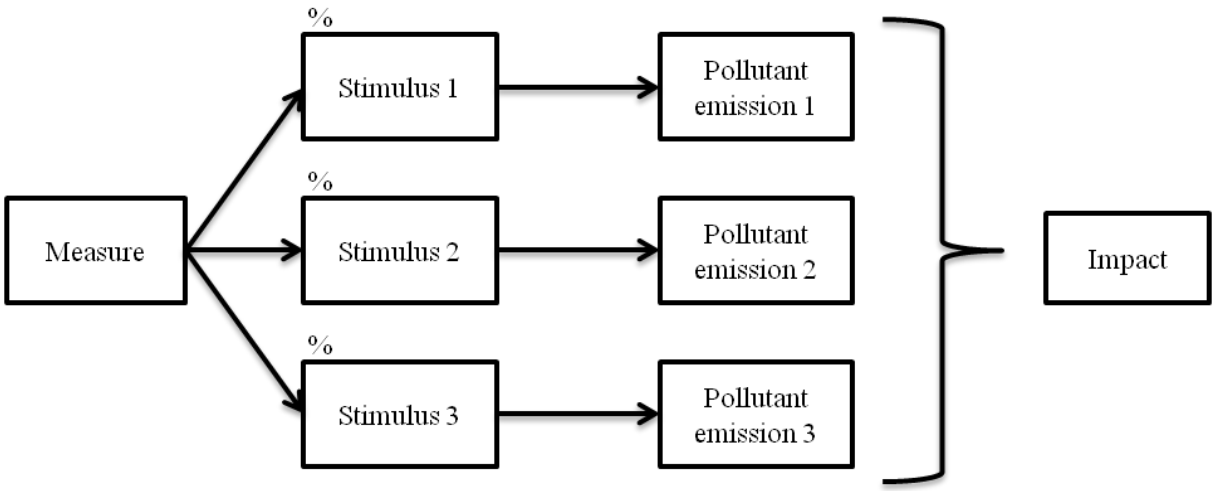


Figure 24 Principle of the approach

Three Stimuli have been defined:

- Stimulus 1: The Passenger Cars travel demand: quantification and localization of the Origins and Destinations (OD) of the trips which are realized with a car;
- Stimulus 2: The network capacity: maximal number of vehicles by time unit which can take a link network;
- Stimulus 3: The vehicle fleet composition: number of vehicles depending on their type (PC, trucks, coaches, bus…) their power engine, their fuel composition, their environmental norm…

As pollutant emissions from road traffic in urban area are mainly related to passenger cars (

Figure 25), in a first simplifying approach, we will consider the trips, which are only completed by the passenger cars.

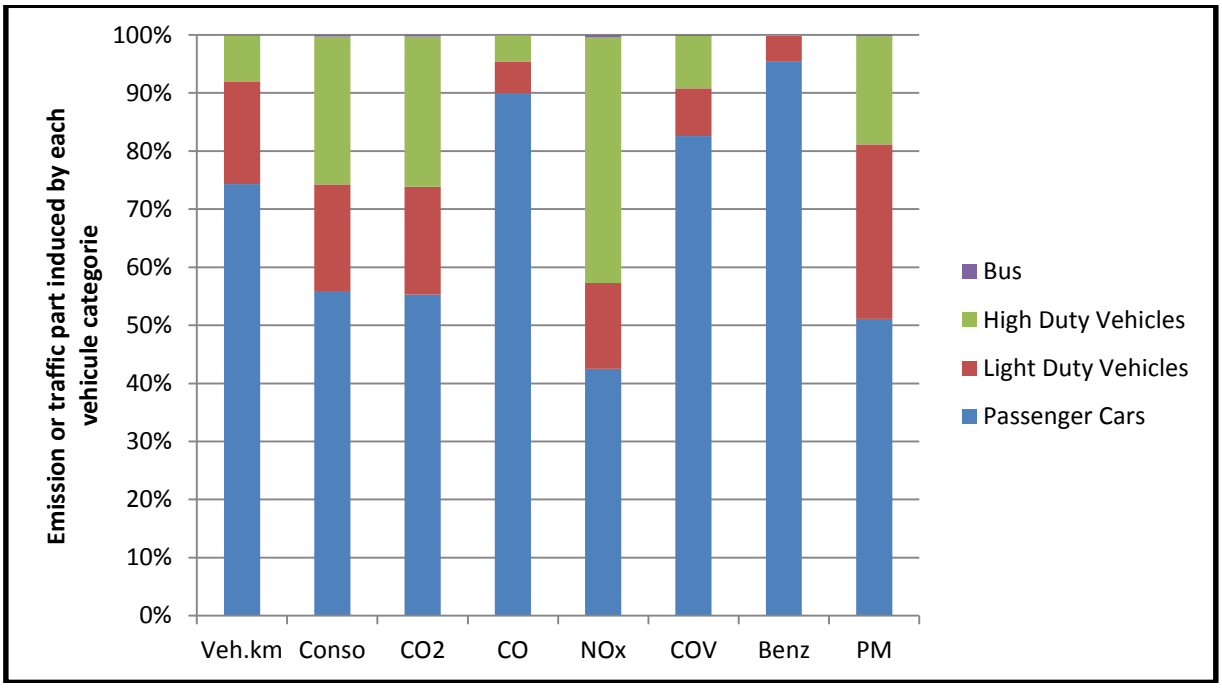


Figure 25 Relative distribution of the pollutant emissions (in mass) with respect to vehicle categories (Reference Scenario)

To justify such an approach and the determining stimuli, we illustrate it hereafter through several examples:

The variation of the fuel cost

The increase of the fuel cost should change the overall demand of PC trips. Such a measure can be represented by a homogeneous variation of the total number of trips across the city, with however possible differences between people categories and areas of the agglomeration.

In that example, **the stimulus 1: PC travel demand** is modified. We can precise that the variation is global, it can affect all the OD trips which are undertaken on the conurbation. The Stimulus 3 will also be modified because people will switch their car for a low fuel comsumption vehicle.

- Stimulus 1 – Action 1: **global variation of the PC demand trips**
- Stimulus 3 – Action 1 : **global variation of the vehicle fleet composition**

The setting up of a Park and Ride connected to a tramway

The impact of the setting up of a Park and Ride connected to a tramway can be represented by an increase of the number of trips by passenger car from their origin to the Park and Ride. Because of the new supply of parking, the Park and Ride area becomes more attractive for passenger cars. Then, this measure also implies a decrease of the passenger cars demand from the Park and Ride area, towards the zones where there is the tramway because people will use public transports.

In that example, **the stimulus 1: PC travel demand** is modified. This same stimulus products two different actions depending on its spatialization. We point out the difference between these two actions because we assume that their impact and the spatialization of their impact could be different.

- Stimulus 1 – Action 3: **variation of the trips attraction** of a zone (in that example: the Park and Ride)
- Stimulus 1 – Action 4: **variation of the trips between a determining origin and a determining destination** (in that example: between the Park and Ride and the zones where the tramway goes)

The setting up of a Bus Lane

The setting up of a Bus lane or a bicycle path can be represented by a decrease of the link capacity because one PC lane is closed.

In that example, **the stimulus 2: Network capacity** is modified. This capacity variation is localized on a specific lane.

- Stimulus 2 – Action 4: **variation of the capacity on a specific lane**

The implementation of a Low Emission Zone

The implementation of a Low Emission Zone can be characterized by a change of the vehicles fleet composition in that area and a modification of the PC travel to this area (new attraction of this area). Actually, some vehicles will not be allowed to travel in the area. We can also assume that people

will change their car while others will shift to public transportation, cancel their travel or take another route.

In that example, **the stimulus 3: Vehicle fleet composition** and **the stimulus 1: PC travel demand** are modified. The actions of these stimuli are localized on a specific zone.

- Stimulus 3: Vehicle fleet composition – Action 2: **A variation of the vehicle fleet composition in a defined area** (in that example: the LEZ)
- Stimulus 1 – Action 3: A **variation of the trips attraction of a zone** (in that example: the LEZ)

A measure is thus divided into a set of stimuli. The link between the measure and the different stimuli is a conjecture which is demonstrated through the above examples. More actions for each stimulus will be discussed in the following analysis in order to be able to assess a large range of measures. It could be deduced by the bibliographical analyses which were realized in the previous chapters. The first chapter concerning the mobility / traffic measures allows having a first separation of the measures into different effects.

Then, we want to build the links between the stimuli and the impacts on the pollutant emission by means of functions.

Lastly, the principle of the approach requires knowing the percentages of each stimulus in the total impact. We have not defined such distribution and how to integrate the interactions between different effects. But we can suppose that the different effects are observed at different spatiotemporal scales, that the weight of each effect is different and that some of them could be insignificant. The relation between the different effects should also be additive.

Others stimuli could be defined and should be analyzed in a future work. For example, we can suppose that a stimulus in relation with the travel speed should be studied. This stimulus will allow defining the impact of a speed regulation for example. Different localization of the actions of this stimulus could be observed. The variation of travel speed could be studied through a modification of the speed flow curves shape. However, the setting up and the validation of the set of parameters are difficult (chapter 4). We do not study this particular aspect on this work.

1.2. Objectives

The main objective of this approach is to define a theoretical framework of a simplified but generic method for a large range of measures. It is able to give a rough and rapid response to the assessment of the measures.

This approach should allow to constitute a comprehensive set of the stimuli associated to the different measures, their ranges of variations, and the response of the pollutant emissions to these stimuli (at least as orders of magnitude). The synthesis of these relations should enable the preliminary impact assessment of a large range (ideally any of them) of mobility or traffic related measures, through a combination of the different concerned effects.

Each measure could be accurately defined by the characterization of theirs effects. Indeed, each stimulus could take different forms (and notably for its spatial application).

1.3. Method

The field of investigation is the area of the urban mobility plan of the conurbation of Nantes (West of France). The conurbation is represented in Figure 26.

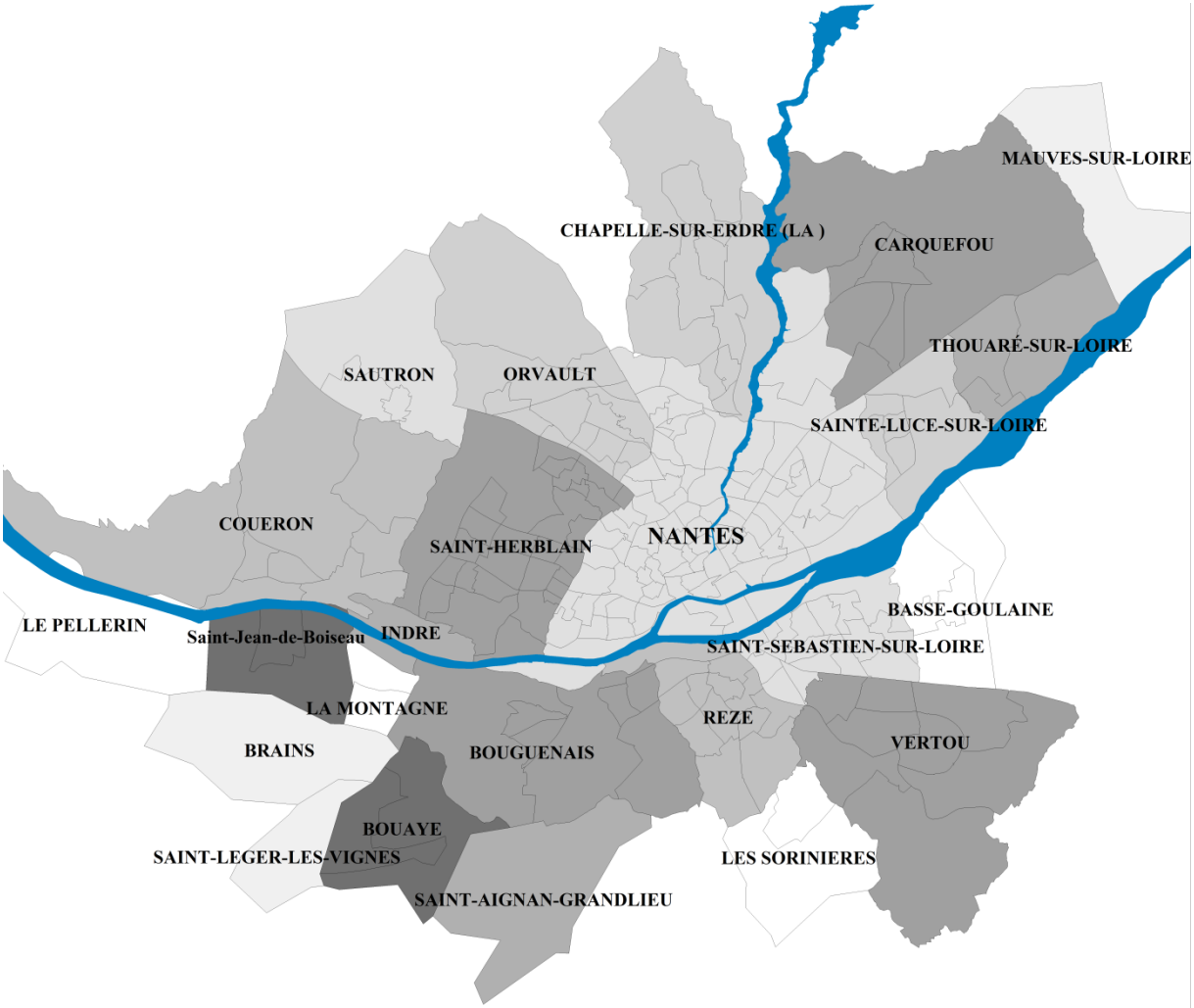


Figure 26 Towns included in the conurbation of Nantes Métropole and zones of the model

The Reference Scenario represents the situation of the network and of the traffic and travel characteristics in 2008. Mobility/travel and traffic estimation are approached according to a classical scheme in 4 steps using VISUM/VISEM (CETE de l'Ouest, 2011). The origin-destination (OD) matrix was elaborated in the first stage of the transport model according to the different zones of the model (Figure 26). Each zone corresponds to a district of around 2 000 inhabitants. The assignment model is based on the Wardrop's principle, i.e. a deterministic user optimum based on travel times derived from speed-flow curves. Pollutants emissions from the traffic are calculated according to the COPERT4 methodology, implemented in the CopCETE tools (CETE Normandie Centre & DADT Département Aménagement Durable des Territoires, 2010). The corresponding IFSTTAR vehicle fleet composition is implemented. Local meteorological data and traffic data from the transport model are implemented for the conurbation of Nantes.

The corresponding data constitute the reference for the interpretation of the different case studies.

To build-up the different relations "stimulus variation - emissions responses", different case study, simulation configurations and variations ranges are set-up to represent the different effects of the measures on these stimuli.

On the whole, as regards the three stimuli (the passenger cars travel demand, the network capacity and the vehicle fleet composition), we can define three different localized actions:

- a global variation: the stimulus variation can be observed on the entire territory (the conurbation, in our work)
- a local variation: the stimulus variation is localized on a specific spatial object of the territory (zone, line)
- a specific variation: the stimulus variation can be observed on a specific component of the stimulus

The case study and their parameterization are described in the following section.

For Stimulus 1, a strong variation is set-up to correspond to the equivalent of a percentage of the whole conurbation trip number (i.e. a variation of +10% corresponds to 12 000 added travels). A lower variation is taken as a percentage of the number of trips coming from the corresponding zones.

In order to make sure that the relation between the stimulus and the impact is valid, we look for the domain of validity of the models and the validity of the implemented simulation which represent different levels of stimuli. Different indicators such as the saturation rate can be used in that aim. The indicators and the determination of the models validity will be discussed.

1.4. Simulation configurations

Simulations should cover the different mechanisms of the measures for which the variations of the determining parameters can be global (at the scale of the conurbation) or local (localized on an area or on an axis).

Stimulus 1 (S1):

As regards stimulus 1: PC travel demand, different cases of variation (and their influence) can be envisaged:

- First, a "global" variation independently of the different zones,
- Secondly, the variation of the number of trips originated from a given zone, or a variation of the trips having their destination in that zone.
- Lastly, the variation of the number of trips between given origin and destination zone

According to the cases, the influence should be studied at the overall scale, or / and at local scale, distinguishing the area inducing the variation, and those influenced by the change.

These theoretical cases are not exhaustive but they allow to cover a large range of real cases of variations of travel demand.

Stimulus 2 (S2):

As regards stimulus 2: network capacity, situations could be:

- Firstly, a global variation of the network capacity independently of the road type or the different zones,
- Secondly, a local variation localized on a specific road or type of road,
- Finally, a local variation localized on a given area.

Stimulus 3 (S3):

As regards the stimulus 3: vehicle fleet composition, the cases could be typically:

- Firstly, variations in the vehicle fleet composition applied on all the conurbation,
- Secondly, the variation of the vehicle fleet composition in a given area (modification of the part of a given EURO standard vehicles category…).

We notice that stimuli 2 and 3 are partially developed because of the lack of time. These stimuli are declined into several actions but the analysis of the cases only includes the observation of the impact. We did not search to determine a function between the stimulus and the impact.

1.4.1. Stimulus 1: PC Travel demand cases

1.4.1.1. S1-Case 1: Global variation of the travel demand

Measures can affect the whole set of the travel on the conurbation without distinction of their localization (origins and destinations). Such measures can be for example, a modification of the fuel cost. This measure concerns all the vehicles and could potentially have an effect on the mobility behavior of all the inhabitants of Nantes Metropole. It can be an urban policy applied at the conurbation scale. This measure can potentially modify the attractiveness of the entire conurbation and induce an increase or a decrease of population on the area. These can also be a national policy (for instance an information campaign for the carpool practice) affecting the mobility behavior on the whole Nantes Metropole area. Such variations of the total number of trips could also result from a global evolution of population caused by a high birthrate. In all these cases, the corresponding mechanism can be represented by a quasi-homogeneous evolution of the PC trips number.

Simulation parameters setting: For our case study, variations from -50% to +50 % of the total PC trips number will be applied to the whole area of "Nantes Metropole".

1.4.1.2. S1-Case 2: Local variation of the number of trips coming from a specific zone (variation in the trip-generation)

The modification of the number of trips originated from a specific zone can be observed with measures like: an urban district renewal (an increase of the population living in this specific area induces an increase of the trips coming from this area), a modal shift (an increase of the public transport supply in a specific area could induce a decrease of the PC trips starting from this area), the evolution of the population living in this area (in number or according to its characteristics, age, income, etc.).

Depending on the localization and characteristics of a given area, the impact of such modifications on traffic and pollutant emissions can be different. Indeed, in the city center for instance, a district is closely connected to the road network, the traffic is important and the surface area of the model zones (see Figure 26) is reduced, while in the peripheral areas, connection and traffic can be less important for larger surfaces. Thus, compared to peripheral areas where the traffic is low, an increase of the number of trips starting from a city center area could induce a more important saturation of the road network, as the traffic flows were already high.

Apart from the localization and trips number level, we will also analyze the influence of the surface of the concerned area, as we can suppose that it should also influence traffic and pollutant emissions.

We have thus 3 parameters to set-up within the different simulations, as explained hereafter.

1.4.1.2.1. S1-Case2- Sub-Case 1: city-center zones, with high- versus low- travel generation

In these sub-cases, we apply a variation of the number of trips originated from a specific area in order to represent the impact of the measures which are above-cited.

The aim of these Sub-Cases is to study the saturation of the network and the pollutant emission resulting according to two different generated levels of trips.

In that first sub-cases, we consider zones which are situated in the City center, generating two different levels of trips, and we apply variations to this trip-generation.

Simulation parameters setting: Zones 408 and 407 are chosen because of their high, versus low level of trip-generation (Tableau 26) and of their localization in the city-center (Figure 29).

Model zone	Number of trips coming from this zone	Trips/km²
407	222	651
408	280	969

Tableau 26 Trips characteristics in the chosen zones

1.4.1.2.2. S1-Case2-Sub-Case 2: Surface area of the zone which generate trips

These scenarios allow to access the relationship between the variations of the surface area on which travels come from and the variations in speed, traffic and pollutant emissions.

We study this influence for the zones 407 and 408.

Simulation parameters setting: We apply the same evolution (same added or removed number of trips) of the number of trips for the single zone 407, for the first perimeter (in blue on Figure 27) and finally for the second perimeter (in green on Figure 27).

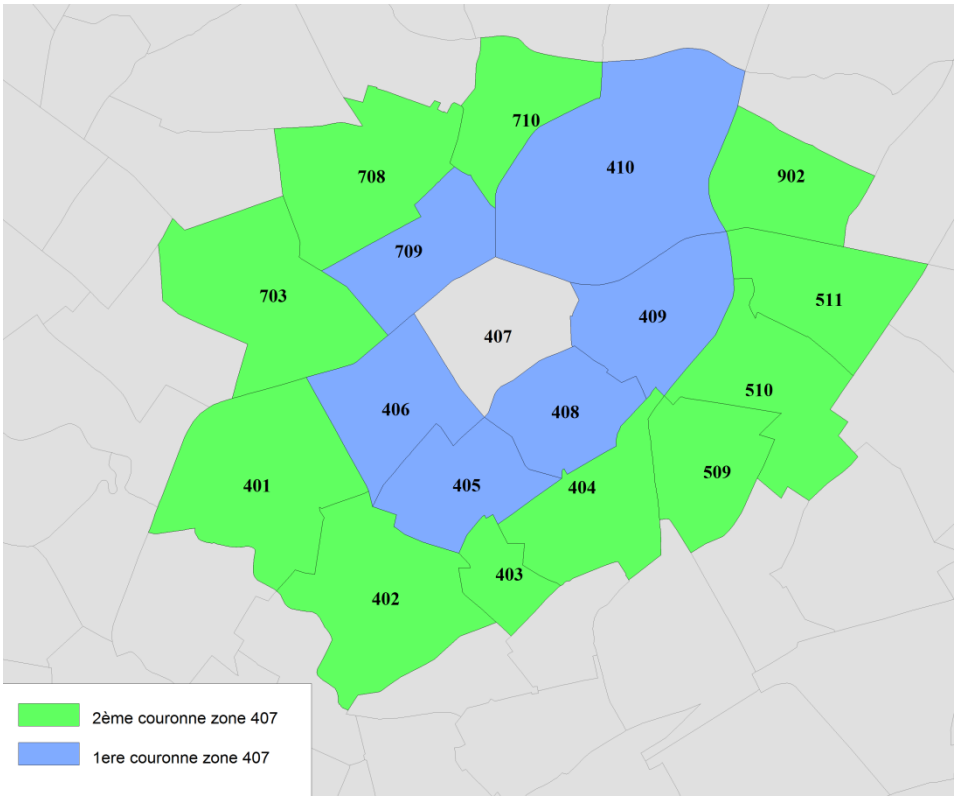


Figure 27 Localization of the three areas for which the number of trips is modified– example for the 407 zone

The same simulations are carried out for the zone 408.

1.4.1.2.3. S1-Case2-Sub-Case 3: Outskirt areas

In that sub-case, we consider low-density zones (typically in suburbs), and we apply variations to this trip-generation.

We select zones with a high population evolution rate because we assume that these zones will continue to grow and that the forced evolutions of trips which come from these zones are not obvious. Some zones, which are situated in the outskirt area, have been identified. Their population evolution rates (more than 1.2% a year), between 1999 and 2006, are the most important as regards others zones which are situated in Nantes Métropole area (see Figure 28 and Tableau 27). The variation in trips coming from these zones represents another specific localization of the evolution of the number of trips. This case enables studying the impacts of this localization on traffic and on pollutant emissions.

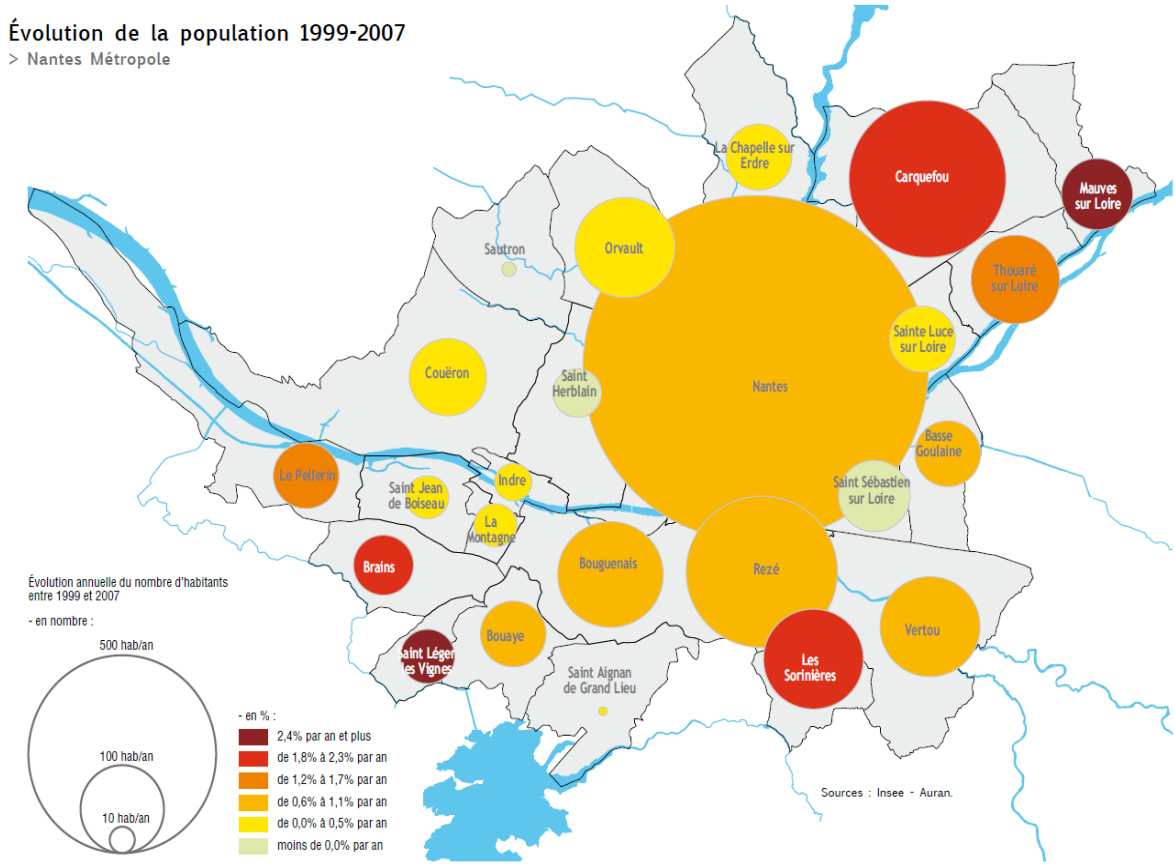


Figure 28 Population evolution rates between 1999 and 2006 on each town of the Nantes Métropole area (Source : INSEE, AURAN)

Town	Annual evolution rate between 1999 and 2006
Carquefou	+323 inhabitants
Mauves sur Loire	+65
Thouaré sur Loire	+93
Les Sorinières	+129
Saint Léger les Vignes	+31
Le Pellerin	+55
Brains	+44
Total	740

Tableau 27 Towns in which annual evolution rate in more than 1.2 %

Simulation parameters setting: These towns are represented, in the travel model, into 15 zones (zones 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2062, 2063, 2074, 2077, 2080 in the travel model).

The variation of the number of trips starting from these specific zones is the same for all the zones. The added or removed number of trips is thus proportional to the initial number of trips.

The variation is applied to all the zones in the same simulation.

Variations from -2% to +10% of the global demand are applied.

1.4.1.2.4. S1-Case2-Specific Sub-Case: the "ile de Nantes" area

As all conurbations, Nantes Métropole presents spatial specificities. The "Ile de Nantes" area is an interesting case because the island is only accessible by 9 bridges. The traffic is thus highly constrained. We analyze the reaction of the network when the number of trips starting from this area is modified.

Simulation parameters setting: This area corresponds to zones 601, 602, 603 and 604 in the travel model (Figure 29).

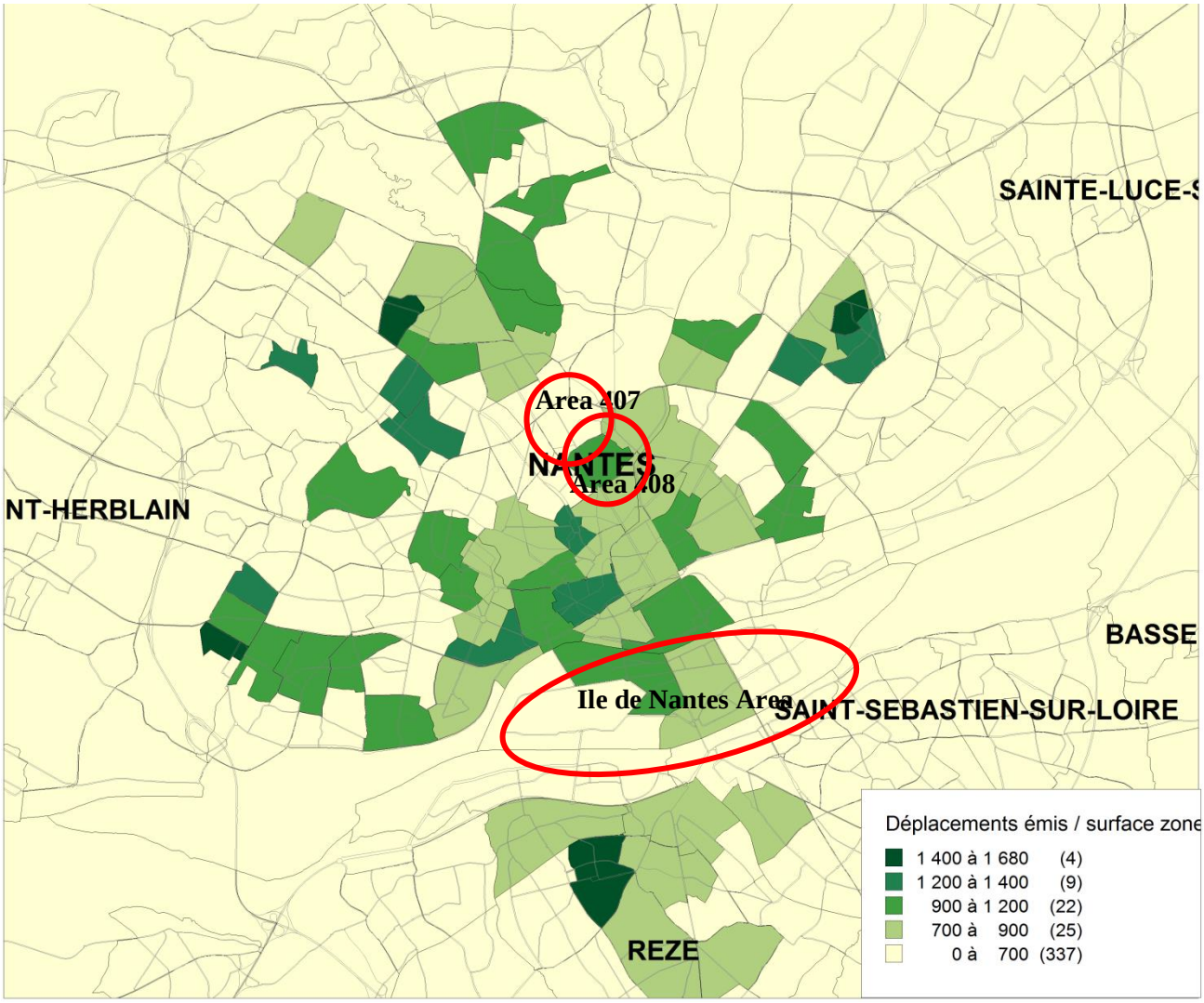


Figure 29 Number of trips starting from the different model zones by surface of the area and Localization of the city center zones and the "Ile de Nantes" area

Variations from -1% to +10% of the global PC demand are applied.

1.4.1.3. S1-Case 3: Local variation of the number of trips coming to a specific zone (variation in the trips-attraction)

The number of trips coming to a specific zone can be altered if the number of jobs, shops or leisure infrastructure in the zone is modified. This can also be observed if the capacity of the roads leading to this zone is changed, or if the public transport or alternative transport supply is modified.

As for the variation of the number of trips starting from a zone, we suppose that variations in traffic and pollutants emissions depend on: the localization of the zone and the initial level of travel number coming to this zone.

Simulation parameters setting: We have selected two zones. The first one is situated on the "Technoparc de l'Aubinière" (zone 2016 in the model Figure 30). It represents a suburban site (Carquefou), with a large surface area. This zone is made up of office buildings of activities in the service sector. On the contrary, we have selected a small but dense zone, which is situated on the city center (zone 403 in the model Figure 30). A large number of trips comes to this zone that accounts for many shops.

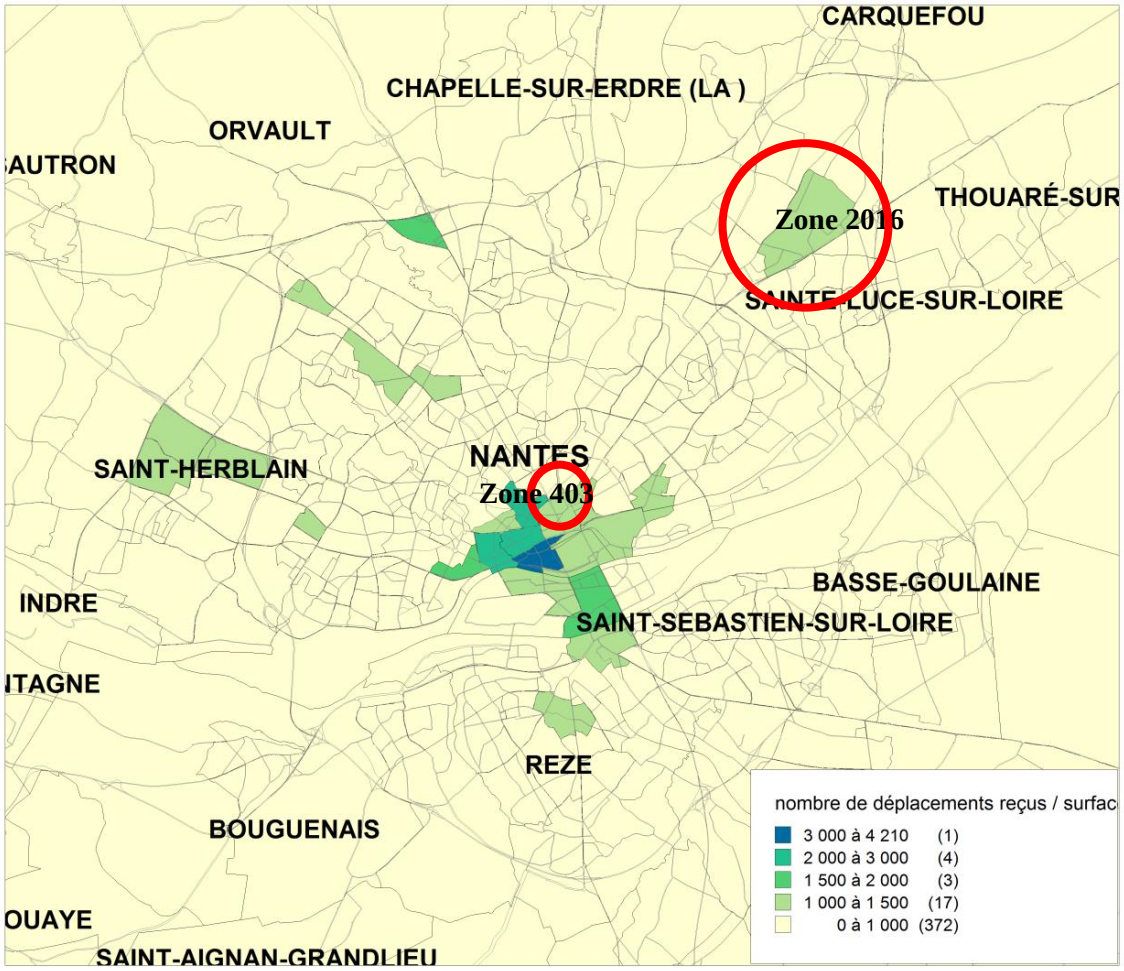


Figure 30 Number of trips coming to each zone, as regards the surface - Localization of the chosen zones

Variations from -75% to +75% of the initial number of trips to the destination of the specific zone are applied.

Variations are applied on the zone 403 then on the zone 2016, but not on the two zones in the same simulation.

1.4.1.4. S1-Case 4: Local variation in the number of PC trips between an origin and a destination

On a given link, the alteration of the trip number can be the consequence of a measure localized on this link: a modification of the bus schedule, the setting up of a bus rapid transit, a park and ride, the setting up of a bicycle lane or parking… Indeed, these measures can induce a modal shift concerning the trips taking this link.

Two different impacts, depending on the intensity of the measure, can be observed. In a first case, it can be a local impact, the variation of the number of trips being limited to the zones closed to the origin or the destination of the trips. This can be observed for the measure like a modification of the bus schedule, the setting up of a bicycle lane or parking. In a second case, a more important impact can affect the whole conurbation and we should consider that nearly all of the trips using this road are affected. These measures can be the setting up of a bus rapid transit, a tramway with park and ride. These two cases should allow representing localized- and large scale impact of travel number changes.

We have selected an arterial road which allows to get in or to go out of the city center from/to suburban areas. This arterial road is situated on the North East of Nantes Métropole area (D723 then Bd Jules Verne - Rue Général Buat) (Figure 31). An arborescence (we obtain all the OD trips which take this road) is realized on this road.

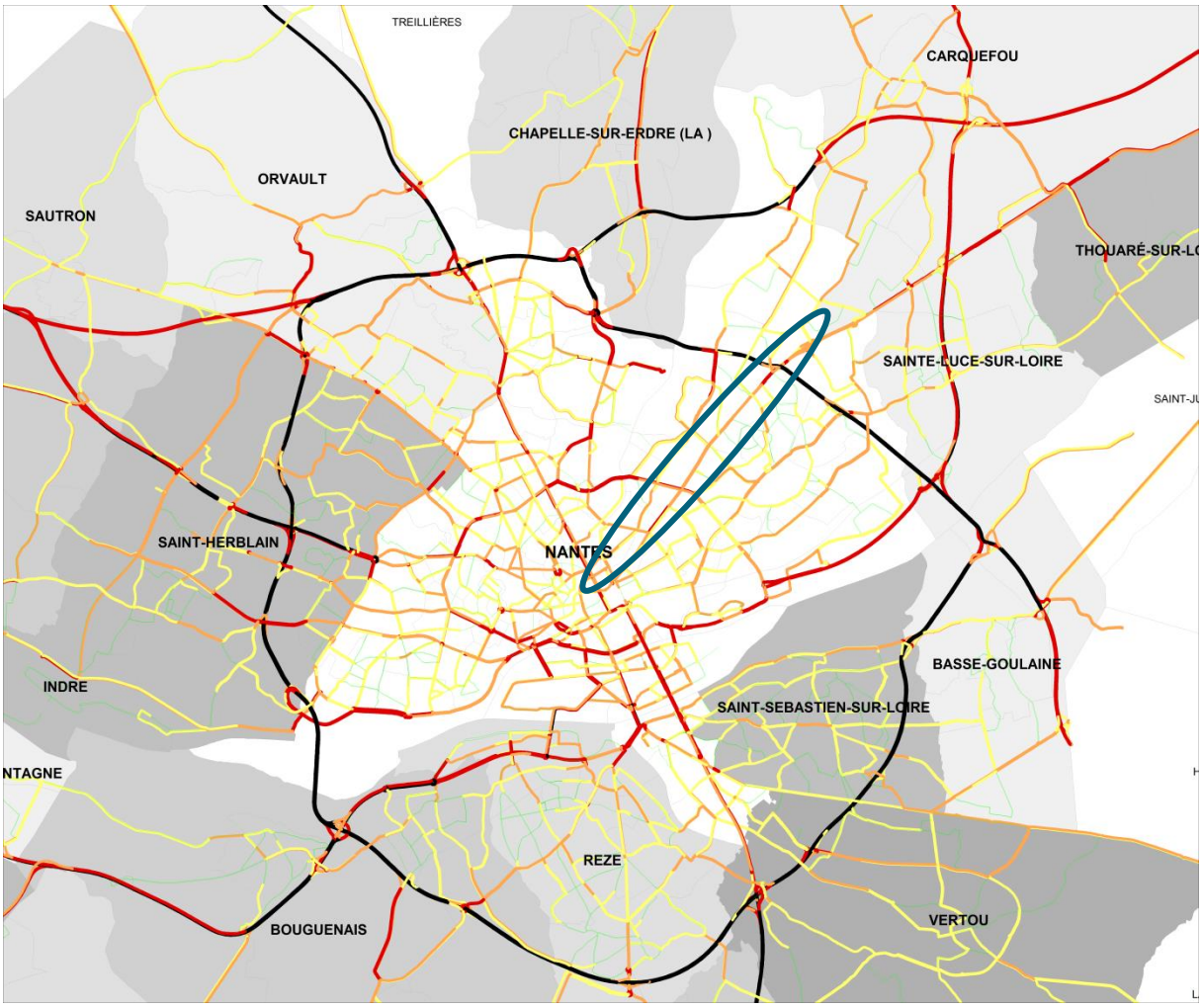


Figure 31 Localization of the arterial road

1.4.1.4.1. S1-Case4-Sub Case 1: Variations in the number of PC trips between several origin and destination zones

In order to represent the local impact of the measures, we have selected the OD's from the Origin of the road to the destination of the road which have the most important number of trips among the OD's selected by the arborescence.

Simulation parameters setting: We have selected six origin zones (906/907/2013/2015/2016/2020) and six destination zones (103/105/106/508/509/510) (Figure 32).

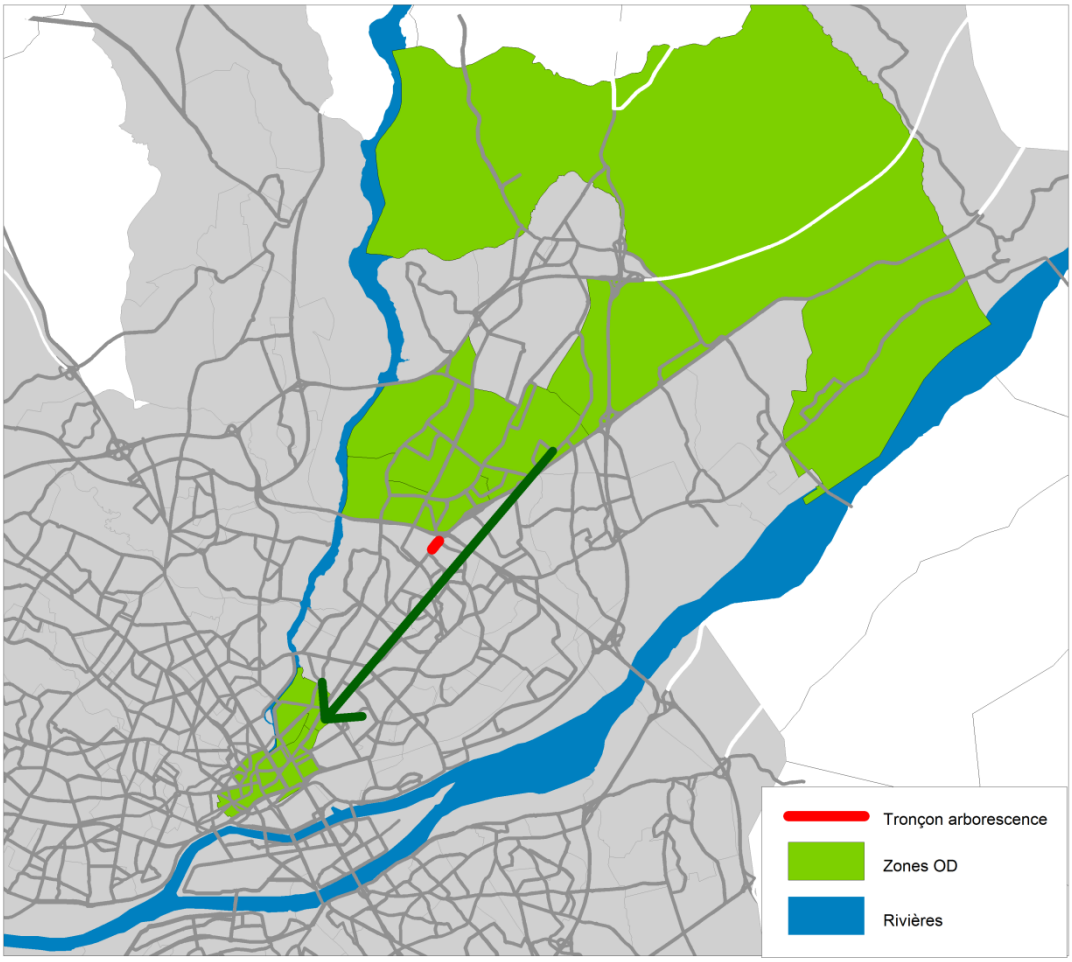


Figure 32 Localization of the Origin and Destination zones

1.4.1.4.2. S1-Case4-Sub Case 2: Variations in the number of PC trips which explain 80% of the traffic of the selected link

In the second case, to represent a more global impact of the measure, we have selected, among the OD's selected by the arborescence, the OD's which represent 80% of the traffic on the arterial road.

Simulation parameters setting: Around 300 OD have been selected. Variations are applied on the number of trips of these OD's.

All the cases which are developed in order to represent the actions of the stimulus 1 are shown in the Tableau 28.

Stimulus 1 : PC travel demand Cases				
S1	Case 1	Global Variation of the PC travel demand		
	Case 2	Local variation of the number of trips coming from a specific zone (variation in trips-generation)	Sub-Case 1	City Center zone, with high versus low PC travel generation
			Sub-Case 2	Surface area of the zones which generate PC trips
			Sub-Case 3	Outskirt areas
			Specific Sub-Case	the "Ile de Nantes" area
	Case 3	Local variation of the number of trips coming to a specific zone (variation in trips-attraction)		
	Case 4	Local variation in the number of PC trips between an origin and a destination	Sub-Case 1	Variation in the number of PC trips between several origin and destination zones
			Sub-Case 2	Variation in the number of PC trips which explain 80% of the traffic in the selected link

Tableau 28 Summary of the case study for the Stimulus 1: PC travel demand

1.4.2. Stimulus 2: Network capacity cases

1.4.2.1. S2-Case 1: Global variation in the network capacity

The capacity of the network and of each link of the network affects the repartition of the traffic on the network via the Speed Flow curves in the traffic assignment model. This capacity can be modified by the variation of the number of lanes on a specific link due to the setting up of a bicycle lane or a bus lane, by the variation of the width lane due to a modification of the roads sharing and by the measures of traffic management (variation of the number of traffic signal lights, the setting up of the synchronization of traffic lights, the setting up of bus priority…).

The capacity can be modified on a different perimeter according to the measures: on the entire conurbation, on a specific area, on a link...

The first Case Study represents a global variation of the network capacity. This phenomenon can represent the impact of a global traffic management policy which is effective or non effective.

Simulation parameters setting: The capacity of each link of the network is modified by -5% and +5%.

1.4.2.2. S- Case 2: Local variation in the network capacity in the central city center

The variation of the capacity on a specific area can represent the impact of an integrate policy applied on an area. This type of policy is generally carried out in the city center areas to limit the number of vehicles which travel on the city center network or to improve the traffic flow for instance. The measures can be the setting up of a bus priority. This measure constraints the PC traffic by stopping it frequently. In an integrate policy, this measure can be coupled with a road sharing giving more place to alternative transportation modes (bicycle, walking…) or/and a suppression of a PC road lane.

Simulation parameters setting: The capacity of each link which issituated on the central city center is modified by -5% and +5%.

1.4.2.3. S2-Case 3: Local variation in the network capacity on the ring roads

On the ring roads, the unique measures which can impact the capacity of the network are the measures related to the traffic management and exceptionally the setting up of an added lane. The closing of a lane is exceptional. The traffic management measures are: a dynamic management of the speed limit depending on the traffic flow, a restriction for trucks traffic…

Simulation parameters setting: The capacity of each link which constitutes the ring road is modified by -5% and +5%.

1.4.2.4. S2-Case 4: Local variation in the network capacity on the arterial road

On an arterial road, measures can be carried out to improve the traffic flow or to penalize it. These measures can be, as in Case 7, the setting up of Bus priority, a suppression of a PC road lane or the exchange of traffic lights junction for roundabout… All these measures modify the capacity of the links. The impact of these measures on the capacity can be more important if they are concentrated on a single road than in a central and concentrated network (Case 7) because the modification of the road characteristics can be more important. Then, in this case, we simulate a more important variation of the capacity than in Case 7.

Simulation parameters setting: The capacity of each link which constitutes the arterial road situated on the North East of Nantes Métropole area (D723 then Bd Jules Verne - Rue Général Buat) is modified by -10%, -5%, +5% and +10%.

All the cases which are developed in order to represent the actions of stimulus 2 are shown in Tableau 29.

Stimulus 2: Network Capacity Cases		
S2	Case 1	Global variation in the network capacity
	Case 2	Local variation in the network capacity in the city center
	Case 3	Local variation in the network capacity on the ring roads
	Case 4	Local variation in the network capacity on the arterial roads

Tableau 29 Summary of the case study for the Stimulus 2: Network Capacity

1.4.3. Stimulus 3: Vehicle fleet composition cases

1.4.3.1. S3-Case 1: Global variation of the vehicles fleet composition

The modification of the global vehicle fleet composition can be the consequence of national or European measures like a vehicle scrappage scheme, or the setting up of a new EURO standard. This case represents two different phenomena: the first measure induces a rapid evolution of vehicle fleet composition (with an increase of the new vehicle part) due to the advantages given to replace an old car with a new one. The second measure induces modifications of the pollutant emissions of the new cars. We represent the effect of these measures with a global variation of the vehicles fleet composition. We can note that it is an approximation because, without doubt, for these two measures, the modification is not observed equally for all the social and occupational groups and for the entire network (ring roads, city center…).

Simulation parameters setting: We run the simulation on the reference scenario with three different prospective vehicles fleet compositions: 2010, 2015 and 2020.

1.4.3.2. S3-Case 2: Local variation of the vehicles fleet composition in the city center and on a specific vehicles category

Measures can modify the vehicles fleet composition in a specific area and for a specific vehicles category. Such measures are generally carried out in the city center because this area concentrates the most important traffic and emission pollutant issues.

The composition of Public transport vehicles fleet is modified following the renewal of this fleet with gas or electric vehicles. Considering the part of public transport emissions as regards total emissions (

Figure 25) we consider that it is not necessary to simulate such a low impact even if the impact can be important at a local scale on the high public transport traffic lane. Furthermore, in the transportation model, the public transport traffic is estimated as a part of the freight traffic. This public transport traffic is not precisely represented locally. A local study for such measure is not relevant.

The setting up of Urban District Center to optimize the freight distribution in the city center with low-emission vehicles can induce a local variation of the vehicles fleet composition. In the transportation model, the estimation of the freight demand and traffic is imprecise (Chapter 4). A local analysis is not relevant with our tools. The same drawbacks linked to the use of the transportation model are noted for the two-wheeler and the coaches' categories.

1.4.3.2.1. S3-Case2-Sub-Case 1: Variation in the repartition of vehicle depending on their environmental standard (EURO)

The modification of the local vehicle fleet composition can be the consequence of the setting up of a Low Emission Zones or an environmental urban toll. This measure induces that the vehicles of a certain environmental standard (EURO) are forbidden to travel in a specific area.

Simulation parameters setting: We suppose that all the EURO 1 and EURO 2 vehicles are banished in the City Centre. We assume that the traffic is not modified. These two kinds of vehicles are replaced by new vehicles or second-hand vehicles. We assume that two thirds of the vehicles are replaced by new cars (EURO 5) and one third of the vehicles are replaced by second-hand vehicles (EURO 3 and EURO 4 in the same proportion).

1.4.3.2.2. S3-Case2-Sub-Case 2: Variation in the surface area of the EURO standard restricted access

These measures can be applied on different areas. We would like to represent the different impacts of two different perimeters.

Simulation parameters settings: The same parameters setting than in Case 2 – Sub-Case 1 are applied but the modifications are applied in the Interne / Out of City Centre area without the areas which contain the ring roads.

All the cases which are developed in order to represent the actions of stimulus 3 are shown in Tableau 30.

Stimulus 3 : Vehicle Fleet Composition Cases				
S3	Case 1	Global variation of the vehicle fleet composition		
	Case 2	Local variation of the vehicle fleet composition in the city center and for a specific vehicles category	Sub-Case 1	Variation in the repartition of vehicle depending on their environmental standard (EURO)
			Sub-Case 2	Variation in the surface area of the EURO standard restricted access

Tableau 30 Summary of the case study for the Stimulus 3: Vehicle Fleet Composition

1.5. Results

1.5.1. Analysis of the Reference Scenario

Tableau 31 presents the different characteristics of the modeled network. Links are a part of a road. They are generally delimited by the network intersections. They have been classified according to their type: Highway or Ring Roads, Roundabouts or Ramps, 70 km/h arterial roads, 50 km/h arterial roads, 50 km/h streets and <50 km/h streets. Zones correspond to districts which regroup around 2000 inhabitants. These zones do not have the same surface area. They have been classified according to their localization: City Centre, Out of City Centre and Out of Ring Roads. The type of roads and the different areas are localized in Figure 33. The density of the zones is more important in the City Centre area and the lowest in the Out of ring Roads area. This area is constituted by the longest network. The 50 km/h Streets links are the most important in number and in network length. The Roundabout network is the shortest. This one is constituted by a high number of short links. The Highway network is constituted by the lowest number of links which are long. The Out of City Centre area is constituted by the highest number of links.

These network characteristics are not modified in the following scenarios.

	Number of links	Network length (km)	Network capacity	Network density	Number of zones	Surface area (km²)
Area						
City Centre	874	172	1 017 200	12.3	36	14
Interne / out of City Centre	2828	798	4 119 300	6.4	114	125
Out of Ring roads	1538	976	2 125 400	2.5	79	395
Nantes Métropole	5240	1 946	7 261 900	3.6	229	534
Type of roads						
Highway / Ring Roads	335	307	1 048 400	-	-	-
Roundabout / Ramp	847	94	1 515 400	-	-	-
70 km/h Arterial Roads	396	344	504 400	-	-	-
50 km/h Arterial Roads	608	161	914 200	-	-	-
50 km/h Streets	2 500	883	2 829 300	-	-	-
< 50 km/h Streets	554	158	452 200	-	-	-

Tableau 31 Network characteristics (links and model zones)

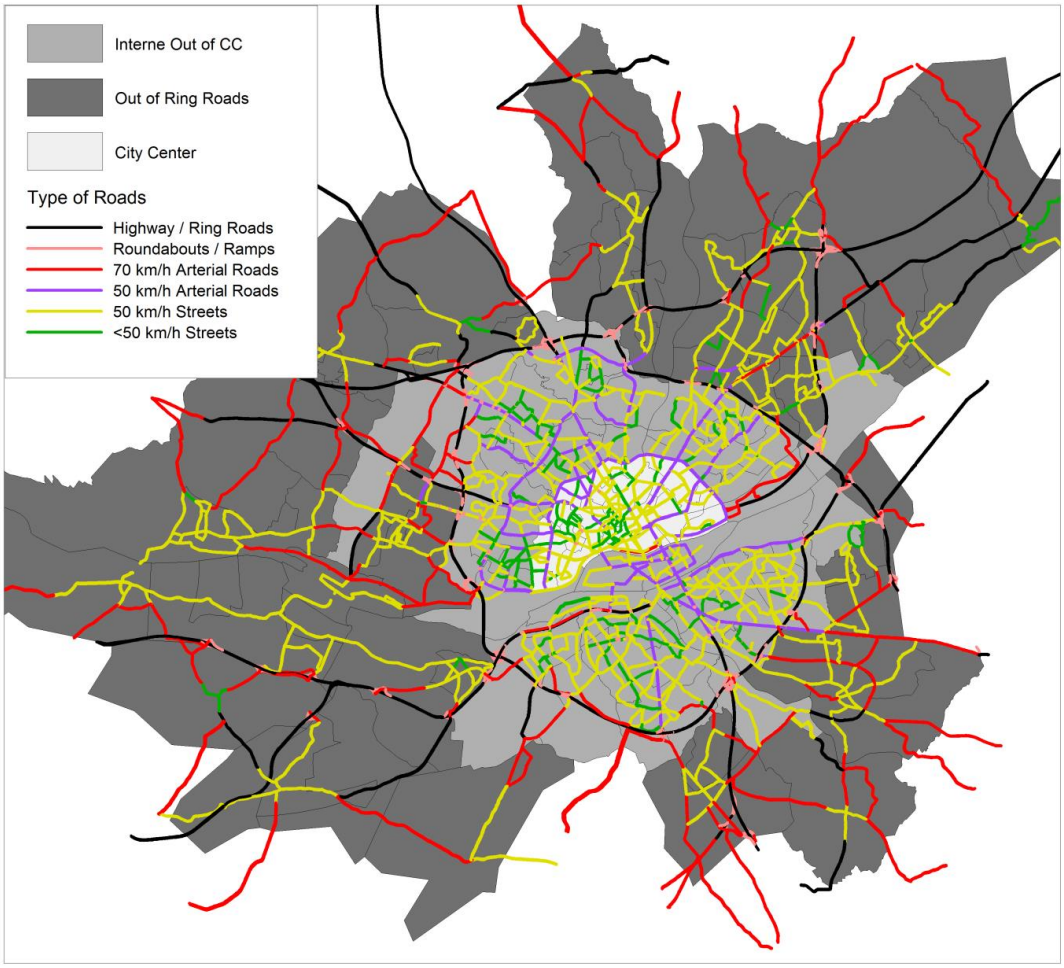


Figure 33 Localization of the types of roads and of the different areas

Figure 34 presents the network axis and the model zones. The main network is constituted by the boulevard, the Highway and the Ring Road.

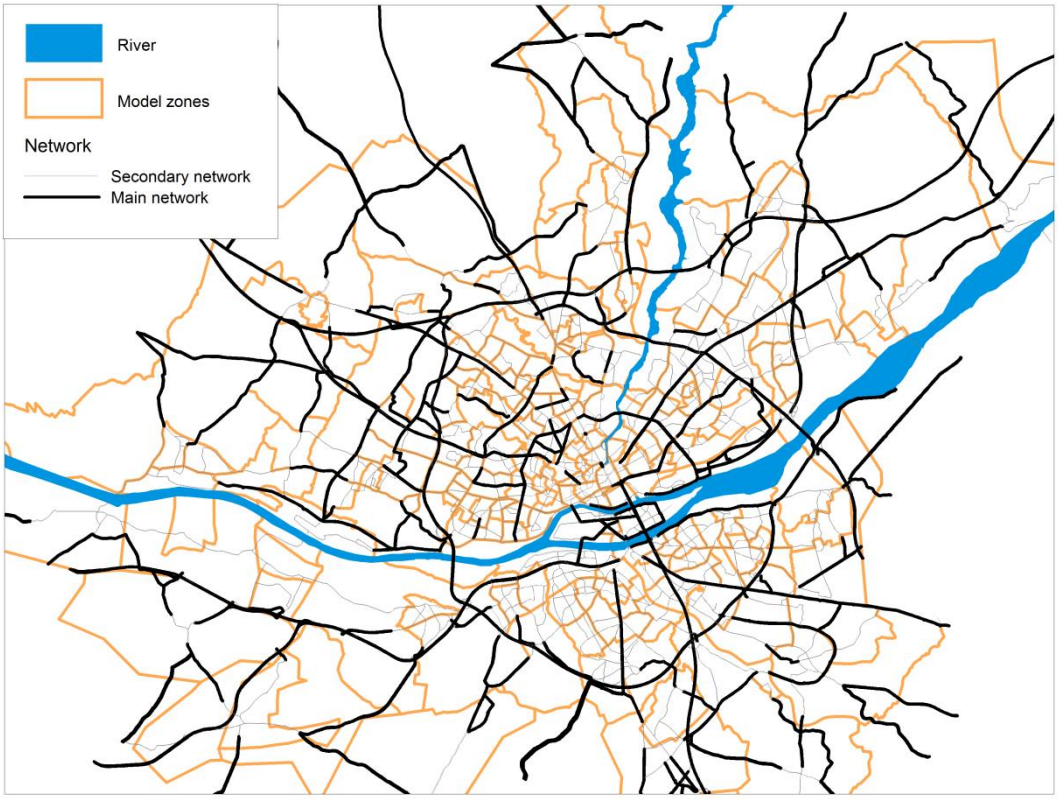


Figure 34 Main Network and Model Zones for the Nantes Metropole Area

Figure 35 represents the length of the main roads in each model zone. The length is widely influenced by the surface area of the zone. The principal main roads are situated in the area "out of the Ring Roads". Others roads are the ring road and the arterial roads which allow to access to the city centre.

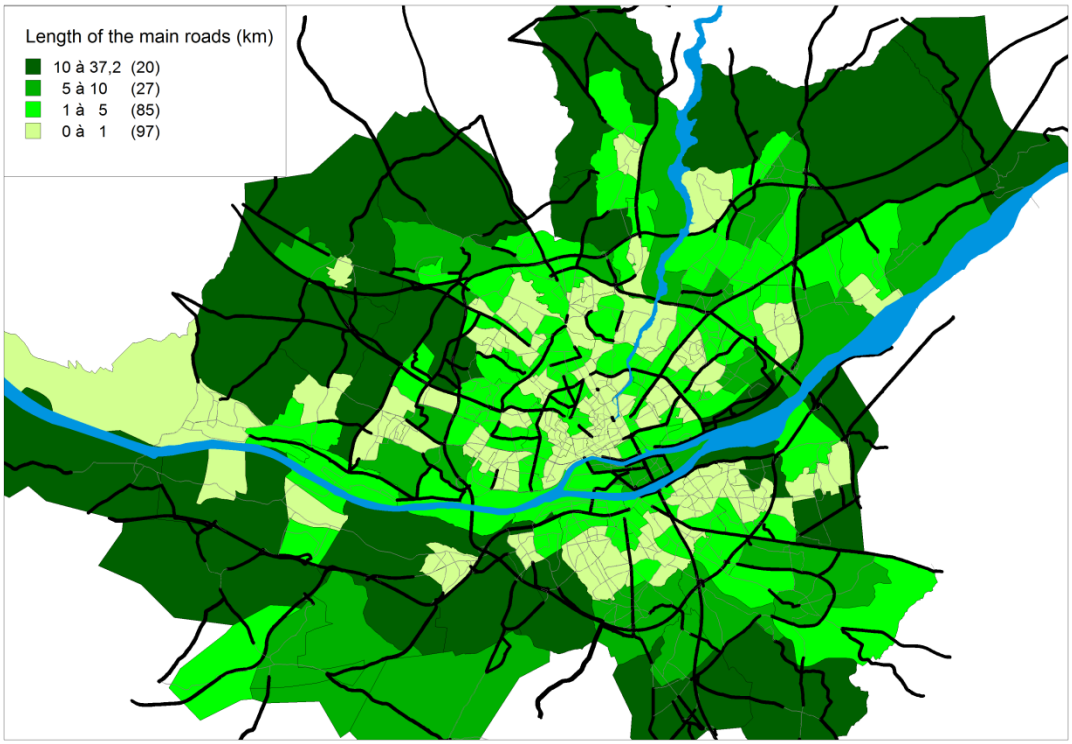


Figure 35 Length of the main roads in each model zone

1.5.1.1. Analysis of the number of trips and their localization

The Reference Scenario represents the trips which have been carried out on Nantes Metropole area during the morning peak hours (7am to 9am) in 2008. Tableau 32 presents the trips according to the areas. A part of the network situated out of the Nantes Métropole area is modeled in order to take into account the trips which do not have their origin or/and their destination on Nantes Métropole area but which take the Nantes Métropole network. This network is not represented because the modeled traffic is not representative of the total traffic in this network. Nevertheless, the total number of trips, which is affected on the Nantes Métropole Area, corresponds to the number of trips on the Urban Area.

In the Nantes Metropole Area, the most part of the trips starts from the Out of City Centre area to go to this same area. Then, a large part of the trips starts from the Out of Ring Roads area to go to this same area. The number of trips starting from the In ring roads area (CC + Out of City Centre) to go to the Out of Ring Roads area is less important than the trips in the other way (getting in to the In road rings area).

		DESTINATION				
		City centre	Out of Ring Roads	Out of City Centre	Nantes Metropole	Total Urban Area
ORIGIN	City Centre	2 853	2 033	5 735	10 621	10 872
	Out of Ring Roads	2 413	12 734	8 712	23 859	25 624
	Out of City Centre	6 925	8 164	22 246	37 335	38 714
	Nantes Metropole	12 191	22 931	36 693	71 815	75 210
	Total Urban Area	12 728	28 582	39 763	81 073	123 915

Tableau 32 Number of trips according to the different areas

1.5.1.2. Analysis of the traffic

Tableau 33 presents traffic flow characteristics according to the different areas and types of roads. Traffic is the most important in the Out of Ring Roads area and on Highway and Ring roads. The flow is the most congested in the Out of City Centre area with a saturation rate of 0.34 and on the Highways and Ring Roads. The mean speed on the entire conurbation is 47 km/h. The lowest mean speed is localized in the City Centre and on the <50km/h streets.

	Mean Speed (km/h)	Traffic (veh.km)	Saturation rate
Area			
City Centre	29	58 550	0.33
Interne / out of CC (RR)	43	387 530	0.34
Out of Ring roads	60	478 720	0.28
Nantes Métropole	47	927 305	0.32
Type of roads			
Highway / Ring Roads	61	448 700	0.49
Roundabout / Ramp	28	48 400	0.34
70 km/h Arterial Roads	62	101 800	0.27
50 km/h Arterial Roads	35	83 600	0.35
50 km/h Streets	41	217 800	0.25
< 50 km/h Streets	23	27 300	0.25

Tableau 33 Traffic flow characteristics according to the different areas and types of roads

Figure 36 represents the mean speed in each model zone for the Reference Scenario. These mean speeds will change for the Demand and Capacity variation Scenarios. The highest mean speeds are situated on the "Out of Ring Roads" area. The lowest mean speeds are observed on the City Centre area.

Figure 36 Mean Speed in each model zone for the Reference Scenario

The Passenger Cars pollutant emissions depending on the different area and the type of roads are presented in Tableau 34. In a second part, pollutant emissions are presented depending on the type of vehicles in order to analyze the part of each category. For all the pollutants, the Interne / Out of CC area is the area which induces the most emission. The Highway links and the 50 km/h Streets induce the highest emission value of all the pollutants.

The passenger cars produce the main part of the pollutant emissions except for the NO_x which is mainly emitted by the Heavy Goods Vehicles. For the Passenger Cars, the Petrol categories induce more CO, COV and Benzene than Diesel categories.

		FC (fuel consumption)	CO_2 (ton)	CO (kg)	NO_x (kg)	COV (kg)	Benz (kg)	PM (kg)
Area (PC emission)								
City Centre		2.99	9.16	138	32.6	15.9	0.85	3.81
Interne / Out of CC (RR)		20.72	63.48	1 050	249	97.9	5.17	28.8
Out of Ring Roads		15.77	48.04	969	208	71.3	3.75	23.4
Nantes métropole		39.48	121	2 157	489	185	9.77	56
Type of roads (PC emissions)								
Highway / Ring Roads			55.4	1.14	0.24	0.08	0.004	0.01
Roundabout / Ramp			7.05	0.1	0.03	0.01	0.0005	0.001
70 km/h Arterial Roads			12.16	0.19	0.05	0.02	0.0009	0.003
50 km/h Arterial Roads			11.93	0.2	0.04	0.02	0.001	0.002
50 km/h Streets			29.79	0.47	0.11	0.05	0.003	0.01
< 50 km/h Streets			4.63	0.06	0.02	0.01	0.0004	0.0009
Categories of Vehicles								
PC	Petrol	13.92	40.58	2.08	0.18	0.17	0.01	0.01
	Diesel	25.58	80.16	0.08	0.31	0.02	0.0003	0.05
	Tot	39.5	121	2.16	0.49	0.19	0.01	0.06
LGV	Petrol	0.31	0.95	0.05	0.005	0.003	0.0002	0.0002
	Diesel	12.69	39.69	0.08	0.17	0.016	0.0003	0.02
	Tot	13	40.64	0.13	0.17	0.018	0.0005	0.02
HGV	Tot	18.05	56.48	0.11	0.79	0.02	1.2E-05	0.05
Coaches	Tot	0.19	0.6	0.01	0.05	0.0004	1.3E-05	0.0005

Tableau 34 Pollutant emissions depending on the area, the type of roads and the type of vehicles

The following maps (Figure 37, Figure 38) localize the pollutant emissions for all the model zones which are situated in Nantes Metropole. The highest levels of CO emission are situated on the ring roads and all around especially in the South and the West and along the highway. We observe the same impact for the NO_x emissions. The peripheral zones, which do not have a significant network of main roads, produce less emissions.

Figure 37 CO_2 emissions for the Reference Scenario

Figure 38 NO_x emissions for the Reference Scenario

1.5.2. Discussion about the indicators

1.5.2.1. General indicators

Transportation models are based on a zonal decomposition. We keep the same principle to define our indicators. This is also relevant because zones correspond to a statistically significant cluster with a constant number of around 2 000 inhabitants. All the French conurbations are divided with such a zoning method. The analysis could thus be reproducible on others conurbations.

The pollutant emissions model can supply a range of about thirty pollutants. In order to synthesize the results, we have selected two pollutants which are able to represent the main trend. These two pollutants are the CO_2 and the NO_x. The CO_2 emission is mainly linked to the volume of traffic. It is a global effect pollutant. Its local analysis is thus not relevant but this one allows to define a general tendency of the variation of different pollutants. Otherwise, the CO_2 emission is an indicator which is widely used for the environnemental assessment of the mobility or traffic measures. We also select the NO_x emissions because it is a pollutant with health issue. Thus, it is relevant to analyze this pollutant at a local scale.

We study the pollutant emission induced by the whole categories of vehicles even if stimulus 1 only concerns the Passenger Cars travel demand. Actually, the traffic assignment could modify speeds and itineraries of the other categories of vehicles. This general indicator allows to compare the PC demand cases with the network capacity cases because the modification of the network capacity induces modifications on all the vehicles categories.

1.5.2.2. Indicators for the quantification and the localization of the impact on the conurbation scale

To compare the different scenarios, we mainly utilize emissions indicators in tones. We use a difference of the absolute values because we want to identify the induced emissions for the different scenarios. A variation indicator in percentages does not allow to identify that phenomenon because this indictor could identify several zones for which the variations are high owing to their low initial value. We analyze the impact of a variation of 1% of the total number of trips. The modified number of trips is thus the same for all the scenarios.

1.5.2.3. Indicators for the specific localization of the impact

For the specific localization of the impact, we observe the impact of the stimulus:

- with respect to the initial number of trips in the disrupted zone (emission or attraction) or between the studied zones for the PC travel demand Cases (S1), (-25% of the number of trips corresponds to -25 % of the number of trips generated for example by the disrupted zone)
- in relation to the variation of capacity on the link or the zone for the Network Capacity Cases (S2)
- and in relation to the number of vehicles which are modified for the Vehicle Fleet Composition Cases (S3)

We analyze the same emission indicators than for the quantification of the impact on the conurbation scale.

Then, we describe the localization of the impacted zones: around the disrupted zone or link, in the origin or destination zones of the disrupted zones, scattered on the conurbation …

For each stimulus, we define, below, specific indicators.

For Stimulus 1, the number of the trips and their OD localization is a first indicator which allows to localize the variations of the number of trips. This number of trips is easily accessible on the conurbation scale thanks to the specific transport and mobility supplies. This accessibility will facilitate the reproducibility of the approach.

For the Stimulus 2, we localize the variations of the capacity in absolute value.

For the Stimulus 3, we analyze the vehicle categories which are modified.

1.5.2.4. Indicators for the simulation validity

To know if each simulation represents a good state of the network reality, we should compare the results of each simulation from transportation model with the results from a dynamic traffic model. Indeed, a transportation model is not able to represent the phenomenon of congestion. The emergence of an important number of such a phenomena, with the variation of a stimulus, could induce results which do not represent the network reality. But we did not realize this analysis in the framework of this work because it would have been too time consuming.

In order to determine the simulation validity, we analyze indicators which allow to define the level of saturation of the network. The saturation rate is a good indicator of the state of the network which is represented by the model. But the model does not represent the spillback of the congestion. So, if too much network links are saturated, the model does not represent the interactions between the different congestions (area and time).

The analysis of the saturation rate depending on the type of roads and the geographical areas allows to determine if the saturated links are gathered or scattered. The concentration of saturated links engenders more important congestion phenomena while these ones are not represented by the static model. The simulation validity will be lower if the saturated links are gathered.

We analyze first the saturation rate of the reference scenario and then the one of the different simulations.

1.5.3. Assessment of the simulations validity

1.5.3.1. Reference scenario

The length of the network for which the saturation rate is greater than 90% is to 1.2% for the reference scenario, this represents around 2.8% of the total traffic (veh.km) and 1.7% of the number of the links (88 links of 5240).

Depending on the areas, the number of links for which the saturation rate is greater than 90% varies a lot. Tableau 35 indicates that the main part of the links which are highly saturated, is located on the ring roads (in terms of traffic volume) and on the ramp and roundabouts (in terms of number of links).

Area	Number of links	Network Length (km)	Traffic (veh.km)
Area			
City Centre	11	1.3	1 237
Interne / out of CC (RR)	64	18.2	53 486
Out of Ring roads	13	3.4	9 595
Type of roads			
Highway / Ring Roads	15	15	52 791
Roundabout / Ramp	48	3	5 159
70 km/h Arterial Roads	4	1	1 802
50 km/h Arterial Roads	4	2	2 503
50 km/h Streets	13	1	1 482
< 50 km/h Streets	4	0.6	581
Total	88	23	64 319

Tableau 35 Links number, network length and traffic with saturation rate higher than 90%, according to the different geographical areas

We suppose that this reference scenario simulation is included in the range of validity of the model.

1.5.3.2. Simulations validity

In order to define the validity of each simulation, we analyze the part of the links for which the saturation rate is higher than 90%. Figure 39 represents the evolution of this indicator depending on the variation of the global PC trips demand (variation on the entire area of the conurbation). We notice that this part varies from 0.5% for a decrease of 50% of the trips to 5.5% for an increase of 50% of the trips. This indicator increases exponentially.

We base our threshold defining on a rough analysis. Indeed, Figure 39 shows that the evolution presents a break point which is represented by the intersection of the two curves (green and red). We consider that this intersection corresponds to the limit of simulation validity because if the number of saturation rate higher than 90% is important the traffic model does not represent the reality.

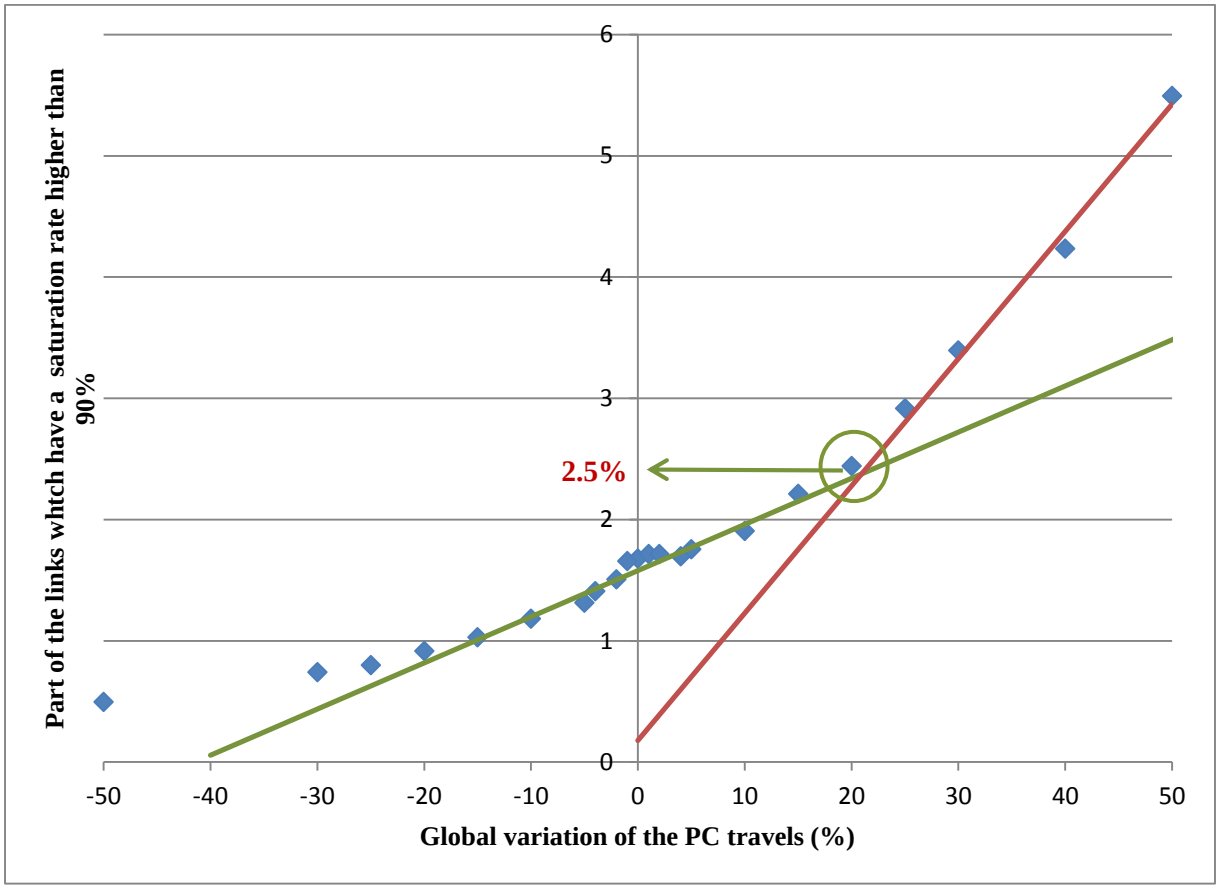


Figure 39 Part of the total links with a saturation rate greater than 90% as regards the PC travel demand

Moreover, the spatial aggregation of the saturated links can induce a propagation of the congestion in the space. This propagation is not represented in the static model. A high aggregation of these links can thus mean that the results of the simulation are not realistic. In order to take into account these limits, we define that the simulations, for which at least 50% of the links in one or several zones have a saturation rates higher than 90%, are outside of the range of model validity.

The same simulations are identified for the two validity indicators.

The simulations which are besides the validity model (Tableau 36) are excluded of the following analysis.

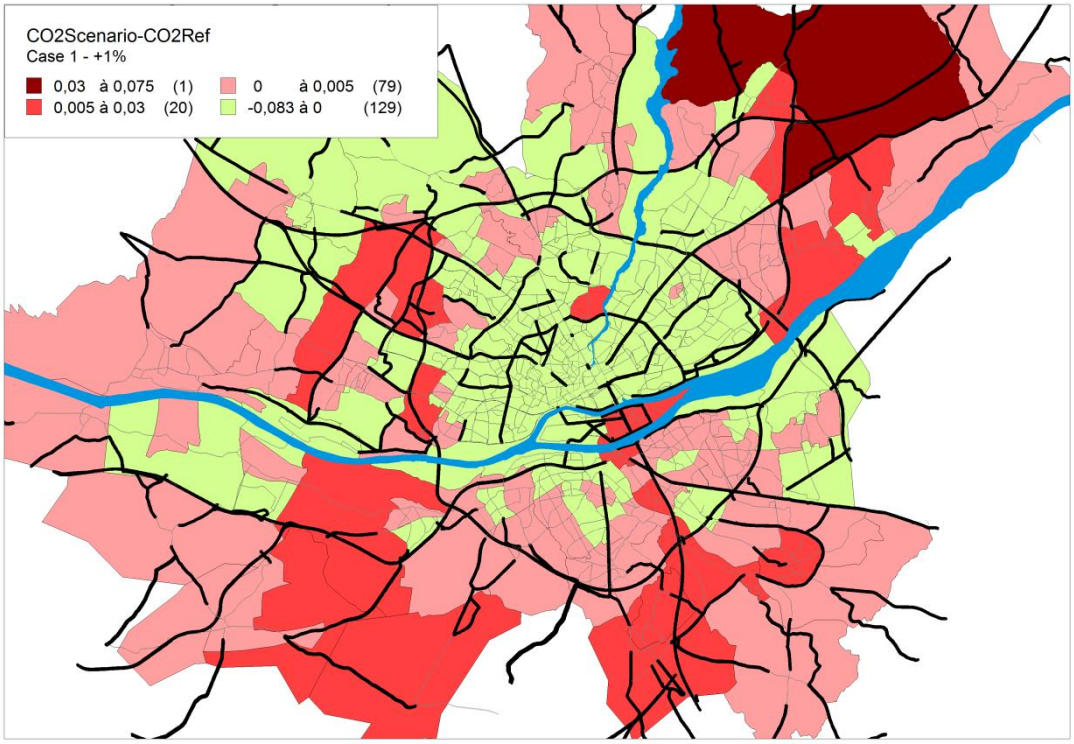
For each simulation, these indicators are presented in the Appendix 7.

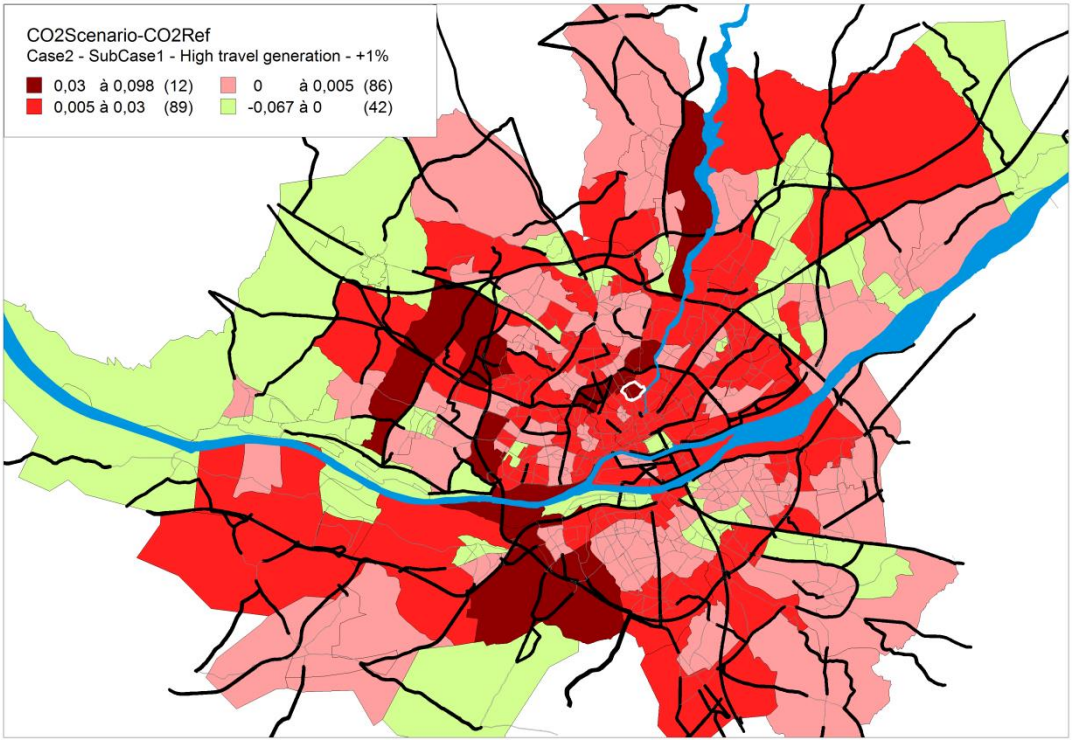
Scenario		Simulations (variation depending on the number of total trips)
S1-Case 1		+25%, +30%, +40%, +50%
S2-Case 2	Sub-Case 1 High travel generation	+10%
	Sub-Case 1 Low travel generation	/
	Sub-Case 2 Low travel generation – 1st area	+10%
	Sub-Case 2 Low travel generation – 2nd area	+10%
	Sub-Case 2 – High travel generation – 1st area	+10%
	Sub-Case 2 High travel generation – 2nd area	+10%
	Sub-Case 3	/
	Specific Sub-Case	+10%
S3-Case 3	City Centre	+5%, +10%
	Suburban Site	+10%
S4-Case 4	Sub-Case 1	+5%, +10%
	Sub-Case 2	+10%

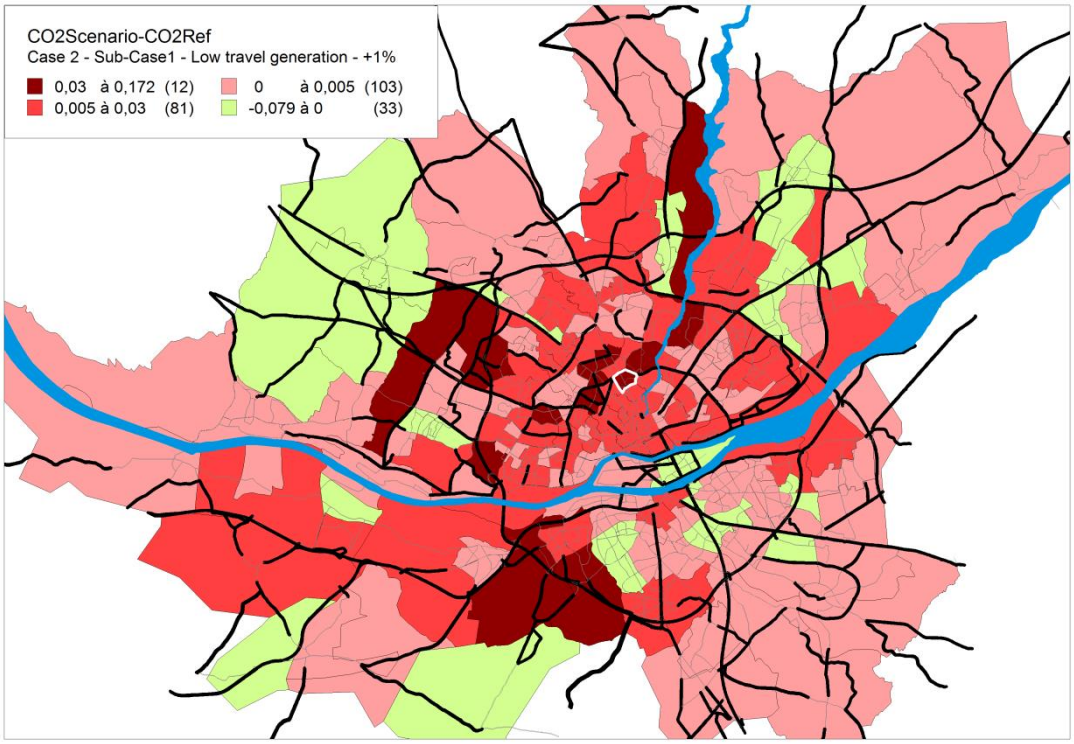
Tableau 36 Simulations which are besides the range of model validity

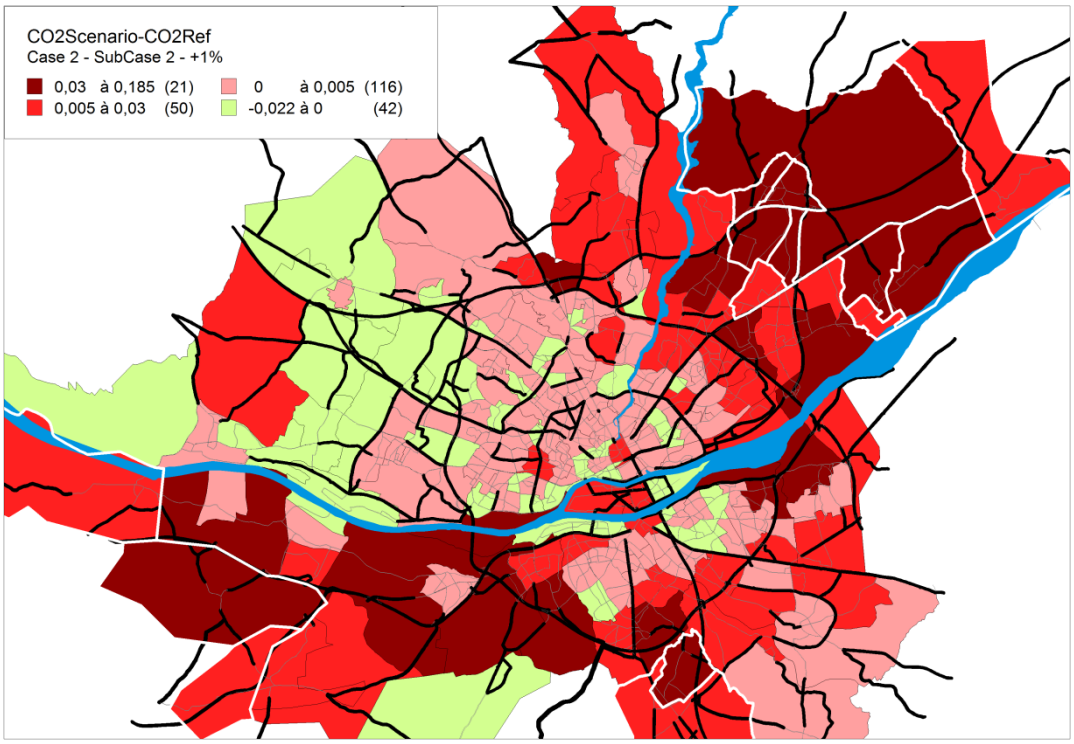
1.5.4. Localization and quantification of the emission impact at the conurbation scale – Stimulus 1

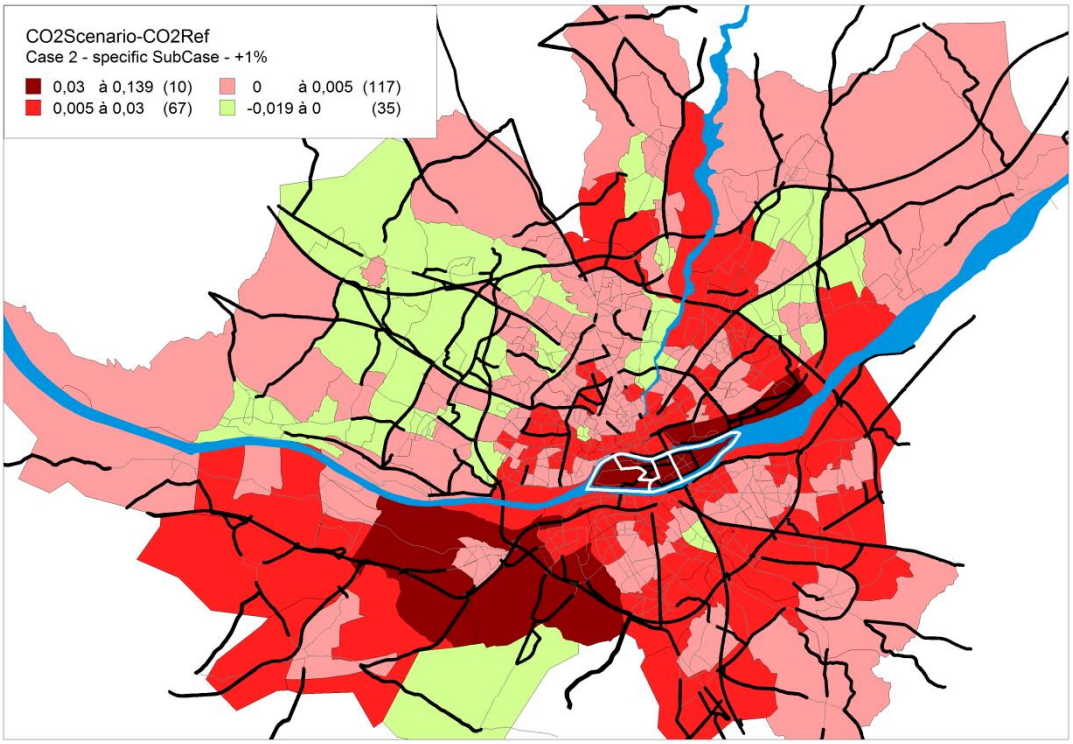
We want to characterize the difference of the impact between a variation of the number of trips which is applied to the entire territory and a variation which is localized on specific zones. All the cases of Stimulus 1 (S1) are shown in Figure 40. Each represented simulation corresponds to the variation of 1% of the total number of trips. This corresponds to an increase of 1 239 trips. The following maps represent the variation of CO_2 emission (tones) between each case and the reference scenario (which is described in the previous part). On the maps, the classes of values are the same for each representation in order to make the comparison between the scenarios easier.

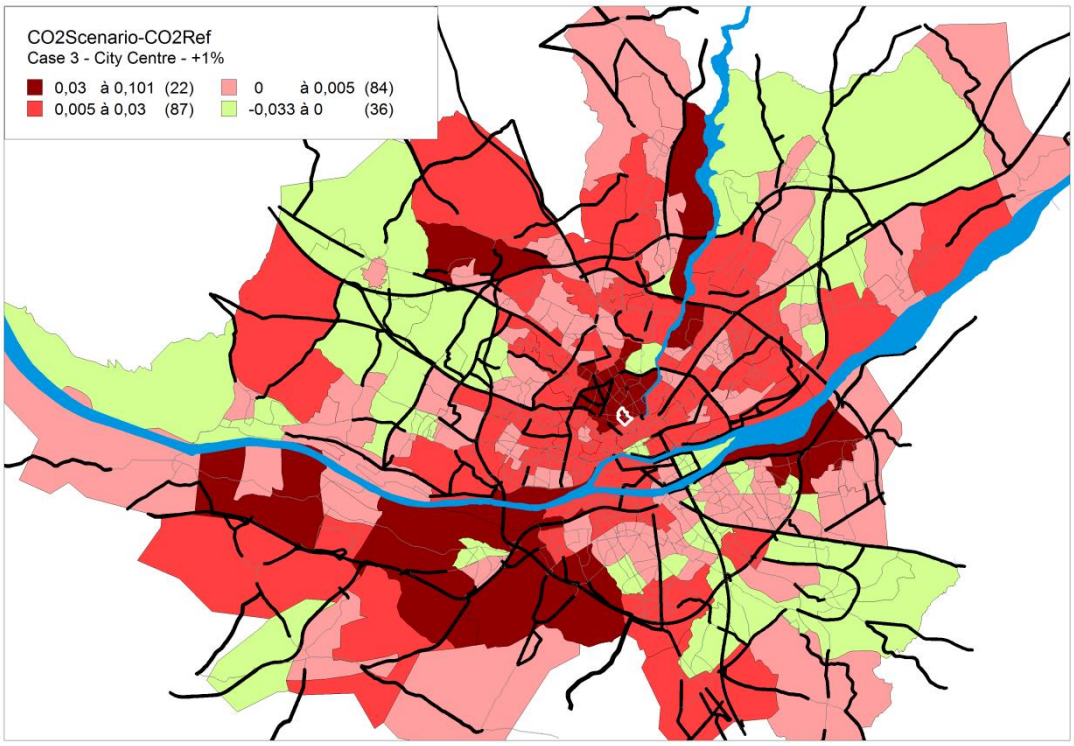

CO2Scenario-CO2Ref
Case 1 - +1%
0,03 à 0,075 (1)
0,005 à 0,03 (20)
0 à 0,005 (79)
-0,083 à 0 (129)


CO2Scenario-CO2Ref
Case2 - SubCase1 - High travel generation - +1%
0,03 à 0,098 (12)
0,005 à 0,03 (89)
0 à 0,005 (86)
-0,067 à 0 (42)


CO2Scenario-CO2Ref
Case 2 - Sub-Case1 - Low travel generation - +1%
0,03 à 0,172 (12)
0,005 à 0,03 (81)
0 à 0,005 (103)
-0,079 à 0 (33)


CO2Scenario-CO2Ref
Case 2 - SubCase 2 - +1%
0,03 à 0,185 (21)
0,005 à 0,03 (50)
0 à 0,005 (116)
-0,022 à 0 (42)


CO2Scenario-CO2Ref
Case 2 - specific SubCase - +1%
0,03 à 0,139 (10)
0,005 à 0,03 (67)
0 à 0,005 (117)
-0,019 à 0 (35)


CO2Scenario-CO2Ref
Case 3 - City Centre - +1%
0,03 à 0,101 (22)
0,005 à 0,03 (87)
0 à 0,005 (84)
-0,033 à 0 (36)

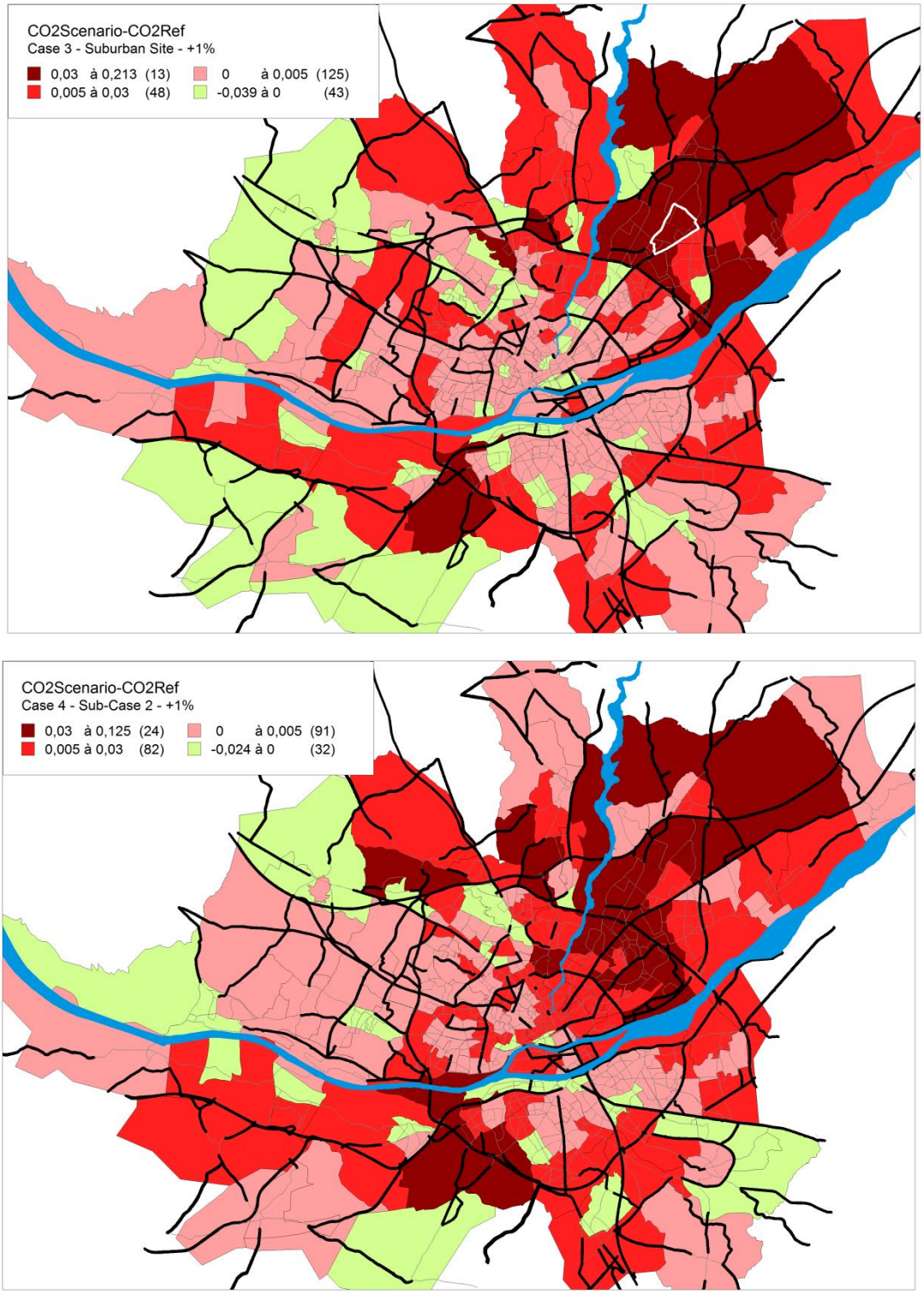


Figure 40 Spatial distributions of the demand scenarios impacts (difference of CO_2 emissions per zone) for a variation of 1% of total number of trips

These maps show that, in the case of a global variation, the increase of CO_2 emission is more diffuse on the entire territory. For this simulation, the variations in each zone are less important (the maximum variation is equal to +0.075 CO_2 tones). For the other cases, the variations seem to be quite concentrated on the zones for which the variation of number of trips is applied and around them. Several zones show a decrease of the CO_2 emission while an increase of the number of trips is applied. These decreases could be explained by the fact that the variations of speeds could induce increases or

decreases of CO_2 or NO_x emissions. For example, a decrease of speed from 120km/h to 100km/h will induce a decrease of CO_2 emissions while a decrease from 40km/h to 20km/h will induce an increase of emissions (Figure 41 and Figure 42). These speed increases or decreases are linked to the traffic assignment. Indeed, a modification of the number of trips from a zone to another zone causes modifications of itineraries and so, relocation of traffic on others links of the network.

The same observations are shown for the NO_x emissions (appendix 8).

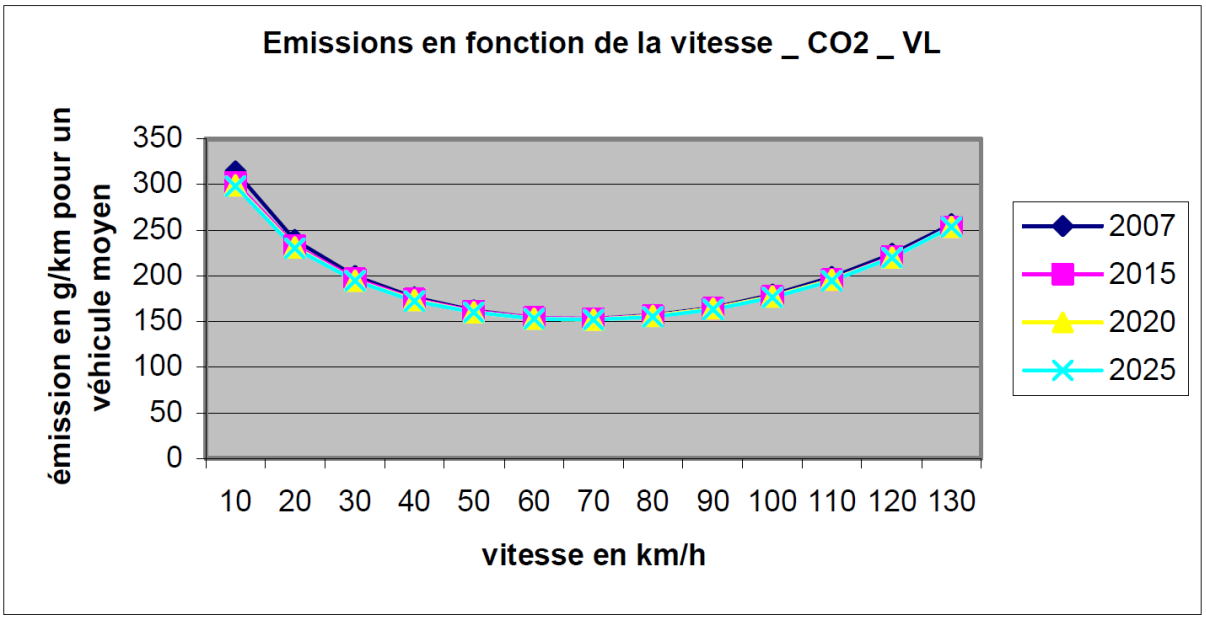


Figure 41 CO_2 Pollutant emissions depending on the speed for the Passenger Cars Category

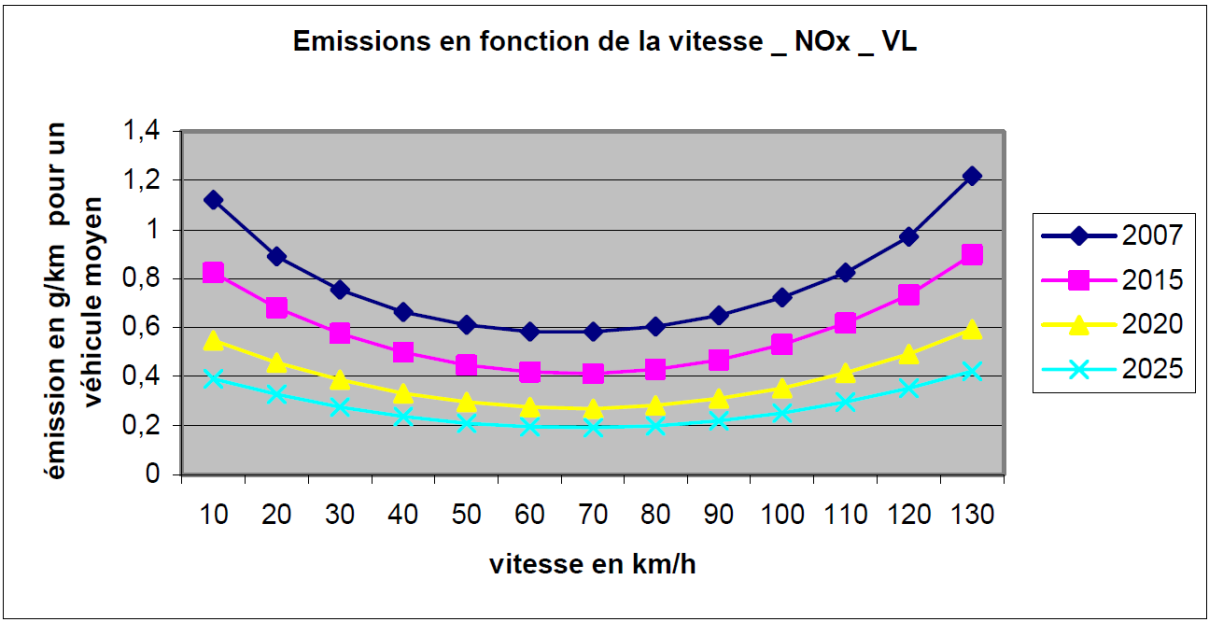


Figure 42 NO_x Pollutant Emissions depending on the speed for the Passenger Cars Category

Tableau 37 shows the total CO_2 and NO_x emissions for all the stimulus 1 scenarios and for a variation of 1% of the total number of trips.

Cases	Sub-Cases	Total CO2 emission (tones)	Total NOx emission (tones)
REF		218.7	1.1538
1		220.05	1.1591
2	1 Low travel generation	220.27	1.1600
	1 High travel generation	220.46	1.1600
	2 Low travel generation 1st area	220.40	1.1606
	2 Low travel generation 2nd area	220.37	1.1606
	2 High travel generation 1st area	220.48	1.1612
	2 High travel generation 2nd area	220.50	1.1613
	3 Outskirts	220.79	1.1619
	Specific Sub-Case	220.23	1.1600
3	City Centre	220.96	1.1626
	Suburban Site	220.61	1.1604
4	1	221.70	1.1657
	2	221.30	1.1641

Tableau 37 Total CO2 and NOx Emission for the Case of the Stimulus 1

The variation of the number of trips on a specific OD (Case 4) shows the highest CO_2 and NO_x variations. We do not observe significant differences between a variation of the number of trips starting from a zone (trip generation – Case 2) and going to a zone (Case 3) (Tableau 37).

To conclude, the localization of the variation of the number of trips seems to be essential for an analysis of the intensity and the localization of the emissions impacts.

1.5.5. Mean travel length based relation between stimulus 1 and the emission impact

1.5.5.1. Method description

We want to define the relation between the Stimulus 1: PC travel demand and the emission impact in order to assess the emission impact of a mobility / traffic measure from the knowledge of its effect on the stimulus.

The quantity of emissions is mainly dependent on the traffic (veh.km). We assume that the influence of other parameters such as the speed or the vehicle fleet composition is low. Between two simulations, with the same modified number of trips, the main parameter, which represents the quantity of traffic, is the lengths of the trips. Thus, we conjecture that the mean length of the new trips is a pertinent determinant of the variation of the traffic quantity.

The lengths of the added trips depend on the existing length matrix between each zone of the model. If we modify the number of trips to the destination of a zone, all the trips between each origin zone and this destination are modified. The length also depends on the taken itinerary which is determined by the traffic assignment.

To investigate this conjecture, we assume that traffic assignment is not modified for the other trips and thus, that the mean lengths of the trips realized on the network are not changed. We assume that the speed is mainly constant in comparison to the reference scenario and that the speed of the new trips can be assimilated to the mean speed of the total trips which are undertaken on the entire conurbation. We suppose that the characteristics (speed and length) of the previous trips are not modified or are faintly modified by the traffic assignment of the new trips. We assume that the vehicle fleet composition of the new trips is the same as the total vehicle fleet composition. Any deviations between the simplified model and the simulation results will stress the limits of these assumptions.

Conversely, the good agreement between the simplified model and the stimulus results will demonstrate the predominance of the trips lengths.

1.5.5.1.1. Pertinence of the relation by the comparison with the impact calculated from the traffic and emissions models

Firstly we try to determine if this conjecture is pertinent. We calculate a mean emission factor (EF) related to the reference scenario for the pollutant (p):

$$EF_{mean}(p) = \text{total emission (p)} / \text{total traffic}$$

Then, we calculate emissions induced by the added traffic (veh.km) for the specific simulation (s):

$$\text{Added emission (p,s)} = (\text{total Veh.km (s)} - \text{total Veh.km (Ref)}) \times FE_{mean}(p)$$

We compare the emission impact which is calculated with this method (from the mean length of the added trips) and this one calculated with the traffic and emission models. This analysis allows to evaluate if the trips length is the determinant parameter. If the estimate of the quantity of emission is not consistent with the traffic and emission model results, the mean length is not the main determinant of this relation. Other parameters such as the speed or the vehicle fleet composition of the previous or new trips could be the main determinants.

1.5.5.1.2. Mean trips length estimation depending on the OD matrix and the length between the centroïds of the model zone

In order to determine the relation between the stimulus and the impact, we want to deduce the mean length of the new trips from the characteristics of the action of the stimulus. To determine the trip length, we first calculate the bird's eye length between each centroïd of the zone of the model. This calculated length does not take into account the layout of the network which links two zones and the added length of trips linked to the traffic assignment.

In order to take into account the total length, we estimate a corrective factor (CF) between the bird's eye length weighted by the number of trips and the traffic (veh.km). This corrective factor is an estimate from the Reference simulation.

$$CF = \text{total traffic (veh.km)} / (\text{total number of trips} \times \text{mean bird's eye length of the trips})$$

In order to simplify the relation, we assume that this corrected factor can be applied to all the trips.

The final relation between the stimulus and the emission impact is:

$$\text{Emission Impact (p)} = EF_{mean}(p) \times (\text{total mean bird's eye lenght of added trips} \times \text{number of added trips}) \times CF$$

1.5.5.2. Application of the method

1.5.5.2.1. Relevance of the relation

We have calculated the mean emission factor related to the reference scenario for the CO_2 and NO_x pollutants (Tableau 38).

Pollutant	Mean emission factor related to the reference scenario (g/km)
CO_2	236
NO_x	1.24

Tableau 38 Mean emission factor related to the reference scenario

Tableau 39 shows the comparison between the total pollutant emissions, for each simulation, which are calculated from the traffic and the Emission Factor and from the traffic and emissions models. In this analysis, the only parameter which is modified between the two emission calculations, is the Emission Factor. In the simplified calculation, we take into account a Mean Emission Factor for the whole links of the network, but, for the initial calculation, the emission factor depends on the speed of the traffic on a specific link and on the vehicle fleet composition in the specific link. This analysis allows to determine if the speeds are modified between the reference scenario and the analyzed scenario, if the traffic speed can be locally represented by the mean speed of the total traffic and if the pollutant emissions depend more on the speed than on the traffic for the analyzed scenari.

Generally, the CO2 emission impacts are very well represented by the simplified calculation (variations are low). The NOx emission impacts are higher with the simplified calculation based on the traffic and the Mean Emission Factors. NOx emissions seem to be more influenced by the speed than the CO2 emissions.

Thus, the defined relation is relevant and the speed is not a determinant factor for the CO2 emissions.

In a future work, we will have to integrate different Emission Factors for the different areas depending on the local mean speed.

Cases (s)	Sub-Cases	Veh.km (s) – Veh.km Ref = [1]	Added CO2 emissions (tones) = [1] x EF =[2]	Total CO2 emissions (tones) =[3]+[2]	Total CO2 emissions from the models	Added NOx emissions (tones) [1] x EF =[4]	Total NOx emissions (tones) =[3]+[4]	Total NOx emission from the models
REF					218.7 [3]			1.1538
1		5886	1.39	220.09	220.05	0.0073	1.1611	1.1591
2	1 Low travel generation	6485	1.53	220.23	220.27	0.0080	1.1618	1.1600
	1 High travel generation	7185	1.70	220.40	220.46	0.0089	1.1627	1.1600
	2 Low travel generation 1st area	7229	1.71	220.41	220.40	0.0090	1.1628	1.1606
	2 Low travel generation 2nd area	7171	1.69	220.39	220.37	0.0089	1.1627	1.1606
	2 High travel generation 1st area	7455	1.76	220.46	220.48	0.0092	1.1630	1.1612
	2 High travel generation 2nd area	7401	1.75	220.45	220.50	0.0092	1.1630	1.1613
	3 Outskirts	8795	2.08	220.78	220.79	0.0109	1.1647	1.1619
	Specific Sub-Case	7416	1.75	220.45	220.23	0.0092	1.1630	1.1600
3	City Centre	8463	2.00	220.70	220.96	0.0105	1.1643	1.1626
	Suburban Site	8798	2.08	220.78	220.61	0.0109	1.1647	1.1604
4	1	10 194	2.41	221.11	221.70	0.0126	1.1664	1.1657
	2	11 978	2.83	221.53	221.30	0.0149	1.1687	1.1641

Tableau 39 Comparison of the total pollutant emission for each simulation calculated from the traffic and the Emission Factors (EF) and from the traffic and emission models

1.5.5.2.2. Estimation of the mean length of the added trips from the OD length matrix

In this case, the factor is equal to 1.378 (Tableau 40). The variation between the bird's eye length and the network length varies between short and long trips and depending on the localization of the origin and destination zones. Through two examples, we have compared SIG length (eye's bird) with the distances which are calculated with Mappy[11]. For the first example, we have selected a trip between an outlying town (Abbartez – zone 7004 in the model) and the city center of Nantes (zone 101). The eye's bird distance is equal to 38.5 km while the distance based on Mappy is equal to 48 km. Thus, the corrected factor is equal to 1.25. For the second example, we have selected two streets in Nantes. The first one is situated to the west (avenue Camus – zone 402) and the second one is situated to the East (rue des Boers – zone 511). The eye's bird length is equal to 2.5 km and the length which is calculated by Mappy is 4 km. The corrected factor is 1.6 what is much higher than the previous example. The approximation is more important for the short trips.

PC traffic (veh.km) on the urban area	927 305
PC trips * mean length of the trips	672 906
Corrective Factor	1.378

Tableau 40 Estimation of the Corrective Factor (CF)

[11] http://fr.mappy.com/

When we apply this corrective factor to the added trips, we assume that the traffic assignment (itinerary and speed) impacts the added trips as for the total trips in the reference scenario.

We first calculate the mean length of the new trips from the traffic model and secondly, from the number of trips (OD matrix) (Tableau 41).We compare the mean length of the added trips with the two calculations. We observe a good estimation for the global variation of the number of trips (Case 1) and for the cases with trips coming from or to the destination to the outskirts zones (Cases 2-3, 3-Suburban Site, 4-1). On the contrary, we observe an underestimation of the mean length for the local variation of the number of trips moving into the center area.

Thus, the traffic assignment seems to be a determinant factor for the assessment of the mean length for the shorter distance. The Corrective Factor will allow to include the influence of the traffic assignment. Nevertheless, for the longer trips, the traffic assignment do not seem to be determinant.

Cases	Sub-Cases	Mean length (km) of the new trips calculated from the veh.km model	Mean length (km) of the new trips calculated from the number of trips
1		4.75	4.39
2	1 Low travel generation	5.23	3.29
	1 High travel generation	5.80	3.48
	2 Low travel generation 1st area	5.83	3.31
	2 Low travel generation 2nd area	5.79	3.29
	2 High travel generation 1st area	6.02	3.41
	2 High travel generation 2nd area	5.97	3.43
	3 Outskirts	7.10	6.57
	Specific Sub-Case	5.99	3.74
3	City Centre	6.83	3.82
	Suburban Site	7.10	5.10
4	1	8.23	6.93
	2	9.67	5.81

Tableau 41 Comparison of the mean trips lengths calculated from the traffic and emission models and from the number of trips (OD matrix)

1.5.5.3. Calculation of the emissions impact from the mean trips length of the added trips

Tableau 42 presents the comparison of the emission impact which is calculated from the traffic and emission models and from the mean length trips.

This calculation allows to estimate the impact variation with a difference from 1 to 30% for the CO_2 emissions and from 3 to 75% for the NO_x emissions in comparison with the emission impact calculated from the traffic and emissions models (Tableau 43). The CO2 emissions errors could be explained by the traffic assignment because we observe in the first part that the speed is not a determinant factor. However, the NOX emissions errors could be explained by the two factos : traffic assignment and speed.

The principle of calculation seems to be consistent, especially for the CO2 emissions.

Cases (s)	Sub-Cases	Total CO2 emissions from simplified calculation	Total CO2 emissions from the models	CO2 emission (Scenario) – CO2 emission(Ref) (tones) (models)	Error between the two methods	Total NOx emissions from simplified calculation	Total NOx emission from the models	NOx emission (Scenario) – NOx emission(Ref) (tones) (models)	Error between the two methods
REF			218.7				1.1538		
1		220.47	220.05	1.35	0.42	1.1631	1.1591	0.0053	0.004
2	1 Low travel generation	220.03	220.27	1.57	-0.24	1.1608	1.1600	0.0062	0.0008
	1 High travel generation	220.1	220.46	1.76	-0.36	1.1612	1.1600	0.0062	0.0012
	2 Low travel generation 1st area	220.03	220.40	1.7	-0.37	1.1608	1.1606	0.0068	0.0002
	2 Low travel generation 2nd area	220.03	220.37	1.67	-0.34	1.1608	1.1606	0.0068	0.0002
	2 High travel generation 1st area	220.07	220.48	1.78	-0.41	1.1610	1.1612	0.0074	-0.0002
	2 High travel generation 2nd area	220.08	220.50	1.8	-0.42	1.1611	1.1613	0.0075	-0.0002
	3 Outskirts	221.35	220.79	2.09	0.56	1.1677	1.1619	0.0081	0.0058
	Specific Sub-Case	220.21	220.23	1.53	-0.02	1.1617	1.1600	0.0062	0.0017
3	City Centre	220.24	220.96	2.26	-0.72	1.1619	1.1626	0.0088	-0.0007
	Suburban Site	220.75	220.61	1.91	0.14	1.1646	1.1604	0.0066	0.0042
4	1	221.49	221.70	3	-0.21	1.1685	1.1657	0.0119	0.0028
	2	221.04	221.30	2.6	-0.26	1.1661	1.1641	0.0103	0.002

Tableau 42 Comparison of the two calculations of the emissions impact

Cases	Sub-Cases	CO2 (%)	NOx (%)
1		31.1	75.5
2	1 Low travel generation	-15.3	12.9
	1 High travel generation	-20.5	19.4
	2 Low travel generation 1st area	-21.8	2.9
	2 Low travel generation 2nd area	-20.4	2.9
	2 High travel generation 1st area	-23.0	-2.7
	2 High travel generation 2nd area	-23.3	-2.7
	3 Outskirts	26.8	71.6
	Specific Sub-Case	-1.3	27.4
3	City Centre	-31.9	-8
	Suburban Site	7.3	63.6
4	1	-7	23.5
	2	-10	19.4

Tableau 43 Error of the Simplified method depending on the emission variation between the studied scenario and the reference scenario (%)

1.5.6. Specific Localization of the impact for each simulation – Demand scenarios

In the previous part, we have tried to quantify the emission impact of each scenario on the entire conurbation. Nevertheless, we notice that affected zones are differently affected depending on the scenarios. Thus, we want to spatially determine the impact of the stimulus. For that, we analyze the representation of the variation of pollutant emission depending on the zone. For each scenario, we analyze in a first time, the impacted surface area. This surface is calculated depending on the variation of the pollutant emission (in absolute value). For each scenario, we define: the strongly impacted surface area, the moderately one, the slightly one and the surface area for which we observe a decrease of the quantity of emission while the number of trips increases or inversely (the inversely impacted zones).

Then, in order to determine the localization of these zones, which is strongly dependent on the network, we determine where these zones are localized: around the disrupted zone, around the origin and destination zones of the disrupted trips or in another shape (dispersed…).

1.5.6.1. Case 1: Global variation of the PC demand travel

In the Case 1 Scenario, the number of trips is varied from 1 239 to 61 958 trips at the conurbation scale (Tableau 44). We thus observe that a lot of zones are impacted for this scenario (Figure 43). For the maximum variation (-50%, -30% or +20% of the trips), almost all the conurbation is strongly impacted. For the intermediate simulation (+ or -10% and + or -5%), the peripheral zones are strongly impacted while the intern zones are moderately impacted. The strongly impacted zones are mainly the zones which contain the main axis (Figure 35). They mainly correspond to the origin and destination zones for which the part of the trips is significant (this is particularly observable on the "île de Nantes" area) (Figure 44).

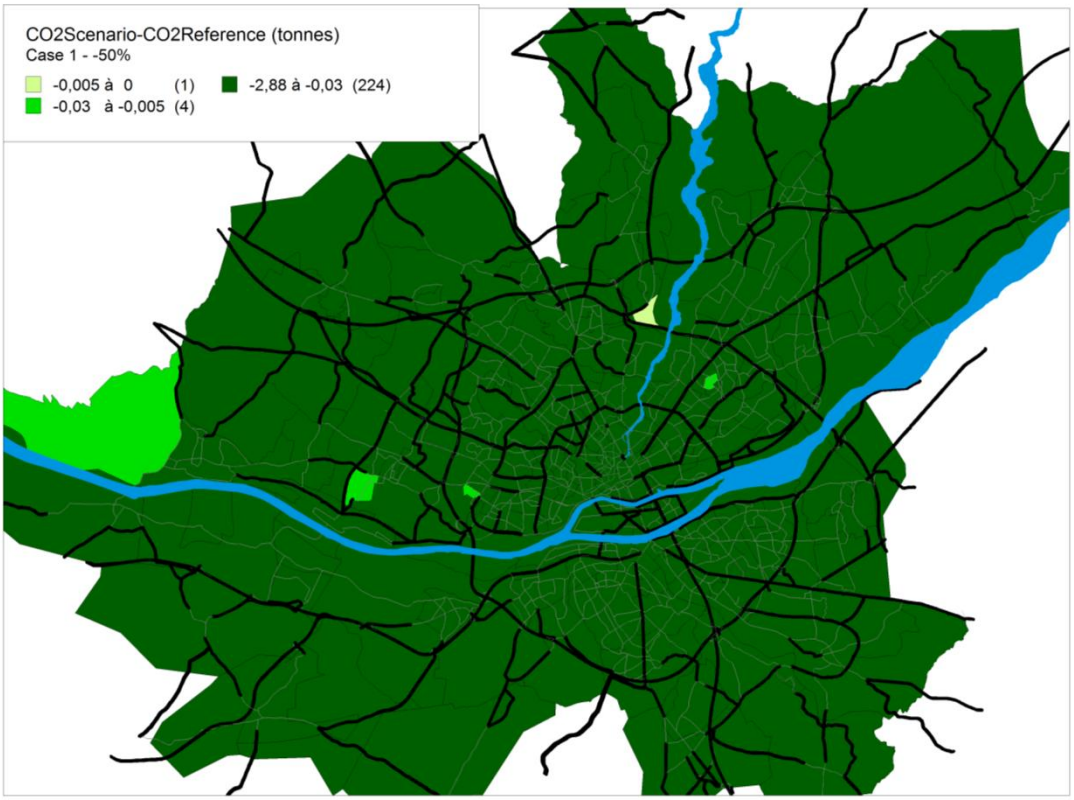
	Trips Variation
+ or -5%	6 196
+ or -10%	12 392
+ or -20%	24 783
+ or -30%	37 175
+ or -50%	61 958

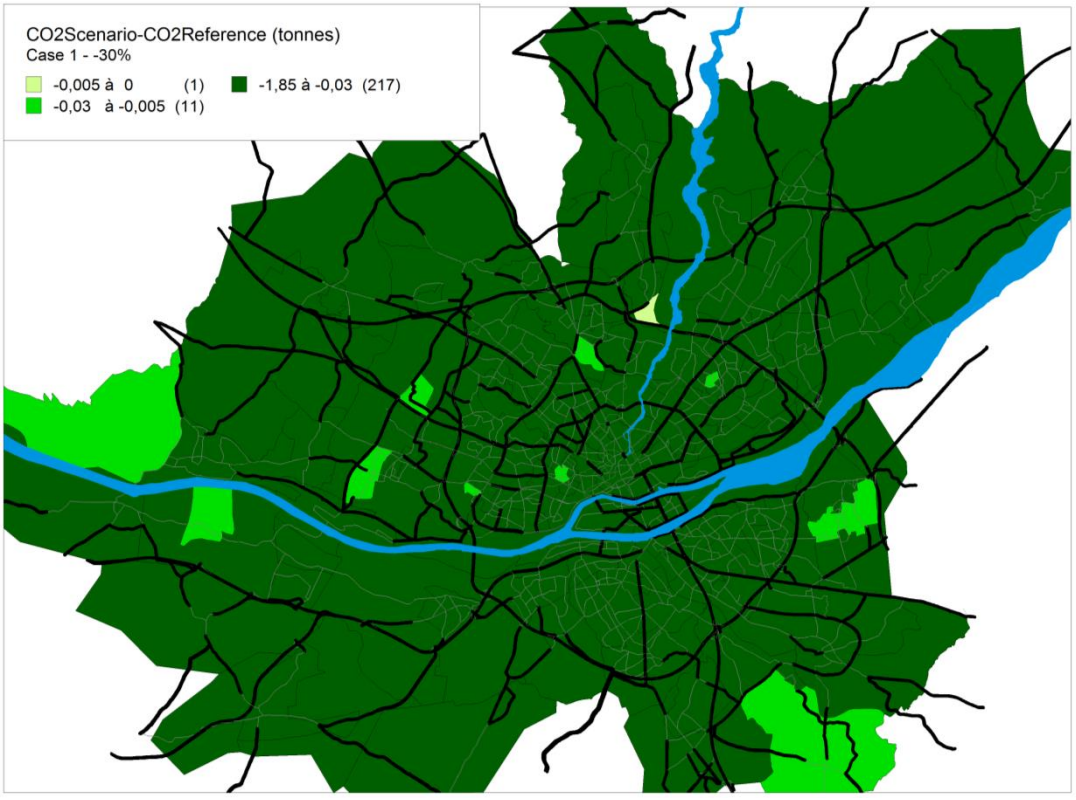
Tableau 44 Variation of the number of trips – Global demand Scenario (Case 1)

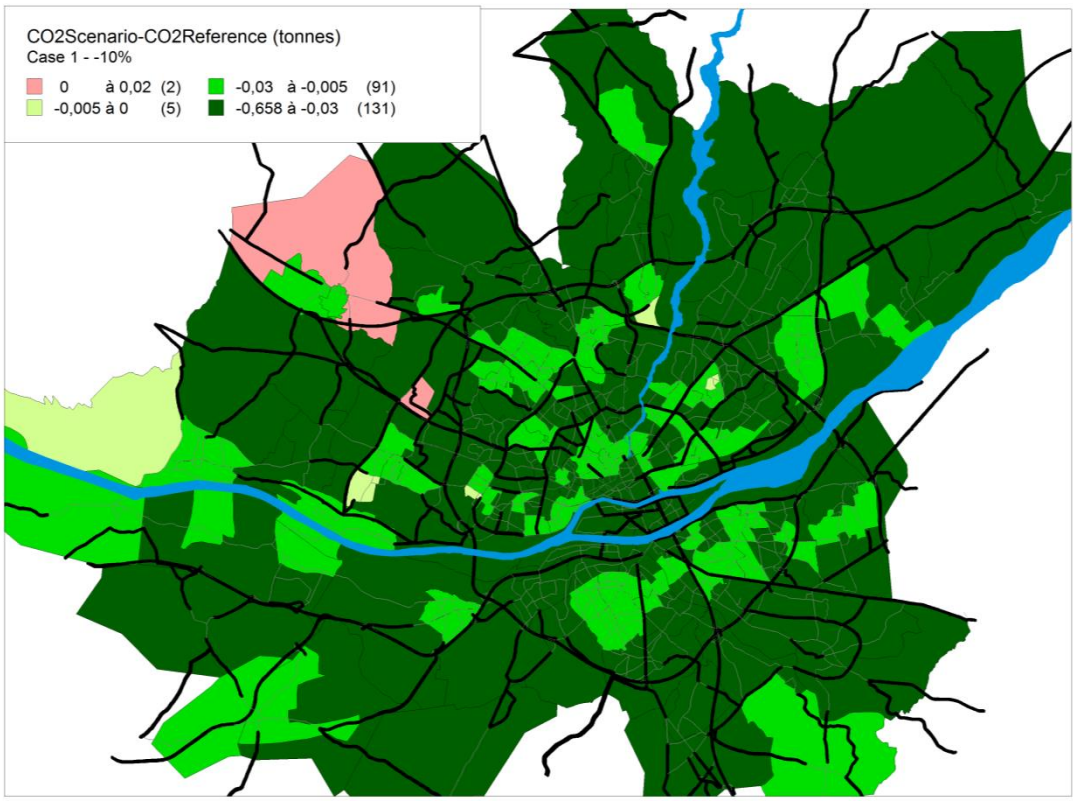
We observe that the surface area of the impacted zones decreases logically when the variation of the number of trips is low (-5% and +5%) (Tableau 45).

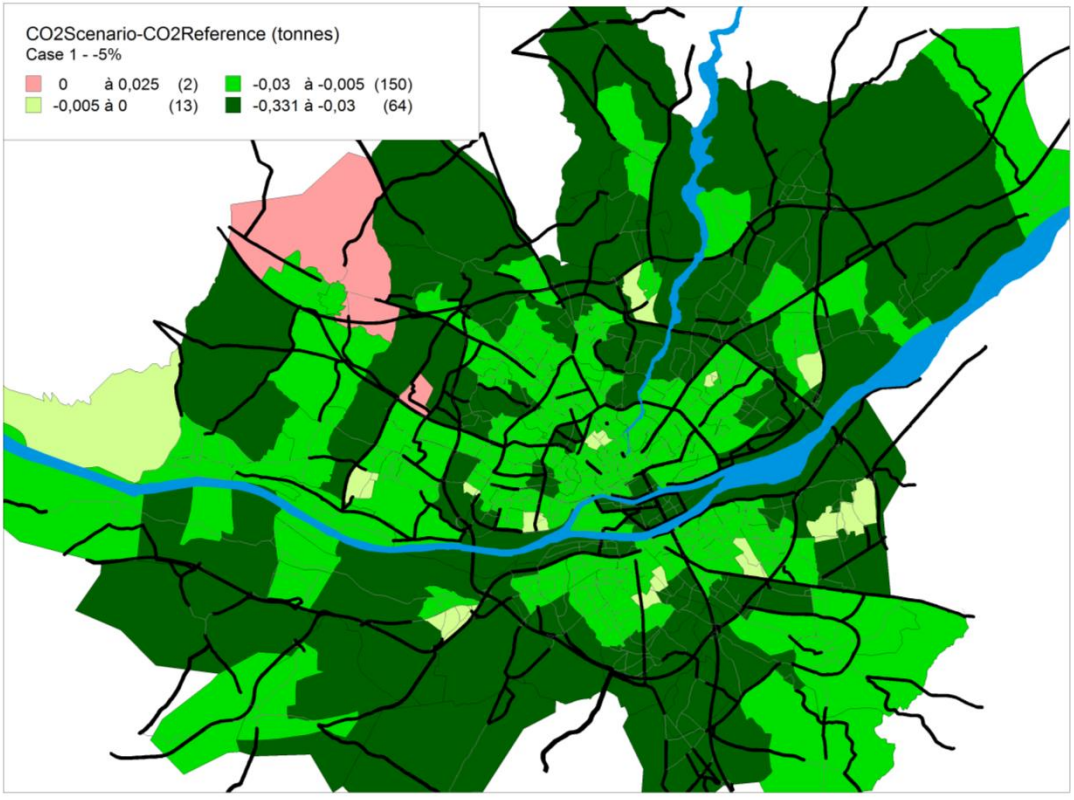
Impacted Zones	Surface area (km²)						
	Simu -50%	-30%	-10%	-5%	+5%	+10%	+20%
Inversely	0	0	15.8	15.8	33.1	16.1	15.4
Slightly	0.4	0.4	18.6	25.1	29.4	19.9	0.8
Moderately	18.3	38.4	117.5	197.9	201.6	103.2	54.7
Strongly	516.1	495.6	382.8	296	270.6	395.5	463.8

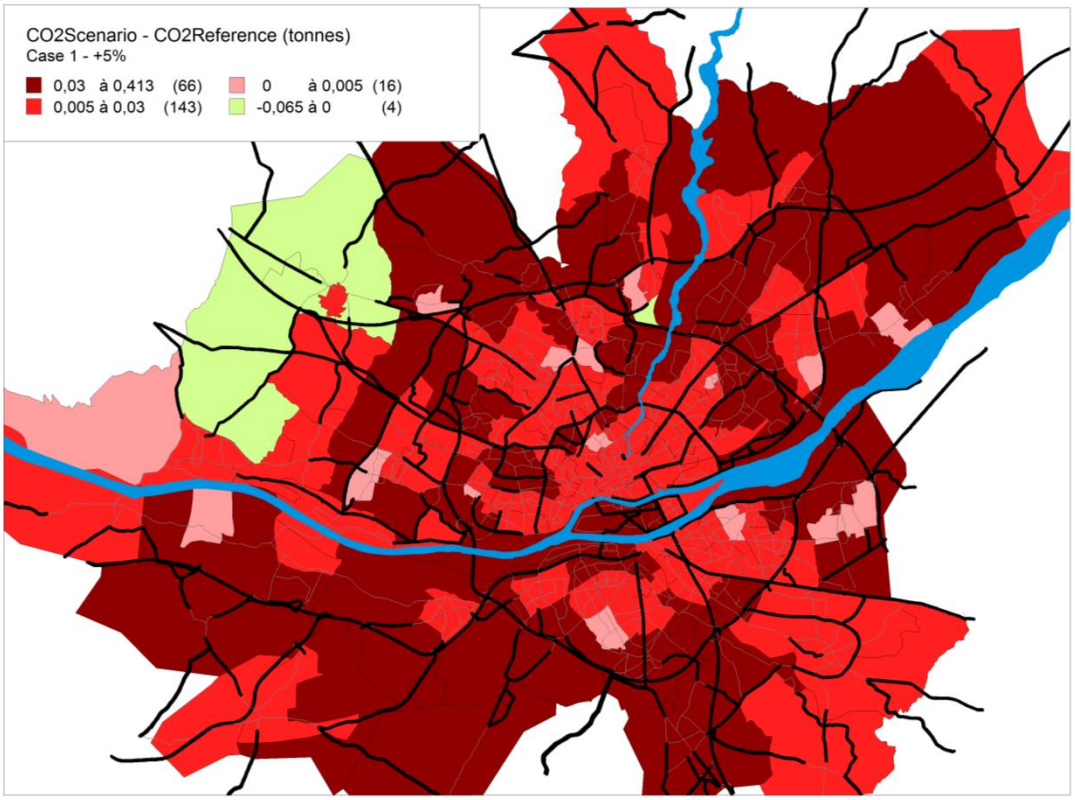
Tableau 45 Surface area of the impacted zones for the Case 1 – Simulation – 50% to +20%

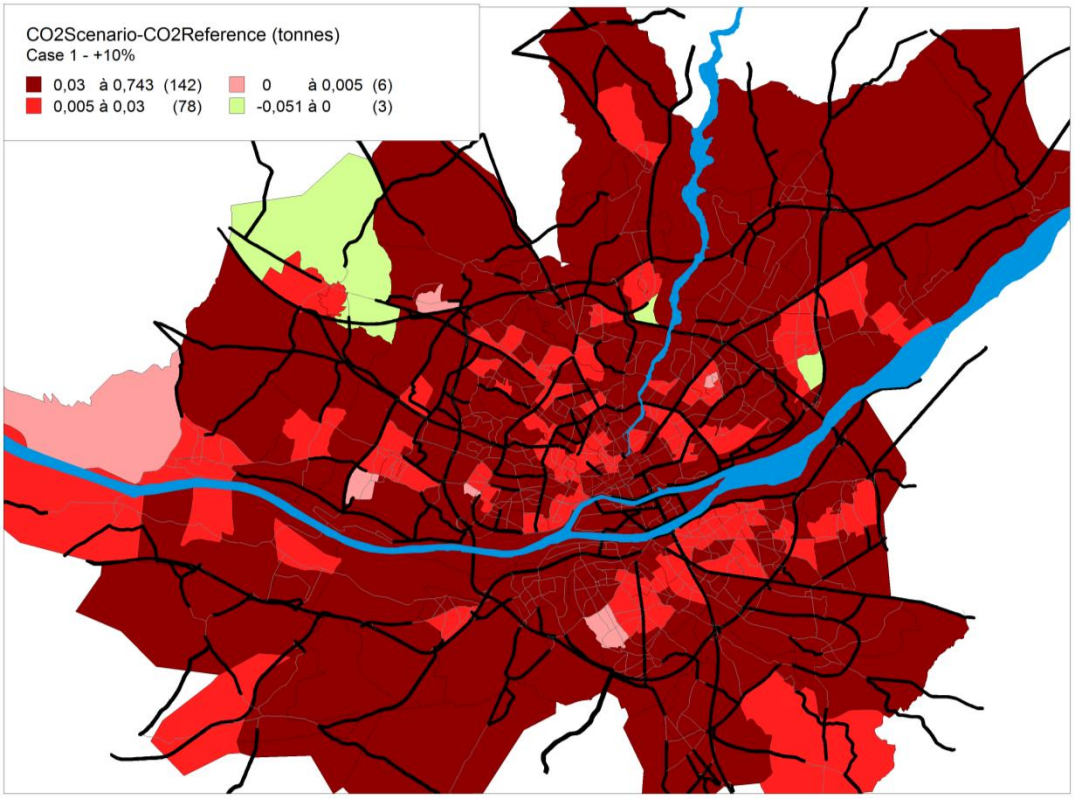

CO2Scenario-CO2Reference (tonnes)
Case 1 - -50%
-0,005 à 0 (1)
-0,03 à -0,005 (4)
-2,88 à -0,03 (224)


CO2Scenario-CO2Reference (tonnes)
Case 1 - -30%
-0,005 à 0 (1)
-0,03 à -0,005 (11)
-1,85 à -0,03 (217)


CO2Scenario-CO2Reference (tonnes)
Case 1 - -10%
0 à 0,02 (2)
-0,005 à 0 (5)
-0,03 à -0,005 (91)
-0,658 à -0,03 (131)


CO2Scenario-CO2Reference (tonnes)
Case 1 - -5%
0 à 0,025 (2)
-0,005 à 0 (13)
-0,03 à -0,005 (150)
-0,331 à -0,03 (64)


CO2Scenario - CO2Reference (tonnes)
Case 1 - +5%
0,03 à 0,413 (66)
0,005 à 0,03 (143)
0 à 0,005 (16)
-0,065 à 0 (4)


CO2Scenario-CO2Reference (tonnes)
Case 1 - +10%
0,03 à 0,743 (142)
0,005 à 0,03 (78)
0 à 0,005 (6)
-0,051 à 0 (3)

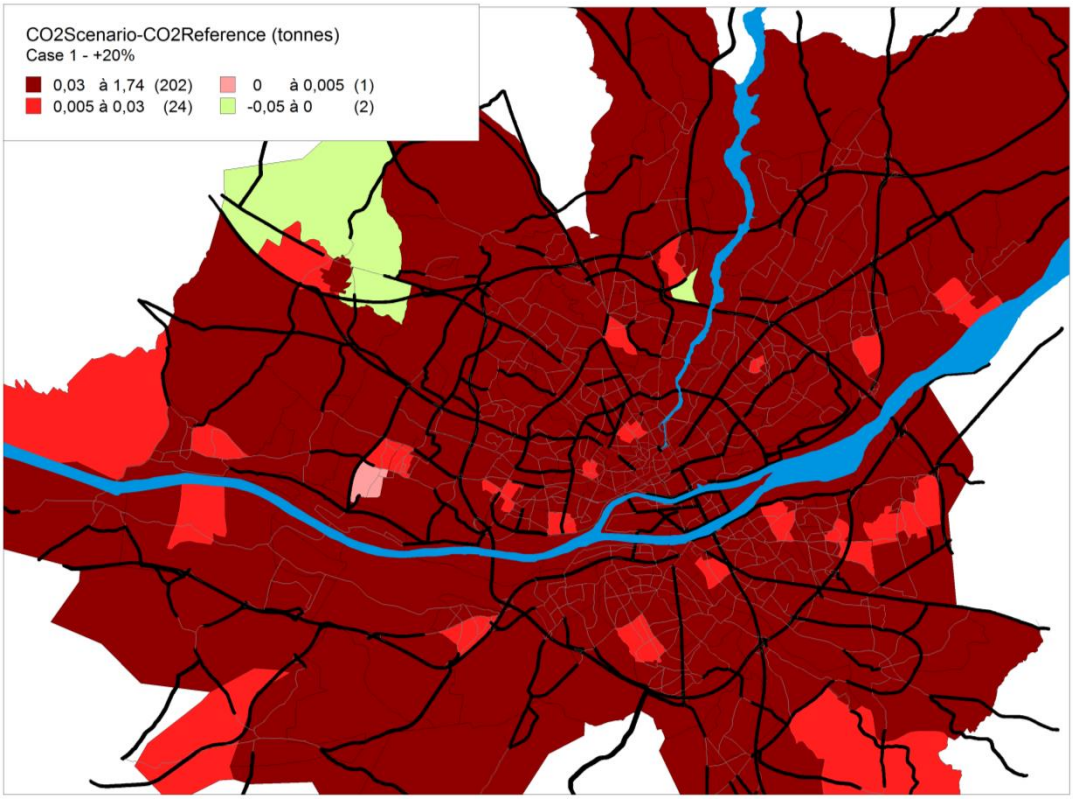


Figure 43 Spatial distributions of the Case 1 - Demand Scenario impacts (difference of CO_2 emissions per zone) for a variation from -50% to +20% of the total number of trips

Figure 44 Spatial distribution of the origin and the destination zones – Case 1

A complementary analyze allows to identify the evolution of the pollutant emission depending on the variation of the number of trips. In the Figure 45 we can observe that pollutants variations curve are polynomials in shape. Variations the most important are observed for benzene emissions. An increase of 50% of the PC demand induces an increase of around 57% of the benzene emissions. A variation of -50% of the PC travel demand induces a decrease of the pollutant emissions between -20% and -40% whereas an increase of the demand of +50% induces a variation ranging from +23% to +58%.

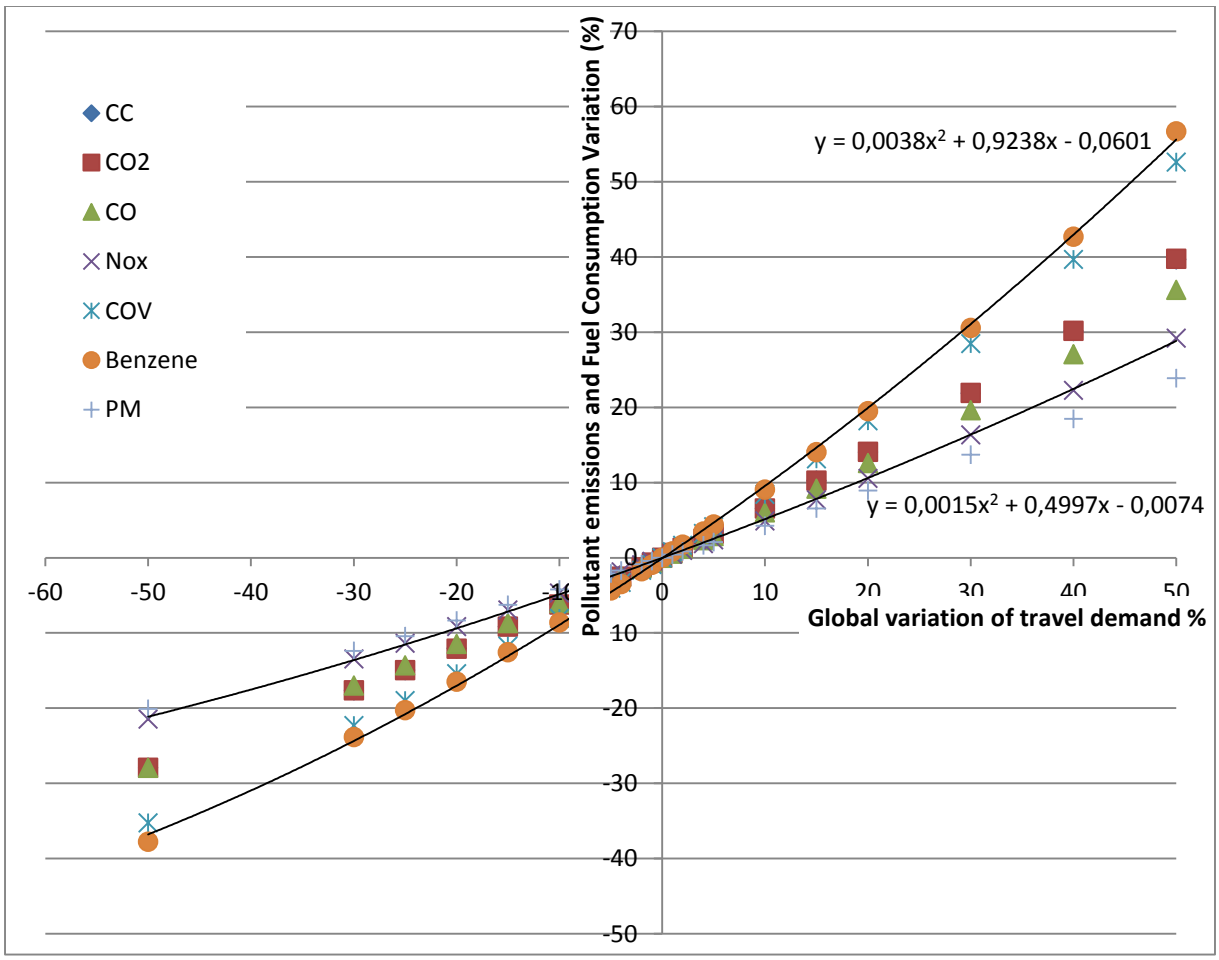


Figure 45 Variation of the Pollutant emissions and Fuel Consumption (CC) parameters as regards PC demand

1.5.6.2. Case 2: Variations in the trip-generation

1.5.6.2.1. Sub-Case 1: City Center: Low travel generation

In this scenario, the maximum variation of the number of trips is 167 trips (Tableau 46). The two maps (Figure 46) show that the highest decreases of CO_2 emission are localized in the East part of the conurbation and in and around the disrupted zone (with white edges) for a decrease of the number of trips.

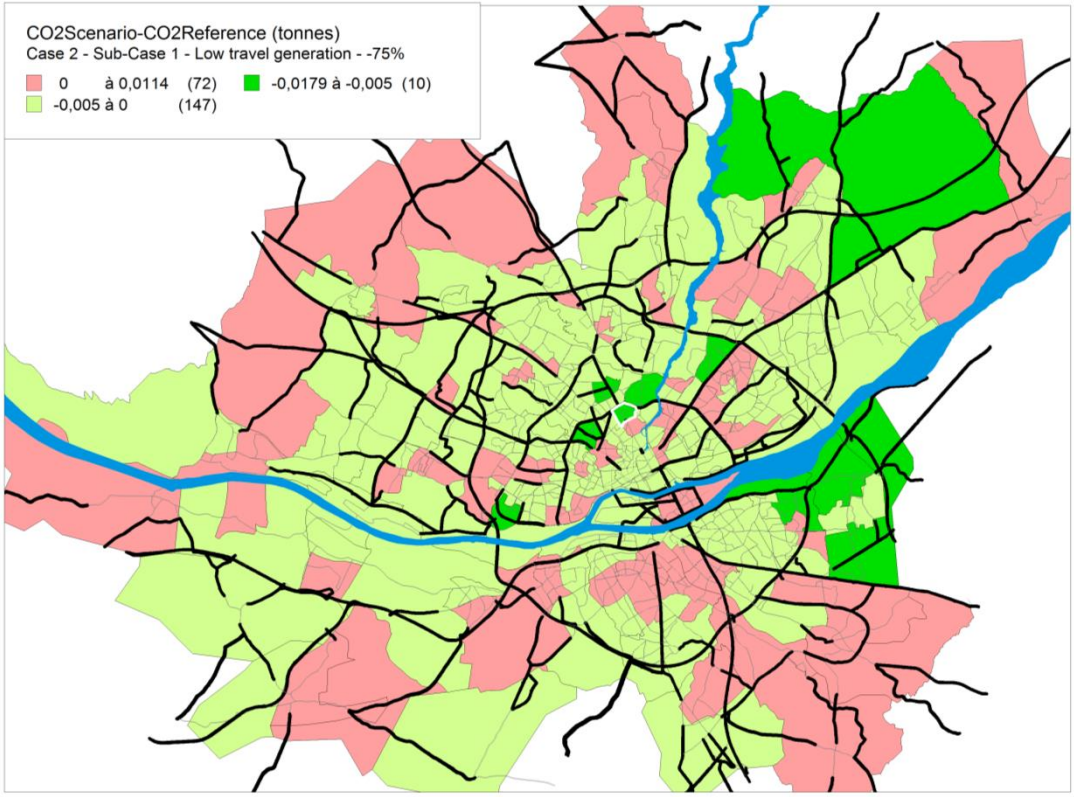
For an increase of the number of trips, we notice that the highest increases of CO_2 emissions are localized in the West part of the conurbation and essentially in the rind roads zones. The low decreases of pollutant emissions are situated in the East part of the conurbation.

	Trips Variation
+ or -25%	55.7
+ or -50%	111.4
+ or -75%	167.1

Tableau 46 Variation of the number of trips – Demand Scenario – Case 2 – Sub-Case 1 – Low travel generation (Stimulus 1)

	Surface area (km²)	
	-75%	+75%
Strongly impacted	0	0
Moderately	53.7	45.6
Slightly	263.2	314.9
Inversely	217.8	174.3

Tableau 47 Surface area of the impacted zones for the Case 2 – Sub-Case 1 – Low travel generation (Stimulus 1)



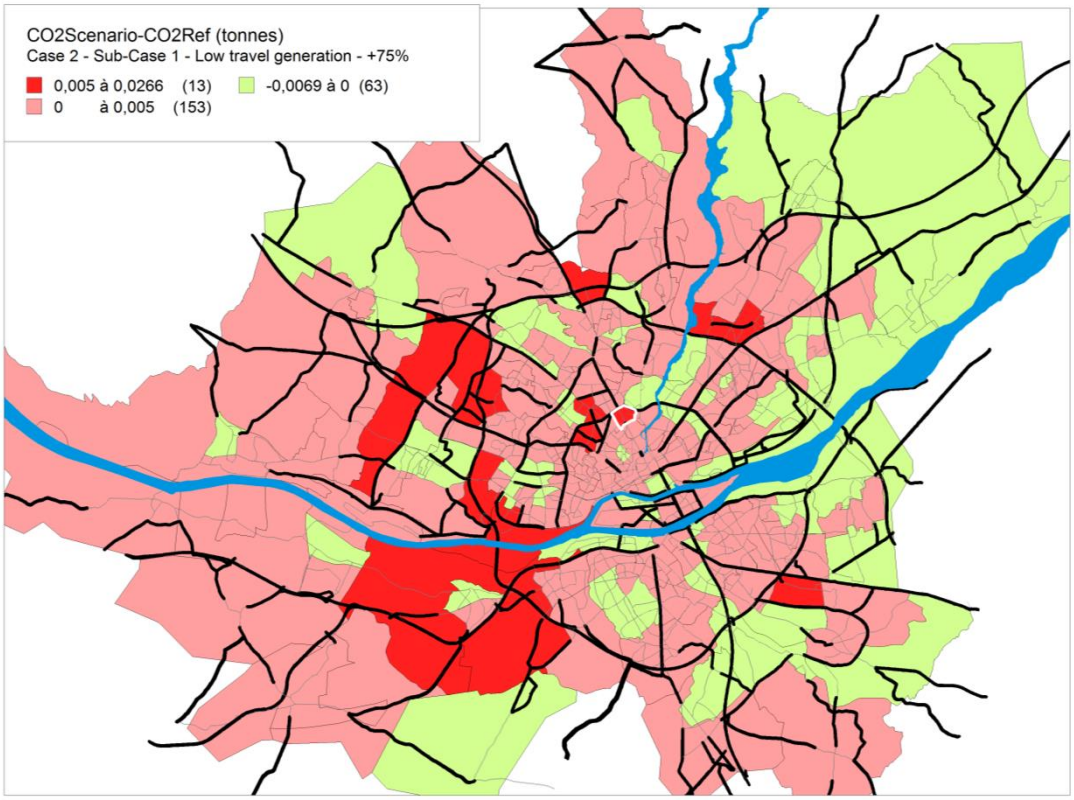


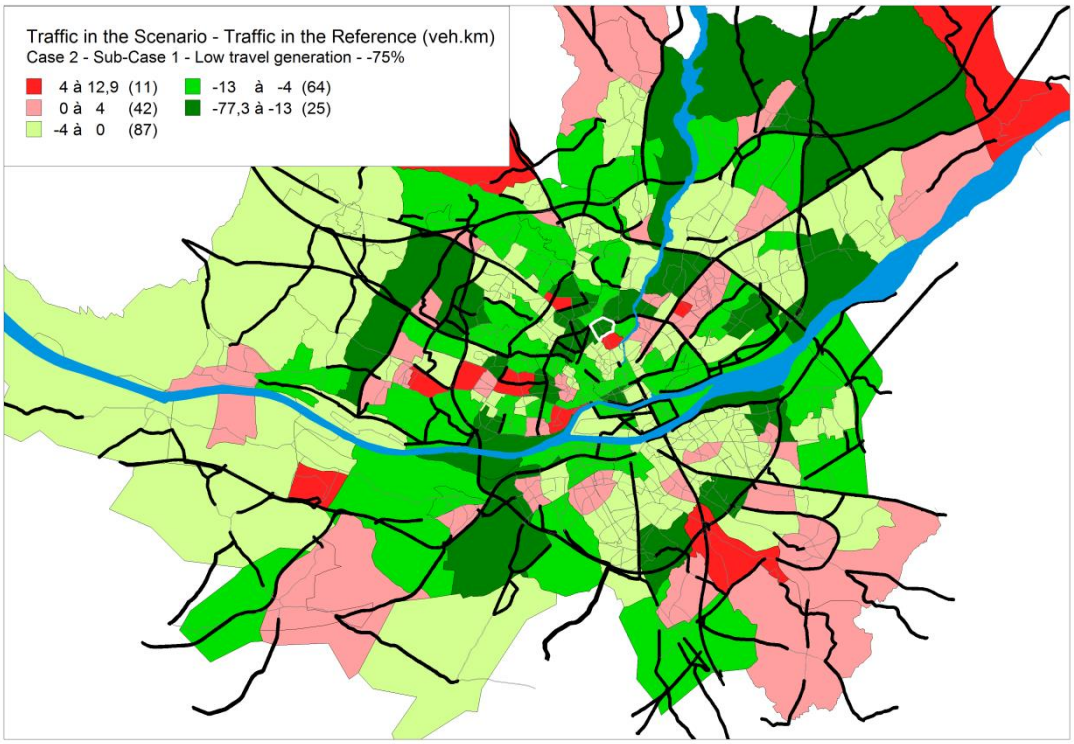
Figure 46 Spatial distributions of the Case 2 – Sub-Case 1 – Low travel generation - Demand Scenario impacts (difference of CO_2 emissions per zone) for a local variation of – 75% and +75% of the number of trips (Stimulus 1)

The following map (Figure 47) represents the destination distribution of the trips starting from the disrupted zone (pink). The deleted or added trips go mainly towards the West of the conurbation and towards the « Ile de Nantes » area. This observation is quite coherent with the observations on the CO_2 emissions variations. However, the zones which are situated on the East are not principal zones of destination of the disrupted zone while in the simulation of the decrease of the number of trips, the main decrease of CO_2 emission are observed in these zones.

The impacted zones are mainly located around the disrupted zone and also scattered on the out of the ring roads zones.

Figure 47 Spatial distribution of the destination zones for the modified trips - Case 2 – Sub-Case 1 – Low travel generation (Stimulus 1)

Lastly, we analyze the localization of the traffic variation on the (Figure 48). These traffic localizations seem to be coherent with the localization of the CO_2 emission variation. Indeed, most of the impacted zones are the same for the two indicators.



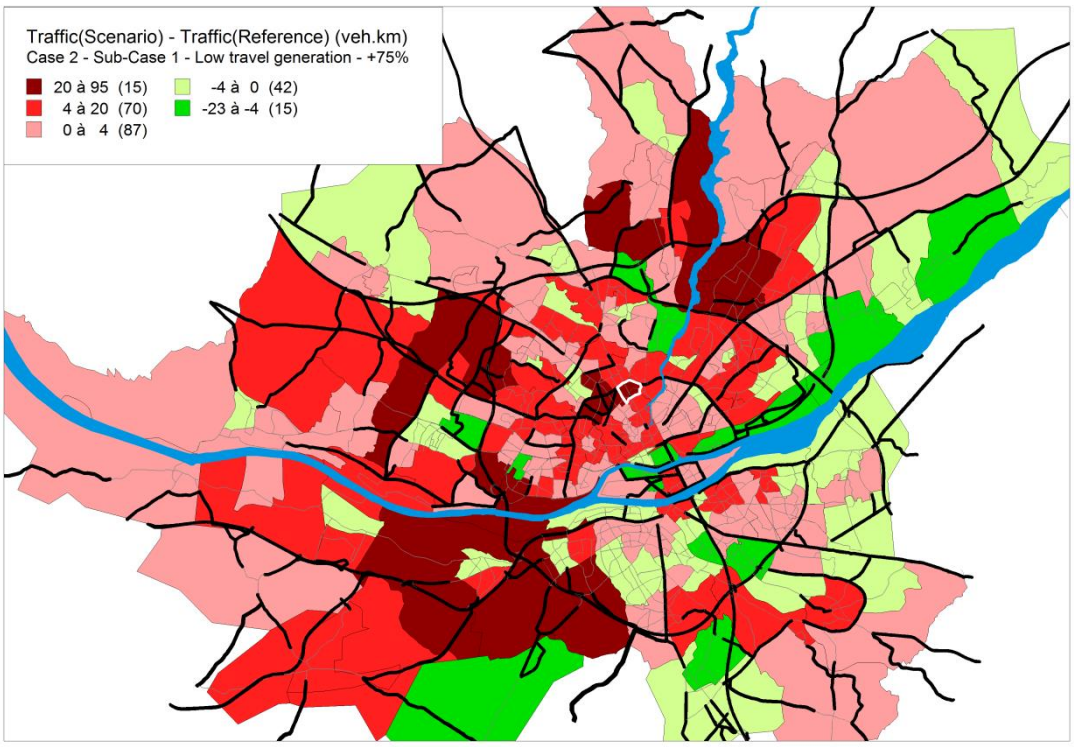


Figure 48 Spatial distribution of the traffic (difference of traffic in veh.km in relation to the reference scenario) of the Case 2 – Sub-Case 1 – Low travel generation - Demand Scenario impacts for a local variation of -75% and +75% of the number of trips (Stimulus 1)

1.5.6.2.2. Sub-Case 1: City Centre: High travel generation

In the simulation, the number of trips starting from the disrupted zone is modified of maximum 210 trips on a surface area of 0.34 km².

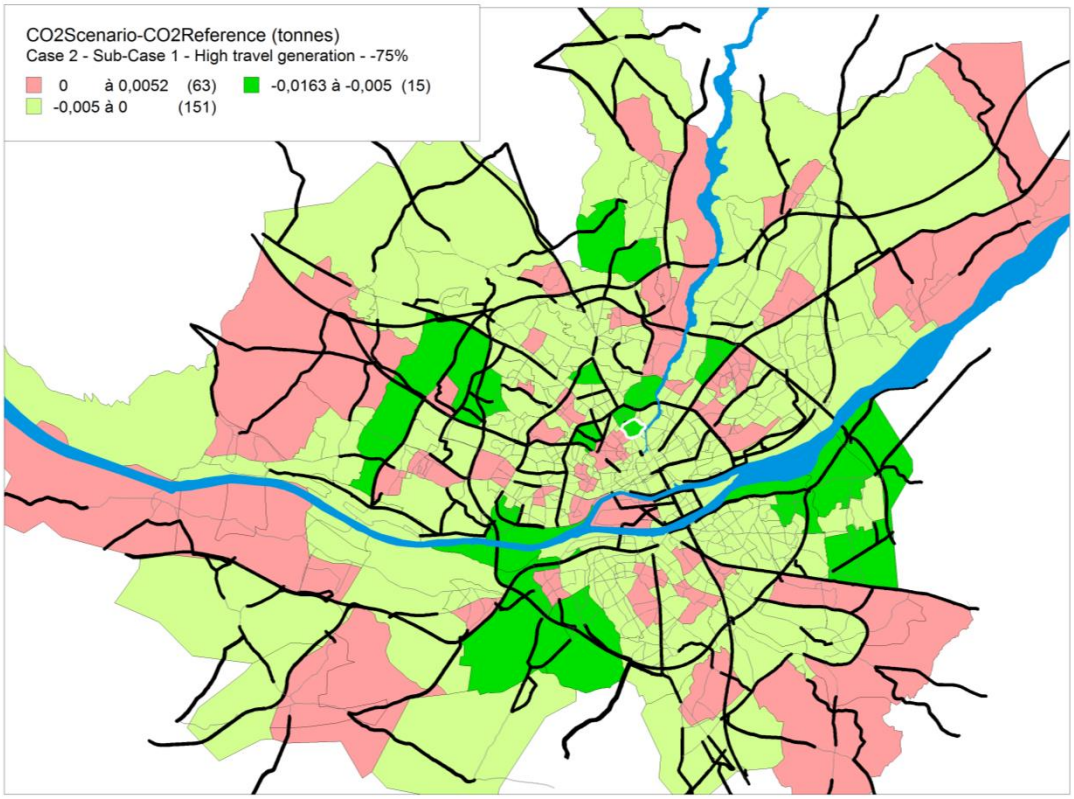
The impacted surface areas are slightly higher in relation to a disrupted zone with a lower density of travel generation (Tableau 49). The moderately zones are mainly located around the disrupted zone and scattered on the ring roads zones (Figure 49). Most of the moderately impacted zones are the main destination zone of the disrupted zone.

	Trips Variation
+ or -25%	70.2
+ or -50%	140.3
+ or -75%	210.5

Tableau 48 Variation of the number of trips Demand Scenario – Case 2 – Sub-Case 1 – High travel generation (Stimulus 1)

	Surface area (km²)	
	-75%	+75%
Strongly impacted	0	0
Moderately	53.1	47.5
Slightly	304	336.3
Inversely	177.7	150.9

Tableau 49 Surface area of the impacted zones for the Case 2 – Sub-Case 1 – High travel generation (Stimulus 1)



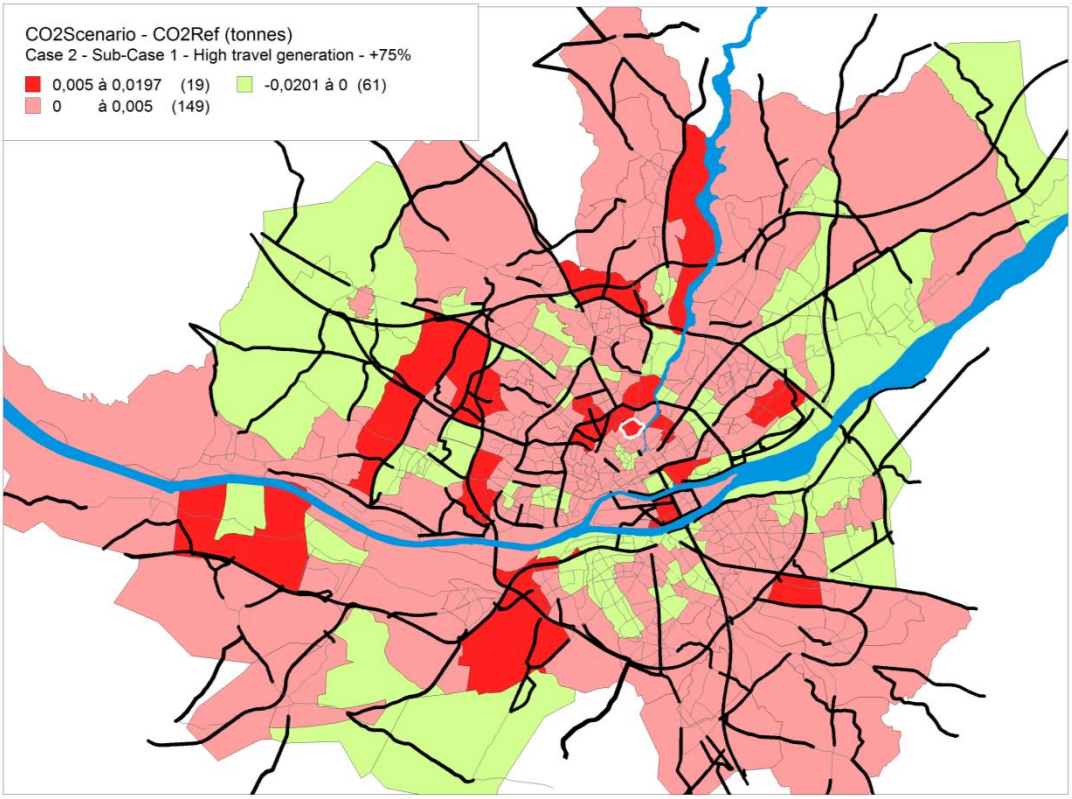


Figure 49 Spatial distributions of the Case 2 – Sub-Case 1 – High travel generation - Demand Scenario impacts (difference of CO_2 emissions per zone) for a local variation of – 75% and +75% of the number of trips (Stimulus 1)

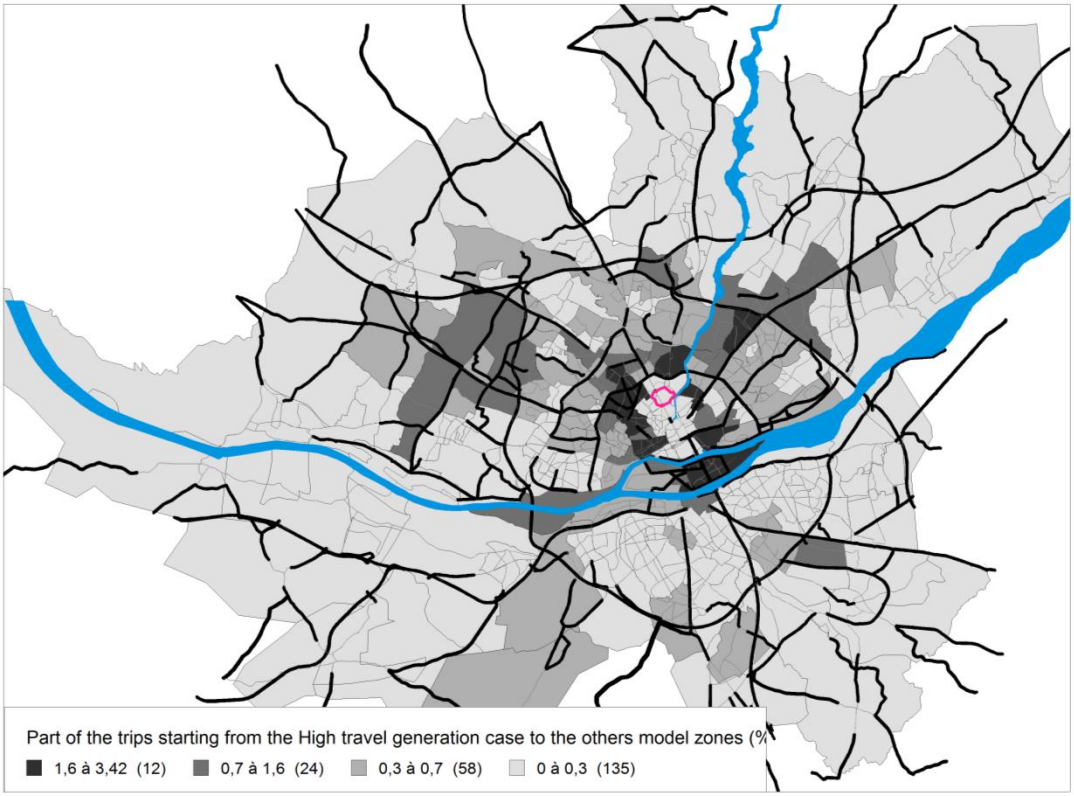


Figure 50 Spatial distribution of the destination zones for the modified trips - Case 2 – Sub-Case 1 – High travel generation (Stimulus 1)

1.5.6.2.3. Sub-Case 2: Surface Area

Low travel generation – 1st area

In this scenario, the same variation of the number of trips than the Case 2 (Sub-Case 1 - Low travel generation) is applied. However, these trips are shared on the OD with an origin located in the 1st area. The surface of the disrupted zone is 2.9 km² and the density of travel generation is 604.8 trips per km².

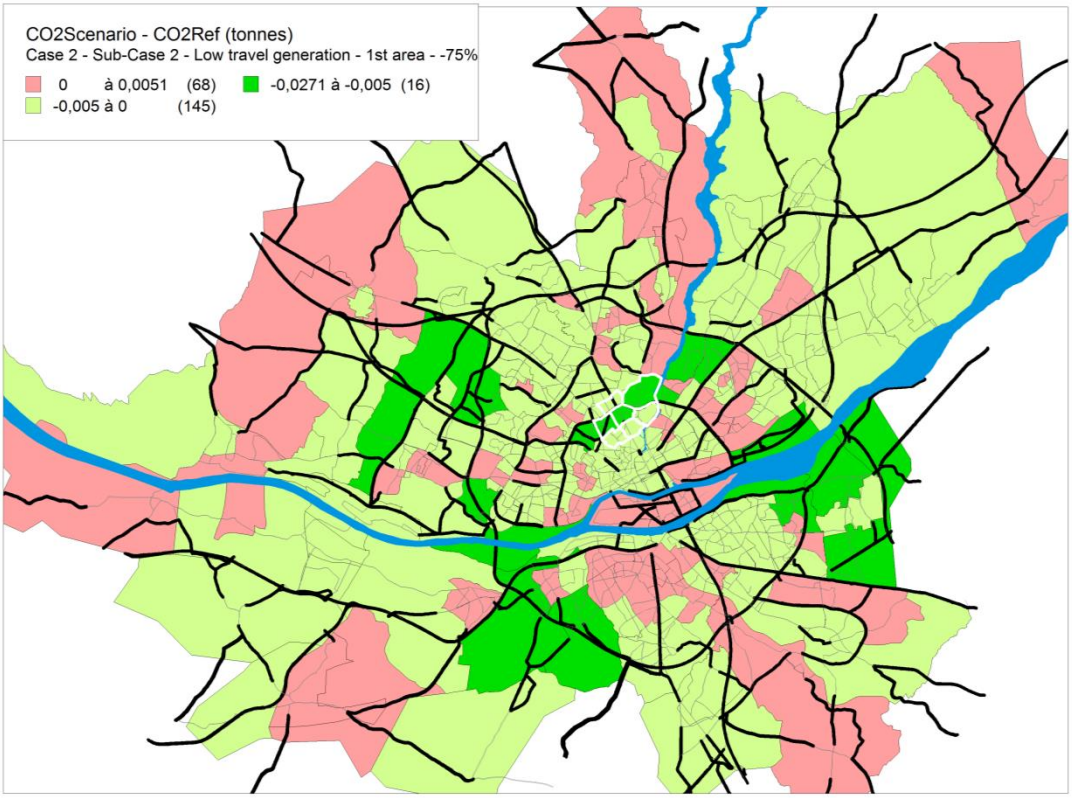
For the simulation of trips increase, the surface area of the moderately impacted zone (46.7 km²) increases compared with the surface area of the same impacted zone in the Case 2 – SubCase 1 – Low travel generation (45.6) (Tableau 50). That can be explained by the fact that the mean length of the trips between the origin and the destination zones are higher in that case than in the previous case.

	Surface area (km²)	
	-75%	+75%
Strongly impacted	0	0
Moderately	53.1	46.7
Slightly	300.9	320
Inversely	180.8	168

Tableau 50 Surface area of the impacted zones for the Case 2 – Sub-Case 2 – Low travel generation – 1st area (Stimulus 1)

In this Sub-Case, the moderately impacted zones are mainly located on the ring roads on the East of the conurbation (Figure 51). The zones which are situated around the disrupted zone are less

impacted. The impacted zones correspond to the main destination zones in the ring roads zones but they do not correspond to the main destination zones in the city center zones (Figure 52).



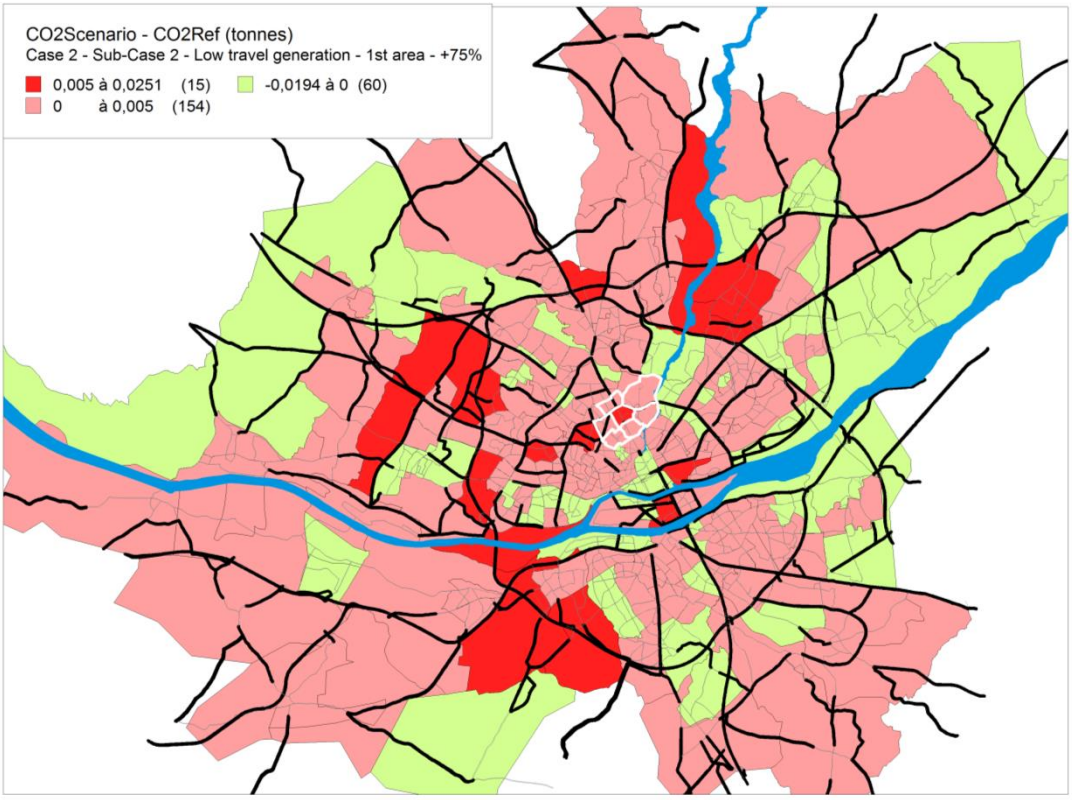


Figure 51 Spatial distributions of the Case 2 – Sub-Case 2 – Low travel generation – 1st area- Demand Scenario impacts (difference of CO2 emissions per zone) for a local variation of – 75% and +75% of the number of trips (Stimulus 1)

Figure 52 Spatial distribution of the destination zones for the modified trips - Case 2 – Sub-Case 1 – Low travel generation – 1st area (Stimulus 1)

Low travel generation – 2nd area

The same modified number of trips is applied on a more important number of OD. We compare the impacted surface area with those the lower disrupted zone scenari (Case 2 –SubCase 1-Low travel generation and Case 2-SubCase 2 –Low travel generation 1st area). In this case, the disrupted surface area is of 7 km². We observe an increase of the moderately impacted surface area because the trips are more spatially distributed on the territory. The more important emission impact is lower for an increase of the number of trips, in this case (+0.0163 for the CO2).

	Surface area (km²)	
	-75%	+75%
Strongly impacted	0	0
Moderately	22.8	52.6
Slightly	308.7	325.9
Inversely	203.2	156.3

Tableau 51 Surface area of the impacted zones for the Case 2 – Sub-Case 2 – Low travel generation – 2nd area (Stimulus 1)

In this Sub-Case, the impacted zones mainly correspond to the main destination zones, in the South of the conurbation (Figure 54). In the North of the conurbation, the main impacted zones are situated on the ring roads and on the zones for which the rate of main network is high. The zones which are situated around and in the disrupted zone are less impacted (Figure 53).

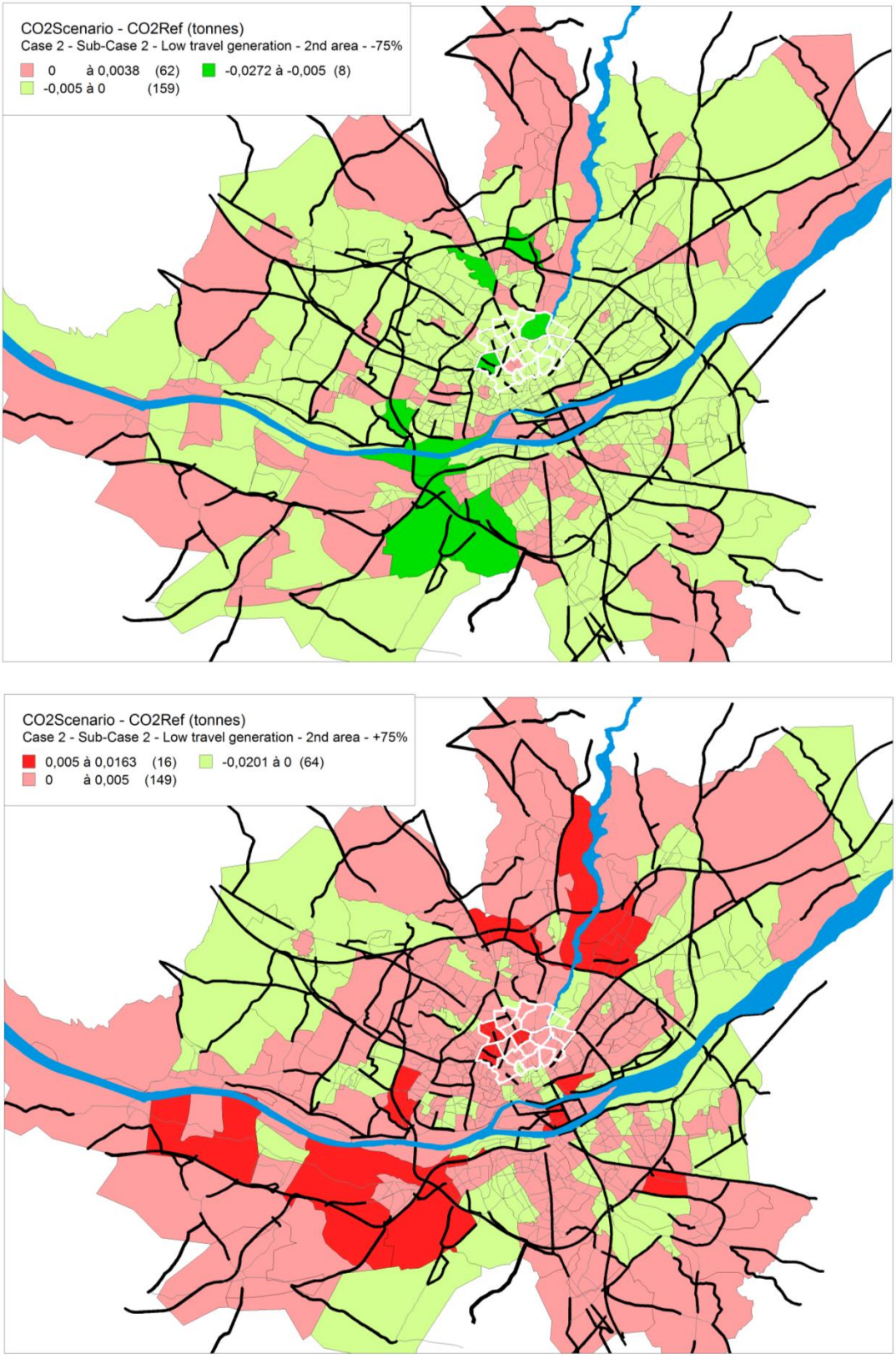


Figure 53 Spatial distributions of the Case 2 – Sub-Case 2 – Low travel generation – 2nd area- Demand Scenario impacts (difference of CO2 emissions per zone) for a local variation of – 75% and +75% of the number of trips (Stimulus 1)

Figure 54 Spatial distribution of the destination zones for the modified trips - Case 2 – Sub-Case 1 – Low travel generation – 2nd area (Stimulus 1)

High travel generation – 1st area

The impacted surface area is higher in this subcase than in the SubCase 1- High travel generation for which the disrupted surface is lower. That can be due to a larger distribution of the added trips on the territory.

In comparison with the Sub-Case 1, the mean length of the trips is lower. The most important CO_2 emission impact is 0.0584 tonnes, what is more than in the Sub-Case 1. We assume that the speed is modified on some links, maybe due to the low itineraries alternatives. This assumption could justify a higher emission impact for a higher disrupted zone.

	Surface area (km²)	
	-75%	+75%
Strongly impacted	16.1	25.3
Moderately	135.4	153.6
Slightly	249.1	204
Inversely	134.2	151.9

Tableau 52 Surface area of the impacted zones for the Case 2 – Sub-Case 2 – High travel generation – 1st area (Stimulus 1)

The impacted zones are mainly situated in the destination zones of the added trips and on the central zones. However, the impacted zones are dispersed on the entire conurbation.

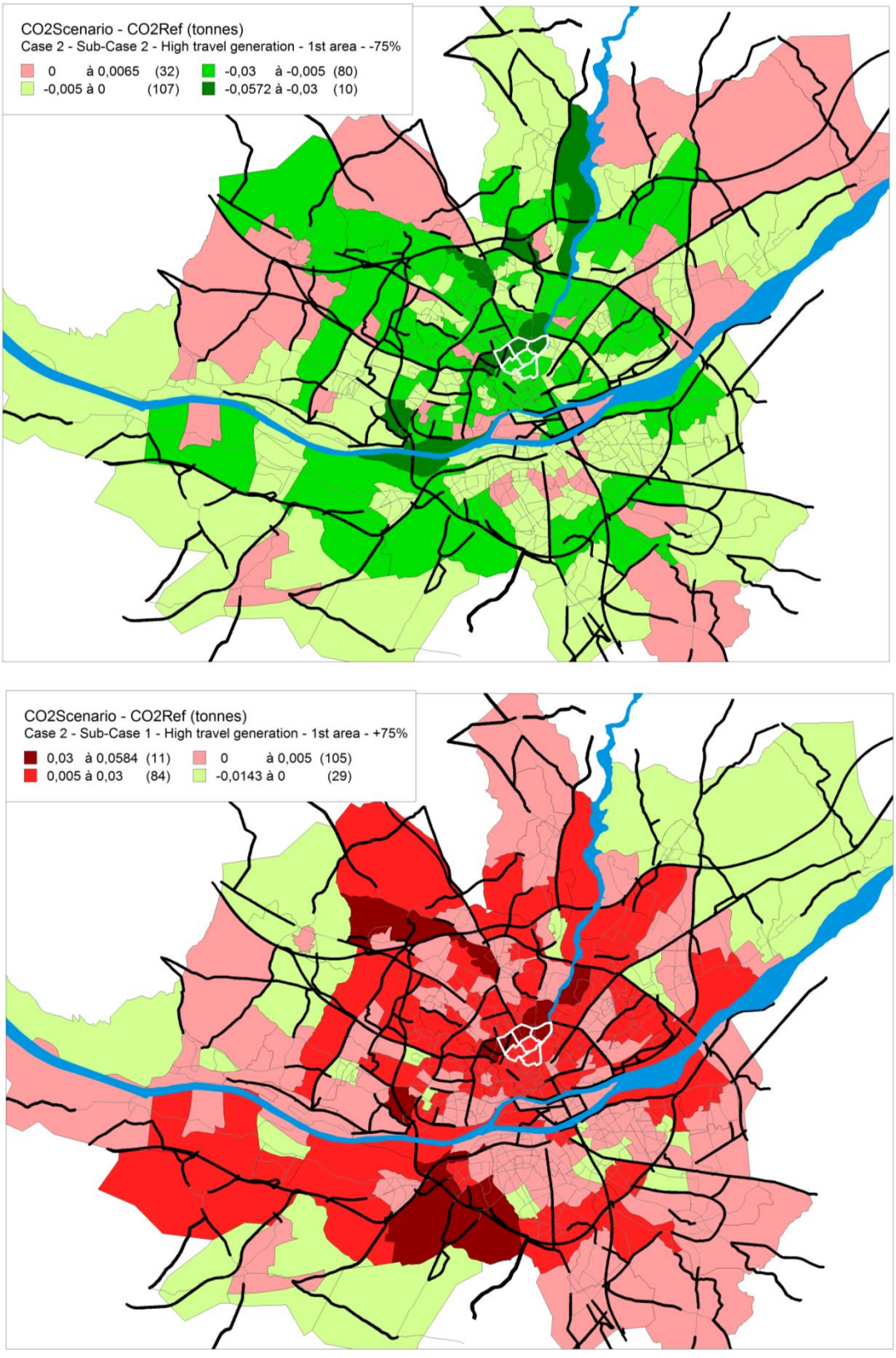


Figure 55 Spatial distributions of the Case 2 – Sub-Case 2 – High travel generation – 1st area- Demand Scenario impacts (difference of CO2 emissions per zone) for a local variation of – 75% and +75% of the number of trips (Stimulus 1)

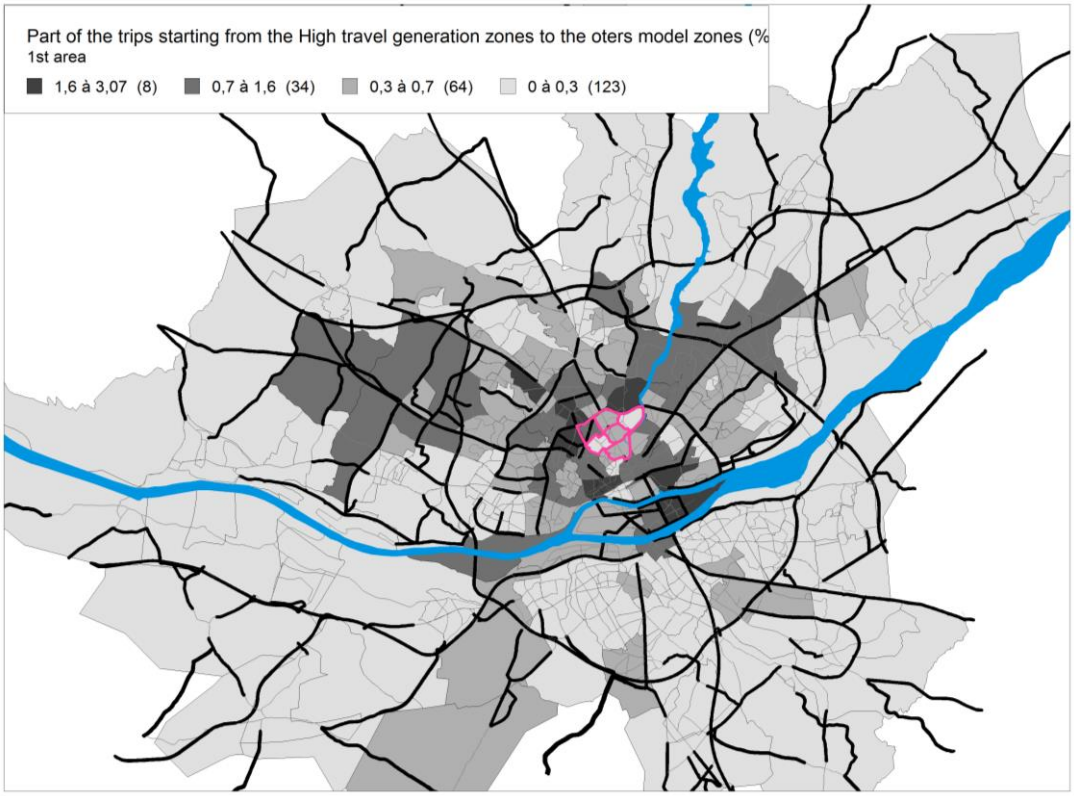


Figure 56 Spatial distribution of the destination zones for the modified trips - Case 2 – Sub-Case 2 – High travel generation – 1st area (Stimulus 1)

High travel generation – 2nd area

In comparison with the previous case, the impacted surface area is lower but in comparison with the Case 2 –SubCase 1 – High travel generation for which only one origin zone is disrupted, the impacted surface area is higher.

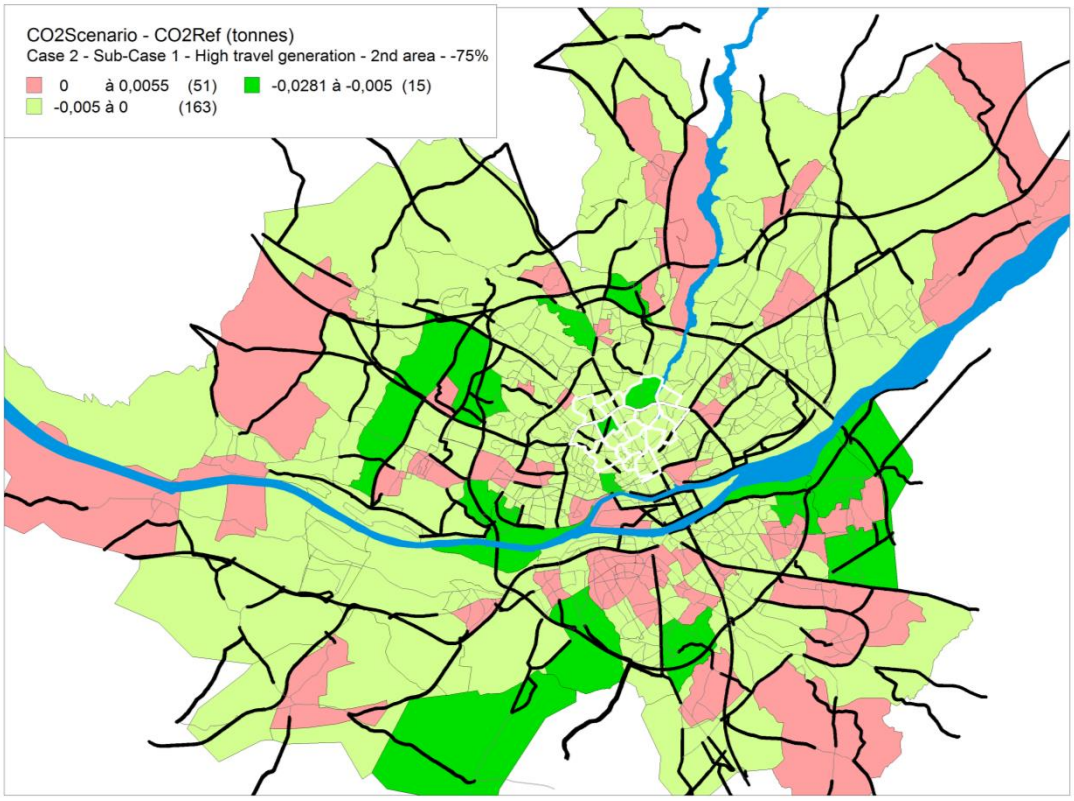
The maximal variation of CO2 emission is lower in this case (0.0169 tonnes) than in the Sub-Case 1 (0.0197).

The distribution of the added trips on a higher number of OD can explain this observation.

	Surface area (km²)	
	-75%	+75%
Strongly impacted	0	0
Moderately	62.7	57.8
Slightly	329.6	315.6
Inversely	142.5	161.4

Tableau 53 Surface area of the impacted zones for the Case 2 – Sub-Case 2 – High travel generation – 2nd area (Stimulus 1)

The impacted zones are mainly located in the out of ring roads zones. They also seem to be situated on the zone for which the main network is important.



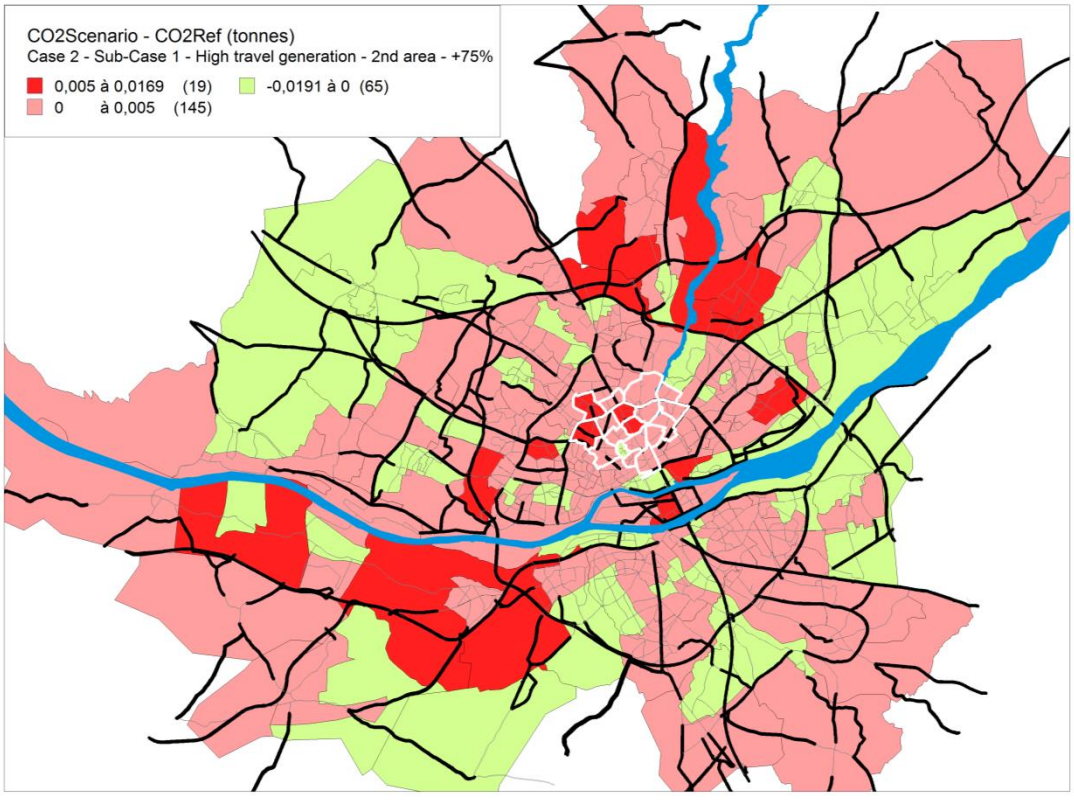


Figure 57 Spatial distributions of the Case 2 – Sub-Case 2 – High travel generation – 2nd area- Demand Scenario impacts (difference of CO2 emissions per zone) for a local variation of – 75% and +75% of the number of trips (Stimulus 1)

Figure 58 Spatial distribution of the destination zones of the modified trips – Case 2 – Sub-Case 2 – High travel generation – 2nd area (Stimulus 1)

To conclude, in the case of a high travel generation zone, the maximal emission impact per zone is lower than in the case of a low travel generation zone (while the number of the modified trips is higher). But this maximal impact tends to be similar when the surface area of the disrupted zone increases.

The impact surface area is quite similar in the case of a high travel generation zone in comparison with a low travel generation zone for the variation of the number of trips coming from only one zone.

When the surface area of the disrupted zone increases, and thus, that the number of added OD increases, we observe a decrease of the impacted zone in the case of a low travel generation zone and we observe an increase of the impacted zone for a high travel generation zone. But this difference is probably not due to the characteristics of the initiated zone. This difference is maybe due to the localization of the destinations of the trips. This assumption is in accordance with the fact that the mean length of the new trips is higher in the case of a high travel generation zone.

1.5.6.2.4. Sub-Case 3 : Outskirt Areas

In this scenario, the variation of the number of trips, which is represented in the following maps, is 2478 trips (Tableau 54).

For an increase of the number of trips, we notice that the highest increases of CO2 emissions are mainly localized on the outskirt areas and especially in the disrupted area in the North East of the

conurbation. They are also situated in the zone which contain the network allowing to access to the center of the conurbation.

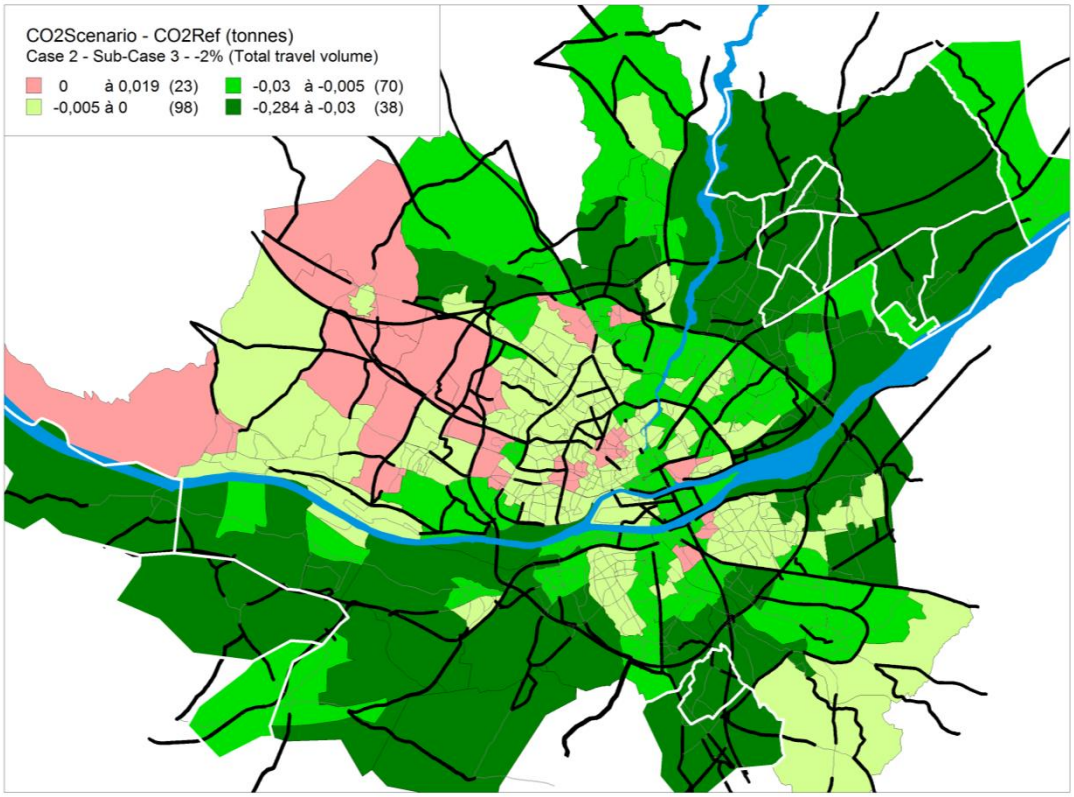
	Trips Variation
+ or -1%	1 239
+ or -2%	2478
+ or -5%	6 196
+ or -10%	12 392

Tableau 54 Variation of the number of trips –Case 2 – Sub-Case 3 (Stimulus 1)

The surface area of the impacted zones is quite high (Tableau 55) in comparison with the previous scenario but we do consider that the variation of the number of trips is at least 10 times higher.

	Surface area (km²)	
	-2%	+2%
Strongly impacted	247.9	233.7
Moderately	123.3	151.9
Slightly	101.1	88.6
Inversely	62.5	60.5

Tableau 55 Surface area of the impacted zones for the Case 2 – Sub-Case 3 (Stimulus 1)



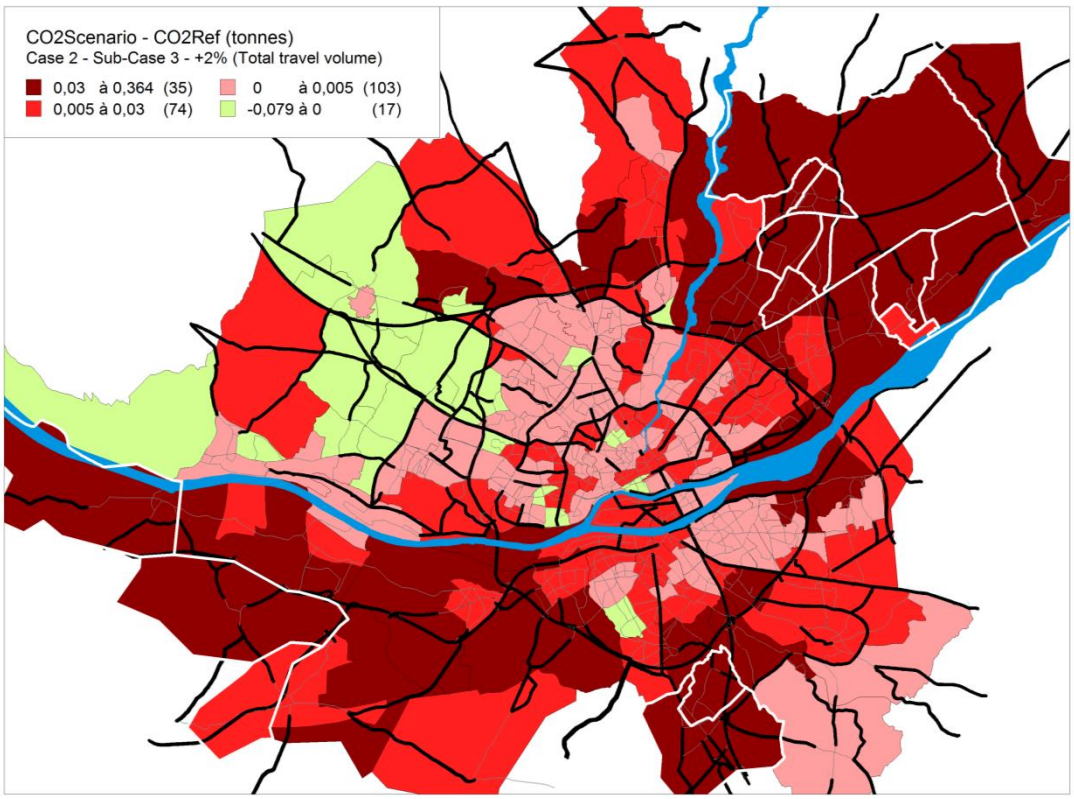


Figure 59 Spatial distributions of the Case 2 – Sub-Case 3 - Demand Scenario impacts (difference of CO_2 emissions per zone) for a variation of -2% and +2% of the total number of trips (Stimulus 1)

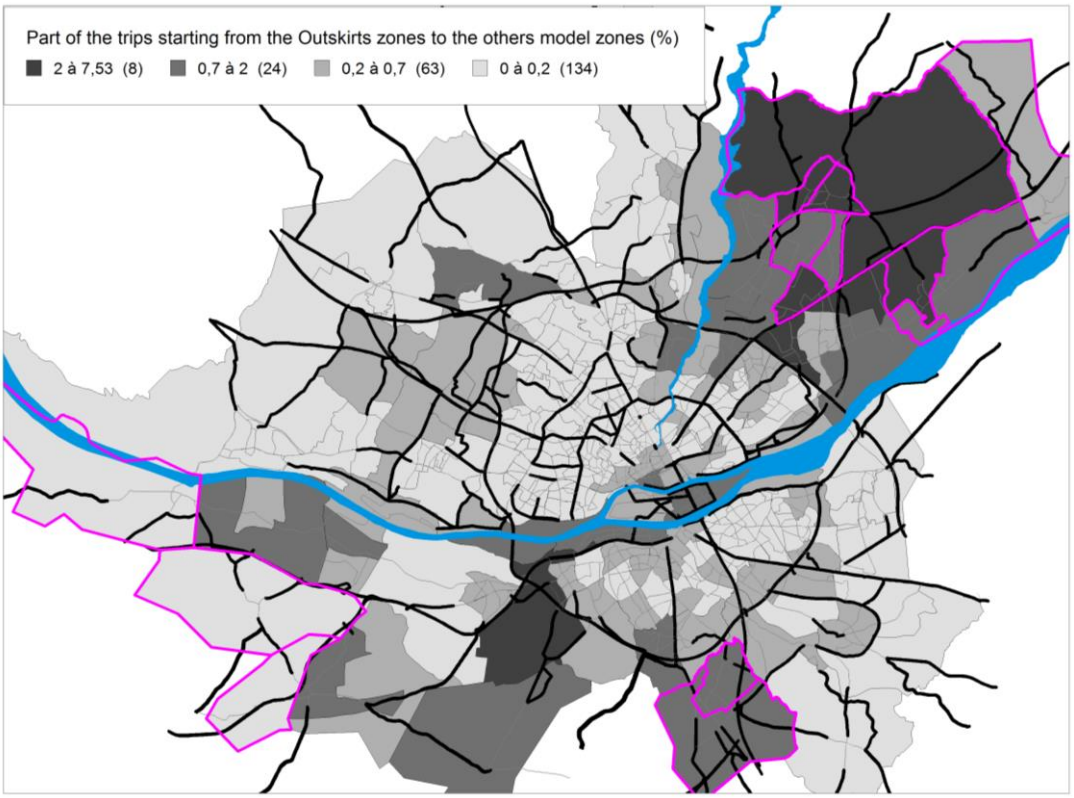


Figure 60 Spatial distribution of the destination zones for the modified trips – Case 2 – Sub-Case 3 (Stimulus 1)

1.5.6.2.5. Specific Sub-Case: Ile de Nantes Area

In this scenario, the Emissions Impact is represented on the maps (Figure 61) for a variation of 1239 trips (Tableau 56).

	Trips Variation
+ or -1%	1 239
+ or -2%	2478
+ or -5%	6 196
+ or -10%	12 392

Tableau 56 Variation of the number of trips –Demand Scenario – Case 2 – Specific Sub-Case (Stimulus 1)

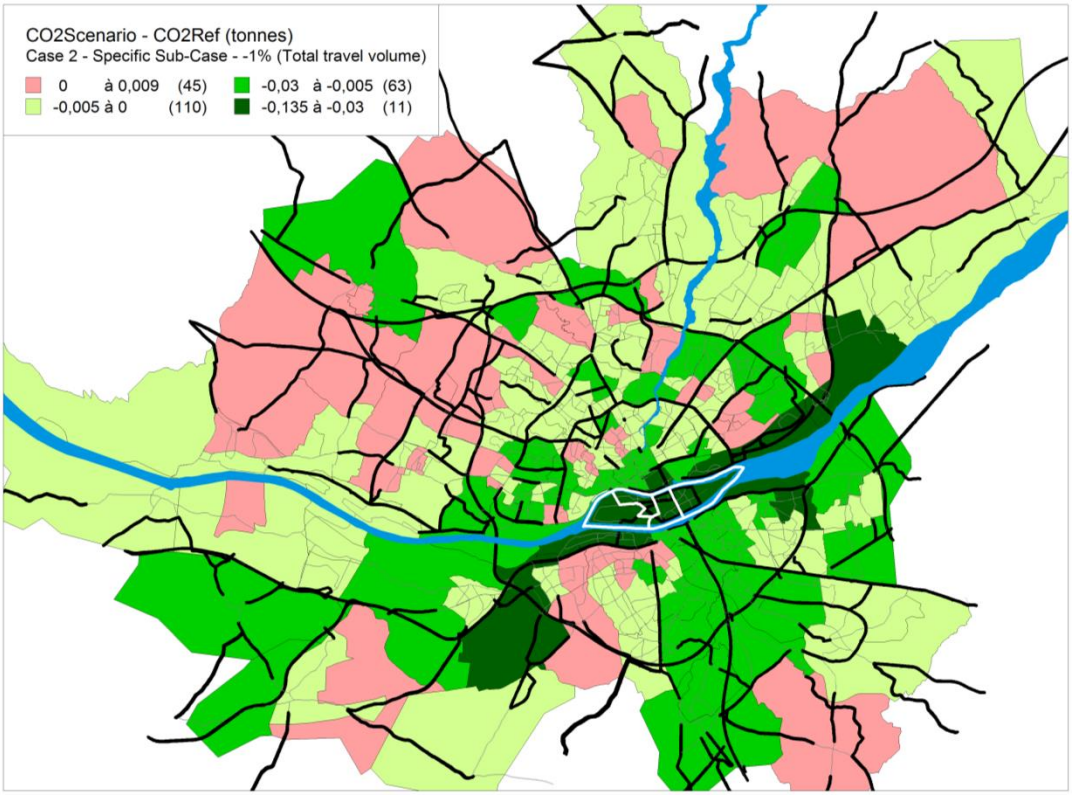
The impacted surface area is quite low as regard to the Outskirt Sub Case (Case 2 – Sub-Case 3) but the number of modified trips is two times less high.

	Surface area (km²)	
	-1%	+1%
Strongly impacted	29.7	36.5
Moderately	130.2	146
Slightly	236.3	261.5
Inversely	138.6	90.7

Tableau 57 Surface area of the impacted zones for the Case 2 – Specific Sub-Case (Stimulus 1)

The maximal variation of CO2 emission for a zone is 0.139 tonnes for a variation of the number of trips of + 1239. This is quite high in comparison to the others cases because the choice of itineraries in order to go outside the “Ile de Nantes” is limited by the number of bridges.

The impacted zones are mainly situated on the “Ile de Nantes” area and in the zones of destination of the added trips.



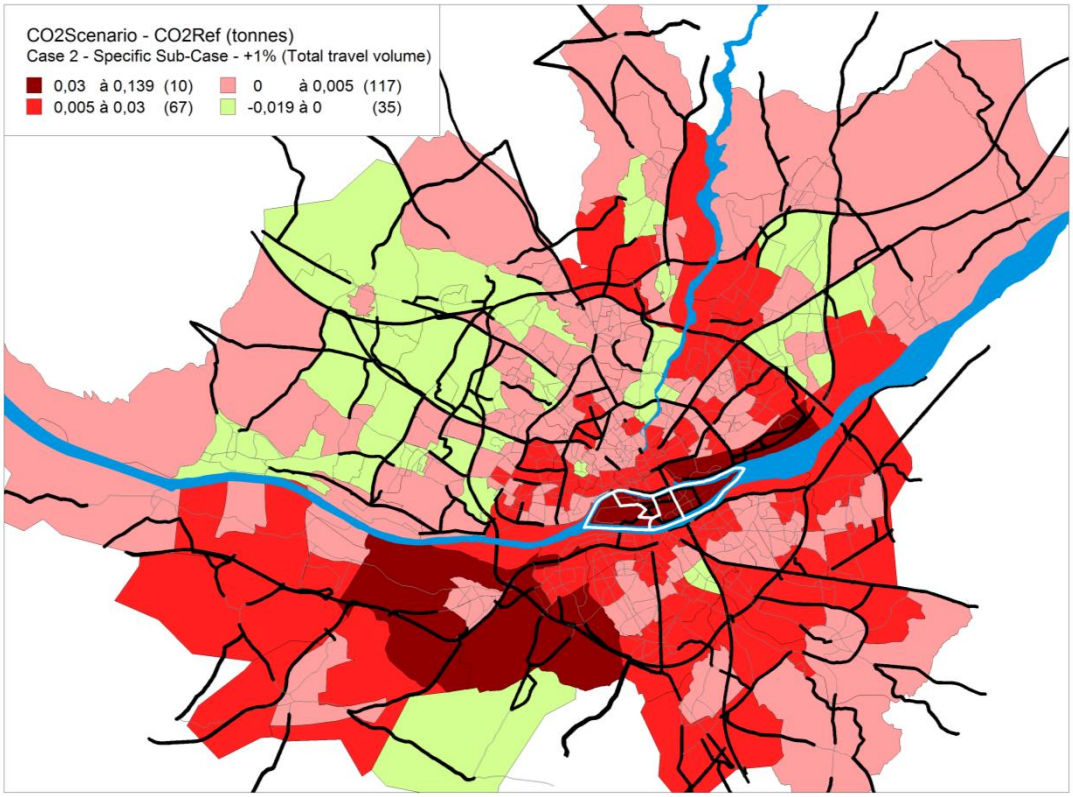


Figure 61 Spatial distributions of the Case 2 – Specific Sub-Case - Demand Scenario impacts (difference of CO2 emissions per zone) for a variation of -1% and +1% of the total number of trips (Stimulus 1)

Figure 62 Spatial distribution of the destination zones for the modified trips – Case 2 – specific Sub-Case (Stimulus 1)

1.5.6.3. Case 3: Variation in the attraction

1.5.6.3.1. Sub-Case: City Center

In this Sub-Case, the maximal variation of the number of trips is 265 trips (Tableau 58). The maximal observed CO2 emission variation is 0.029 tonnes, which is quite low.

	Trips Variation
+ or -25%	88
+ or -50%	177
+ or -75%	265

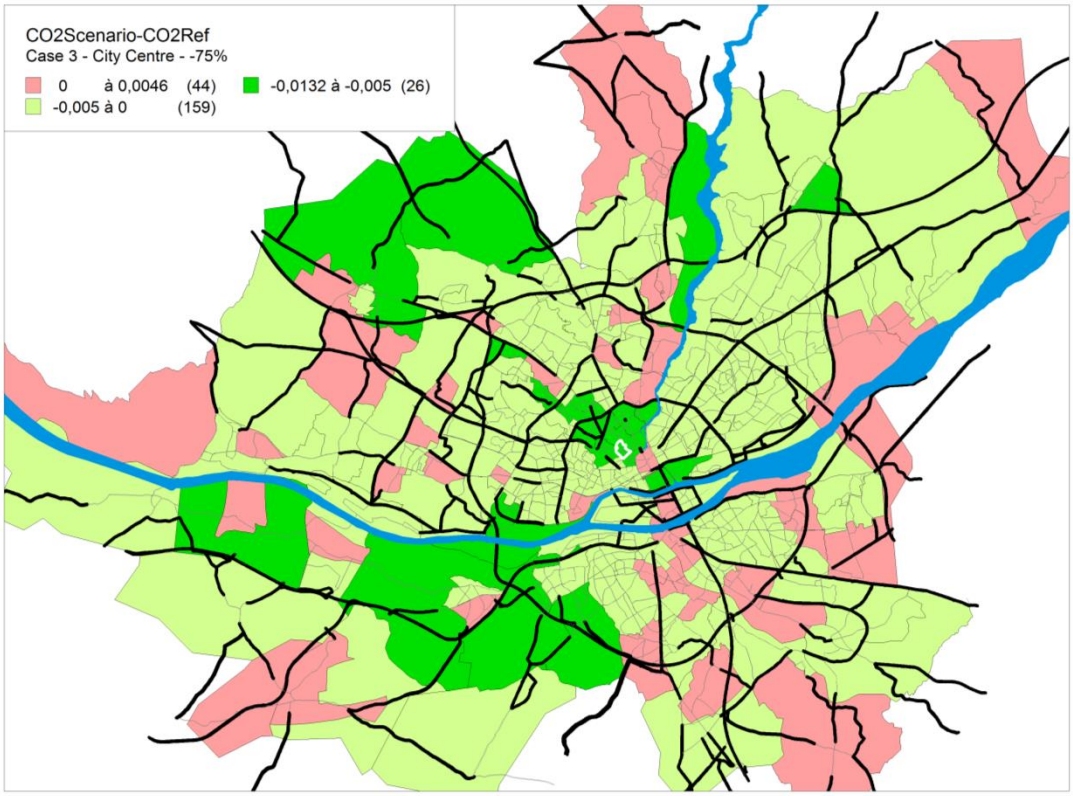
Tableau 58 Variation of the number of trips – Case 3 – Sub-Case City Center (Stimulus 1)

	Surface area (km²)	
	-75%	+75%
Strongly impacted	0	0
Moderately	85.5	109.4
Slightly	314.5	239.6
Inversely	134.7	185.8

Tableau 59 Surface area of the impacted zones for the Case 3 – Sub-Case City Center (Stimulus 1)

The impacted zones are dispersed on the entire conurbation. We observe a concentration of the affected zones in the city center, around the disrupted zone. This can be explained because the traffic induced by the trips is concentrated around their same zone of destination. This is not the case for a modification of the trips coming from a single zone and to the destination of several destinations.

The origin zones of the modified trips are located on the zone situated between the ring roads and the boulevard surrounding the city center. These zones are not the main impacted zones.



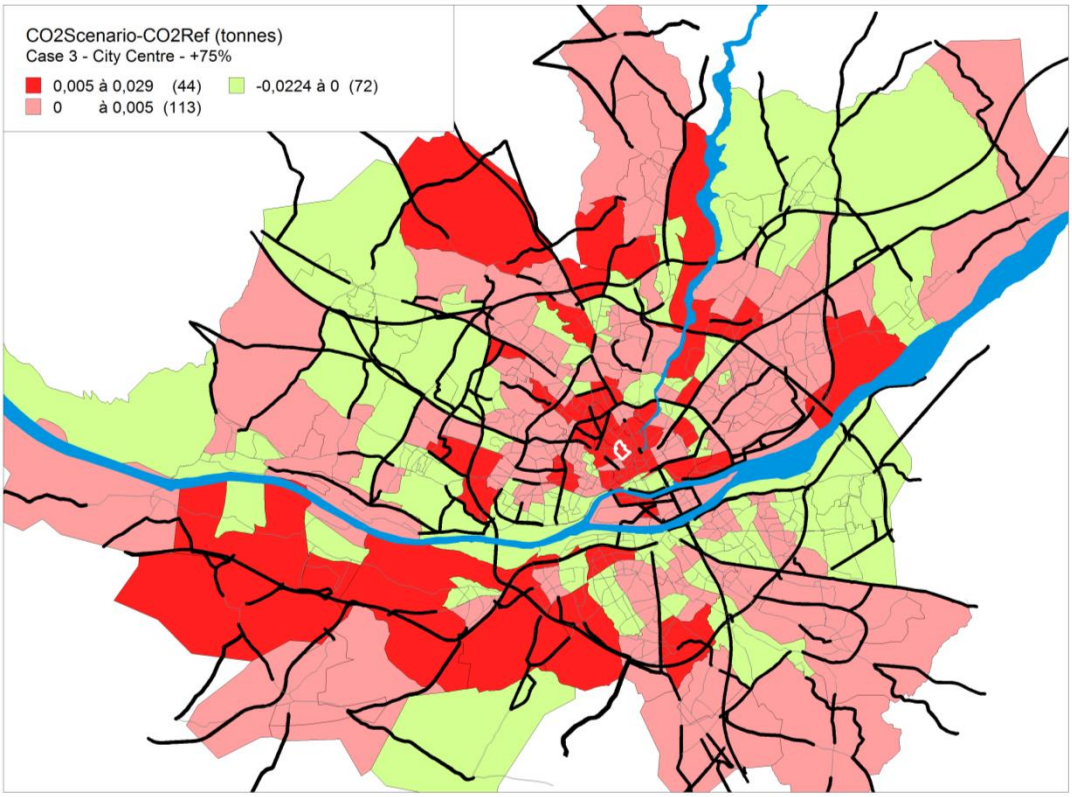


Figure 63 Spatial distributions of the Case 3 – City Centre – Demand Scenario impacts (difference of CO2 emissions per zone) for a local variation of – 75% and +75% of the number of trips (Stimulus 1)

Figure 64 Spatial distribution of the origin zones for the modified trips – Case 3 – Sub-Case City Center (Stimulus 1)

1.5.6.3.2. Sub-Case: Suburban Site

In comparison with the previous case, the maximal CO_2 variation per zone is 0.254 tonnes, what is higher. This is mainly explained because the variation of the number of trips is seven times higher. But it is probably also explained because the mean length of the new trips id higher.

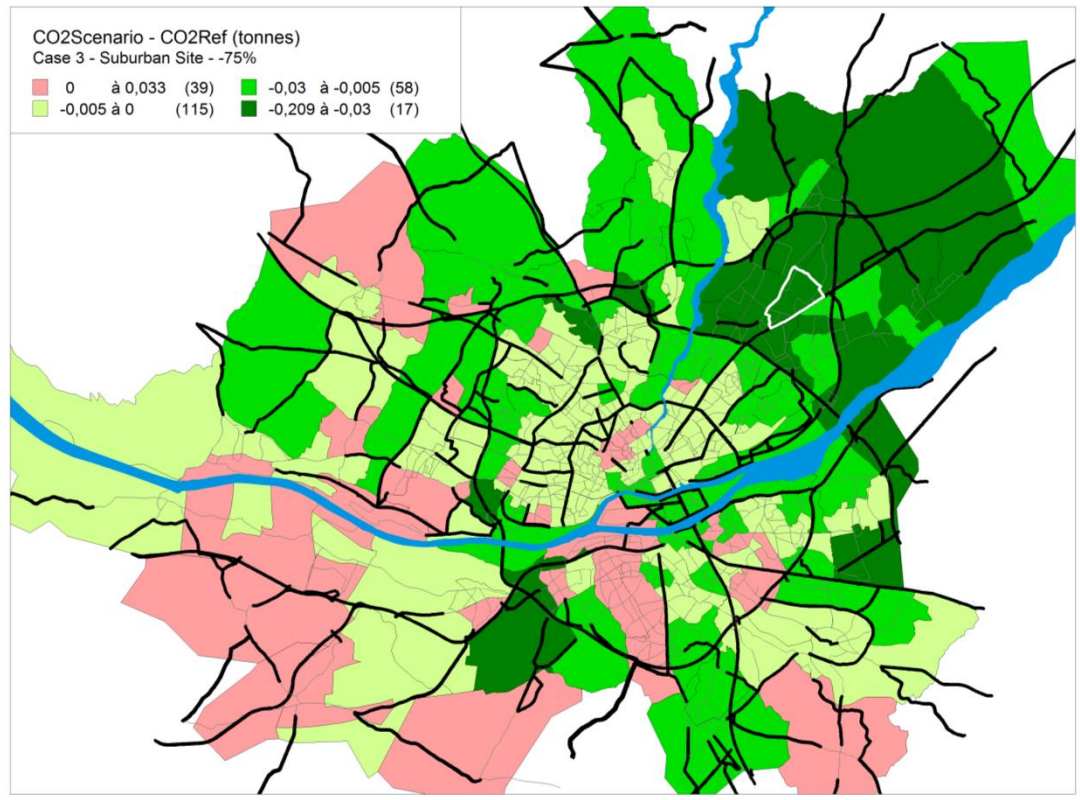
	Trips Variation
+ or -25%	490
+ or -50%	980
+ or -75%	1 470

Tableau 60 Variation of the number of trips – Case 3 – Sub-Case Suburban Site (Stimulus 1)

The impacted areas are mainly situated in the origin zone of the modified trips. As in the previous case, they are concentrated in and around the disrupted zone.

	Surface area (km²)	
	-75%	+75%
Strongly impacted	88.4	86.6
Moderately	163.7	167.6
Slightly	163.8	179.7
Inversely	118.8	100.9

Tableau 61 Surface area of the impacted zones for the Case 3 – Sub-Case Suburban Site (Stimulus 1)



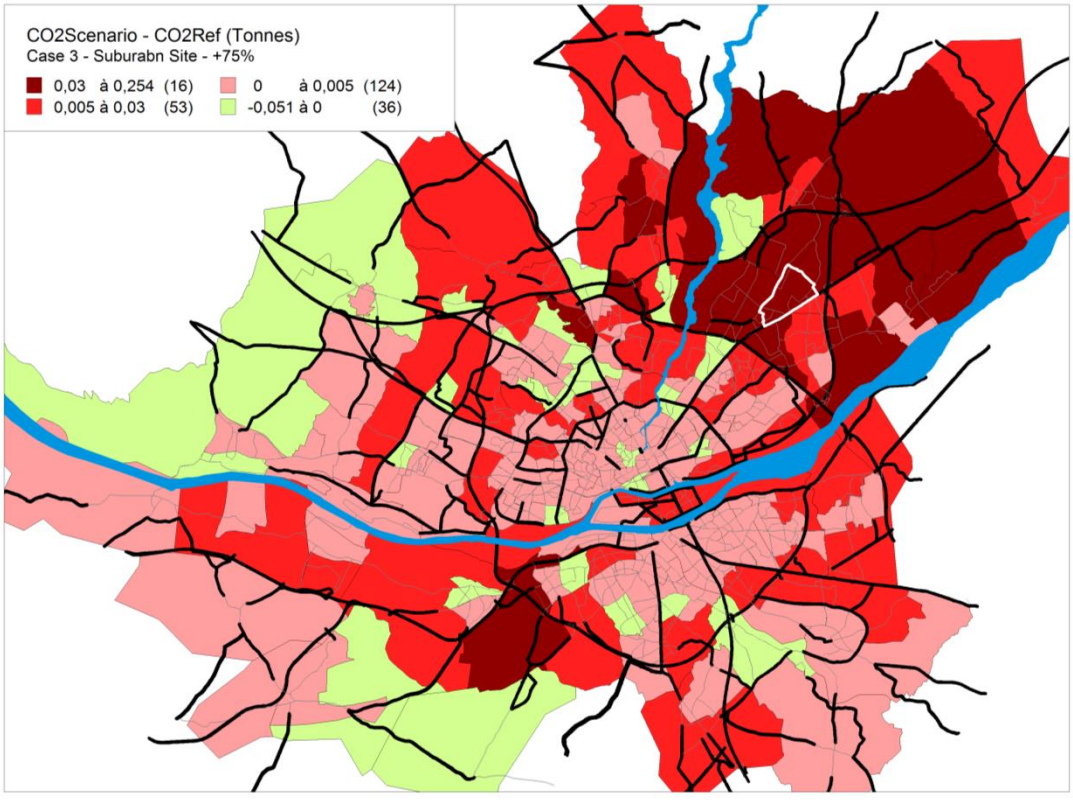


Figure 65 Spatial distributions of the Case 3 – Suburban Case – Demand Scenario impacts (difference of CO2 emissions per zone) for a local variation of – 75% and +75% of the number of trips (Stimulus 1)

Figure 66 Spatial distribution of the origin zones for the modified trips – Case 3 – Sub-Case Suburban Site (Stimulus 1)

1.5.6.4. Case 4: Local variation due to travel changes in other places (in the number of PC trips between an origin and a destination)

1.5.6.4.1. Sub Case 1: Variations in the number of PC trips between several origin and destination zones

In this Sub-Case, the variation of the number of trips is localized between some specific origin and destination zones. The maximum value of variation of the number of trips is low: 70 trips. The impacted surface area is also low.

The maximum CO2 emission variation for one zone is of 0.0215tonnes, what is quite important for a low variation of the number of trips and in comparison with the others scenari.

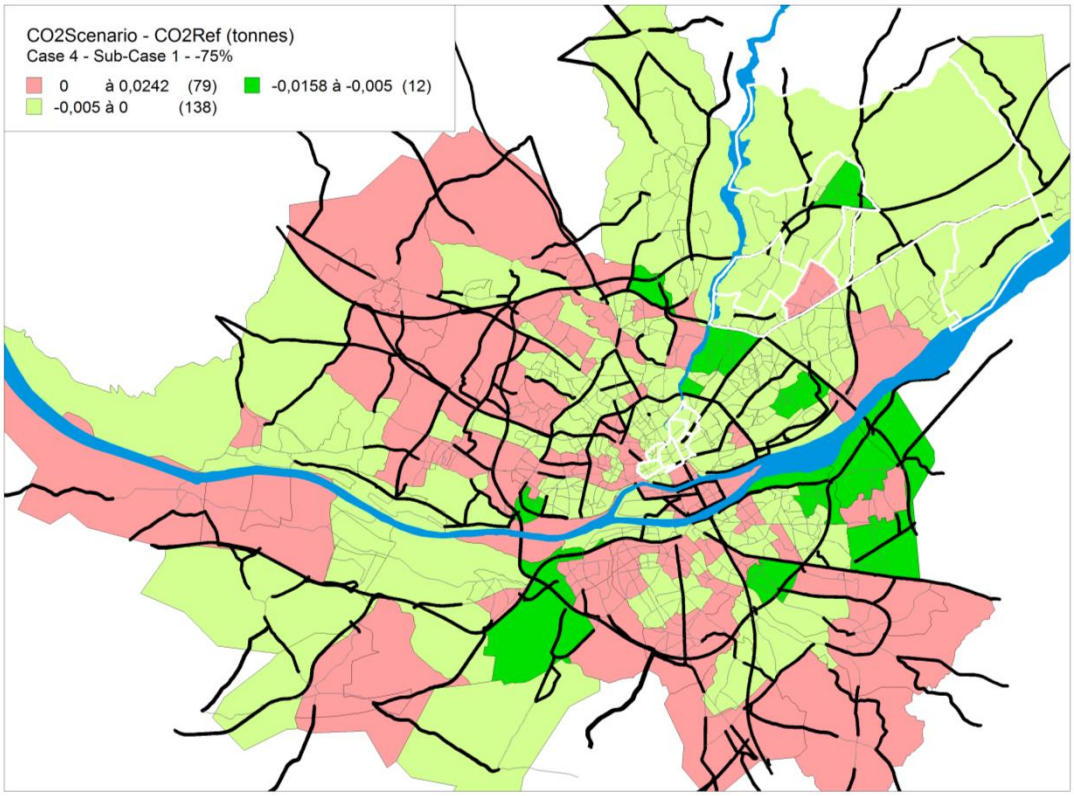
	Trips Variation
+ or -25%	23
+ or -50%	47
+ or -75%	70

Tableau 62 Variation of the number of trips – Case 4 – Sub-Case 1 (Stimulus 1)

The impacted zones are mainly situated between the origin and the destination zones. However, a zone which is situated on the South West of the conurbation is affected, what is quite inconsistent because it is too far to represent an alternative itinerary.

	Surface area (km²)	
	-75%	+75%
Strongly impacted	0	0
Moderately	34.2	20.6
Slightly	290	335.8
Inversely	210.5	178.3

Tableau 63 Surface area of the impacted zones for the Case 4 – Sub-Case 1 (Stimulus 1)



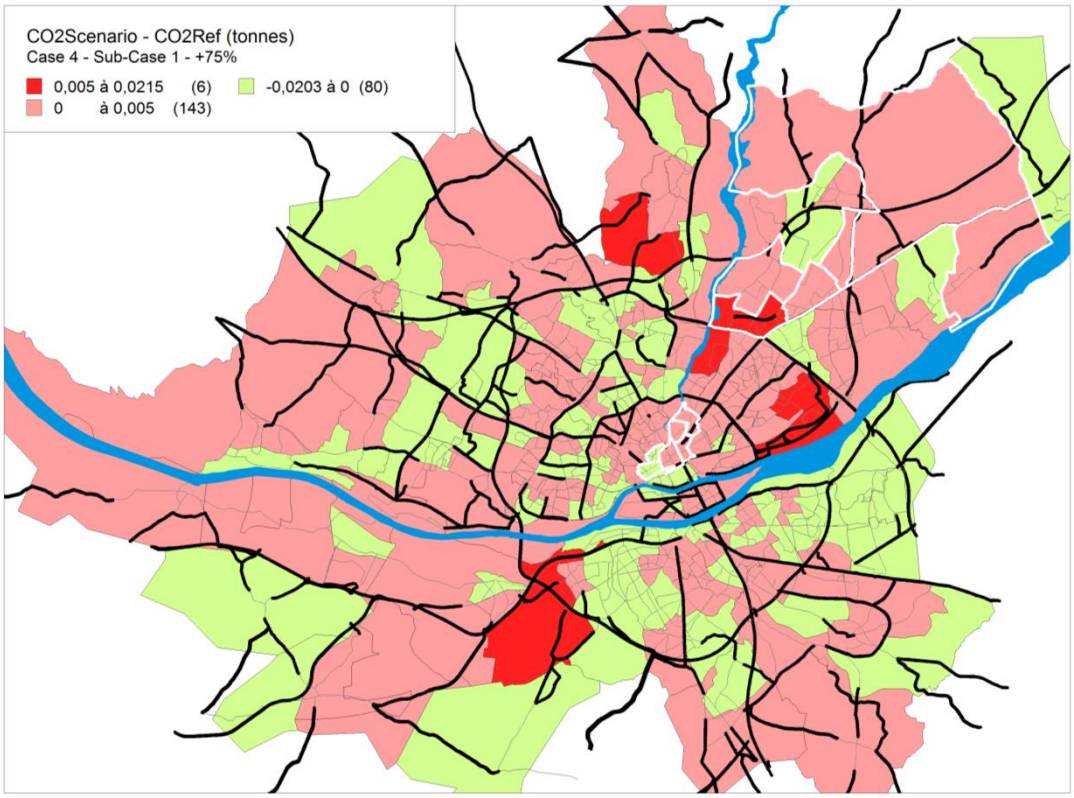


Figure 67 Spatial distributions of the Case 4 – Sub-Case 1 – Demand Scenario impacts (difference of CO2 emissions per zone) for a local variation of – 75% and +75% of the number of trips (Stimulus 1)

1.5.6.4.2. Sub Case 2: Variations in the number of PC trips which explain 80% of the traffic of the selected link

In this Sub-Case, the maximal studied variation of the number of trips is high: 533 trips. The maximum variation of CO2 emission per zone is 0.0584 tonnes, what is low as regard the high number of modified trips. The added trips are probably more dispersed on the entire conurbation.

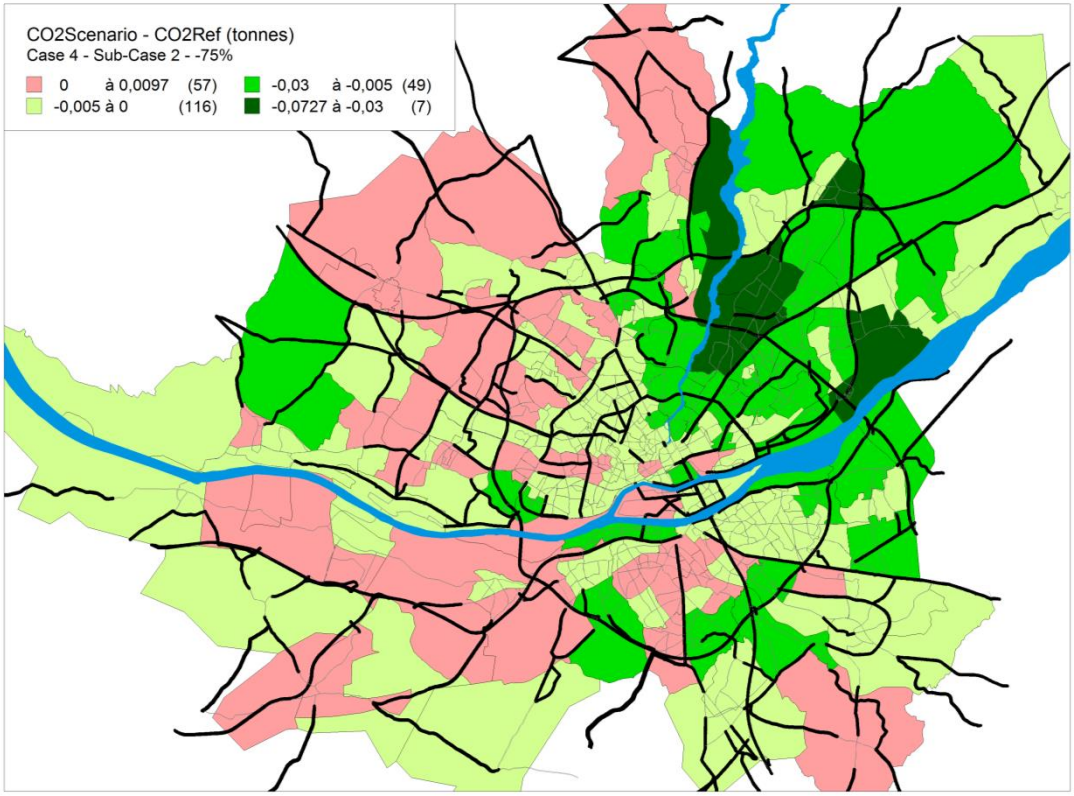
	Trips Variation
+ or -25%	178
+ or -50%	355
+ or -75%	533

Tableau 64 Variation of the number of trips – Case 4 – Sub-Case 2 (Stimulus 1)

The impacted zones are situated around the disrupted link and they are also concentrated on the ring roads in the South of the conurbation.

	Surface area (km²)	
	-75%	+75%
Strongly impacted	22.1	17
Moderately	121.7	123.3
Slightly	234.3	232.2
Inversely	156.7	162.3

Tableau 65 Surface area of the impacted zones for the Case 4 – Sub-Case 2 (Stimulus1)



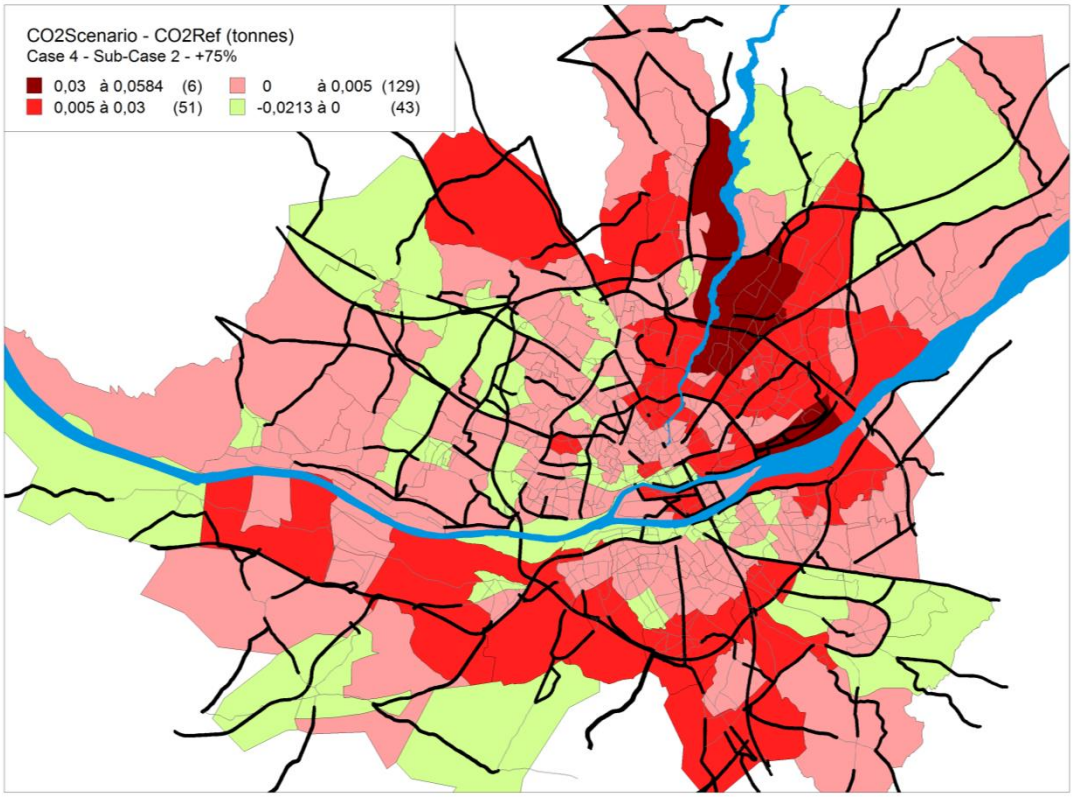


Figure 68 Spatial distributions of the Case 4 – Sub-Case 2 – Demand Scenario impacts (difference of CO2 emissions per zone) for a local variation of – 75% and +75% of the number of trips

1.5.6.5. Conclusion on the different actions of the Stimulus 1: PC travel demand

To conclude, we have observed that the emissions impact and its localization depend on the localization and the type (trip generation, trip attraction or OD) of the variation of the number of trips. When the modified trips are concentrated on few OD, the emission impact seem to be important and the impacted surface area seems to be low. The impacted zones are mainly concentrated on the destination zone when the trips attraction of a zone is modified. The surface area of the disrupted zone seems to influence the localization of the impacted zones and the maximal emission impact for a zone. At least, the mean length of the added trips can allow to explain the value of the emission impact in some cases.

1.5.7. Specific Localization of the impact for each simulation – Stimulus 2: Network Capacity

1.5.7.1. Case 1: Global variation in the network capacity (Stimulus 2)

The variation of the network capacity is applied on all the links of the network. The new traffic assignment alters the speeds, the traffic and the pollutant emissions on each link of the network.

The total mean network capacity is 1 227 UVP/h (1 166 UVP/H for -5% and 1 288 for +5%). We can notice that the total traffic on the "Nantes Métropole" area can vary depending on the simulation because the modeled territory is larger. Thus some trips could take an itinerary which is situated outside the « Nantes Métropole » area (total traffic for the -5% simulation is 922 973 veh.km and for the +5% simulation is 930 771 veh.km).

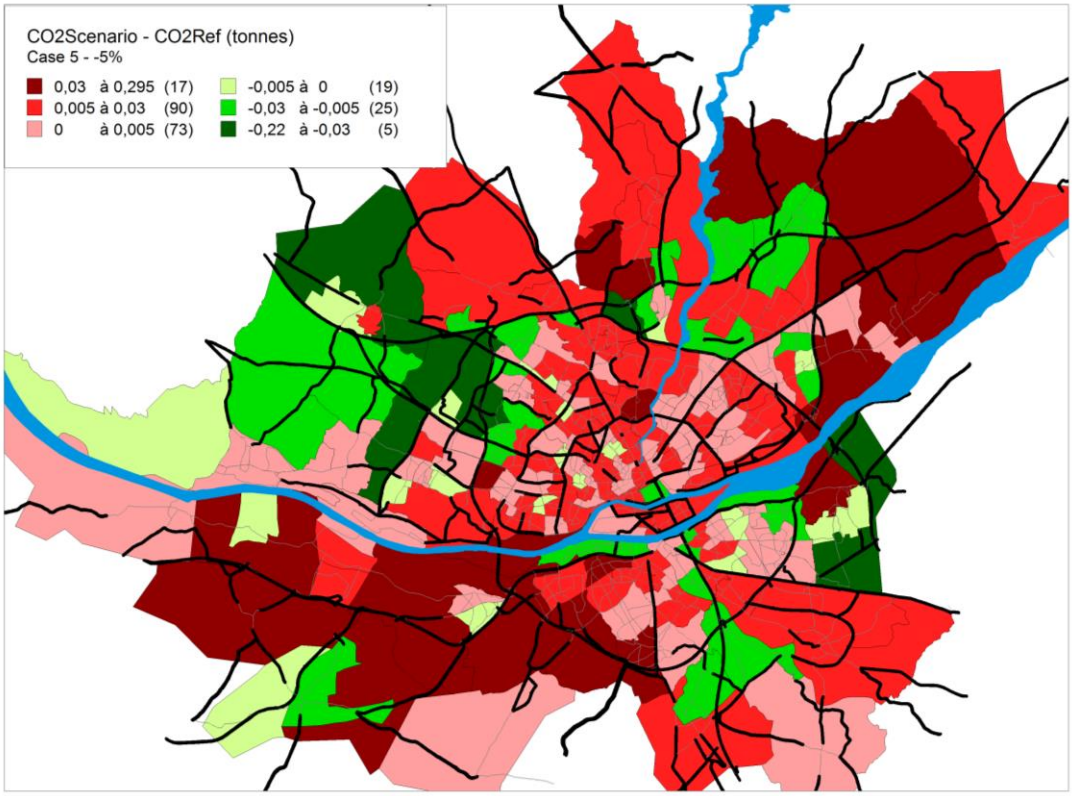
Globally, an increase of the network capacity induces a decrease of the emission impact and inversely but the emission impact depend on the zone. This way, variation of the emission depend on the existing traffic, on the speeds and on the network, the increase or decrease of the network capacity can induce an increase or a decrease of the traffic. Moreover, the emission variation depends on the speed and on the variation of the speed depending on the different emission functions.

The variation of the speed and the range of variation (in relation to the emission function) seem to be more influent on the emission impact than the volume of traffic.

	Surface area (km²)	
	-5%	+5%
Strongly impacted+	130	26.4
Moderately +	151.4	64.1
Slightly+	117.6	50.5
Strongly impacted-	36.1	91
Moderately -	62.1	175.3
Slightly-	37.5	127.4

Tableau 66 Surface area of the impacted zones for the Case 1 (Stimulus 2)

The more impacted zone are mainly situated where the capacity variation (in absolute value) is the more important and thus especially on the ring roads and on the motorways.



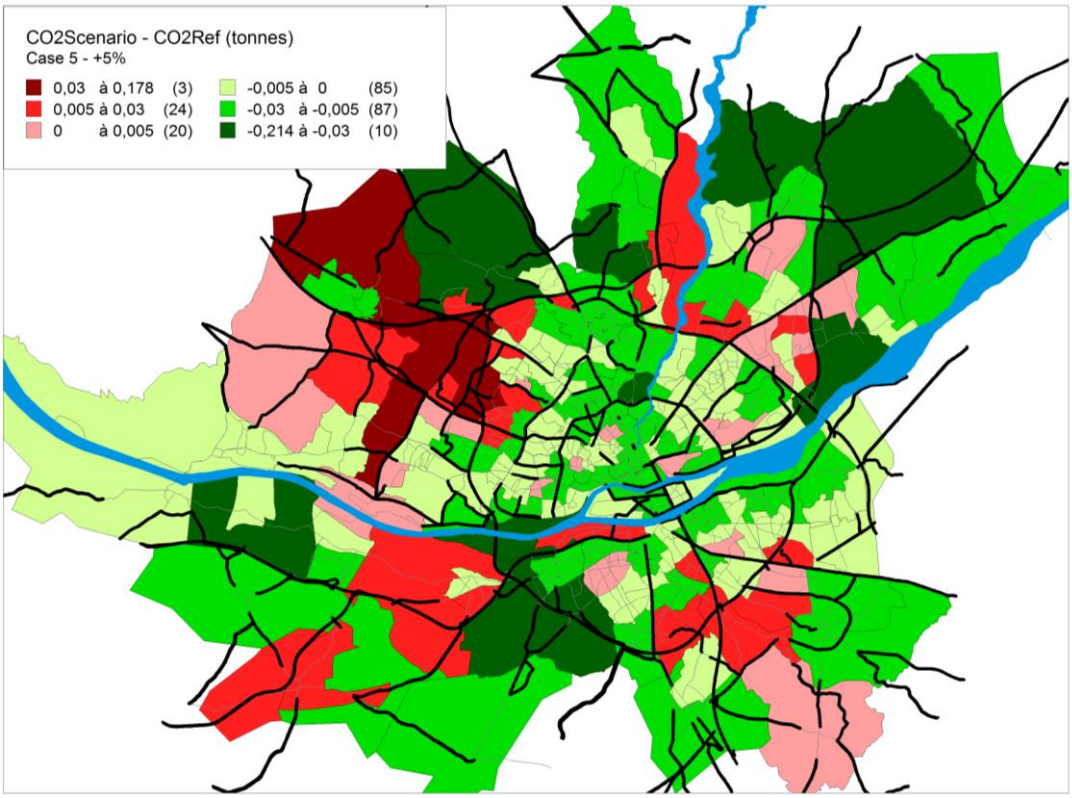
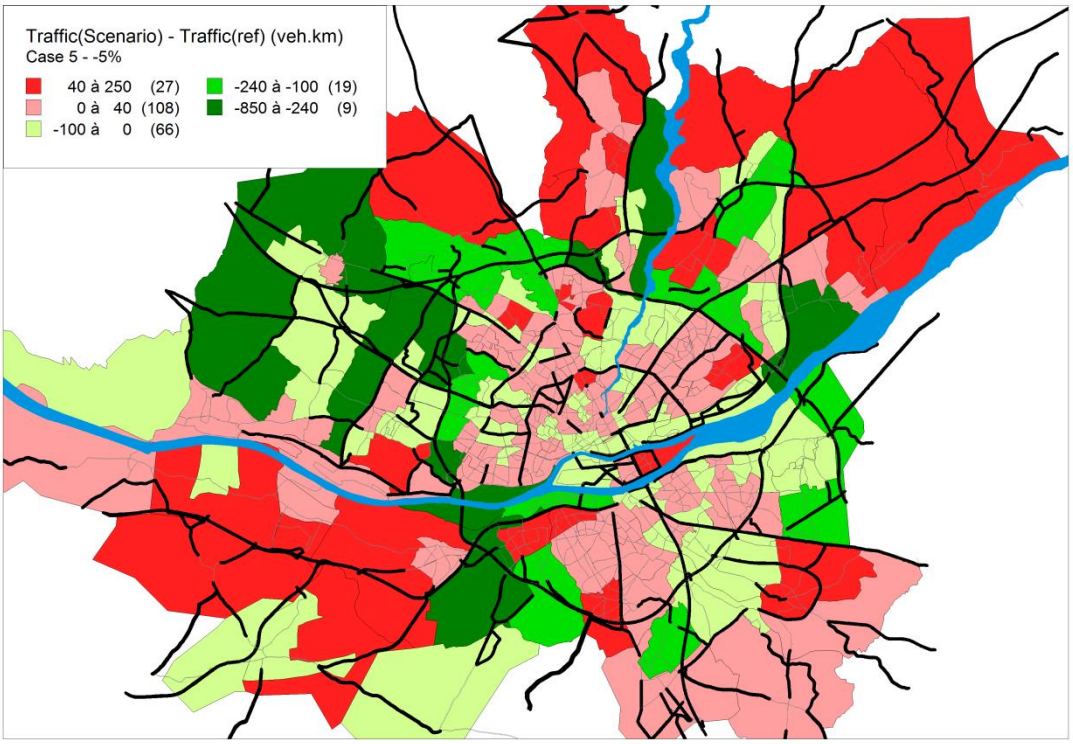


Figure 69 Spatial distributions of the Emission Impacts for the Case 1 – variation of – 5% and +5% of the network capacity (Stimulus 2)



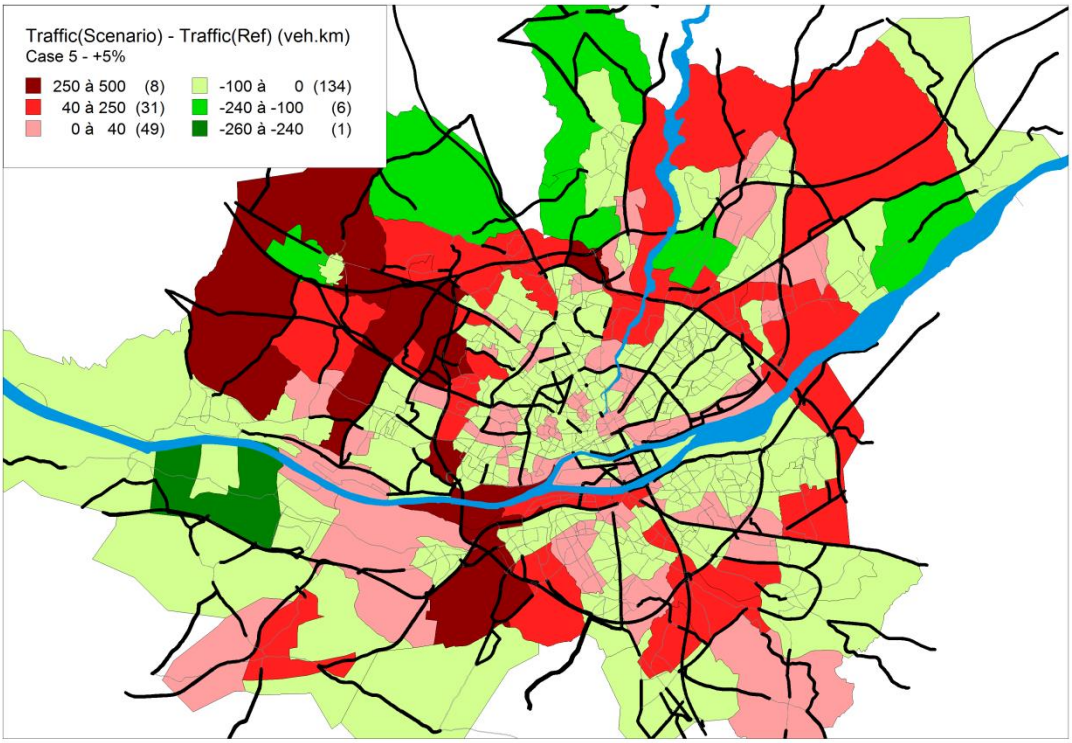


Figure 70 Difference of the volume of traffic between the Reference Scenario and the Case 1 (Stimulus 2)

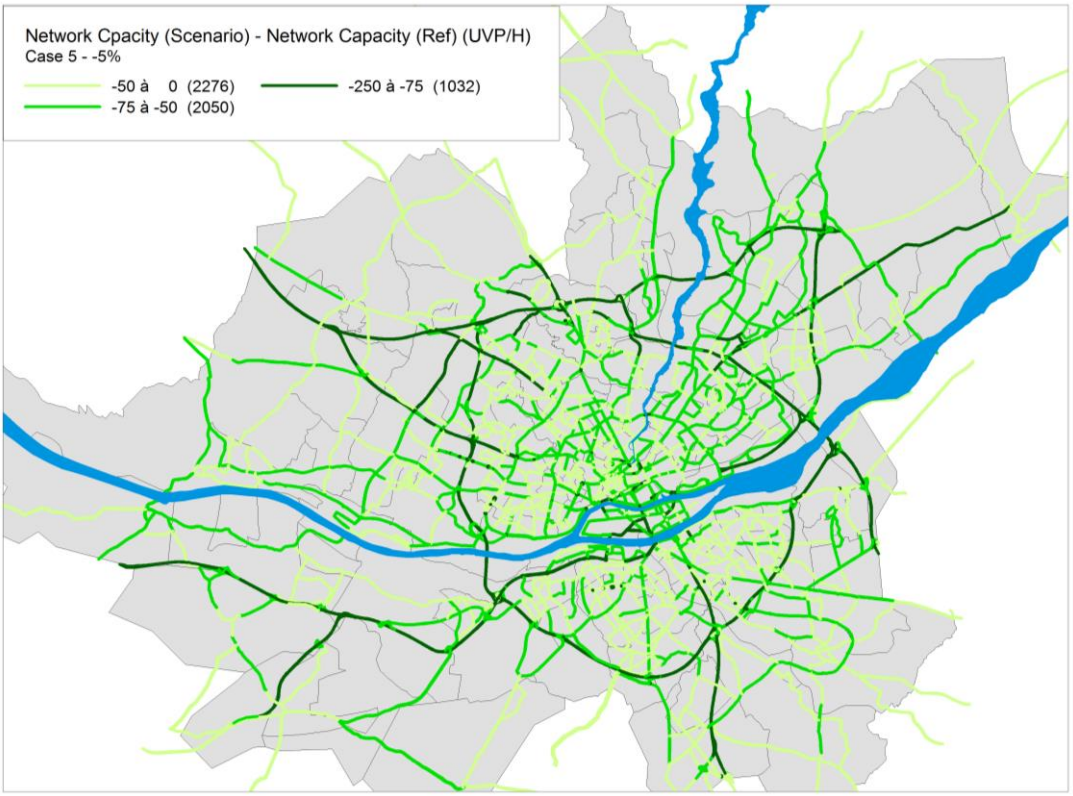


Figure 71 Difference of the Network Capacity between the Reference scenario and the Case 1 (Stimulus 2)

1.5.7.2. Case 2: Local variation in the network capacity in the central city center (Stimulus 2)

The initial mean capacity of the central city center network is 1 304 UVP/h. In this scenario, the mean capacity of this network varies from 1 239 (-5%) to 1 369 UVP/H (+5%).

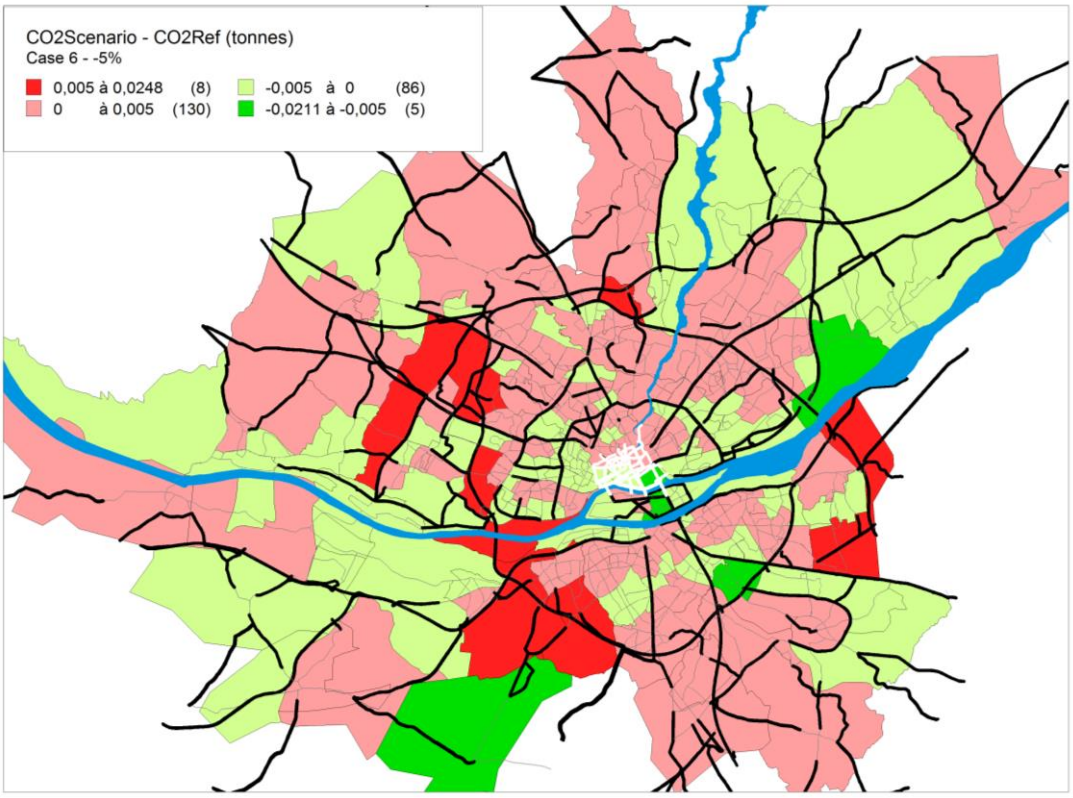
	Surface area (km²)	
	-5%	+5%
Strongly impacted+	0	0
Moderately +	40	8.7
Slightly+	256	196.2
Strongly impacted-	0	0
Moderately -	27.3	62.6
Slightly-	211.1	267.2

Tableau 67 Surface area of the impacted zones for the Case 2 (Stimulus 2)

Only few zones are impacted. They are mainly situated in the West ring roads zones and on the South of the disrupted zone.

When the capacity decreases in the central city center network, we mainly observe a decrease of the emission impact in the central zones and an increase in the peripheral zones. We assume that the direct itineraries, which take central network, change and take the peripheral roads. The decrease and the increase of the traffic in these zones could explain the evolution of the emission impact.

On the contrary, when the capacity decreases in the central city center network, we mainly observe an increase of the emission impact in the city center and a decrease in the peripheral zones. We assume that the trips take direct itineraries which are shorter.



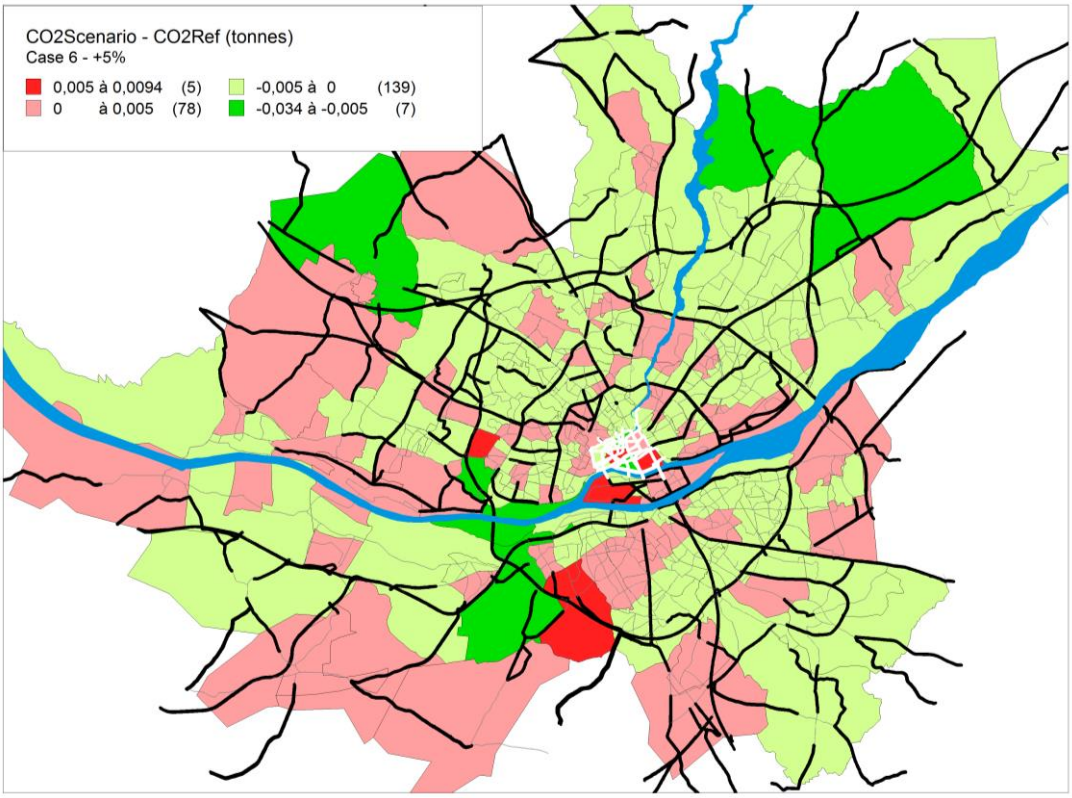


Figure 72 Spatial distributions of the Emission Impacts for the Case 2 – variation of -5% and +5% of the central city center network capacity

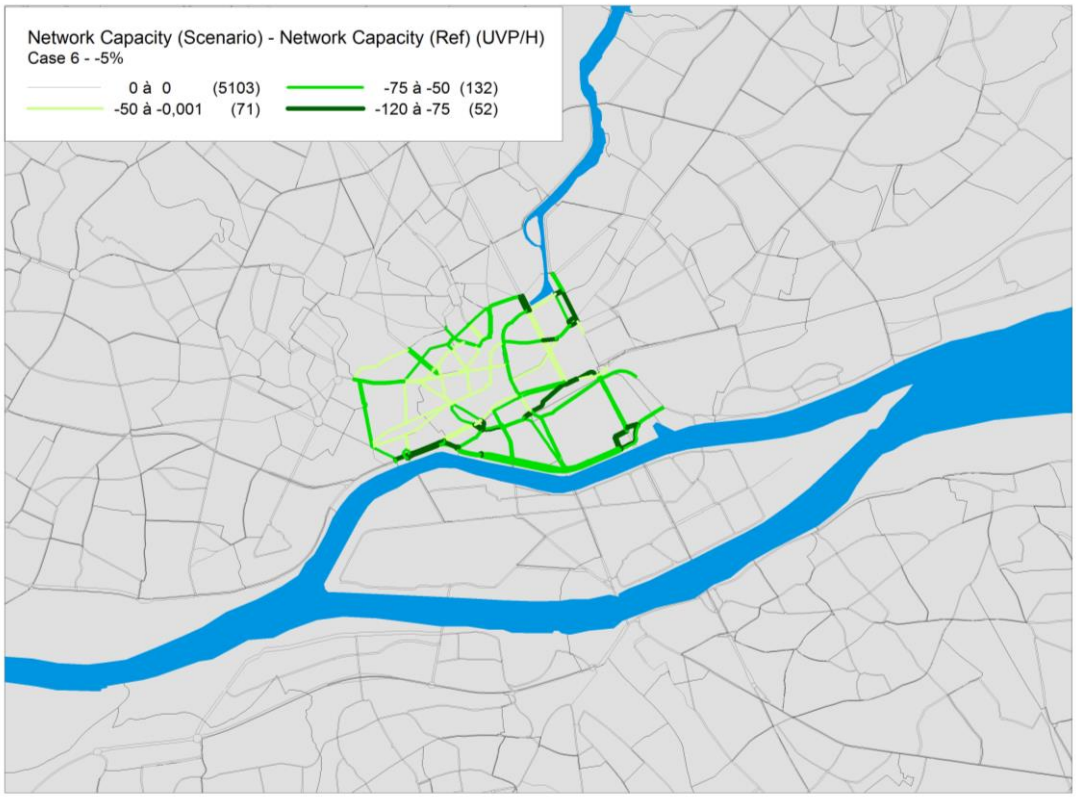


Figure 73 Comparison of the network capacity between the Reference scenario and the Case 2 (Stimulus 2)

1.5.7.3. Case 3: Local variation in the network capacity on the ring roads (Stimulus 2)

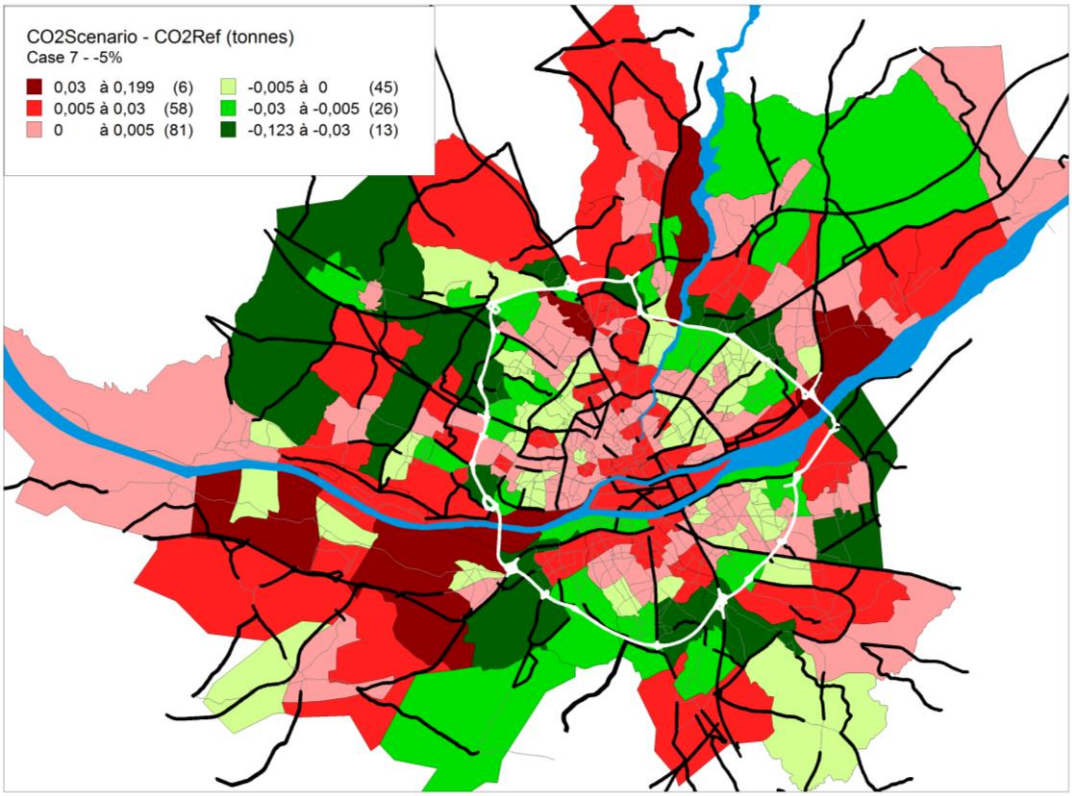
The initial mean capacity of the ring roads is 4 123 UVP/h. In this scenario, the mean capacity of this network varies from 3 923 (-5%) to 4 336 UVP/h (+5%).

	Surface area (km²)	
	-5%	+5%
Strongly impacted+	40	43.5
Moderately +	146.4	60.7
Slightly+	131.5	52.2
Strongly impacted-	73.5	26.4
Moderately -	91.1	123.2
Slightly-	52.3	228.7

Tableau 68 Surface area of the impacted zones for the Case 3 (Stimulus 2)

When the capacity decreases on the ring roads network, any accurate trend is observed. But globally, the emission impact decreases on the ring roads zones. On the contrary, the emission impact increases in the city center and especially in the "Ile de Nantes" area and on the access road to the conurbation as in the South West for example. That can be explained by a decrease of the speed and/or the traffic on the ring roads zones.

When the capacity increases on the ring roads, we globally observe a decrease of the emissions impact. We mainly observe a decrease of the emission impacts on the city center and an increase of the emission impact on the ring roads zones. With a higher capacity, the ring roads are more attractive because, the speeds are higher. We assume that the traffic increases.



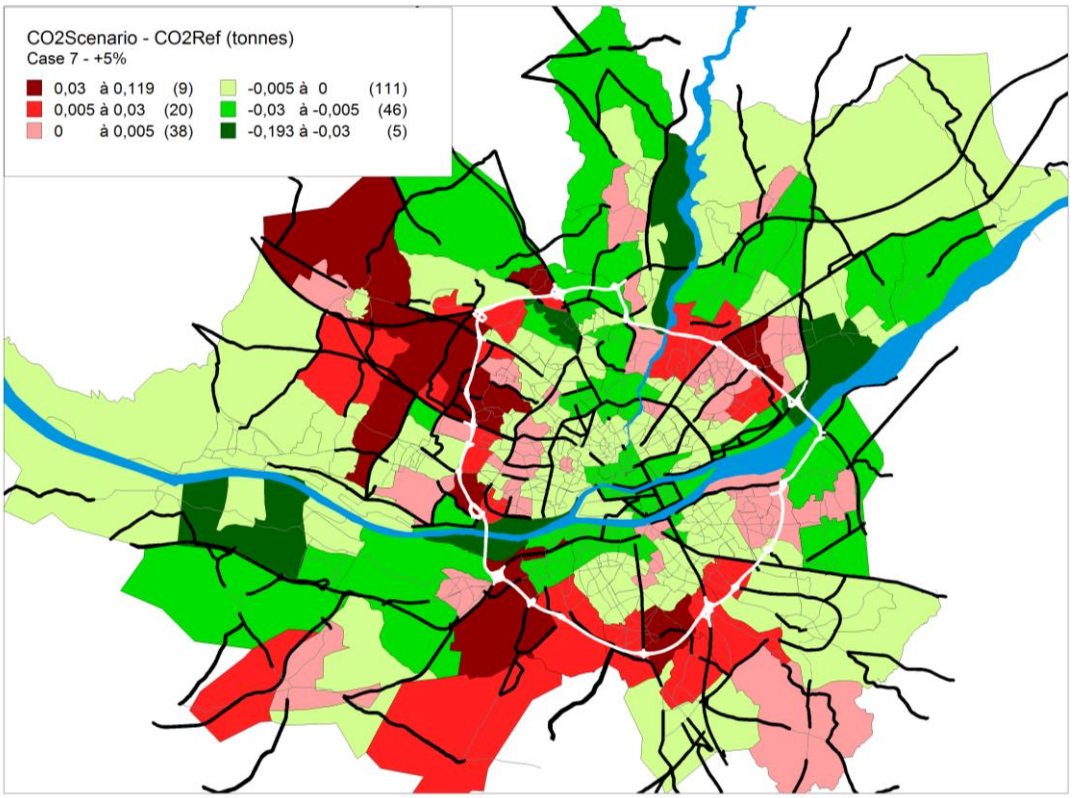


Figure 74 Spatial distributions of the Emission Impacts for the Case 3 – Variation of – 5% and +5% of the ring roads capacity (Stimulus 2)

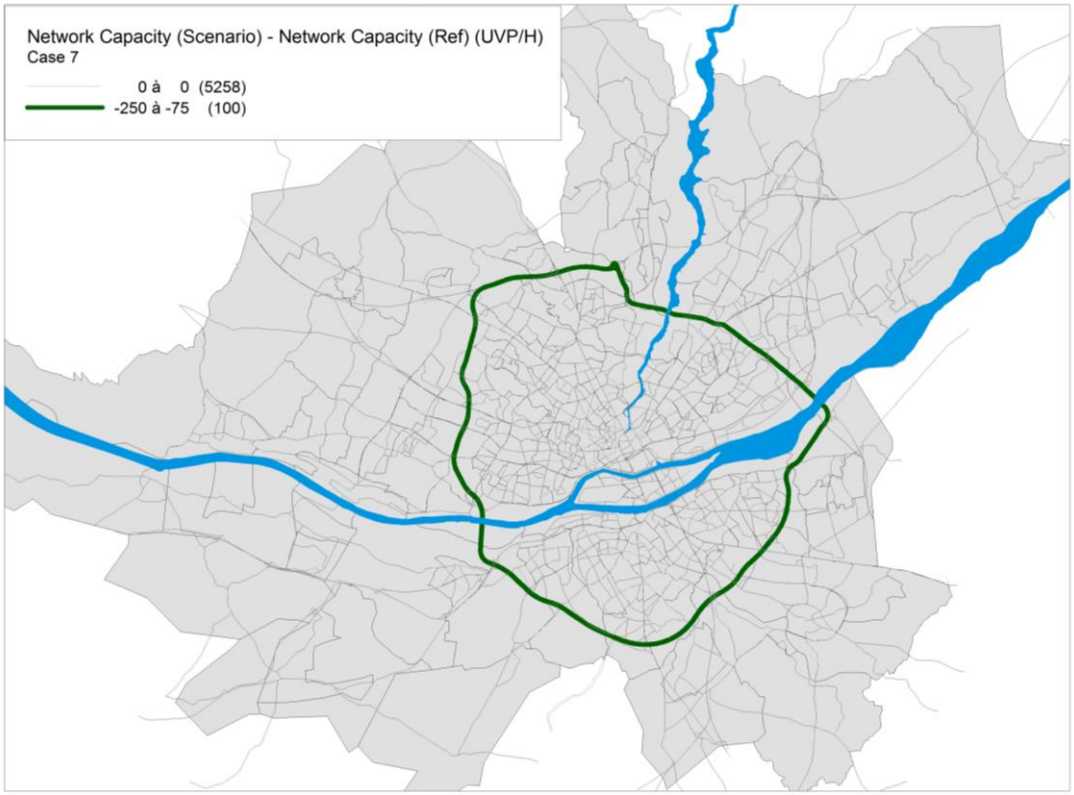


Figure 75 Difference of the Network Capacity between the Reference scenario and the Case 3 (Stimulus 2)

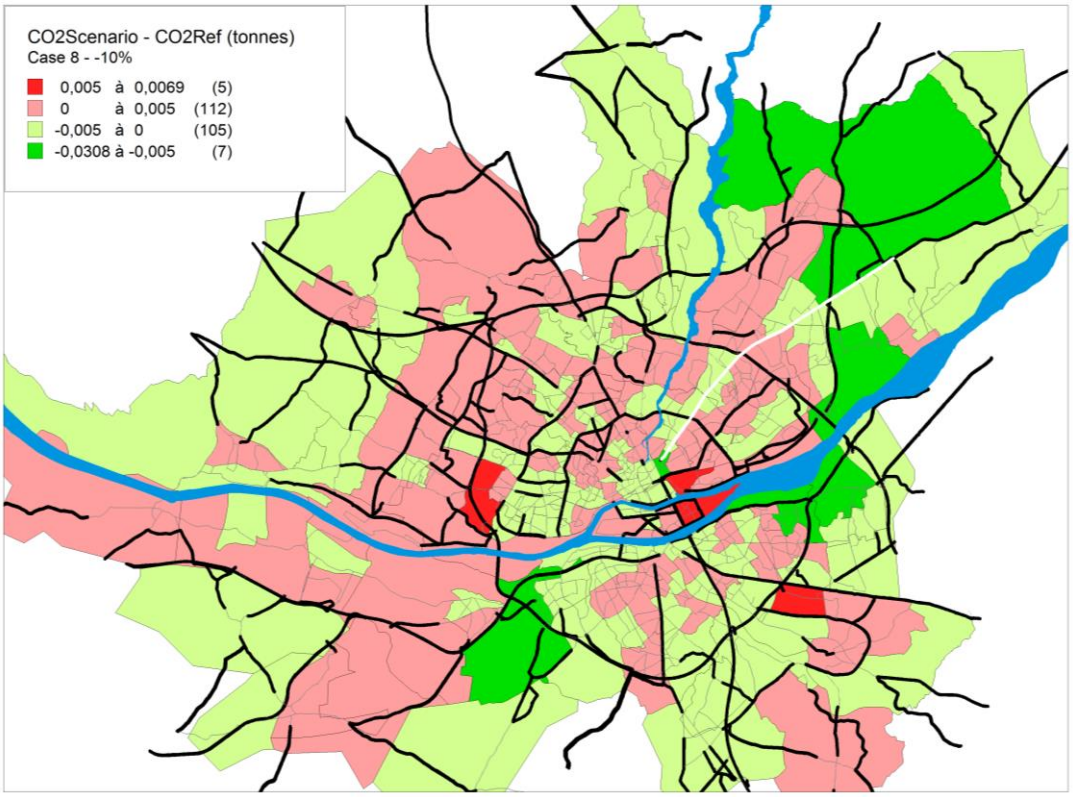
1.5.7.4. Case 4: Local variation in the network capacity on the main road RD 723 (Stimulus 2)

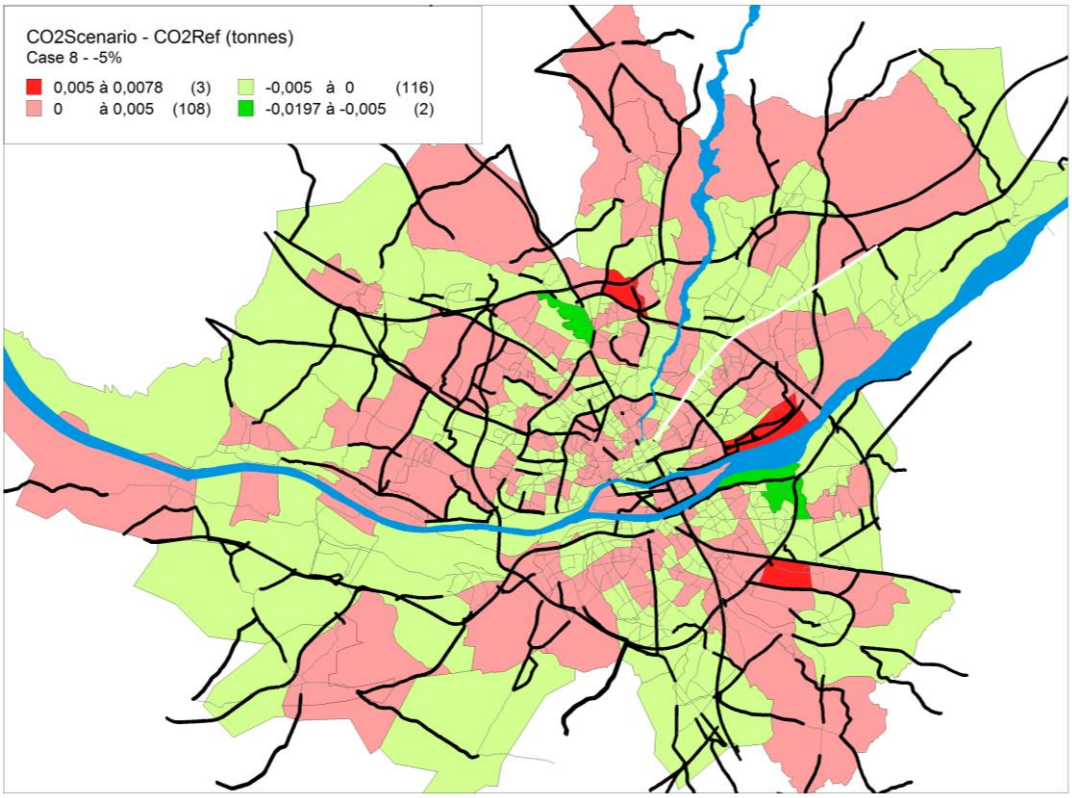
The initial mean capacity of the main road is 1 737 UVP/h. In this scenario, the mean capacity of this network is 1 911 UVP/h for a variation of +10%, 1 563 for -10%, 1 650 for -5% and 1 824 for +5%.

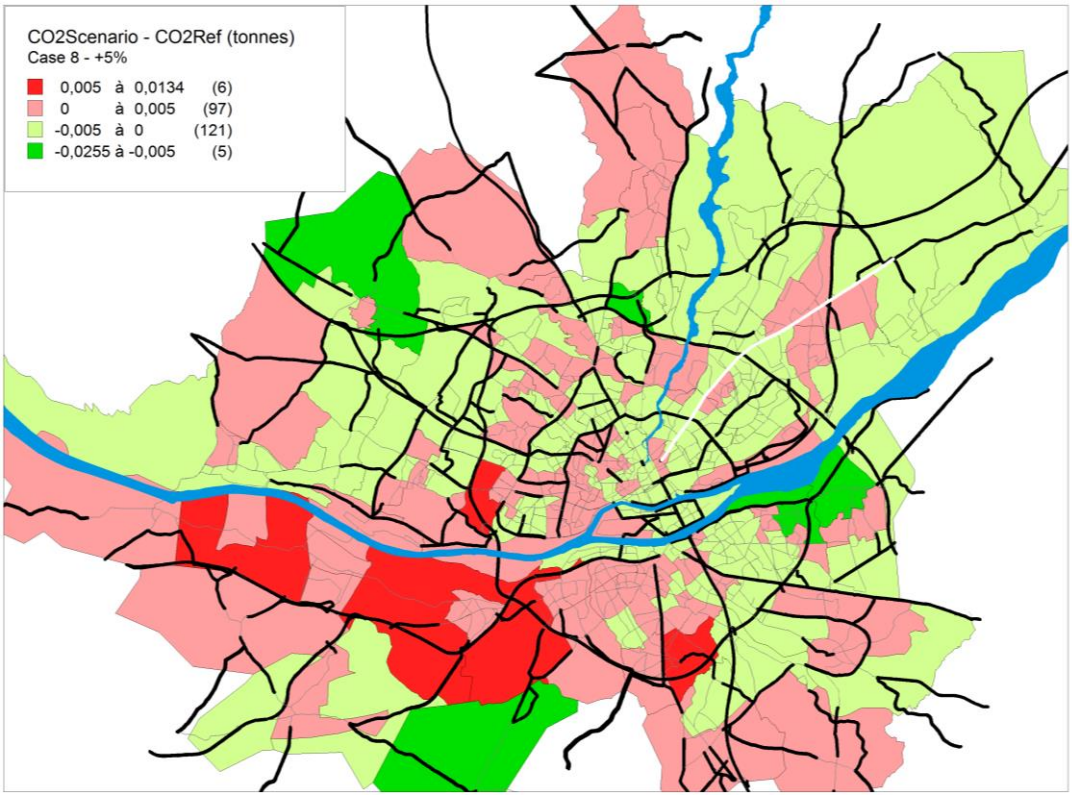
	Surface area (km²)			
	-10%	-5%	+5%	+10%
Strongly impacted+	0	0	0	0
Moderately +	5.8	5.4	36.3	21.8
Slightly+	213.4	246.2	213	220.2
Strongly impacted-	0	0	0	0
Moderately -	57.5	5.4	41.9	15
Slightly-	258	277.7	243.5	277.8

Tableau 69 Surface area of the impacted zones for the Case 4 (Stimulus 2)

Any precise trend is observed on the entirety simulations. The main road zones are not affected. In the reference situation, this main road is not congested. We can suppose that an increase of the capacity does not cause an increase of the speed or of the traffic on this main road because the traffic demand is kept up with the existing capacity supply. On the same way, a decrease of the capacity does not induce changes of itineraries and a decrease of the speed because the supply is always quite important to support the traffic demand.




CO2Scenario - CO2Ref (tonnes)
Case 8 - -5%
0,005 à 0,0078 (3)
0 à 0,005 (108)
-0,005 à 0 (116)
-0,0197 à -0,005 (2)


CO2Scenario - CO2Ref (tonnes)
Case 8 - +5%
0,005 à 0,0134 (6)
0 à 0,005 (97)
-0,005 à 0 (121)
-0,0255 à -0,005 (5)

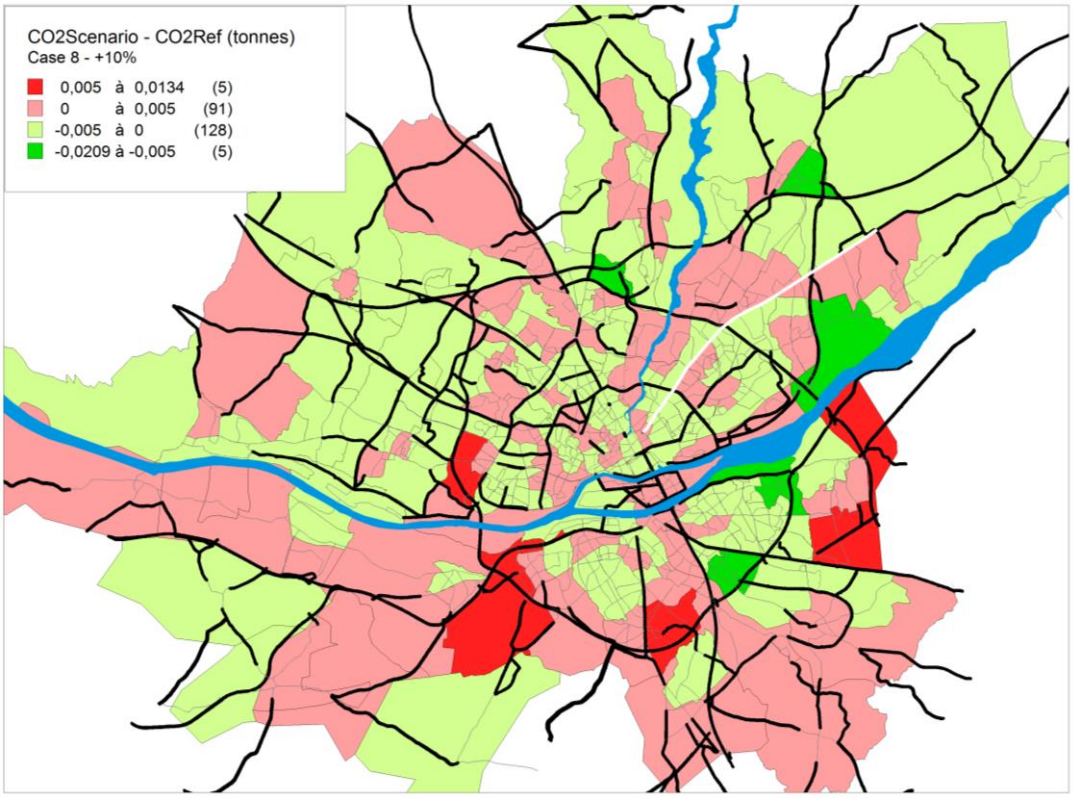


Figure 76 Spatial distributions of the Emission Impacts for the Case 4 – Variation of – 10%, -5%, +5% and +10% of the main road capacity (Stimulus 2)

Figure 77 Difference of the Network Capacity between the Reference scenario and the Case 4 (Stimulus 2)

1.5.7.5. Conclusion on the different actions of the Stimulus 2: Network Capacity

The variation of the emission impact depends on the modification of the speed and of the traffic which are induced by the traffic assignment. The variation of the emission impact seems to depend on the localization of the capacity variation and on the initial characteristics of the zone. For example, a modification of the capacity in the city center or on the ring roads network induces variations in emissions impact on the entire conurbation. On the contrary, a modification of the capacity in a non congested road induces very low emission impact.

1.5.8. Specific Localization of the impact for each simulation – Stimulus 3: Vehicles fleet composition

1.5.8.1. Case 1: Global variation of the vehicles fleet composition (Stimulus 3)

Globally, the recent vehicle fleet compositions (2010 – 2015 – 2020) induce an increase of CO_2 emission impacts on almost the entire conurbation. The observed variation depends on the traffic volume on the zone and on the type of the road because it affects the vehicle fleet composition (and especially the proportion between Passenger Cars and HGV).

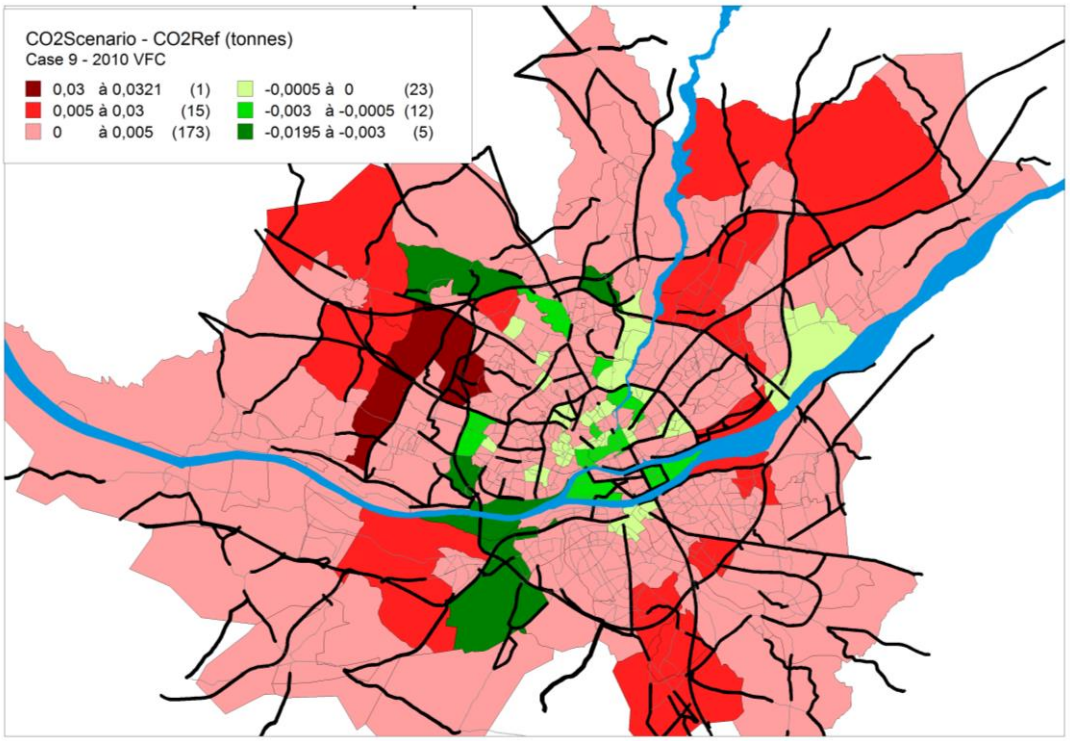
In this scenario, the volume of traffic is not modified as regards the Reference Scenario.

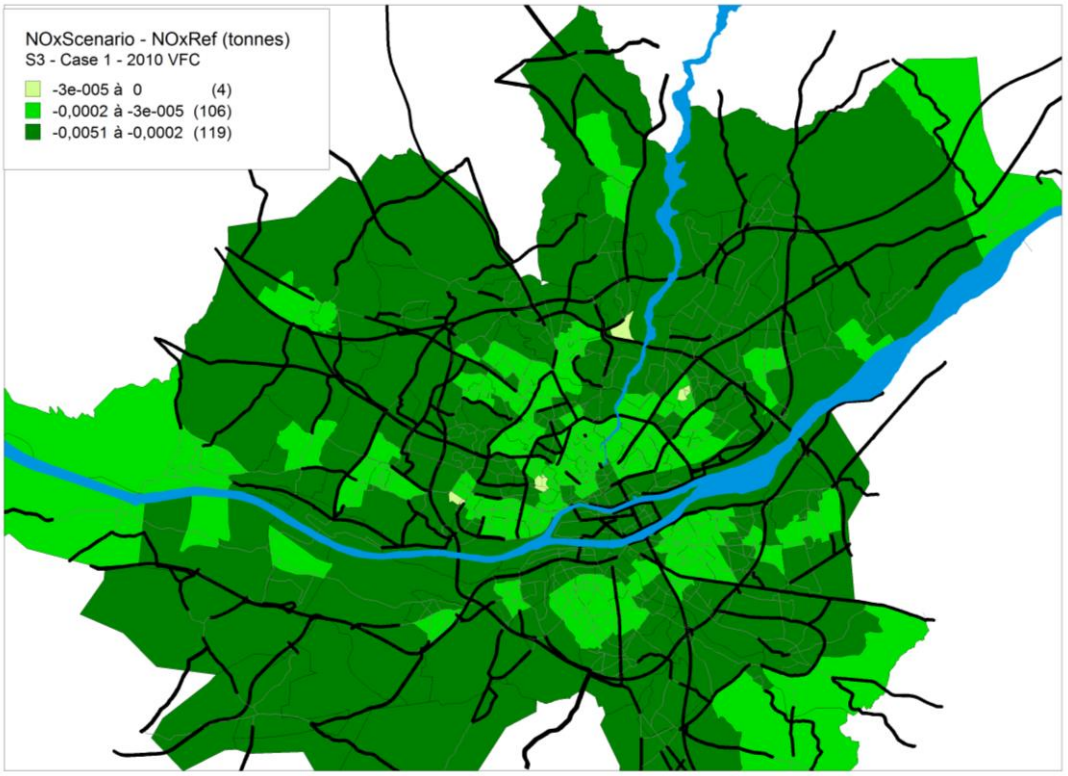
Different CO_2 emissions impacts are observed on the different zones of the conurbation because the new vehicle fleet compositions induce a low decrease of CO_2 emission for the low speed of the HGV and a low increase of CO_2 emission for the low and high speeds of the PC.

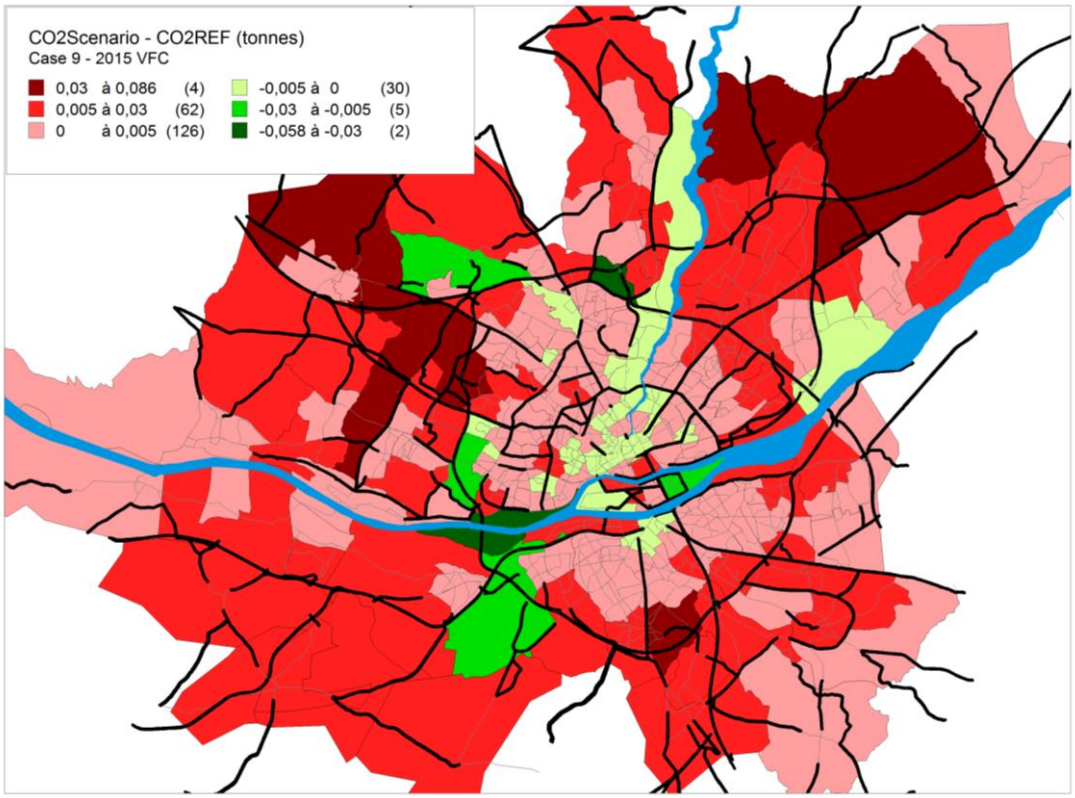
The evolution of the NOx emissions impacts is different: globally we observe a decrease of the impact which is higher when the vehicle fleet composition is recent. For the 2020 VFC, almost all the conurbation presents a strongly decrease of the NOx emissions.

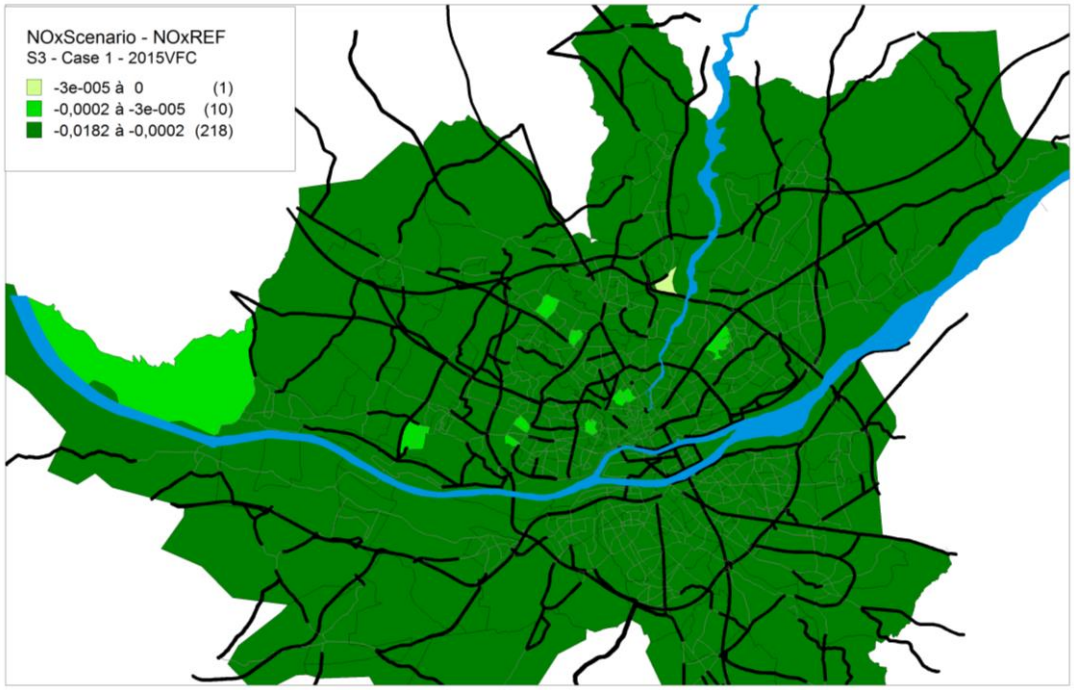
	Surface area (km²)					
	2010 CO2	2010 NOx	2015 CO2	2015 NOx	2020 CO2	2020 NOx
Strongly impacted+	10.8	0	62.3	0	82.9	0
Moderately +	106.1	0	237	0	252.5	0
Slightly+	375.1	0	188	0	159.1	0
Strongly impacted-	15.3	146.5	4.8	514.4	4.8	533.9
Moderately -	8	387.4	17.1	19.9	9.6	0.5
Slightly-	19.5	0.8	25.6	0.4	25.8	0.4

Tableau 70 Surface area of the impacted zones for the Case 1 (Stimulus 3)


CO2Scenario - CO2Ref (tonnes)
Case 9 - 2010 VFC
0,03 à 0,0321 (1)
0,005 à 0,03 (15)
0 à 0,005 (173)
-0,0005 à 0 (23)
-0,003 à -0,0005 (12)
-0,0195 à -0,003 (5)


NOxScenario - NOxRef (tonnes)
S3 - Case 1 - 2010 VFC
-3e-005 à 0 (4)
-0,0002 à -3e-005 (106)
-0,0051 à -0,0002 (119)


CO2Scenario - CO2REF (tonnes)
Case 9 - 2015 VFC
0,03 à 0,086 (4)
0,005 à 0,03 (62)
0 à 0,005 (126)
-0,005 à 0 (30)
-0,03 à -0,005 (5)
-0,058 à -0,03 (2)


NOxScenario - NOxREF
S3 - Case 1 - 2015VFC
-3e-005 à 0 (1)
-0,0002 à -3e-005 (10)
-0,0182 à -0,0002 (218)

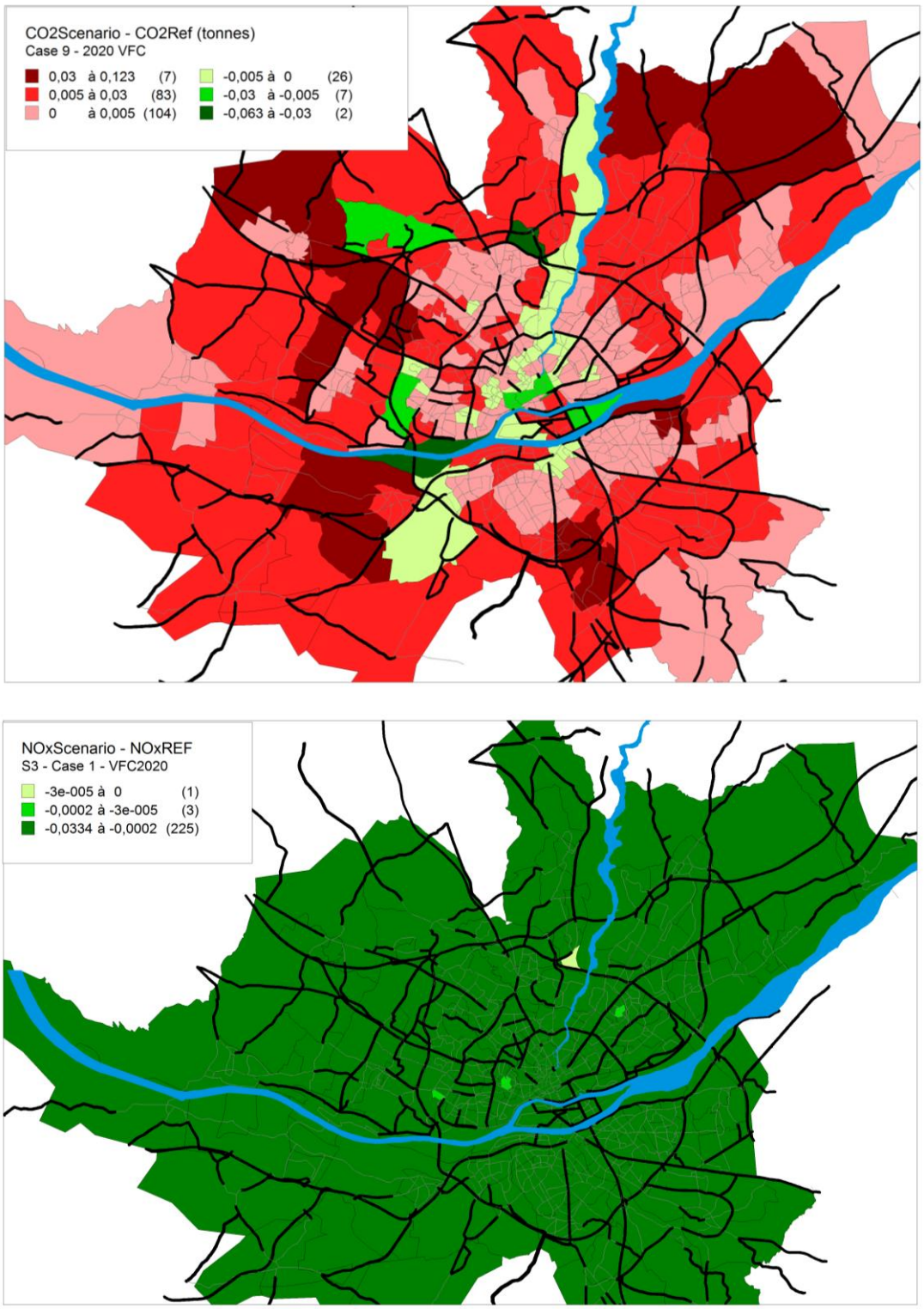


Figure 78 Spatial distributions of the Emission Impacts (CO2 and NOx) for the Case 1 – 2010, 2015 and 2020 Vehicle Fleet Compositions (Stimulus 3)

1.5.8.2. Case 2: Local variation of the vehicle fleet composition in the city center (Stimulus 3)

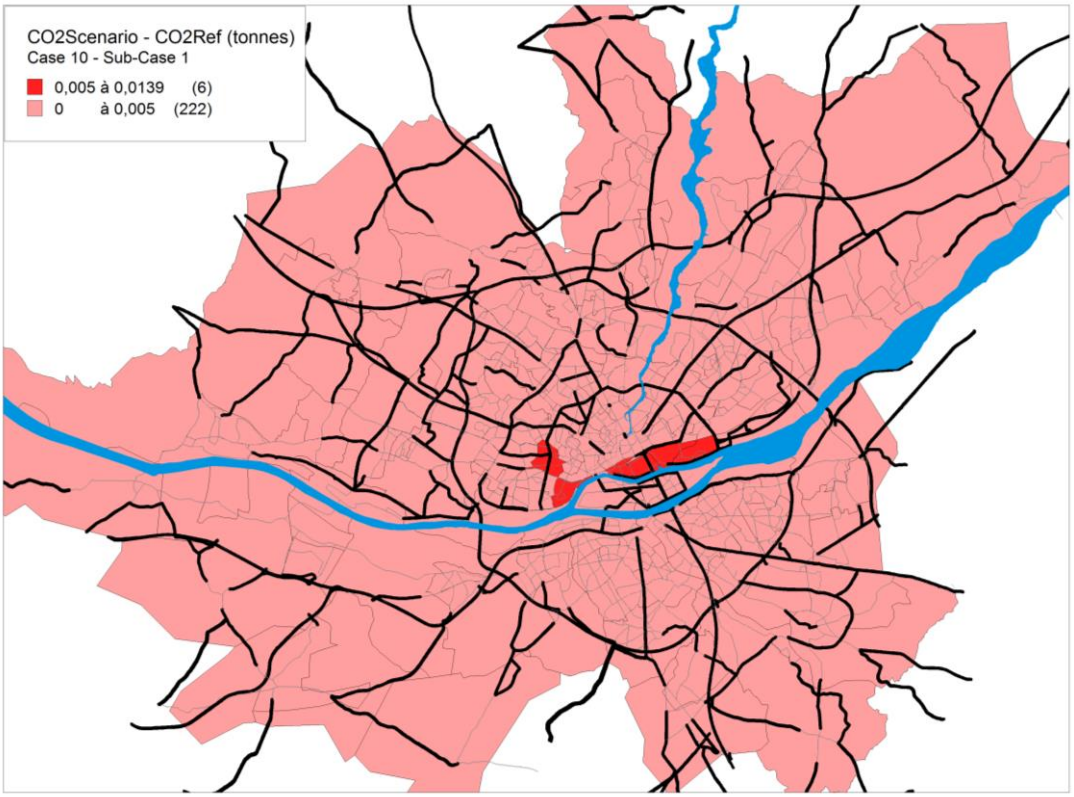
1.5.8.2.1. Sub-Case 1: Variation in the repartition of vehicles depending on their environmental standard (EURO)

In this scenario, we have modified the vehicle fleet composition in the city center. We observe a low increase of the CO2 emission in some city center zones. That is linked the increase of the CO2 emission of the new PC vehicles.

The emission impact for the NOx is different. All the city center presents a moderately decrease of the emission.

	Surface area (km²)	
	CO2	NOx
Strongly impacted+	0	0
Moderately +	3.8	0
Slightly+	530.9	0
Strongly impacted-	0	0
Moderately -	0	14.3
Slightly-	0	520.4

Tableau 71 Surface area of the impacted zones for the Case 2 – Sub-Case 1 (Stimulus 3)



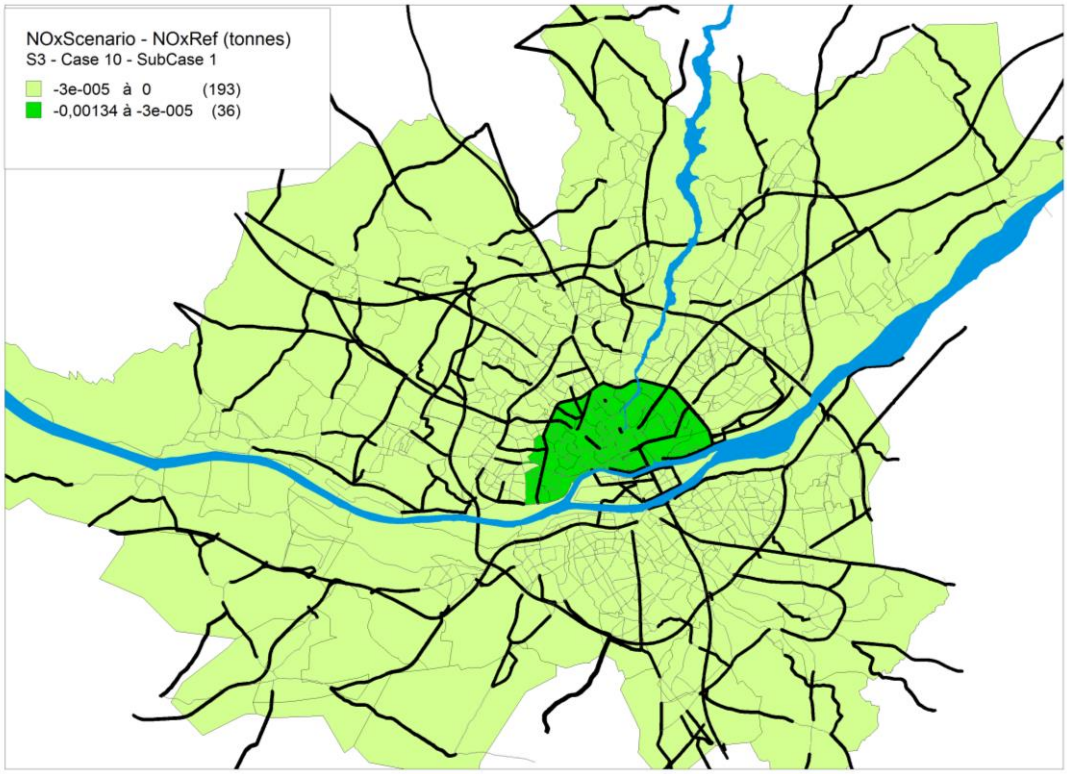


Figure 79 Spatial distributions of the Emission Impacts (CO2 and NOx) for the Case 2 – Sub-Case 1 (Stimulus 3)

1.5.8.2.2. Sub-Case 2: Variation in the surface area of the EURO Standard restricted access

We observe an increase of the impacted surface area in relation to the increase of the surface area of the disrupted zone.

For the CO_2 and the NOx emission, the intensity of the impact slightly increases (or decreases) in comparison with the Sub-Case 1.

	Surface area (km²)	
	CO2	NOx
Strongly impacted+	0	0
Moderately +	510	0
Slightly+	24.8	0
Strongly impacted-	0	59.6
Moderately -	0	4.6
Slightly-	0	470.6

Tableau 72 Surface area of the impacted zones for the Case 2 – Sub-Case 1 (Stimulus 3)

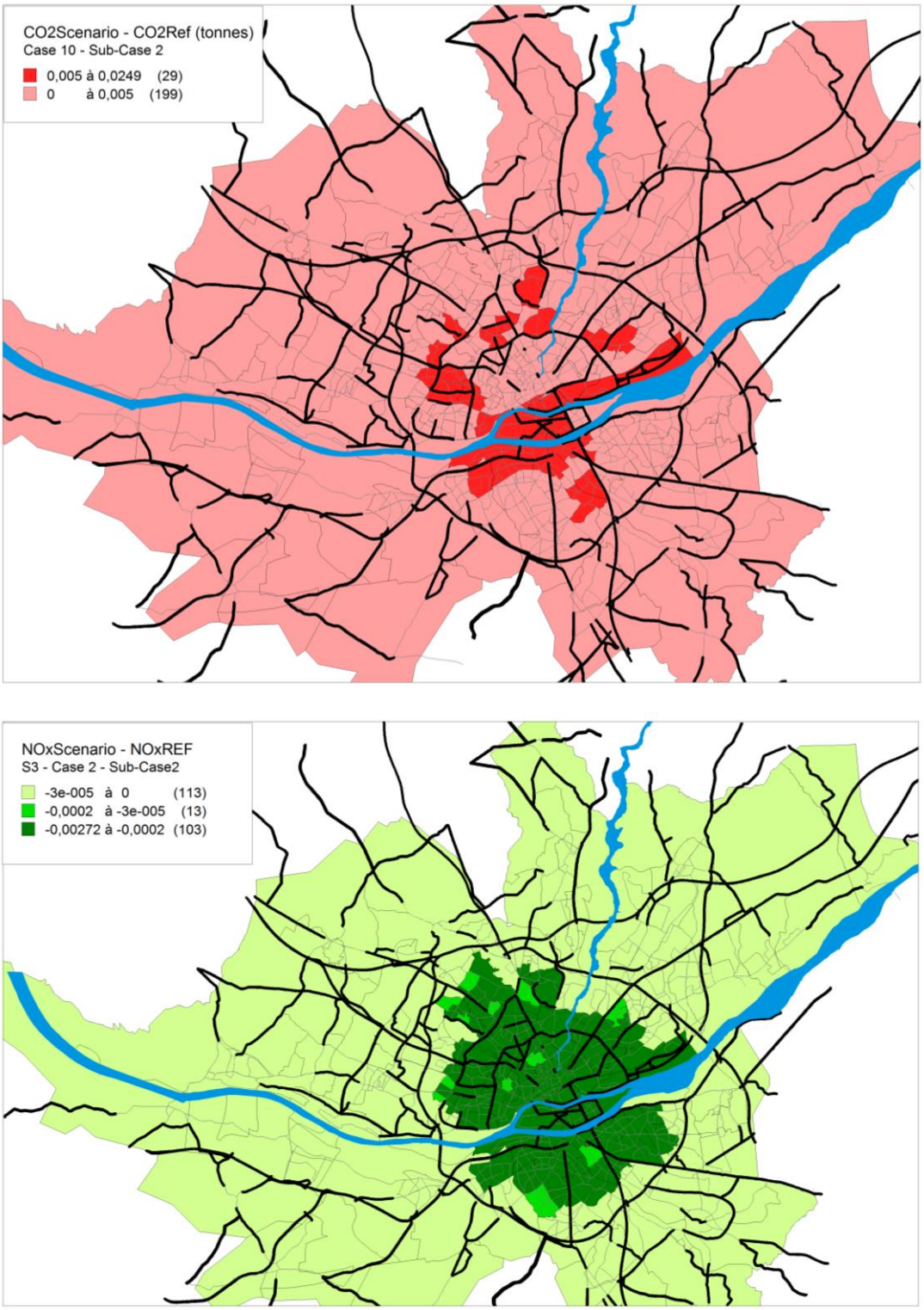


Figure 80 Spatial distributions of the Emission Impacts for the Case 2 – Sub-Case 2 (Stimulus 3)

1.6. Conclusion

The analysis of the simulation impact highlights the localization of the impacted zones and the intensity of the impact. We have tried to identify the relation between the stimulus, its action and the induced pollutant emission.

We have observed that the localization of the impacted zones and the intensity of the emissions impact depend on the characteristics of each zone, on the stimulus, on the action of the stimulus and on the network (localization of the main roads, connection between the zones…).

For the stimulus 1: Passenger Cars travel demand, the impact on the global variation of the emission quantity is different according to the localization of the disrupted zone and according to the action. We have defined a relation, based on the mean length trips in order to determine the emissions impact. On the zone scale, we have observed that the emissions impact and its localization depend on the localization and the type (trip generation, trip attraction or OD) of the variation of the number of trips. When the modified trips are concentrated on few OD, the emissions impact seems to be important and the impacted surface area seems to be low. The impacted zones are mainly concentrated on the destination zone when the trips attraction of a zone is modified. The surface area of the disrupted zone seems to influence the localization of the impacted zones and the maximal emissions impact for a zone. At least, the mean length of the added trips can allow to explain the value of the emissions impact in some cases.

For the stimulus 2: Network Capacity, the variation of the emissions impact depends on the modification of the speed and of the traffic which are induced by the traffic assignment. The variation of the emission impact seems to depend on the localization of the capacity variation and on the initial characteristics of the zone. For example, a modification of the capacity in the city center or on the ring roads network induces variations in emission impacts on the entire conurbation. On the contrary, a modification of the capacity on a non congested road induces very low emissions impact.

For the stimulus 3: Vehicle Fleet Composition, we observe an increase of the impacted surface area in relation to the increase of the surface area of the disrupted zone. The emissions impact seems to depend on the study pollutant.

Thus, this approach allows to define a range of scenari representing the different actions of each stimulus and to define their emissions impact for the specific case of the Nantes Métropole conurbation. The observed emissions impacts can be used in order to assess mobility or traffic measures.

This approach is relevant because it is not necessary to run complex and multiple simulations. Only one simulation of the reference situation is necessary. Thanks to the definition of the stimuli, it is possible to take into account different actions of one measure and to assess measures which are usually not assessed because classical models cannot take into account their effects (cycle measures for example).

This approach presents some limits. The representation of the interaction between the effects on each stimulus is not defined. The variation of the emissions impact of some zones is not explained. We wonder if it is due to the uncertainties of the model or if the scale of analysis is too low to perform some phenomenon. While we try to determine a relation between the stimulus 1 and the emissions impact, the localization of the impacted zones is mainly dependent on the network. Lastly, the constraints due to the use of the static travel model (as the representation of mean speeds) are the same in this approach because the results are based on this model.

In order to complete the framework of this approach, future investigations on the definition of the other relations between the stimulus and the impact, on the interaction between effects and on others stimuli, such as the travel time, are necessary.

2. Mise en pratique de la méthode sur le cas de la mesure « mise en place d'un TCSP + P+R »

Cette deuxième partie présente un exemple d'application de l'approche sur le cas de la mesure « mise en place d'un TCSP + P+R ». La comparaison de l'approche développée avec l'approche classique appliquée dans le projet EvalPDU, nous permet de cibler ses avantages et ses limites.

Dans une première partie, nous exposons la démarche ainsi que les résultats obtenus avec l'approche classique.

Afin de mettre en œuvre l'approche développée, nous définissons les différents effets de la mesure grâce aux connaissances synthétisées dans le premier chapitre de cette thèse, puis nous sélectionnons les stimuli sur lesquels la mesure a des effets. Il faut ensuite définir les actions de ces stimuli. Enfin, nous identifions les impacts de la mesure grâce à l'analyse des simulations réalisées dans la première partie de ce chapitre. L'impact final doit regrouper les effets de chaque stimulus.

2.1. Représentation de l'impact de la mesure avec l'approche classique

Dans le projet EvalPDU, l'analyse de l'impact de la mise en place du Busway (TCSP) est permise par la comparaison de deux scénari : un scénario de référence 2008 (mise en place du Busway en 2006) et la construction d'un scénario sans Busway pour la même année. On peut aussi analyser le scénario P+R qui modélise la situation 2008 avec l'ajout de P+R.

2.1.1. Construction des scénarios, hypothèses et paramètres des modèles affectés

Dans le scénario sans Busway, il est supposé que le Busway n'a pas été réalisé. L'ensemble des aménagements de l'ex-pénétrante Sud ainsi que les parkings relais P+R ne sont pas non plus modélisés. En ce qui concerne cet axe, l'infrastructure est donc la même que pour la situation 2002. La demande est par contre la même que pour 2008. Entre les scénarios 2002 et 2008, la variation de la demande est représentée grâce à l'évolution de la population et de leurs caractéristiques dans chaque zone en fonction des données du RGP 2006. Comme la demande n'est pas modifiée entre les deux scénarios (avec et sans Busway), l'influence de la mesure sur la demande n'est pas représentée.

Le scénario P+R modélise une situation 2008 (donc avec le Busway) avec la mise en place de trois P+R sur l'axe Busway. Ces P+R sont représentés de la façon suivante : pour l'heure de pointe du matin, des trajets VP en direction du centre sont arrêtés au niveau du P+R, leur nombre est fonction de la capactié de celui-ci. L'affectation est ensuite relancée. La symétrie est réalisée pour l'heure de pointe du soir, les heures creuses ne sont pas modifiées.

Les caractéristiques du réseau sont modifiées sur l'axe du TCSP, une baisse de capacité est appliquée.

Pour la modélisation des émissions de polluants, aucune hypothèse ou modification n'est réalisée entre les deux scénarios (avec et sans Busway). Un parc de véhicules identique est appliqué pour les deux scénarios. La localisation des parcs de véhicules est aussi la même.

2.1.2. Effets en termes de trafic

2.1.2.1. Effets à l'échelle de l'agglomération

A l'échelle de l'agglomération, on observe une augmentation des distances parcourues, des heures roulées, des heures perdues et du pourcentage de ralentissement pour les deux scénarios : avec Busway et avec Busway et P+R par rapport à la situation sans Busway (Tableau 73).

	2008	2008 P+R	Sans busway	2008 P+R scénario 2008 base 100	Sans Busway Scénario 2008 base 100
Distances parcourues (v.km)	12 196 613	12 183 181	12 132 422	99,9	99,5
Heures roulées (h)	231 183	229 781	226 726	99,4	98,1
Vitesses moyennes (km/h)	52,76	53,02	53,51	100,5	101,4
Heures perdues (v.h)	29 407	28 286	25 856	96,2	87,9
% de ralentissement (h.perdues)	12,72%	12,31%	11,40%		

Tableau 73 Evolution des indicateurs de trafic entre les scénarios avec/sans busway et P+R (Fouillé, 2011)

2.1.2.2. Effets à l'échelle de l'axe du Busway

A l'échelle du Busway, en intégrant les P+R, l'aménagement réduit le trafic sur son itinéraire (en bleu), il génère par contre des reports conséquents (en rouge) sur les itinéraires concurrents (Figure 81) :

- L'enchaînement Bd Joliot Curie, Rue Saint Jacques, Pont de Pirmil, Bd des Martyrs Nantais

- Le périphérique : et en particulier par l'Est et le Pont de Bellevue. Mais aussi sur d'autres voies : dans l'île de Nantes, sur le pont des 3 continents, la rue de Vertou ou encore l'enchaînement rue Ernest Sauvestre-rue Charles Rivière – rue Aristide Briand

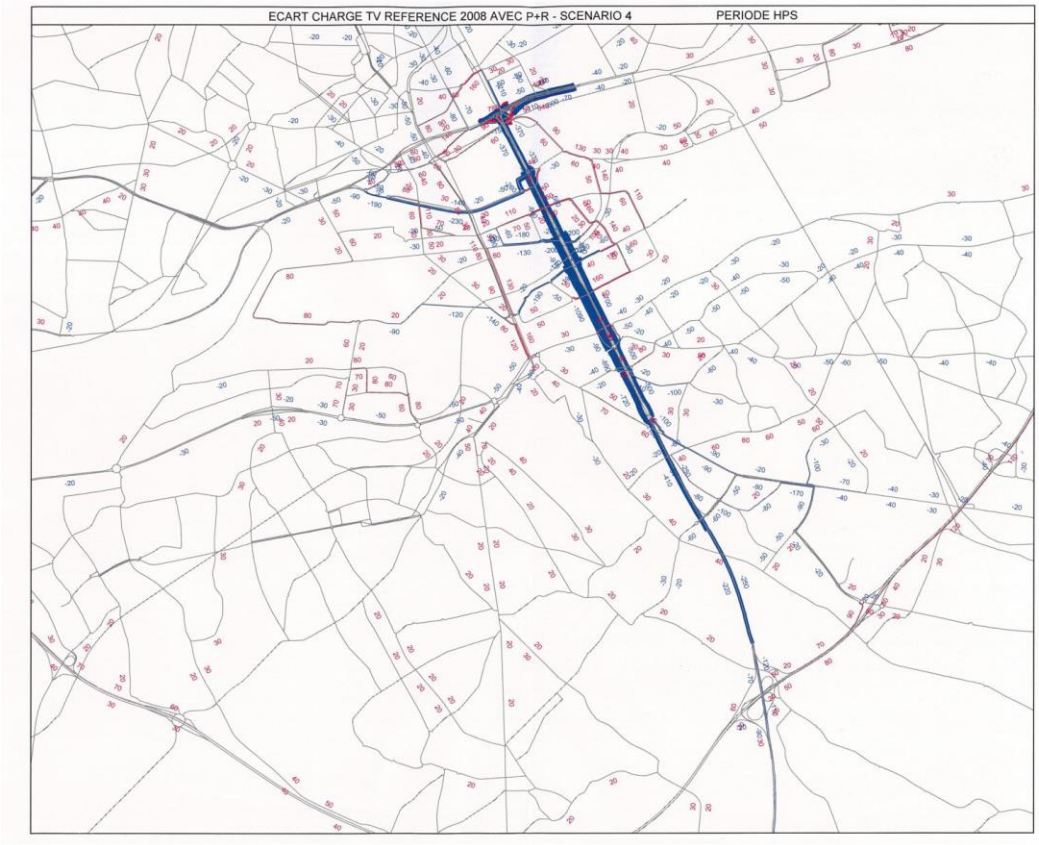


Figure 81 Ecart charge TV référence 2008 avec P+R et scénario sans Busway issu de (Fouillé, 2011)

2.1.3. Impact en termes d'émission

2.1.3.1. Analyse de l'impact global – modélisation des émissions de polluants avec COPERT

A l'échelle de l'ensemble de l'agglomération, l'impact du Busway sur les consommations et les émissions est très peu perceptible, inférieur à +1% (Tableau 74), cela est principalement dû à des reports de circulation.

	Conso en TEP	GES $T_{éq}$ CO2	CO en Kg	NOx en kg	NO2 en kg	PM10 en kg	PM2,5 en kg	SO2 en kg	COV en kg
Avant Busway	327 534	1 025 660	8 545 869	5 145 911	874 578	536 546	398 768	32 997	1 138 934
Après Busway	329 850	1 032 883	8 610 539	5 179 260	880 572	539 663	401 164	33 230	1 148 050
Evolution	< +1%	< +1%	< +1%	< +1%	< +1%	< +1%	< +1%	< +1%	< +1%

Tableau 74 Evolution des consommations et des émissions routières « avec/sans Busway »

Les émissions de polluant et les consommations de carburant sont réduites dans une proportion comparable à celle des distances. Le Tableau 75 montre la stabilité relative des ratios prenant la distance pour dénominateur :

	2008	2008 P+R	Sans busway
G Carburant/km	64,03	63,97	63,89
G NOx/km	1,028	1,027	1,026
G CO/km	0,826	0,825	0,823
G CO2 finaux /km	203,41	203,41	202,97
G COV/km	0,154	0,153	0,153
G PM/km	0,0464	0,0464	0,0463
Minutes/km	1,1373	1,1316	1,1213

Tableau 75 Facteurs d'émission des différents polluants pour les scénarios avec et sans Busway

2.1.3.2. Analyse de l'impact local – modélisation des émissions de polluants avec COPERT

A l'échelle locale de l'axe du Busway, on observe une diminution des émissions de NOx de 37%, ce qui équivaut à une diminution supérieure à 2 500 kg/km/an (10%) des émissions de NOx. Par contre, on constate une augmentation des émissions (environ 500 kg/km/an) sur des itinéraires de contournement.

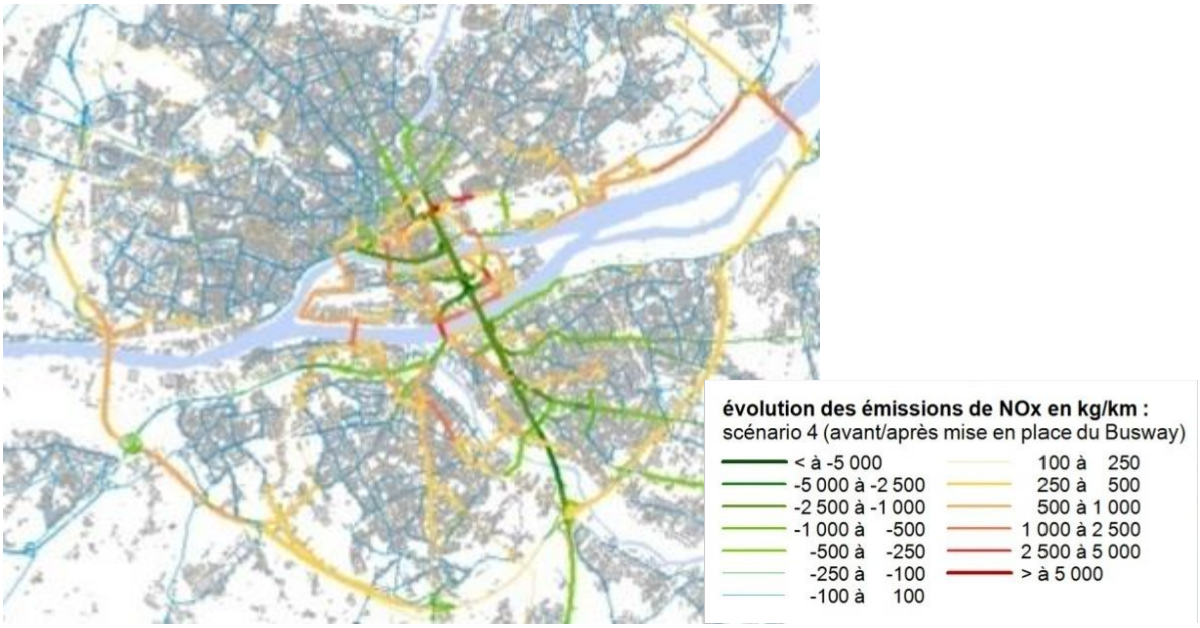


Figure 82 Evolution relative des émissions de NOx du transport routier – scénario « avec/sans Busway »

2.1.4. Conclusion sur l'impact de la mesure

Au niveau de l'agglomération, la situation Sans Busway induit un impact en termes d'émissions moins élevé que la situation avec Busway et avec Busway et P+R. La mise en place du Busway aurait ainsi amplifié la quantité d'émissions induite par le trafic.

Au niveau de l'axe du Busway, par contre, la mise en place du Busway a réduit les vitesses et le nombre de véhicules, à cause de la suppression de voies de circulation pour les VP. Néanmoins, une part des automobilistes a reporté son itinéraire sur les voies parallèles ou de contournement de cet axe. Les itinéraires se sont donc allongés pour ces déplacements, ce qui aboutit à une augmentation des

distances parcourues en voiture. Une autre part des automobilistes a changé de mode de déplacement dans le cas où leur temps de parcours était moins important avec ce nouveau mode. Ce transfert modal était l'un des objectifs de la mise en place du TCSP.

On observe donc une baisse des émissions de polluants sur l'axe du Busway, en relation avec les observations relatives au trafic mais une augmentation de ces émissions sur les voies de contournement.

L'ensemble de ces résultats est à prendre avec précaution puisque les écarts observés sont très faibles. On peut se demander si les variations observées ne se situent pas dans la marge d'incertitude des modèles et donc si nous pouvons établir un impact pertinent de cette mesure.

2.2. Représentation de l'impact de la mesure avec l'approche développée

2.2.1. Les effets relatifs à de la mise en place d'un TCSP + P+R

Dans un premier temps, nous tentons de définir les effets potentiels de la mise en place d'un TCSP + P+R en relation avec les retours d'expérience identifiés pour chaque mesure dans le 1er chapitre.

Nous avons identifié quatre mesures pouvant être reliées à la mise en place d'un TCSP et P+R :

- Mesure 1 : Augmentation de la fréquence des transports en commun
- Mesure 2 : Mise en site propre de lignes de transports en commun
- Mesure 5 : Augmentation de l'offre kilométrique du réseau de transports en commun
- Mesure 16 : Création de Parcs Relais sur des lignes de TC structurantes

Les différents retours d'expérience recensés pour chacune de ces mesures indiquent que les effets potentiellement observables sont :

Effets sur l'offre en TC :

- Diminution du temps de parcours et du temps d'attente des TC notamment aux heures de pointe durant lesquelles le trafic automobile dense pouvait contraindre la vitesse des TC lorsqu'ils circulaient sur la même voie

Effets sur la demande de déplacements :

- Augmentation de la fréquentation des TC (nouveaux déplacements et transfert modal : le potentiel d'usagers utilisant les TC suite à la mise en place de parcs relais serait de 5 à 7 % de la clientèle des axes lourds)
- Localisation des zones de destination des déplacements : attractivité nouvelle ou renforcée des zones desservies par le TCSP
- Attractivité renforcée de la zone du P+R
- Localisation des zones d'origine des déplacements : étalement urbain amplifié par les P+R (relocalisation des ménages sur le long terme), ce qui provoque une augmentation des longueurs de déplacements

Effets sur le trafic :

- Réduction de la capacité des voies VP liée à la mise en place d'un site propre
- Augmentation du nombre de kilomètres effectués en VP entre le lieu d'origine des déplacements et le P+R liée à la mise en place des parcs relais situés en périphérie urbaine

Effets sur le report modal :

- Transfert modal de la voiture particulière vers les transports en commun lié à la baisse du temps de parcours TC, transfert modal des TC vers la VP sur une partie du trajet sur la partie du trajet en amont du P+R
- Modification des pratiques de mobilité des usagers des P+R pour leurs autres déplacements (pratiques plus favorables aux TC)
- Sur le long terme : abandon des P+R lié à leur saturation

Effets sur la composition du parc de véhicules :

- La composition du parc de véhicules TC sur l'axe du TCSP est modifié : les véhicules sont généralement différents, la fréquence des véhicules est différente

2.2.2. Les stimuli affectés et leurs actions

L'approche que nous avons développée nécessite de décomposer les effets de la mesure sur les différents stimuli.

Nous cherchons donc à définir les effets de la mesure sur :

- La demande de déplacements en VP : Stimulus 1
- La capacité du réseau : Stimulus 2
- Et la composition du parc de véhicules : Stimulus 3

2.2.2.1. Stimulus 1 : demande de déplacements en VP

2.2.2.1.1. Action : Variation du nombre de déplacements en VP sur un axe (Case 4 – Sub-Case 2)

Les retours d'expérience permettent principalement d'identifier une baisse de la demande VP sur l'axe du Busway, liée au transfert modal de la VP vers les TC. Cette action peut s'apparenter au Case 4 – Sub-Case 2 développé dans l'approche.

Dans le cas d'application, nous avons observé que la variation d'émissions de polluants était faible en comparaison du nombre de déplacements modifiés car les déplacements supprimés sont dispersés sur l'ensemble de l'agglomération. Nous avons aussi constaté que les zones affectées par des baisses d'émissions de polluants se situent principalement autour du lien que nous avons perturbé.

On peut donc en déduire que l'impact du Busway se situera principalement au niveau de l'axe du Busway, avec une réduction des émissions de polluants. L'impact sera a priori faible pour chaque zone en comparaison avec le nombre de déplacements supprimés.

Dans notre cas d'application, nous disposons du scénario de référence intégrant le Busway. Afin de décrire l'impact du Busway, nous représentons donc un scénario sans Busway. Cela correspond à une augmentation du nombre de déplacements sur l'axe du Busway. Nous supposons que cette variation est de l'ordre de +50% du nombre de déplacements initialement présents sur cet axe puisque d'une part une certaine proportion de déplacements était effectué en VP plutôt qu'en TC et

d'autre part puisque le nombre de voies de circulation VP était deux fois plus important. Ce cas peut donc être assimilé au Case 4 – Sub-Case 2 – Simulation +50% (représenté dans l'annexe 9). Au niveau de l'agglomération, la variation de CO_2 est de +0,67 tonnes et la variation de NOx de +0,0023 tonnes.

2.2.2.1.2. Action : variation de l'attractivité d'une zone (Case 3 : Sub-Case : Suburban Site)

Des effets plus marginaux sont identifiés d'après les retours d'expérience comme l'augmentation de la demande VP des zones d'origine vers la zone du P+R. Cette action peut s'apparenter au Case 3 : Suburban Site développé dans l'approche.

Dans le cas d'application, nous avons observé que l'impact en termes d'émissions et par zone est assez élevé du fait de la longueur moyenne élevée des déplacements. Ils concernent ainsi des déplacements effectués en périphérie de la ville. Les zones impactées sont principalement situées dans les principales zones des déplacements affectés. Elles sont ainsi situées dans et autour de la zone perturbée.

On peut donc en déduire que l'impact en terme d'émission au niveau local n'est pas négligeable même si la variation du nombre de déplacements est faible, notamment à cause du trafic engendré. L'impact se concentre au niveau et autour des zones des P+R.

On assimile donc cet effet au Case 3 – Sub-Case : Suburban Site et à la simulation -25% de déplacements en destination de la zone de P+R afin de représenter la situation sans Busway. La variation semble élevée pour l'effet à représenter, nous n'appliquerons le cas qu'une seule fois (et non trois, puisque trois P+R sont représentés sur la ligne). Au niveau de l'agglomération, la variation de CO_2 est de -0,81 tonnes et la variation de NOx de -0,0033 tonnes.

2.2.2.1.3. Effets non représentés par l'approche et justification

Un des effets relevés par les retours d'expérience est l'induction de la demande suite à la mise en place d'une infrastructure. Dans ce cas, la demande induite concerne les déplacements TC or nous avons défini un stimulus de variation de la demande VP et non de la demande TC car nous supposons que cette dernière demande a un impact très faible sur les émissions de polluants. Cet effet n'est donc pas représenté.

Le changement de destination des déplacements suite à l'attractivité accrue du centre ville, grâce à la nouvelle desserte, n'est pas représenté, pour les mêmes raisons que le précédent effet. Par contre, ce changement de destination peut aussi être accompagné d'un transfert modal (de la VP vers les TC). Une baisse de la demande en déplacements VP sur les OD initiales devrait être observée. Cet effet n'est pas représenté car il est difficile de savoir quelles sont les OD concernées et car l'effet est relativement faible.

2.2.2.2. Stimulus 2 : Capacité du réseau, Action : variation de capacité sur une pénétrante (Case 4)

La mise en place d'un Transport en Commun en Site Propre induit la création d'une voie réservée aux transports en commun. Cette voie est généralement créée en supprimant une voie pour le trafic VP. La restriction de capacité sur l'axe du Busway peut s'apparenter au Case 4 développé dans l'approche. Néanmoins, ce cas présente l'impact de la modification de la capacité sur une pénétrante non congestionnée, alors que l'axe du Busway est un axe initialement (avant la mise en place du

Busway) congestionné. On peut alors tenter d'assimiler ce cas à la modification de la capacité d'un axe initialement congestionné comme le cas du périphérique.

Dans le cas d'application, nous avons observé que l'impact en termes d'émissions et par zone est assez élevé sur la zone comprenant les voies affectées. Pour une baisse de la capacité, les zones pour lesquelles on observe une diminution de l'impact se situent autour du tronçon affecté et les zones pour lesquelles on observe une augmentation de l'impact se situent sur les voies de contournement de la voie perturbée.

On peut donc en déduire que l'impact est significatif sur l'axe du Busway avec des baisses d'émissions de polluants. Par contre, les voies de contournement de cet axe, qui sont situées relativement à proximité de cet axe, contrairement au cas de la réduction de capacité sur périphérique, subissent une augmentation des émissions de polluants suite à des reports de trafic.

Afin de déterminer l'impact au niveau de l'agglomération, nous pouvons donné un premier ordre de grandeur de la variation des émissions de polluants, en assimilant le cas sans Busway au Case 4 et à la simulation +10%. En effet, la mise en place du Busway a provoqué une baisse de la capacité de la voirie. La base de données (en annexe 9) nous indique ainsi que le scénario sans Busway présente donc au niveau de l'agglomération une variation de -0,05 tonne de CO_2 et de -0,0002 tonne de NOx par rapport au scénario de référence avec Busway. Cependant, comme nous l'avons déjà expliqué, cette variation devrait être plus élevée.

2.2.2.3. Stimulus 3

L'application de cette mesure s'est accompagnée d'un changement du type de véhicules circulant sur cette voie. Les bus traditionnels ont été remplacés par des bus souvent articulés et circulant au GNV. Cela induit une modification locale du parc des TC. Cet effet pourrait s'apparenter au case 2 de modification locale du parc, néanmoins, notre application ne concerne pas une zone mais une pénétrante. De plus, nous avons mentionné dans l'explicitation de notre approche que les déplacements TC ainsi que la composition locale de leur parc était mal prise en compte dans la chaîne de modèles que nous utilisons. Il nous est donc impossible dans l'état actuel de caractériser les effets de cette mesure avec l'approche développée. On peut néanmoins mentionné que le trafic des TC est négligeable dans le bilan de l'impact des émissions au niveau de l'agglomération (ce qui justifierait sa non prise en compte). Par contre, au niveau local, la modification du parc et du trafic TC peut avoir un impact sur les émissions de polluants non négligeable.

2.2.3. Impact global en termes d'émissions

Afin de calculer l'impact global de la mesure, nous avons suggéré de définir des pourcentages d'impact total pour chaque stimulus. Nous n'avons par contre pas déterminé de méthode permettant de définir ces pourcentages.

Nous tentons de définir ces pourcentages, au regard des retours d'expérience, pour cet exemple d'application. Nous pouvons dans un premier temps définir un impact principal de réduction des émissions de polluants sur l'axe du TCSP. Cet impact est induit par d'une part la baisse de capacité sur l'axe et d'autre par la baisse du trafic TC sur l'axe lié au transfert modal de la VP vers les TC. Des investigations complémentaires seraient néanmoins nécessaires afin de déterminer la relation entre ces deux impacts. Les deux impacts peuvent par exemple être additionnés ou alors l'un peut réduire l'impact de l'autre (l'impact global ne pourrait donc pas être obtenu en additionnant les impacts sur les deux stimuli).

Nous avons défini une hausse des émissions de polluants située sur les voies de contournement lié à la baisse de capacité sur l'axe principal. Au niveau de l'agglomération cet impact doit être combiné avec la baisse des émissions de polluants sur l'axe du TCSP. La définition du type d'agrégation de ces deux impacts nécessite des investigations complémentaires.

Nous avons déterminé des impacts que nous pouvons qualifier de marginaux à l'échelle de l'agglomération comme l'augmentation du trafic VP entre les origines des déplacements. Par contre, l'impact des P+R est sans doute masqué par l'impact majoritaire au niveau global. Néanmoins, au niveau local cet impact peuvent être important. La détermination de l'impact global devrait donc intégrer un indicateur permettant de déterminer l'intensité et le type d'impact au niveau local.

Grâce à l'identification des effets aux cas que nous avons simulé, nous avons obtenu trois variations d'émissions de polluants (une pour chacun des cas). À défaut de répartition de chaque effet dans l'impact global, nous additionnons ces trois variations, nous obtenons des variations de CO_2 de -0,19 tonne et de NOx de -0,0012 tonne pour le scénario sans Busway. Au niveau de l'agglomération, les variations seraient donc de -0,09% pour le CO_2 et de -0,10% pour les NOx. On observe néanmoins, que l'effet de la variation de l'attractivité des P+R semble majoritaire, ce qui est contraire avec la réalité. Cela vient sans doute du fait que l'effet de la variation de la capacité est très faible car le cas simulé ne correspond pas au cas de l'axe du Busway qui est fortement congestionné.

2.3. Comparaison des deux approches

Les deux approches ont permis de déterminer les impacts sur les émissions de polluants au niveau de l'axe du Busway et sur les voies de contournement.

Les effets sur la composition du parc de véhicules TC ne sont pas représentés dans les deux approches à cause des contraintes des modèles. L'approche développée ne peut en effet pas améliorer la représentation des stimuli par les modèles. L'intérêt de cette approche est avant tout de déterminer les impacts par une approche simplifiée, les contraintes des modèles ne peuvent être dépassées.

L'impact global en termes d'émissions de polluants est du même ordre de grandeur pour les deux méthodes. Au niveau de l'agglomération, on obtient ainsi des variations de moins de -1% pour la situation sans Busway et sans P+R en comparaison avec la situation avec Busway.

L'approche simplifiée permet de caractériser l'ensemble des effets des mesures (même des effets qui sont observables au niveau local ou des effets qui sont d'une faible intensité) alors que l'approche classique n'appréhende que les effets prépondérants (le transfert modal et la réduction de capacité dans l'exemple du TCSP + P+R). Le fait de décomposer les effets de la mesure en se basant sur des retours d'expérience permet d'appréhender l'ensemble des effets à différentes échelles spatiales et temporelles. Le fait d'intégrer les effets des mesures par le biais des stimulus permet de prendre en compte des effets qui ne peuvent pas être représentés dans les modèles car le modèle n'est pas capable de représenter les composantes affectées.

Par contre l'approche simplifiée n'est applicable qu'au cas de Nantes, car la localisation des impacts est dépendante du réseau. Au contraire l'approche classique peut être utilisée pour d'autres agglomérations. La caractérisation de la relation entre le stimulus et l'impact (comme cela a été fait pour le stimulus 1 à partir des longueurs moyennes de déplacements) permettrait d'appliquer l'approche à n'importe quel type d'agglomération, grâce à la simulation de la seule situation de référence.

L'approche développée comporte différentes lacunes par rapport à l'approche classique mais la finalisation du cadre de l'approche permettrait d'enrichir la dernière méthode et ainsi de quantifier de manière plus précise les impacts. Le développement d'autres cas d'application comme un cas de variation de la demande VP sur une pénétrante congestionnée permettrait d'enrichir la caractérisation

des impacts. La formulation de la relation entre le stimulus et l'impact permettrait d'avoir des impacts quantifiés.

Conclusion

Nous avons introduit un cadre méthodologique générique pour l'évaluation des mesures de gestion des déplacements et du trafic. Ce cadre permet de représenter les mécanismes d'action en déclinant les composantes suivant la localisation de leurs actions. Nous avons restreint l'ensemble des composantes à trois actionneurs principaux (stimulus) que sont : la demande en déplacements VP, la capacité de la voirie et la composition du parc de véhicules. Cela nous conduit à réaliser une analyse cause-effet relativement rapide afin de représenter les effets de chaque mesure à des échelles différentes.

Nous avons défini différents scénarios représentant les différentes actions de chaque stimulus. L'analyse de l'impact de chacun de ces scénarios a permis de caractériser l'intensité de l'impact et d'identifier la localisation des zones impactées.

Pour chaque stimulus, l'impact en termes d'émissions dépend de l'intensité du stimulus, de la localisation de la zone perturbée et du type d'action du stimulus. Pour le stimulus 1 (la demande de déplacements VP), nous avons défini une relation, basée sur la longueur moyenne des déplacements afin de déterminer l'impact global de chaque action du stimulus. À l'échelle de la zone, nous avons pu déterminer différents impacts. Lorsque les déplacements modifiés sont concentrés sur peu d'OD, l'impact semble être important et la surface impactée semble faible. Les zones impactées sont principalement concentrées dans les zones de destination des déplacements quand l'attraction d'une zone est modifiée. La surface de la zone perturbée semble influencer la localisation des zones impactées et l'impact maximal observé sur une zone. Enfin, la longueur moyenne des déplacements modifiés peut expliquer la valeur de l'impact dans certains cas. Pour le stimulus 2 (la capacité du réseau), la variation de l'impact dépend de la modification de la vitesse et du trafic qui sont induits par l'affectation du trafic. La variation de l'impact semble dépendre de la localisation de la variation de la capacité et des caractéristiques initiales de la zone. Par exemple, une modification de la capacité dans le centre ville ou sur le périphérique induit des variations d'impact sur toute l'agglomération. Au contraire, une modification de la capacité sur les voies non congestionnées induit un très faible impact. Pour le Stimulus 3 (la composition du parc de véhicules), nous observons une augmentation de la surface impactée en relation avec l'augmentation de la surface de la zone perturbée. L'impact semble dépendre du polluant étudié.

L'ensemble de ces résultats permet de déterminer les impacts en termes d'émissions pour des effets types sur les stimulis. L'exemple (sur la mise en place d'un TCSP + P+R) développé dans la deuxième partie démontre comment utiliser ces effets types pour l'analyse de l'impact d'une mesure. Nous avons d'une part identifié l'ensemble des effets de cette mesure puis nous avons déterminé les effets sur chacun des trois stimuli. L'identification de chaque effet à un cas d'application nous a permis de déduire l'impact de chaque action de la mesure.

La comparaison de l'approche classique (développée dans le projet EvalPDU et basée sur une chaîne de modélisation) avec l'approche développée dans ce chapitre révèle que les deux approches permettent de déterminer les impacts sur les émissions de polluants au niveau de l'axe du Busway et sur les voies de contournement. Certains effets (comme les effets sur la composition du parc de véhicules TC) n'ont par contre pas pu être représentés dans les deux approches à cause des limites des modèles. L'approche simplifiée a permis de caractériser l'ensemble des effets des mesures (même des effets qui sont observables au niveau local ou des effets qui sont d'une faible intensité) alors que l'approche classique n'appréhende que les effets prépondérants (le transfert modal et la réduction de capacité dans l'exemple du TCSP + P+R). Par contre l'approche simplifiée n'est applicable qu'au cas de Nantes, car la localisation des impacts est dépendante du réseau. La caractérisation de la relation entre le stimulus et l'impact (comme cela a été fait pour le stimulus 1 à partir des longueurs moyennes de déplacements) permettrait d'appliquer l'approche à n'importe quel type d'agglomération, grâce à la simulation de la seule situation de référence. L'approche développée comporte différentes lacunes par rapport à l'approche classique mais la finalisation du cadre de l'approche permettrait d'enrichir la

dernière méthode et ainsi de quantifier de manière plus précise les impacts. Le développement d'autres cas d'application comme un cas de variation de la demande VP sur une pénétrante congestionnée enrichirait la caractérisation des impacts. La formulation de la relation entre le stimulus et l'impact permettrait d'avoir des impacts quantifiés.

Nous avons donc défini le cadre théorique d'une méthode simplifiée, facilement exportable à faible coût et générique pour une large palette de mesures pouvant ainsi permettre l'évaluation d'un grand nombre de variantes.

Conclusion et perspectives

Le principal objectif de ce travail de recherche était de contribuer à la réflexion sur l'évaluation environnementale des mesures de gestion des déplacements et du trafic. Ces mesures sont mises en place d'abord dans un souci d'organisation des déplacements effectués sur un territoire mais aussi de maîtrise des déplacements afin de limiter leur impact sur l'environnement. Ce dernier objectif tend à être dominant du fait de l'émergence des problématiques environnementales liées au trafic et des réglementations strictes (et donc des pénalités financières pour ceux qui ne les respectent pas) en termes d'émissions de polluants établies par l'Union européenne. La nécessité de mettre en place des mesures efficaces induit une connaissance approfondie de l'impact de ces mesures sur les émissions de polluants. La réflexion menée au cours de cette thèse se concentre sur les méthodes d'évaluation et notamment sur l'utilisation des outils de modélisation, outils les plus pertinents afin de représenter des impacts localisés à l'échelle de l'agglomération même si, comme nous l'avons vu, ceux-ci présentent de nombreuses limites.

Pour cela, nous avons réalisé une analyse fine des objets à évaluer, des méthodes et outils existants et des entités que sont le trafic et les émissions de polluants avant de proposer le développement d'un cadre d'évaluation approprié à l'évaluation des mesures de gestion des déplacements et du trafic.

Ainsi, le premier chapitre présente une mise à plat des différentes mesures. On recense une quarantaine de mesures pouvant être mises en œuvre sur un territoire urbain. Les mesures se distinguent de par leurs échelles spatiales et temporelles d'application, les leviers d'action mis en œuvre, les cibles d'action et les moyens de transport concernés… Les retours d'expérience des impacts de ces mesures font apparaître des impacts variés en termes d'intensité, d'échelles spatiales et temporelles, de localisation, de contributeur (nombre de déplacements trafic, composition du parc de véhicules…)... Une classification des mesures suivant ces différents paramètres est ainsi proposée dans cette thèse. Cette première analyse permet d'orienter les réflexions sur l'évaluation et de faire émerger différentes problématiques comme l'évaluation des différents effets (et des phénomènes associés) d'une mesure, la représentation des différents échelles temporelles et spatiales, la variété des retours d'expérience pour une même mesure suivant les territoires…

Le deuxième chapitre a mis en évidence les limites et les avantages des méthodes existantes. Ainsi, l'évaluation des mesures est complexe car les phénomènes en jeu sont multiples (trafic, émissions, dispersion, transformations physico-chimiques, influence forte et variabilité de la météorologie, etc.). La difficulté tient en l'identification de l'impact propre d'une mesure en faisant abstraction de l'évolution globale du contexte urbain et de l'incidence d'autres mesures. Une autre difficulté particulière de l'évaluation tient à l'échelle à laquelle elle peut être faite. A l'échelle de l'agglomération, les impacts sont souvent très faibles compte tenu des nombreuses autres contributions et du caractère très local ou très temporel de nombreuses mesures. Une conclusion apparaît clairement : aucune méthode n'est totalement pertinente et ne permet d'apporter des éléments d'évaluation pour l'ensemble des mesures et de leurs effets décrits dans le premier chapitre. Néanmoins, nous avons identifié que l'utilisation des outils de modélisation permettait de représenter des indicateurs continus (de trafic et d'émissions de polluants) sur un territoire aussi grand qu'une agglomération. Les résultats de ce chapitre nous ont donc conduit à focaliser notre analyse sur les outils de modélisation dans les chapitres suivants.

Dans la troisième partie, nous présentons différents modèles de trafic et d'émission de polluants. La pertinence de ces modèles pour évaluer l'impact environnemental des mesures est analysée en fonction des échelles spatio-temporelles d'application, des données d'entrées, des types de polluants estimés… Les modèles statiques de déplacements sont les plus utilisés à l'échelle de

l'agglomération. Ils sont en effet adaptés à l'étude de réseaux sur des échelles relativement larges, et permettent de prendre en compte les localisations d'activités (habitats, emplois, etc.), l'évolution des réseaux, l'évolution démographique et prospective, etc. Ces modèles n'ont cependant pas comme objectif premier (et ne devraient sans doute pas être utilisés à cet effet) d'évaluer finement les conditions de trafic dans la rue. Ils présentent également des limites quant à la représentation des comportements, la prise en compte du trafic de marchandises, etc. Les modèles d'émissions de polluants basés sur la vitesse moyenne sont les plus utilisés pour les évaluations environnementales. L'approche est cependant frustre car elle ne repose que sur des données agrégées qui ne permettent pas des analyses fines ou locales, et sur la vitesse moyenne qui ne permet pas de décrire finement les conditions de trafic. Cependant les modèles couvrent souvent la plupart ou tous les phénomènes d'émission et des polluants et prennent en compte la connaissance de la composition du parc à l'échelle de l'agglomération. Cette approche est donc la plus à même pour évaluer des mesures qui ont des effets et des impacts à l'échelle de l'agglomération.

Les mesures ont des effets sur deux « entités » différentes que sont les déplacements/le trafic (effet sur la vitesse par exemple) et les émissions de polluants (amélioration technologique des véhicules par exemple). Afin d'évaluer ces mesures, il est donc nécessaire de représenter leurs effets sur ces deux « entités ». Dans le quatrième chapitre, nous avons décliné les composantes de ces entités et tenté d'identifier leur représentation dans les modèles. Nous avons pu identifier des composantes déterminantes communes aux deux entités. Ainsi la variation de la quantification de la demande induit des écarts de trafic et d'émissions de polluants non négligeables alors que cette quantification présente des incertitudes liées notamment à l'estimation des déplacements de transit, d'échange et des véhicules de marchandises. Les volumes de trafic déduits de cette quantification de déplacements est par ailleurs une composante déterminante de l'entité émissions de polluants. Cette relation est représentée par les facteurs d'émission qui présentent comme nous l'avons vu des approximations plus ou moins élevées suivant les polluants. La représentation de la vitesse et notamment de la dynamique du trafic est particulièrement négligée dans les modèles statiques de déplacements. Or la variation spatio-temporelle de ces vitesses et la qualité de la représentation des vitesses dans les modèles sont des éléments déterminants pour un certain nombre de polluants. Enfin, on peut citer des composantes qui ne sont pas représentées dans les modèles ou qui le sont mal comme la localisation du trafic de marchandises, les déplacements en modes doux (vélo, marche à pied), les facteurs d'émission des nouvelles motorisations… alors que celles-ci constituent des leviers d'actions de certaines mesures.

A l'issue de ces quatre premiers chapitres, il nous est apparu indispensable de réfléchir à une nouvelle approche d'évaluation permettant d'enrichir la représentation des impacts des mesures. Les quatre premiers chapitres nous ont fourni des états des connaissances riches notamment sur les effets des mesures, les principes des outils d'évaluation ainsi que la représentation des effets dans ces outils. À partir de ces connaissances, nous pouvons proposer une approche qui permet de représenter les mécanismes d'action d'une manière générique pour l'ensemble des mesures et qui adopte un positionnement au niveau d'effets intermédiaires. Ainsi nous avons identifié trois actionneurs, qui sont des points d'entrée particuliers des modèles : la demande en déplacements VP, la capacité de la voirie et la composition du parc de véhicules. Nous avons défini différents scénarios représentant les différentes actions de chaque stimulus. L'analyse de l'impact de chacun de ces scénarios a permis de caractériser l'intensité de l'impact et d'identifier la localisation des zones impactées. L'ensemble de ces résultats permet de déterminer les impacts en termes d'émissions pour des effets types sur les stimuli. L'exemple (sur la mise en place d'un TCSP + P+R) démontre comment utiliser ces effets types pour l'analyse de l'impact d'une mesure. L'identification de chaque effet à un cas d'application nous a permis de déduire l'impact de chaque action de la mesure. L'approche a permis de déterminer les impacts sur les émissions de polluants au niveau de l'axe du Busway et sur les voies de contournement tout comme l'approche classique (développée dans le projet EvalPDU et basée sur une chaîne de modélisation). L'approche simplifiée a permis de caractériser l'ensemble des effets des mesures (même des effets qui sont observables au niveau local ou des effets qui sont d'une faible intensité) alors que l'approche classique n'appréhende que les effets prépondérants (le transfert modal et la réduction de capacité dans l'exemple du TCSP + P+R). L'approche simplifiée n'est néanmopins applicable qu'au cas de Nantes, car la localisation des impacts est dépendante du réseau. La

caractérisation de l'ensemble des relations, qui sera à développer, permettra d'appliquer l'approche à n'importe quel type d'agglomération, grâce à la simulation de la seule situation de référence. L'approche développée comporte différentes lacunes par rapport à l'approche classique mais la finalisation du cadre de l'approche permettrait de quantifier de manière plus précise les impacts. Nous avons donc défini le cadre théorique d'une méthode simplifiée, facilement exportable à faible coût et générique pour une large palette de mesures pouvant ainsi permettre l'évaluation d'un grand nombre de variantes.

***

Notre contribution témoigne donc du fait que les évaluations environnementales des mesures de gestion des déplacements et du trafic posent, à l'heure actuelle, de multiples questionnements relatifs à leur exhaustivité et à leur pertinence. Cela vient s'ajouter à un contexte économique qui tend à réduire drastiquement les dépenses publiques et par là même les investissements dans les infrastructures de transport. L'évaluation environnementale a donc dans ce cadre là une nouvelle responsabilité conduisant à définir les mesures les plus efficaces à moindre coût. D'autre part, les réglementations européennes en termes de qualité de l'air, s'accompagnent en cas de non respect de pénalités financières. La mise en place de mesures permettant de réduire les zones de dépassement de seuils est ainsi primordiale. Leur évaluation doit donc être, avant leur mise en place, particulièrement pertinente et spatialisée afin que les mesures mises en place soient les plus efficaces. Le travail réalisé dans cette thèse a permis d'entamer une réflexion sur ces évaluations grâce à la mise à plat de nombreux éléments (mesures, effets, méthodes, outils) nécessaires à la connaissance de cette thématique. L'approche développée, malgré un certain nombre de faiblesses, permet d'envisager une méthode d'évaluation plus adaptée à l'évaluation de mesures individuelles, spatialisées et présentant un large spectre d'effets. Cette approche peut ainsi, à faible coût, rendre l'évaluation plus pertinente et par là même répondre aux enjeux actuels de l'évaluation (contexte économique, réglementation européenne).

***

Comme nous l'avons précisé, l'approche développée nécessite quelques points d'approfondissement afin que son utilisation soit optimale.

L'approche est principalement basée sur des conjectures que nous avons donc démontrées par le biais de quelques exemples. Il serait souhaitable de démontrer l'approche sur un plus large spectre de mesures. Cela permettrait d'une part de valider notre conjecture et d'autre part d'identifier un ensemble plus exhaustif de stimuli et de leurs différentes actions. Afin de consolider la démarche, il est nécessaire d'envisager la formalisation d'autres stimuli. Nous pensons notamment à un stimulus qui pourrait être le temps de parcours en VP. Il conduirait à caractériser les effets des mesures agissant sur les vitesses de circulation par exemple. L'exemple sur le TCSP nous a par ailleurs montré certains manques dans les définitions d'actions. On peut citer le cas de la capacité sur une voie qui a priori a des impacts différents suivant que celle-ci soit congestionnée ou non. Ces deux cas doivent donc apparaitre dans la base de l'approche. Il en est de même pour la composition du parc de véhicules qui manque de cas d'applications suivant les actions du stimulus. La définition d'autres exemples permettrait d'appréhender une déclinaison plus exhaustive de ces actions.

L'approche se base sur les effets des mesures qui sont établis grâce à des retours d'expérience. Cependant, les différents contextes et territoires ont une large influence sur les retours d'expérience. Nous avons ainsi pu remarquer dans le premier chapitre qu'une mesure peut avoir différents effets

suivant ces contextes. Il serait donc envisageable et souhaitable de constituer une typologie des contextes. Celle-ci permettrait d'appréhender les effets des mesures et leur intensité selon ce contexte.

Dans les principes de l'approche, nous avons défini que les effets sur chaque stimulus peuvent être affectés d'un coefficient permettant de différencier le poids de chaque effet dans l'impact global de la mesure. Ces coefficients n'ont pas été pris en compte dans notre analyse et nous avons supposé en première approche que certaines mesures pouvaient avoir des impacts importants masquant les impacts d'autres mesures ayant des impacts peu significatifs. Néanmoins, un prochain travail devrait se pencher sur cette question d'une part de l'interaction des effets d'une mesure et d'autre part de l'interaction des impacts de différentes mesures mises en œuvre sur un même territoire.

Enfin, les éléments essentiels de l'approche qu'il reste à développer sont les relations entre les stimuli et les impacts. Nous avons tenté de le faire pour le Stimulus 1 mais nous avons vu que la relation nécessitait d'être enrichie par d'autres critères et notamment des critères de vitesse. La formulation de l'ensemble des relations permettrait d'obtenir une approche transposable à un large panel de mesures et sur d'autres agglomérations.

***

Si le travail amorcé dans cette thèse apporte une contribution à la réflexion sur l'évaluation environnementale des mesures de gestion des déplacements et du trafic, il pose dans le même temps de nouvelles questions et ouvre de nouvelles perspectives de recherche.

Au vu des impacts de chaque mesure, on se demande ainsi s'il est finalement possible de dégager des actions type à fort impact environnemental. Quelle politique adoptée pour que les impacts de la mobilité sur l'environnement soient réduits et qu'en même temps les besoins en terme de mobilité soient satisfaits pour chaque individu ? A l'heure actuelle, les faibles variations des impacts sont majoritairement attribuables à l'amélioration technologique des véhicules mais on est en droit de se demander si les améliorations peuvent encore être significatives ou si nous avons atteint un pic. La proportion attribuable aux évolutions du parc automobile serait alors de moins en moins importante dans la réduction des émissions de polluants, quelles seraient donc leurs évolutions futures si les mesures mises en place ont de faibles impacts ?

Une autre problématique émerge à l'heure actuelle en terme d'évaluation environnementale des politiques de transport concernant l'imbrication des différents programmes sur un même territoire : plan climat, ScOT, PPA, Schéma régional Air Energie … On est donc en droit de se demander si on va vers une évaluation intégrée de ces plans et dans ce cas là comment envisager leur évaluation commune.

Concernant la question plus technique des modèles, les réflexions présentées dans cette thèse ont mis en évidence de nombreuses problématiques que nous n'avons pas réellement discutées. La difficulté de la validation des modèles implique indubitablement la question de la validité des résultats de l'évaluation. Les variations observées entre deux scénarios étant extrêmement faibles, on est sans doute dans les marges d'incertitude des modèles. Or la plupart des analyses prennent ces résultats pour établis et comme éléments de décision. Mais la difficile caractérisation des incertitudes des modèles utilisés rend compliqué l'identification d'une marge d'incertitude globale dans laquelle l'ensemble des résultats ne serait pas exploitable. Cette réflexion me semble très intéressante à développer, notamment avec l'approche développée dans cette thèse qui pourrait constituer un cadre adapté pour l'évaluation des incertitudes.

Bibliographie

Abadie, G. (2003). Le péage urbain de Londres. *Notes de synthèse du SES*.

Acutt, M. Z., & Dodgson, J. S. (1997). Controlling the environmental impacts of transport: matching instruments to objectives. *Transportation Research Part D, 2*(1), 17-33.

Ademe. Les Centres de Distribution Urbaine : quels outils d'évaluation environnementale ?

Ademe. (2010a). *Etat de l'art Les Zones Zero Emission (Low Emission Zones) à travers l'Europe : déploiement, retour d'expérience, évaluation d'impact et efficacité du système*.

Ademe. (2010b). *Logistique urbaine : agir ensemble*.

Ademe, Certu, DTT, & Gart. (2002). *Bilan des PDU de 1996 à 2001, Plans de Déplacements Urbains, De la loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie à la loi relative à la solidarité et au renouvellement urbain*.

Ahn, K., Rakha, H., Trani, A., & Van Aerde, M. (2002). Estimating Vehicle Fuel Consumption and Emissions based on Instantaneous Speed and Acceleration Levels. *Journal of Transportation Engineering, 128*(2), 182-190.

Air pays de la Loire. (2006). *Rues "canyons" de l'agglomération angevine - qualité de l'air en 2002 et 2015 - impact du Plan de Déplacements Urbains, des projets routiers et des transports collectifs*.

Air Pays de la Loire. (2012). *Impact d'un PDU sur les émissions polluants, la qualité de l'air et les consommations d'énergie à l'échelle de l'agglomération et des rues - Livrable L3.4 : rapport de fin de tâche - Projet EvalPDU*.

AIUTO. (1999). *AIUTO Final Report*.

Akçelik, R. (1991). Travel Time Functions for Transport Planning Purposes: Davidson's Function, its Time-Dependent Form and an Alternative Travel Time Function. *Australian Road Research, 21*(3), pp. 49-59.

An, F., Barth, M., Scora, G., & Ross, M. (1999). Modal-Based Intermediate Soak-Time Emissions Modeling. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1664*, 58-67.

André, M., Fallah, M., Berger, C., Montenon, A., & Brutti-Mairesse, E. (2012). *Evaluation des PDU - problématique du calcul des émissions de polluants du trafic*.

André, M., Fantozzi, C., & Adra, N. (2006). *Development of an approach for estimating the pollutant emissions from road transport at a street level*. Bron, France.

André, M., & Hammarstom, U. (2000). Driving speeds in Europe for pollutant emissions estimation. *Transportation Research Part D, 5*, 321-335.

André, M., Roche, A. L., & Bourcier, L. (2012). *Statistiques de parcs et trafic pour le calcul des émissions de polluants des transports routiers*. Bron, France.

Arfaoui, A. (1999). *Estimation des matrices origine-destination à partir des comptages : étude de quelques modèles*: INRETS.

Arnott, R., De Palma, A., & Lindsey, R. (1993). A Structural Model of Peak-Period Congestion: A Traffic Bottleneck with Elastic Demand. *The American Economic Review, 83*(1), 161-179.

ATEMA Conseil, MHC Conseil, & ADEME. (2005). *Evaluation nationale des Plans de Déplacements Entreprise*. Paris.

AURAN. (2004). *46 000 déplacements quotidiens en vélo - Profil des utilisateurs*.

Bakis, H., Vidal, P., & Veler, B. (2007). Les TIC seraient-elles en partie responsables de la baisse tendancielle des mobilités quotidiennes dans les agglomérations ? *Networks and Communication Studies, 21*(n° 3-4), 407-4010.

Bamberg, S., & Schmidt, P. (1999). Regulating Transport: Behavioural Changes in the Field. *Journal of Consumer Policy, 22*, 479-509.

Bamberg, S., & Schmidt, P. (2001). Theory-Driven Subgroup-Specific Evaluation of an Intervention to Reduce Private Car Use. *Journal of Applied Social Psychology, 31*(6), 1300-1329.

Bamberg, S., & Schmidt, P. (2003). INVENTIVES, MORALITY, OR HABITS? Predicting Students' Car Use for University Routes With the Models of Ajzen, Schwartz, and Triandis. *Environment and Behavior, 35*(2), 264-285.

Banister, D. (2008). The sustainable mobility paradigm. *Transport Policy, 15*, 73-80.

Barth, M., An, F., Younglove, T., Scora, G., & Levine, C. (2000). *Development of a Comprehensive Modal Emissions Model*.

Barth, M., & Boriboonsomsin, K. (2009). Energy and emissions impacts of a freeway-based dynamic eco-driving system. *Transportation Research Part D*(400-410).

Barth, M., Scora, G., & Ypunglove, T. (1999). Estimationg Emissions and Fuel Consumption for Different Levels of Freeway Congestion. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1664*.

Beevers, S. D., & Carslaw, D. C. (2005). The impact of congestion charging on vehicle speed and its implications for assessing vehicle emissions. *Atmospheric Environment, 39*, 6875-6884.

Boiteux, M. (2001). *Transports : choix des investissements et coût des nuisances*.

Bonnel, P. (2001). *Prévision de la demande de transport*: Laboratoire d'Economie des Transports, ENTPE, Université Lumière Lyon 2, CNRS.

Bonnel, P., Caubel, D., & Massot, M.-H. (2003). *Efficacité spatiale des réseaux de transport dans une perspective de réduction drastique de l'usage de la voiture - Application aux zones denses parisenne et lyonnaise*. Paper presented at the 34ème Colloque de l'A.S.R.D.L.F. Concentration et dégrégation, dynamiques et inscriptions spatiales.

Bonnel, P., Chapleau, R., Lee-Gosselin, M., & Raux, C. (1997). *Les enquêtes de déplacements urbains : mesurer le présent, simuler le furtur = Urban travel survey methods: measuring the present, simulating the future*. Paper presented at the Actes du colloque dans le cadre des Huitièmes entretiens du Centre Jacques Cartier Rhône-Alpes.

Boulter, P. G., McCrae, I. S., & Barlow, T. J. (2007). *A review of instantaneous models for road vehicles*. UK.

Boussier, J.-M. (2007). *Modélisation de comportements dans les systèmes dynamiques : Application à l'oganisation et à la régulation de stationnement et de déplacement dans les Systèmes de Trafic Urbain.* Ecole Doctorale ED 0374 Laboratoire Informatique - Image - Interaction.

Broc, J.-S., & Bourges, B. (2009). *Livrable L1.1 : Rapport méthodologique sur l'élaboration des scénarios de référence et des scénarios d'actions pour l'évaluation des impacts environnementaux d'un PDU*.

Brutti-Mairesse, E., Teillac, S., André, M., & Leclercq, L. (2012). Estimation of pollutant emissions from the road traffic at a city scale, and its sensitivity as regards the calibration of the static traffic assignment models. *Procedia Social and Behavioral Sciences, 48*, 2091-2100.

Bussière, Y., & Bernard, A. (2000). *L'impact du vélo sur les gaz à effet de serre au Québec*: INRS-Urbanisation.

Bussière, Y., & Lewis, P. Gestion de la demande ou nouvelles infrastructures ? L'exemple de la Rive-Sud de Montréal, 2001-2021.

Can, A., & Leclercq, L. (2009). *Estimation des consommations énergétiques et des polluants émis par le trafic routier - Revue bilibographique des modèles existants*: ENTPE - INRETS - Université de Lyon.

CANTIQUE. (1999). *Concerted Action on Non Technical Measures and their Impact on Air Quality and Emissions (CANTIQUE) Workpackage 2 Deliverable 2*.

CARENE. (20 juin 2006). *Plan de Déplacements Urbains*.

Cernuschi, S., Giugliano, M., Cemin, A., & Giovannini, I. (1995). Modal analysis of vehicle emissions factors. *The Science of the Total Environment, 169*, 175-183.

CERTU. (1996). *Plans de déplacements urbains : guide*.

CERTU. (1999). *Plans de déplacements urbains. Prise en compte de la pollution de l'air, du bruit, de la consommation d'énergie*.

CERTU. (2001a). *Note méthodologique sur les études d'environnement dans les projets routiers "volet air"*.

CERTU. (2001b). *Observatoires des plans de déplacements urbains. De la méthode aux indicateurs*.

CERTU. (2002). *Recommandations pour l'évaluation socio-économique des projets de TCSP*.

CERTU. (2003). *Les politiques de stationnement après la loi SRU - Pourquoi ? Comment ?*

CERTU. (2005). *Monographies*.

CERTU. (2008). *Agir contre l'effet de serre, la pollution de l'air et le bruit dans les plans de déplacements urbains - Approches et méthodes*.

CERTU. (2009). *Contrainte de stationnement et pratiques modales*.

CERTU. (2010). *Comprendre le trafic routier - Méthodes et calculs*.

CERTU. (Décembre 2000). *Simulation dynamique du trafic routier*.

CERTU. (octobre 2001). *Observatoires des plans de déplacements urbains. De la méthode aux indicateurs*.

CERTU, & CETE de LYON. (2010). Les parcs relais urbains, étude bibliographique 2010.

CETE de l'Ouest. (2011). Eval-PDU : Livrable L 2.3 : Note méthodologique, Modélisation des déplacements et du trafic

CETE Méditerranée. (2009). *Impacts de la réduction permanente de la vitesse sur l'A9*.

CETE Nord Picardie. (2009). *Modélisation des concentrations de polluants atmosphériques issus de la circulation automobile dans l'agglomération lilloise, programme de recherche PREDIT 2*.

CETE Normandie Centre, & DADT Département Aménagement Durable des Territoires. (2010). *COPCETE v3, Outil de Calcul des Emissions Polluantes d'Origine Routière, Notice d'utilisation*.

Chevallier, E. (2005). *Une approche microscopique pour l'estimation des nuisances environnementales de politiques de gestion du trafic.* University of London Centre for Transport Studies.

Chevallier, E., & Chanut, S. (2009). Estimation des impacts énergétiques et atmosphériques de projets de gestion du trafic - Simulation des impacts énergétiques et atmosphériques de projets de gestion du trafic.

Cheynet, D. (2011). *Modélisation des impacts environnementaux - Quelles applications dans le domaine des transports ?*

Circulaire relative à l'évaluation de certains plans, schémas, programmes et autres documents de planification ayant une incidence notable sur l'environnement (12/04/06).

Coelho, M. C., Farias, T. L., & Rouphail, N. M. (2005). Impact of speed control traffic signals on pollutant emissions. *Transportation Research Part D, 10*, pp. 323-340.

Colella, W. G., Jacobson, M. Z., & Golden, D. M. (2005). Switching to a US hydrogen fuel cell vehicle fleet: The resultant change in emissions, energy use, and greenhouse gases. *Journal of Power Sources, 150*, 150-181.

Commissariat général au développement durable. (2012). *Les comptes des transports en 2011 - Tome 1 - 49e rapport de la Commision des comptes des transports de la Nation*.

Commissariat général au développement durable, & SOeS. (2010). L'environnement en France-Les pressions sur l'environnement-Les transports. *Références*.

Communauté d'Agglomération Sophia Antipolis. (5 mai 2008). *Plan de Déplacements Urbains de la Communauté d'Agglomération Sophia Antipolis*.

Communauté Nice Côte d'Azur. (28 janvier 2008). *Plan de Déplacements Urbains Communautaire*.

Communauté Urbain de Nantes. (2000). *Agglomération Nantaise, Plan de Déplacements Urbains 2000-2010, concilier ville mobile et ville durable*.

Communauté Urbaine de Brest. (22 mars 2002). *Le Plan de Déplacements Urbains de la Communauté Urbaine de Brest*.

Communauté Urbaine de Nantes. (2000). *Agglomération Nantaise, Plan de Déplacements Urbains 2000-2010, concilier ville mobile et ville durable*.

COUR DES COMPTES. (2005). *Les transports publics urbains - Rapport au président de la république suivi des réponses des administrations et des organismes intéressés*.

Courbot, M. (2010). *Ville à 30 : Ville à vivre - L'évaluation de quelques zones 30 de Lille Métropole Communauté Urbaine*

Paper presented at the Rencontre régionale Ville à 30 Ville à vivre.

Crabbe, H., & Elsom, D. M. (1998). Air quality effectiveness of traffic management schemes: UK and European case studies. *Environmental Monitoring and Assessment, 52*, 173-183.

Daganzo, C. (2007). Urban gridlock: Macroscopic modeling and mitigation approaches. *Transportation Research Part B, 41*(1), 49-62.

Daganzo, C., & Geroliminis, N. (2008). An analytical approximation for the macroscopic fundamental diagram of urban traffic. *Transportation Research Part B, 42*, 771-781.

Darbéra, R. (1999). Du mauvais usage des politiques de stationnement pour réguler la circulation. *Transports, 395*(mai-juin 1999), 166-171.

Dargay, J. (2007). The effect of prices and income on car travel in the UK. *Transportation Research Part A, 41*, 949-960.

Dasgupta, M., Oldfield, R., Sharman, K., & Webster, V. (1994). *Impact of transport policies in five cities. Transport Research Laboratory Project Report PR107*. Crowthorne.

Dijkema, M. B. A., Van Der Zee, S. C., Brunekreef, B., & Van Strien, R. T. (2008). Air quality effects of an urban highway speed limit reduction. *Atmospheric Environment, 42*, 9098-9105.

Dowling, R. G., Singh, R., & Cheng, W. W.-K. (1998). Accuracy and Performance of Improved Speed-Flow Curves. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board, 1646*(98-0146), pp. 9-17.

Dowling, R. G., & Skabardonis, A. (1992). Improving Average Travel Speeds Estimated by Planning Models. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board, 1366*, pp.68-74.

DRAST. (2003). *Impact des politiques de stationnement sur la circulation et l'environnement*.

ECOSTAND. (2011). *Inception report and state-of-the-art, ECOSTAND, Deliverable 2.1*.

EMEP/EEA. (2009a). *Air Pollution Emission Inventory Guidebook 2009 - Technical guidance to prepare national emission inventories*.

EMEP/EEA. (2009b). *Part B.1 : Sectoral Guidance - Energy*. Copenhague: EEA.

Eriksson, L., Nordlund, A. M., & Garvill, J. (2010). Expected car use reduction in response to structural travel demand management measures. *Transportation Research Part F, 13*, 329-342.

Espino, R., Ortuzar, J., & Roman, C. (2007). Understanding suburban travel demand; Flexible modelling with revealed and stated choice data. *Transportation Research Part A, 41*, pp.899-912.

Favez, J.-Y., Weilenmann, M., & Stilli, J. (2009). Cold start extra emissions as a function of engine stop time: Evolution over the last 10 years. [Publication]. *Atmospheric Environment, 43*(5), 996-1007.

Ferguson, E. (1990). Transportation Demand Management - Planning, Development, and Implementation. *APA Journal, autumn 1990*.

Fouillé, L. (2011). *Indicateurs généraux de trafic 2 : Méthode simplifiée d'estimation des émissions et consommations énergériques liées au trafic - Projet EvalPDU*.

Fouillé, L. (2011). *Projet EVALPDU : Les trajets en voiture selin leur origine/destination dans le scénario 2008*.

Frere, S. L'intégration des préoccupations environnementales dans les PDU du Nord-Pas de Calais : un exercice difficile.

Fujii, S., & Kitamura, R. (2003). What does a one-month free bus ticket do to habitual drivers? An experimental analysis of habit and attitude change. *Transportation, 30*, pp. 81-95.

Gagnepain, L. (2004). *Véhicules légers GPL Euro 3 - Mesures des émissions de CO2 et de polluants - Comparatif avec leurs versions essence et Diesel*.

Gandit, M. (2007). *Déterminants psychosociaux du changement de comportement dans le choix du mode de transport, Le cas de l'intermodalité.* Université Pierre Mendès France - Grenoble 2.

Garling, T., Eek, D., Loukopoulos, P., Fujii, S., Johansson-Stenman, O., Kitamura, R., et al. (2002). A conceptual analysis of the impact of travel demand management on private car use. *Transport Policy, 9*, pp. 59-70.

GART. (avril 2010). *Plans de déplacements urbains : panorama 2009. Résultats d'enquête et perspectives*.

Genre-Grandpierre, C. (2007). Qualité de l'offre et usage du transport public en milieu urbain. *Cybergeo : European Journal of Geography, article 376*,

GESMAD. (2000). *Evaluation des Modèles de Prevision de Trafic*.

Godinot, C., & Bonnel, P. (2008). *Phase d'affectation : mise en forme du réseau routier sur l'Aire Urbaine de Lyon, Rapport intermédiaire n°8 du projet Simbad Simuler les MoBilité pour une Agglomération Durable*.

Goger, T. (2006). *Un indicateur d'impact environnemental global des polluants atmosphériques émis par les transports.*

Goncalves, M., Jimenez-Guerrero, P., Lopez, E., & Baldasano, J. M. (2008). Air quality models sensitivity to on-road traffic speed representation: Effects on air quality of km/h speed limit in the Barcelona Metropolitan area. *Atmospheric Environment, 42*, pp. 8389-8402.

Goodwin, P. (1999). Transformation of transport policy in Great Britain. *Transportation Research Part A, 33*, pp.655-669.

Goodwin, P., Dargay, J., & Hanly, M. (2004). Elasticities of Road Traffic and Fuel Consumption with Respect to Price and Income: A Review. *Transport Reviews, 24*(3), pp.275-292.

Gould, J., & Golob, T. F. (1997). Shopping without travel or travel without shopping? An investigation of electronic home shopping. *Transport Reviews, 17*(4), 355-376.

Graham, D. J., & Glaister, S. (2002). The demand for automobile fuel: a survey of elasticites. *Journal of Transport Economics and Policy, 36*, pp.1-26.

Grand Nancy. (2006). *Plan de Déplacements Urbains 2006 > 2015*.

Granovskii, M., Dincer, I., & Rosen, M. A. (2006). Economic and environmental comparison of conventional, hybrid, electric and hydrogen fuel cell vehicles. *Journal of Power Sources, 159*, 1186-1193.

Haire, A. R., & Machemehl, R. B. (2007). Impact of Rising Fuel Prices on US Transit Ridership. *Transportation Research Record, No. 1992*, pp. 11-19.

Hausberger, S., Rexeis, M., Zallinger, M., & Luz, R. (2009). *Emission Factors from the Model PHEM for the HBEFA Version 3*.

Highway Capacity Manual. (1965). Washington, DC.

Highway Capacity Manual. (2000). Washington, D.C.

Hubert, J.-P. (2009). Dans les grandes agglomérations, la mobilité quotidienne des habitants diminue, et elle augmente ailleurs. *INSEE PREMIERE, n°1252*.

Hugrel, C., & Joumard, R. (2006). *Directives et facteurs agrégés d'émission des véhicules routiers en France de 1970 à 2025*.

Hunecke, M., Blobaum, A., Matthies, E., & Hoger, R. (2001). REPONSABILITY AND ENVIRONMENT Ecological Norm Orientation and External Factors in the Domain of Travel Mode Choice Behavior. *Environment and Behavior, 33*(6), pp.830-852.

Hymel, K. M., Small, K. A., & Dender, K. V. (2010). Induced demand and rebound effects in road transport. *Transportation Research Part B, 44*, pp.1220-1241.

IAURIF. (2003). *Le péage urbain de Londres - Bilan après 6 mois de fonctionnement - Les impacts sur les transports et les activités londonniennes*.

IAURIF. (2008a). *Le péage urbain de Londres : Eléments pour une analyse coûts-avantages*.

IAURIF. (2008b). *Le péage urbain de Stockholm - Bilan de l'expérimentation (du 3 janvier au 31 juillet 2006)*.

IAURIF. (2010). Les effets de la crise - L'industrie automobile, le marché des bureaux, le transport de marchandises et l'immobilier résidentiel.

IFEN. (2003). Le vélo dans les villes françaises. *Les données de l'environnement, numéro 86*.

In't Panis, L., Beckx, C., & Broekx, S. (2006). Impact of 30 km/h zone introduction on vehicle exhaust emissions in urban areas.

In't Panis, L., Broekx, S., & Liu, R. (2006). Modelling instantaneous traffic emission and the influence of traffic speed limits. *Science of the Total Environment, 371*, 270-285.

INGEROUTE. (avril 2000). *Bilan des pratiques sur l'évaluation environnementale des plans et programmes de transport en France, 2. Les Plans de Déplacements Urbains*: Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement.

Joumard, R. (2003). Les émissions de polluants oscillent entre progrès techniques et explosion du trafic. *La Revue Durable, 3*.

Joumard, R., Jost, P., Hickman, J., & Hassel, D. (1995). Hot passenger car emissions modelling as a function of instantaneous speed and acceleration. *Science of the Total Environment, 169*(1-3), 167-174.

Joumard, R., & Lambert, J. (1991). *Evolution des émissions de polluants par les transports en France de 1970 à 2010*. Bron.

Joumard, R., & Lambert, J. (1991). *Evolution des émissions de polluants par les transports en France de 1970 à 2010*. Bron: INRETS.

Joumard, R., & Nicolas, J.-P. (2010). Transport project assessment methodology within the framework of sustainable development. *Ecological Indicators, 10*, 136-142.

Keller, J., Andreani-Aksoyoglu, S., Tinguely, M., Flemming, J., Heldstab, J., Keller, M., et al. (2008). The impact of reducing the maximum speed limit on motorways in Switzerland to 80 km/h on emissions on peak ozone. *Environmental Modelling & Software, 23*, pp. 322-332.

Keller, M. (2010). *Handbook Emission Factors for Road Transport 3.1 - Quick Reference*. Berne: Infras.

Keuken, M. P., Jonkers, S., Wilmink, I. R., & Wesseling, J. (2010). Reduced NOx and PM10 emissions on urban motorways in The Netherlands by 80 km/h speed management. *Science of the Total Environment, 408*, pp. 2517-2526.

Kouridis, C., Gkatzoflias, D., Kioutsioukis, I., & Ntziachristos, L. (2009). *Uncertainty estimates and guidance for road transport emission calculations*. Thessaloniki, Greece: Emsia Report.

L'agglo Orléans Val de Loire. (3 juillet 2008). *Plan de Déplacements Urbains de l'Agglomération Orléanaise 2008-2013*.

Laboratoire d'Economie des Transports. (1997). *Développement d'un modèle stratégique de simulation des déplacements, vingt ans de retrospective à travers les enquêtes-déplacements de l'agglomération lyonnaise (1976-1986-1995)*.

Lacour, S. (2003). *Intercomparaison d'outils et de méthodes d'inventaires d'émission d'origine routière*: ENPC-CEREA-ADEME.

Larsen, J., & El-Geneidy, A. (2011). A travel behavior analysis of urban cycling facilites in Montréal Canada. *Transportation Research Part D, 16*, 172-177.

Leblanc, D. C., Saunders, F. M., Meyer, M. D., & Guensler, R. (1995). Driving Pattern Variability and Impacts on Vehicle Carbon Monoxide Emissions. *Transportation Research Record, 1472*, pp. 45-52.

Leclercq, L., Can, A., & Nadji, M. (2009). *Action de recherche "Impact et modélisation du trafic urbain au sein des maquettes numériques" Rapport final*.

Lenschow, P., Abraham, H.-J., Kutzner, K., Lutz, M., Preuss, J.-D., & Reichenbächer, W. (2001). Some ideas about the sources of PM10. [Publication]. *Atmospheric Environment, 35*(Supp. 1), 823-833.

Leurent, F. (1997). *Analyse et mesure de l'incertitude dans un modèle de simulation, les principes, une méthode et l'exemple de l'affectation bicritère du trafic*. Ecole nationale des Ponts et Chaussées.

Lichère, V., Raux, C., & Petiot, R. (juin 2000). *Modélisation des contraintes de stationnement* (Rapport final).

LIG'AIR. (2008). *Zones 30 Simulation de l'impact des aménagements urbains sur la qualité de l'air Rapport final*.

Lighthill, M. J., & Whitham, G. B. (1955). On kinematic waves II - a theory of traffic flow in long crowded roads. *Proceedings of the Royal Society, vol. A*(n°229), pp.317-345.

Lille Métropole Communauté Urbaine. (juin 2000). *Le Plan de Déplacements Urbains*.

Loi 2000-1208 relative à la solidarité et au renouvellement urbains (13 décembre 2000).

Loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie, n°96-1236 C.F.R. (30/12/96).

Loukopoulos, P., Jakobsson, C., Garling, T., Schneider, C. M., & Fuji, S. (2004). Car-user reponses to travel demand management measures : goal setting and choice of adaptation alternatives. *Transportation Research Part D, 9*, pp.263-280.

Margail, F. (1996). *Les parcs relais, outils clés de politiques intermodales de déplacement urbain.* Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

Marsden, G. R. (2006). The evidence base for parking policies - a review. *Transport Policy, 13*(6), 447-457.

Marshall, S., & Banister, D. (2000). Travel reduction strategies: intentions and outcomes. *Transport Research Part A, 34*, pp.321-338.

Mathon, S. (2007). Une première génération de plans de déplacements d'entreprises : enseignements et bilan. *Air Pur, 73*.

Matzoros, A., & Dan Villet, D. (1992). A model of air pollution from road traffic, based on the characteristics of interrupted flow and junction control. *Transportation Research Part A, 26*(4), 315-330.

May, A. D., Jopson, A. F., & Matthews, B. (2003). Research challenges in urban transport policy. *Transport Policy, 10*, pp.157-164.

May, A. D., Kelly, C., & Shepherd, S. (2006). The principles of integration in urban transport strategies. *Transport Policy, 13*, pp.319-327.

McNally, M. G., & Rindt, C. (2007). The Activity-Based Approach. *eScholarship University of California*, 18 p.

Meead, S. K., & Figliozzi, M. A. (2011). *A Study of Freeway Volume-to-Capacity Ratio Based Travel Time Approximations Using Archived Loop Detector Data.* Paper presented at the 90th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, BC.

Michel, P., & Monier, T. (2001). *L'évaluation environnementale des plans et programmes de transport*: Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement.

Mirabel, F. (2004). *les péages urbains : une solution pour un développement durable des villes ?* Paper presented at the colloque MONDER.

Montet, J. (2008). *Le contrat d'axe de Grenoble et Toulouse : Un outil de cohérence entre Urbanisme et Transport en Commun en Site Propre*.

Morelli, P. Modélisation des déplacements urbains - Démarche à 4 étapes Davis de l'INRETS.

Nantes Métropole Communauté Urbaine. (2011). *Plan de déplacements urbains 2010-2015 perspectives 2030*.

National Cooperative Highway Research Program. (1999). *Planning Application For The Year 2000 Highway Capacity Manual, Appendix A Literature Review*.

Nicolas, J. (1996). *Ville, Transports et Environnement.* Université Lumière Lyon 2, Lyon.

Nicolas, J. P., Bonnel, P., Bouzouina, L., Cabrera, J., Corsatea, T., Pluvinet, P., et al. (2011). *Projet SIMBAD 2 - Une analyse temporelle de long terme permettant de mieux simuler les mobilités pour une agglomération durable*.

Noland, R. B. (1995). Short-run and long-run policies for increasing bicycle transportation for daily commuter trips. *Transport Policy, 2*, pp.67-79.

Noppe, J., Rotheval, J.-P., & Vinot, J.-P. (2002). Quantification des émissions polluantes pour l'évaluation des politiques locales de transport. *TEC, n°171*, pp.6-12.

O'Fallon, C., Sullivan, C., & Hensher, D. A. (2004). Constraints affecting mode choices by morning car commuters. *Transport Policy, 11*, pp.17-29.

OFEN. (2004). *Efficience énergétique des P&R*.

Omstedt, G., Bringfelt, B., & Johansson, C. (2005). A model for vehicle-induced non-tailpipe emissions of particles along Swedish roads. [Publication]. *Atmospheric Environment, 39*(33), 6088-6097.

ORAMIP. (2006). *Plan de Protection de l'Atmosphère - Bilan de la qualité de l'air - Mesure B1 : réduction de vitesse sur le périphérique toulousain - été 2006 - Synthèse de l'étude*.

Ortuzar, J., Iacobelli, A., & Valeze, C. (2000). Estimating demand for a cycle-way network. *Transportation Research Part A, 34*, 353-373.

Ortuzar, J., & Willumsen, L. G. (1990). *Modelling Transport*. Londres.

Owen, B. (2005). Air quality impacts of speed-restriction zones for road traffic. *Science of the Total Environment, 340*, 13-22.

Papaioannou, P., & Georgiou, G. Are Traffic Demand Management (TDM) measures a solution for traffic problems in urban areas ? The Greek experience.

Papon, F. (1992). Une modélisation de l'équilibre local du stationnement : SUPERNOVA et son application dans quatre villes européennes. *RTS, 34*, 37-48.

Patra, A., Colvile, R., Arnold, S., Bowen, E., Shallcross, D., Martin, D., et al. (2008). On street observations of particulate matter movement and dispersion due to traffic on an urban road. [Publication]. *Atmospheric Environment, 42*, 3911-3926.

Pays de Montbéliard, Communauté d'Agglomération. (2009). *Plan de Déplacements Urbains 2009, Révision du PDU 2000-2006*.

Pelkmans, L., Debal, P., Hood, T., Hauser, G., & Delgado, M.-R. (2004). *Development of a Simulation Tool to Calculate Fuel Consumption and Emissions of Vehicles Operating in Dynamic Conditions*.

Perujo, A., & Ciuffo, B. (2010). The introduction of electric vehicles in the private fleet: Potential impact on the electric supply system and on the environment. A case study for the Province of Milan, Italy. *Energy Policy, 38*, 4549-4561.

Prado, C. (2010). *Exploitation de l'EMD de Nantes, Estimation des caractéristiques de mobilité, Projet Eval-PDU* (Rapport de stage).

Prady, G. Tramway de Montpellier : le succès des Parcs Relais: Midi-Pyrénées.

PREDIT. (2008). *L'impact des politiques de stationnement sur les émissions de Gaz à Effet de Serre - Tome I - Rapport de synthèse*.

PROSPECTS. (2001). *Cities initial policy assessment. PROSPECTS Deliverable 4*. Brussels.

PTV France. (2008). *Construction de la modélisation multimodale des transports de l'Aire Urbaine toulousaine*.

Quddus, M. A., & Noland, R. B. (2004). Flow Imporvements and Vehicle Emissions : effects of trip generation and emission control technology.

Rakha, H., & Ahn, K. (2004). Integration Modeling Framework for Estimating Mobile Source Emissions. *Journal of Transportation Engineering, March/April 2004*.

Ramjerdi, F., Minken, H., & Ostmoe, K. (2004). Norwegian Urban Tolls. In G. S. Editor (Ed.), *Road Pricing: Theory and Evidence* (Vol. Research in Transportation Economics, pp. 237-249): Elsevier.

Raux, C. (2008). Le péage urbain. Lyon, France.

Ravalet, E., Bussière, Y. D., & Collomb, J.-L. (2008). *Potentiel du vélo en ville : Une comparaison France-Mexique (Lyon et Puebla)*. Paper presented at the XLVe Colloque ASDRLF : Territoires et action publique territoriale : nouvelles ressources pour le développement régional.

Reims Métropole. (20 février 2007). *Plan de Déplacements Urbains, Révision, Projet*.

Rennes Métropole. (5 juillet 2007). *Plan de Déplacements Urbains 2007-2017*.

Rennesson, C. (2005). Des zones 30 pour mieux se déplacer et vivre en ville. In e. c. d. c. d. V. Cyclables (Ed.). Lille.

Rexeis, M., Hausberger, S., Riemersma, I., Tartakovsky, L., Zvirin, Y., Van Poppel, M., et al. (2005). *Heavy duty vehicle emissions. Final Report of WP 400 in ARTEMIS (Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems)*. Graz: University of Technology.

Reynolds, A. W., & Broderick, B. M. (2000). Development of an emissions inventory model for mobile sources. *Transportation Research Part D, 5*, 77-101.

Richards, P. I. (1956). Shockwaves on the highway. *Operational research, vol. 4*, pp. 42-51.

Rodier, C. J., & Johnston, R. A. (2002). Uncertain socioeconomic projections used in travel demand and emissions models: could plausible errors result in air quality nonconformity ? *Transportation Research Part A, 36*, 613-631.

Rosenbloom, S. (1978). Peak Period Traffic Congestion: A State-of-the-Art Analysis and Evaluation of Effective Solutions. *Transportation, 7*.

Russo, F., & Comi, A. (2010). A classification of city logistics measures and connected impacts. *Procedia Social and Behavioral Sciences, 2*, pp. 6355-6365.

Saint-Etienne Métropole. (17 mai 2004). Plan de Déplacements Urbains.

Schmidt, T. (2012). *EvalPDU - Livrable L3.4 : Rapport final de tâche - Impact d'un PDU sur les émissions polluants, la qualité de l'air et les consommations d'énergie à l'échelle de l'agglomération et des rues*: Air Pays de la Loire.

Schuitema, G., Steg, L., & Vlek, C. (2007). Are pricing policies effective to change car use ? *IATSS Research, 31*, pp.21-31.

SETRA. (2009). *Emissions routières de polluants atmosphériques - Courbes et facteurs d'influence*.

SETRA. (2010). *Calage et validation des modèles de trafic - Techniques appliquées à l'affectation routière interurbaine*.

Sharples, R. (1993). Modelling cyclists in SATURN. *Traffic Engineering and Control, 34*, 472-475.

Singh, R. (1999). *Improved Speed-Flow Relationships : Application to Transportation Planning Models*. Paper presented at the 7th TRB Conference on Application of Transportation Planning.

Sisiopiku, V., & Gunda, V. (2001). Design and safety of modern roundabouts. Birmingham: University of Alabama.

Sisiopiku, V., & Oh, H.-U. (2001). Evaluation of roundabout Performance Using SIDRA. *Journal of Transportation Engineering, March/April 2001*.

Smit, R. (2006). *An examination of congestion in road traffic - Emission models and their application to urban road networks.*

Smit, R., Brown, A., & Chan, Y. (2008). Do air pollution emissions and fuel consumption models for roadway inclde the effects of congestion in the roadway traffic flow ? *Environmental Modelling & Software, 23*, 1262-1270.

Smit, R., Ntziachristos, L., & Boulter, P. (2010). Validation of road vehicle and traffic emission models - A review and meta-analysis. *Atmospheric environment, 44*, pp. 2943-2953.

Smit, R., Poelman, M., & Schrijver, J. (2008). Improved road traffic emission inventories by adding mean speed distributions. *Atmospheric Environment, 42*, pp. 916-926.

SMT. (30 novembre 2007). *Le Plan de Déplacements Urbains des Agglomérations de Lens_Liévin et Hénin_Carvin.*

SMTC. (15 décembre 2008). *Plan de Déplacements Urbains de l'Agglomération Grenobloise*.

SOeS. (2010). La mobilité des Français. Panorama issu de l'enquête nationale transports et déplacements 2008. *La Revue du CGDD.*

SPECTRUM. (2004). *Synergies and conflicts of transport packages. SPECTRUM (Study of Policies regarding Economic instruments Complementing Transport Regulation and the Undertaking of physical Measures) Deliverable 4*. Brussels.

Steg, L., & Vlek, C. (1997). The role of problem awareness in willingness-to-change car use and in evaluating relevant policy measures. *Traffic and Transport Psychology*, pp.465-475.

Sternbeck, J., Sjödin, A., & Andreasson, K. (2002). Metal emissions from road traffic and the influence of resuspension—results from two tunnel studies. [Publication]. *Atmospheric Environment, 36*(30), 4735-4744.

Sterner, T. (2007). Fuel taxes: An important instrument for climate policy. *Energy Policy, 35*, pp. 3194-3202.

Stover, V. W., & Christine Bae, C.-H. (2010). *The Impact of Gasoline Prices on Transit Ridership in Washington State*. Paper presented at the TRB 2011 Annual Meeting.

SYTRAL. (2 juin 2005). *Révision du PDU de l'Agglomération Lyonnaise*.

SYTRAL. (2007). *Enquête Ménages Déplacements 2006 de l'Aire métropolitaine lyonnaise - Principaux résultats*

Tanaboriboon, Y. (1992). An Overview and Future Direction of Transport Demand Management in Asian Metropolises. *Regional Development Dialogue, 13*.

Taylor, C. J., Nozick, L. K., & Meyburg, A. H. (1998). Selection and Evaluation of Travel Demand Management Measures. *Transportation Research Record, 1598*(N° 971114).

Teillac, S. (2010). *Pratique de l'évaluation (environnementale) : Plans de déplacements urbains et déclinaisons locales des Plans de Déplacements Urbains*.

Thogersen, J., & Moller, B. (2008). Breaking car use habits: The effectiveness of a free one-month travelcard. *Transportation, 35*, pp.329-345.

Thomann, S. Report modal en périurbain et représentations de l'installation résidentielle.

Thorpe, A., & Harrison, R. (2008). Sources and properties of non-exhaust particulate matter from road traffic: A review. [Publication]. *Science of the Total Environment, 400*, 270-282.

Toilier, F., Alligier, L., Patier, D., & Routhier, J.-L. (2005). *Vers un modèle global de la simulation de la logistique urbaine : FRETURB, version 2 - Rapport final*.

Transportation Research Board of The National Academies. (2007). *Metropolitan Travel Forecasting - Current Practice and Future Direction*. Washington, DC.

Treil, S. (2005). *Comprendre l'évolution de la mobilité entre deux enquêtes ménages déplacements - Le cas du vélo à Grenoble entre 1992 et 2002*: Université Lyon 2 - Laboratoire d'Economie des Transports - Ecole Nationale des Travaux Publics d'Etat.

Valiquette, F. (2010). *Typologie des chaînes de déplacements et modélisation descriptive des systèmes d'activités des personnes*: Université de Montréal, Ecole Polytechnique de Montréal.

Vande Walle, S., & Steenberghen, T. (2006). Space and time related determinants of public transport use in trip chains. *Transportation Research Part A, 40*, pp. 151-162.

Varhelyi, A. (2002). The effects of small roundabouts on emissions and fuel consumption: a case study. *Transportation Reseaech Part D, 7*, 65-71.

Vestreng, V., Nitziachristos, L., Semb, A., Reis, S., Isaksen, I., & Tarrason, L. (2009). Evolution of NOx emissions in Europe with focus on road transport control measures. *Atmospheric Chemistry and Physics, 9*, 1503-1520.

Viegas, J. M. (2003). Transport policy development in Europe 1950-2020. In E. C. o. M. o. Transport (Ed.), *Fifty Years of Transport Policy*. Paris: OECD Publication Services.

Vieira, J., Moura, F., & Viegas, J. M. (2007). Transport policy and environmental impacts: The importance of multi-instrumentality in policy integration. *Transport Policy, 14*, pp.421-432.

Virignia Department of Transportation. (2009). *Implementing Activity-Based Models in Virginia*.

Washbrook, K., Haider, W., & Jacard, M. (2006). Estimating commuter mode choice : A discrete choice analysis of the impact of road pricing and parking charges. *Transportation, 33*, pp.621-639.

Weilenmann, M., Favez, J.-Y., & Alvarez, R. (2009). Cold-start emissions of modern passenger cars at different low ambient temperatures and their evolution over vehicle legislation categories. [Publication]. *Atmospheric Environment, 43*(15), 2419-2429.

Zallinger, M., Hausberger, S., Ajtay, D., & Weilenmann, M. (2005). *Instantaneous emission modeling applications*. Dübendorf, Switzerland and Graz, Austria.

Zallinger, M., Le Anh, T., & Hausberger, S. (2005). *Improving an instantaneous emission model for passenger cars.* Paper presented at the Transport and Air Pollution conf., Graz, Austria.

Annexes

ANNEXE 1 : EXTRAIT - LOI NO 96-1236 DU 30 DECEMBRE 1996 SUR L'AIR ET L'UTILISATION RATIONNELLE DE L'ENERGIE (1) 344

ANNEXE 2 : LISTE DES MESURES 345

ANNEXE 3 LES MESURES ET LEURS CRITERES 348

ANNEXE 4 : LISTES D'INDICATEURS DANS (AIUTO, 1999) ET (CANTIQUE, 1999) 352

ANNEXE 5 :COMPARAISONS DES PARTS MODALES OBSERVEES ET MODELISEES (EVALPDU)..... 355

ANNEXE 6 : ESTIMATION OF POLLUTANT EMISSIONS FROM THE ROAD TRAFFIC AT A CITY SCALE, AND ITS SENSITIVITY AS REGARDS THE CALIBRATION OF THE STATIC TRAFFIC ASSIGNMENT MODELS 356

ANNEXE 7 : VALIDITE DES SIMULATIONS – ANALYSE DU TAUX DE SATURATION 367

ANNEXE 8 : REPARTITION SPATIALE DES EMISSIONS DE NOX POUR LES SIMULATIONS REPRESENTANT LE STIMULUS 1 368

ANNEXE 9 : QUANTIFICATION DES IMPACTS GLOBAUX POUR CHAQUE SIMULATION 372

Annexe 1 : Extrait - LOI no 96-1236 du 30 décembre 1996 sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie (1)

JORF n°1 du 1 janvier 1997 page 11

TITRE V

PLANS DE DEPLACEMENTS URBAINS

Art. 28-1. - Les orientations du plan de déplacements urbains portent sur :

1o La diminution du trafic automobile ;

2o Le développement des transports collectifs et des moyens de déplacement économes et les moins polluants, notamment l'usage de la bicyclette et la marche à pied ;

3o L'aménagement et l'exploitation du réseau principal de voirie d'agglomération, afin de rendre plus efficace son usage, notamment en l'affectant aux différents modes de transport et en favorisant la mise en oeuvre d'actions d'information sur la circulation ;

4o L'organisation du stationnement sur le domaine public, sur voirie et souterrain, notamment la classification des voies selon les catégories d'usagers admis à y faire stationner leur véhicule, et les conditions de sa tarification, selon les différentes catégories de véhicules et d'utilisateurs, en privilégiant les véhicules peu polluants ;

5o Le transport et la livraison des marchandises de façon à en réduire les impacts sur la circulation et l'environnement ;

6o L'encouragement pour les entreprises et les collectivités publiques à favoriser le transport de leur personnel, notamment par l'utilisation des transports en commun et du covoiturage.

Annexe 2 : Liste des mesures

Mesures permettant d'augmenter l'attractivité des transports en commun	
1	Augmentation de la fréquence des Transports en Commun
2	Mise en site propre de lignes de Transports en Commun
3	Réduction des tarifs d'utilisation des Transports en Commun
4	Organisation temporelle de l'offre en Transports en Commun
5	Augmentation de l'offre kilométrique du réseau de Transport en Commun
6	Hiérarchisation du réseau de transport en commun
7	Mise en place d'une information aux voyageurs des TC grâce aux PMV
Mesures portant sur l'attractivité des modes doux	
8	Augmentation de l'offre de pistes ou bandes cyclables
9	Mise en place d'équipements permettant le stationnement des vélos et des deux roues
10	Sensibilisation à l'utilisation du vélo
11	Mise en place de Vélos en libre service
12	Augmentation de l'offre d'itinéraires piétonniers
13	Actions encourageant la pratique du covoiturage
Mesures favorisant l'intermodalité	
14	Mise en place d'un Titre de transport multimodal
15	Aménagement de pôle d'échanges intermodaux
16	Création de Parcs relais sur des lignes de TC structurantes
Mesures affectant le réseau de voiries	
17	Hiérarchisation du réseau viaire
18	Réduction ou augmentation de la capacité des autoroutes urbaines
19	Réduction de la vitesse sur autoroutes, périphériques ou boulevards urbains
20	Remplacement des carrefours à feux par des giratoires
21	Mise en place d'onde verte
22	Mise en place d'un jalonnement dynamique
23	Création d'infrastructures routières
24	Mise en place d'une zone 30
25	Mise en place d'une zone de rencontre
26	Mise en place d'une aire piétonne
Organisation du transport de marchandises en milieu urbain	
27	Création d'espaces logistiques ou centres de distributions urbaines
28	Organisation spatiale des déplacements poids lourds
29	Gestion des livraisons de marchandises en ville
Organisation du stationnement	
30	Tarification du stationnement suivant les usages
31	Gestion de l'offre de stationnement
32	Gestion de la durée du stationnement
Restriction de l'utilisation de la voiture	
33	Mise en place d'une zone à accès réservé aux véhicules peu polluants
34	Mise en place d'un péage urbain
Articulation entre transport et urbanisme	
35	Les contrats d'axe / politique de cohérence transport-urbanisme / densification urbaine
Information sur la mobilité	
36	Mise en place d'une centrale de mobilité
37	Incitation à la mise en place de Plan de déplacements Entreprises (PDE) et Plan de Déplacements Etablissement Scolaire (PDES):
Mesures affectant le parc de véhicules	
38	Renouvèlement des parcs de véhicules (des collectivités) avec des véhicules propres (gaz, électrique,…)
Autres mesures	
39	Informatisation des déplacements
40	Flexibilité horaires de déplacements
41	Prix de l'essence
42	Réglementation des niveaux d'émission

43	Prime à la casse
44	Bonus / Malus basé sur les émissions unitaires de CO2

Annexe 3 Les mesures et leurs critères

	cibles d'action		moyens d'action	effets attendus/obtenus			Echelle temporelle d'impact	Echelle spatiale d'impact
Mesures	usages	modes	instruments d'intervention	modifications des parts modales	modifications des conditions de déplacements	modifications du parc de véhicules		aire urbaine, agglomération, quartier, infrastructure
Modalités	passagers/marchandises	voitures particulières, transports en commun, modes doux, transports alternatifs, transport de marchandises	réglementation / investissement / incitation / information-sensibilisation / gestion / urbanisation		trajets, vitesses		immédiat, moyen, long terme	
Planification du réseau de transport en commun	passagers	transports en commun	investissement	oui			moyen	agglomération
renforcement et création de liaisons TC de rocades performantes TC	passagers	transports en commun	investissement	oui			moyen	agglomération
Mise en place d'axes forts bus reliés au tramway	passagers	transports en commun	investissement	oui			moyen	agglomération
mise en place de liaisons bus en site propre avec de fortes fréquences	passagers	transports en commun	investissement	oui			moyen	agglomération
allongement du réseau tramway	passagers	transports en commun	investissement	oui			moyen	agglomération
amélioration de la desserte ferroviaire dans les pôles urbains secondaires	passagers	transports en commun	investissement	oui			moyen	aire urbaine
aménagement pôle d'échanges multimodal	passagers	transport en commun,modes doux	investissement	oui			moyen	agglomération
mise en place d'un titre de transport multimodal	passagers	transports en commun, modes doux	investissement	oui			moyen	agglomération
rédaction d'un document de planificaion des circulations douces	passagers	modes doux	réglementation	oui			moyen	agglomération
mise en place de vélos en libre service	passagers	modes doux	investissement	oui			moyen	agglomération

mis en place stationnement et consignes vélo	passagers	modes doux	investissement	oui			moyen	agglomération
mise en place d'un système de transport à la demande	passagers	transports alternatifs	investissement	oui			moyen	quartier
renouvellement des parcs de véhicules des collectivités avec des véhicules propres	passagers	transport de marchandises	investissement			oui	immédiat	agglomération
hiérarchisation du réseau viaire et usage des voies	passagers	tous modes	gestion		oui		immédiat	agglomération
baisse vitesse sur des voies rapides urbaines	passagers	véhicules particuliers	gestion		oui		immédiat	infrastructure
homogénéisation de la vitesse sur le périphérique	passagers	véhicules particuliers et transport de marchandises	gestion		oui		immédiat	infrastructure
mise en place de jalonnement directionnel	passagers	véhicules particuliers et transport de marchandises	gestion		oui		immédiat	quartier voire agglomération
gestion dynamique des flux sur le périphérique	passagers	véhicules particuliers et transport de marchandises	gestion		oui		immédiat	infrastructure
construction de nouvelles infrastructures routières	passagers	tous modes	investissement		oui		moyen	agglomération
navettes fluviales pour piétons et vélos	passagers	transports alternatifs	investissement	oui			moyen	quartier
définition des plages horaires pour les livraisons de marchandises dans les communes	marchandises	transports de marchandises	réglementation		oui		immédiat	quartier
organisation du stationnement des véhicules de marchandises	marchandises	transports de marchandises	réglementation		oui		immédiat	quartier
création de centre de distribution logistique dans le centre ville	marchandises	transports de marchandises	investissement		oui		moyen	agglomération
réflexion transport de marchandises sur voie d'eau :anticiper les	marchandises	transports de marchandises	investissement		oui		long	agglomération

projets de grands équipements logistiques								
rédaction document de planification de la circulation PL	marchandises	transports de marchandises	réglementation		oui			agglomération
construction de parcs relais	passagers	véhicules particuliers	investissement	oui			moyen terme	quartier
adapter le tarif et les places de stationnement en fonction de l'usage (résidents,…)	passagers	véhicules particuliers	réglementation	oui			moyen terme	quartier
mise en place d'une centrale de mobilité (information)	passagers	tous modes	information	oui			moyen terme	agglomération
PDE	passagers	modes doux, transport en commun et transports alternatifs	incitation	oui			moyen terme	agglomération
expérimentation covoiturage	passagers	transports alternatifs	incitation	oui			moyen terme	agglomération
information stationnement	passagers	véhicules particuliers	information	oui			moyen terme	agglomération
communication sur le PDU	passagers	tous modes	information	oui			moyen terme	agglomération
zones 30 à grande échelle	passagers	tous modes	réglementation		oui		immédiat	agglomération
zone 30 locale	passagers	tous modes	réglementation		oui		immédiat	infrastructure
Contrat d'axe	passagers	transport en commun et modes doux	urbanisaton	oui			long terme	agglomération
ZAPA	passagers	véhicules particules	réglementation	oui	oui	oui	immédiat	agglomération
formes urbaines compactes et denses	passagers	transports en commun et modes doux	urbanisation	oui			long terme	agglomération
mixité des fonctions urbaines	passagers	transports en commun et modes doux	urbanisation	oui			long terme	agglomération
péage urbain	passagers	véhicules particuliers	réglementation	oui	oui		immédiat	agglomération
tarification stationnement	passagers	véhicules particuliers	réglementation	oui			moyen terme	agglomération
ondes vertes	passagers	véhicules particuliers	gestion		oui		immédiat	infrastrucutre
priorité bus	passagers	transports en commun	gestion		oui		immédiat	infrastructure

Annexe 4 : Listes d'indicateurs dans (AIUTO, 1999) et (CANTIQUE, 1999)

Criterion	Sub-criterion	Indicators
A. Environment	Air pollution	CO emissions
		NOx emissions
		CxHy emissions
		Dust emissions (from Diesel engines)
		Population involved (at a level that exceeds the law threshold2)
	Noise pollution	Noise emissions
		Population involved (at a level of noise that exceeds the law threshold)
	Energy saving	TEP (Tons of equivalent petroleum used by road traffic and other modes)
B. Effectiveness	Functionality of the whole transport system	Time spent on the transport networks
		Occupancy (passengers*km / offered seats*km)
		Length of congested links (private transport)
		Flow/capacity ratio
		Accessibility (costs on the network)
		Average speed of each system
	Functionality of TDM policies	
	Limit growth of car use	Car kilometrage
		Number of car trips
	Encourage public transport	Number of public transport trips
		Travel time ratio between modes
		Travelers kilometrage
	Encourage company based traffic management	Number of participants to company based traffic management
		Presence of a co-ordination centre
	Encourage car pool	Car occupancy
		Number of car poolers
		Number of car pool facilities
	Limit car use in leisure time	Car kilometrage by trip purpose
		Number of car trips by purpose
	Organise Dial-a-Ride	Level of service (ratio between travel time and minimum possible travel time)
	Accessibility	Accessibility of a zone (generalized cost for each origin zone to reach the other zones)
		Walking time to nearest station or stop
	Disturbs	Number of transfer during a trip
		Number and length of links that become congested (and their localization)
C. Efficiency	Economic	User costs (travel time, charges)
		Investment costs
		Net Present Value (NPV)
		Internal Rate of Return (IRR)
	Financial	Cash flow (referred to the whole system)
D. Equity	Land-zones	Standard deviation of all the accessibility indicators
E. Quality	Quality of service	Comfort (for each system). It could be a single indicator
		Seated passengers*km/total passengers *km
		Number of public transport runs that never overcome capacity
	Safety	Number of fatalities (No. of deaths, injured, accidents)
		Damages to the belongings

Tableau 76 Indicateurs dans (AIUTO, 1999)

traffic-related impacts	▪ vehicle, ton, passenger km ▪ modal split ▪ capacity usage, occupancy level ▪ dispersion of traffic peaks ▪ capacity of infrastructure ▪ operating costs ▪ travel time ▪ transport quality
impacts on the environment and on traffic safety	▪ emissions of pollutants ▪ CO2-emissions ▪ Noise ▪ land use and separation effects ▪ accidents
economic impacts	▪ general economic profitability ▪ business economic profitability ▪ technology improvement and innovation
social impacts	▪ distribution of income ▪ mobility of user groups ▪ access to education and labor

Tableau 77 Indicateurs dans (CANTIQUE, 1999)

Annexe 5 :Comparaisons des parts modales observées et modélisées (EvalPDU)

Parts modales		PPM						PPS					
Trajet N-N Résidence NM	Segment	MàP		VL		TC		MàP		VL		TC	
	Am	**12%**	19%	**73%**	70%	**15%**	11%	**26%**	25%	**63%**	63%	**11%**	12%
	Im	**36%**	36%	**54%**	54%	**9%**	10%	**34%**	36%	**56%**	52%	**10%**	11%
	Em	**35%**	35%	**41%**	43%	**24%**	22%	**20%**	35%	**54%**	42%	**26%**	23%
	Ts	**19%**	24%	**66%**	65%	**15%**	12%	**28%**	29%	**60%**	58%	**12%**	12%

Parts modales		PCJ						PCN					
Trajet N-N Résidence NM	Segment	MàP		VL		TC		MàP		VL		TC	
	Am	**27%**	26%	**64%**	65%	**9%**	9%	**13%**	12%	**84%**	83%	**4%**	5%
	Im	**39%**	37%	**51%**	52%	**10%**	11%	**20%**	19%	**76%**	76%	**4%**	6%
	Em	**40%**	38%	**46%**	47%	**14%**	15%	**22%**	18%	**75%**	74%	**3%**	8%
	Ts	**33%**	30%	**57%**	59%	**10%**	12%	**16%**	15%	**81%**	80%	**4%**	6%

Parts modales		PPM						PPS					
Trajet NM-NM Sauf N-N Résidence NM	Segment	MàP		VL		TC		MàP		VL		TC	
	Am	**4%**	3%	**90%**	91%	**6%**	5%	**5%**	5%	**90%**	89%	**5%**	6%
	Im	**20%**	15%	**78%**	77%	**3%**	8%	**15%**	15%	**80%**	76%	**5%**	8%
	Em	**1%**	3%	**83%**	80%	**16%**	16%	**2%**	2%	**87%**	83%	**12%**	14%
	Ts	**6%**	5%	**88%**	89%	**6%**	6%	**7%**	8%	**88%**	85%	**5%**	7%

Parts modales		PCJ						PCN					
Trajet NM-NM Sauf N-N Résidence NM	Segment	MàP		VL		TC		MàP		VL		TC	
	Am	**6%**	5%	**89%**	90%	**4%**	5%	**3%**	2%	**95%**	95%	**2%**	3%
	Im	**18%**	16%	**77%**	75%	**5%**	9%	**11%**	9%	**87%**	86%	**2%**	5%
	Em	**4%**	3%	**83%**	88%	**13%**	9%	**5%**	1%	**92%**	92%	**3%**	7%
	Ts	**11%**	8%	**84%**	86%	**5%**	6%	**4%**	4%	**94%**	92%	**2%**	4%

Tableau 78 Comparaison des parts modales observées (en gras) et des parts modales estimées grâce au modèle de déplacement (EvalPDU)

Annexe 6 : Estimation of pollutant emissions from the road traffic at a city scale, and its sensitivity as regards the calibration of the static traffic assignment models

Available online at www.sciencedirect.com

SciVerse ScienceDirect

Procedia - Social and Behavioral Sciences 48 (2012) 2091 – 2100

Procedia Social and Behavioral Sciences

Transport Research Arena– Europe 2012

Estimation of pollutant emissions from the road traffic at a city scale, and its sensitivity as regards the calibration of the static traffic assignment models

Eugénie Brutti-Mairesse[a,*] Sonia Teillac[a], Michel André[a], Ludovic Leclercq[b]

[a]*IFSTTAR – Laboratoire Transport Environnement, 25 avenue François Mitterrand, F-69675 Bron, France*
[b]*Université de Lyon, IFSTTAR/ENTPE – Laboratoire Ingénierie Circulation, Transports, Rue Maurice Audin, F-69518 Vaulx-en-Velin CEDEX, France*

Abstract

In this work, we study how uncertainties on input data of the coupling traffic of the assignment and pollutant emission models affect the resulting traffic and pollutant emissions. We analyse the sensitivity of the approach as regards the scenario definition (O/D matrix and vehicle fleet composition) and as regards the calibration process, which mostly consists in fitting the speed-flow curves. Variations on scenario definition induce changes of about 15 % on pollutant emissions and traffic whereas variations on speed-flow curves affect them by about 5%. Complementary analyses show that variation of the travel demand significantly influences traffic, variation of the vehicle fleet composition significantly influences particulate matter (PM), CO_2 and NO_x emissions, while variation of the shape of speed-flow curve mainly influences the traffic speeds.

© 2012 Published by Elsevier Ltd. Selection and/or peer review under responsibility of the Programme Committee of the Transport Research Arena 2012

"Keywords: speed-flow curve ; vehicle fleet composition ; Origin-Destination matrix ; environmental assessment"

Introduction

The environmental assessment of transportation facilities at a city scale is usually addressed by a static description of the road traffic (flow and speed) on each link of the roads network. A travel demand model

* Corresponding author.
E-mail address: eugenie.brutti-mairesse@ifsttar.fr.

1877-0428 © 2012 Published by Elsevier Ltd. Selection and/or peer review under responsibility of the Programme Committee of the Transport Research Arena 2012
doi:10.1016/j.sbspro.2012.06.1182

and a traffic assignment model are generally required for a complete description of the flows on the whole roads network. But these models are very complex and depend on many parameters, some of them having a strong influence on the results. To study how uncertainties from these models as regards traffic flows and speeds may influence the estimation of pollutant emissions, a sensitivity analysis was carried out. Such uncertainties may come from (i) the scenario definition (O/D matrix, vehicle fleet composition…) or from (ii) the calibration process which mostly consists in fitting the speed-flow curves for each link or type of links of the roads network. The principles of assignment models may also introduce bias but this will be disregarded in the present study.

2. Transport model and pollutant emission model

We have applied the models to the simulation of traffic flow and traffic-related emissions. Modelling chain is based on Nantes roads network (fig 1). This work is part of the ANR EvalPDU project (Mestayer, et al., 2010).

Fig. 1. Map of the Nantes Métropole roads network

Traffic data are obtained from a four-stage transport model applied to the city of Nantes (CETE de l'Ouest, 2011). In this work, we consider the assignment model. The origin-destination (OD) matrix was elaborated in previous stage of the transport model, and is taken into account as input data. The assignment model is based on the Wardrop's principle, i.e. a deterministic user optimum based on travel times derived from speed-flow curves. This model is coupled with a model for estimating pollutant emissions from the road traffic CopCETE (CETE Normandie Centre & DADT Département Aménagement Durable des Territoires, 2010), which implements the COPERT4 methodology. Calculations are carried out for the year 2008. The corresponding CITEPA vehicle fleet composition (CITEPA, 2010) is implemented. Local meteorological data and traffic data from the transport model are implemented for the city of Nantes.

3. Scenarios and parameters variations

To characterise the effect of the different parameters of the models on traffic and on estimations of pollutant emissions, potential variations of these parameters are defined and tested. Firstly, we defined potential variations linked to the scenario definition. Two parameters are analysed: OD matrix and the vehicle fleet composition. OD matrix is a central element of the travel model and this matrix is often modified to analyse transport facilities. The vehicle fleet composition is also considered, because it is changing continually and it has a significant impact on pollutant emissions, as fleet renewal strongly reduces pollutant emissions. (Vestreng, et al., 2009) observe in consequence a decrease of NOx emissions during 1990-2005 due to the setting up of the EURO pollutant emission standard, with successive and decreasing limits of emissions. Secondly, we define variations depending on the calibration process and mathematical formulation. As the speed flow curves are highly sensitive in traffic model, we assume that this sensitivity is also significant into the coupling of the traffic and pollutant emission models. Thus, different assumptions and calibrations of this curve are tested.

The Reference Scenario is composed by a reference OD matrix, a 2008 CITEPA vehicle fleet composition and calibrated BPR2 speed-flow curves (eq. 1).

3.1 Demand Scenario

An Origin-Destination matrix is a table with *I* lines and *J* columns. *Tij* elements represent the number of travel from *i* area to *j* area during a time *k*. This matrix represents traffic demand expressed in vehicles units. OD matrix estimation methods are not really accurate because only traffic flows can be easily observed on the contrary to vehicles routes which are difficult to observe. OD matrices are thus estimated from derivative observation (travel surveys, entropy method...). This induces a high level of uncertainty. It is difficult to evaluate the potential uncertainty of this complex stage. We decided to take into account a hypothetic uncertainty rate of 20 %. This is coherent with noted errors after the calibration of the model which are of 12 % on average between observed traffic counts and modelled traffic (CETE de l'Ouest, 2011). A scenario with a homogeneous increase of 20% of the overall travel demand is thus simulated.

3.2 Vehicle fleet composition Scenario

Determining the actual composition of the vehicle fleet (in its diversity and sizes) induces the working out of many data, assumptions, and the combining of heterogeneous or partial statistics. For example, the IFSTTAR vehicle fleet composition is built-up from license registration data and implies a disaggregation into detailed classification (according to technologies, fuels, emission standards, sizes), vehicles survival assumptions, etc... Then, the on-the-road vehicle fleet composition is estimated by combining the previous results (static fleet) and vehicles usage parameters (annual mileage as regards vehicle types and age, and its distribution in urban, rural areas, etc.).

Different vehicle fleet compositions exist. They are based on different assumptions and they are computed by different institutes. Reference Scenario is based on 2008 CITEPA vehicle fleet composition. A 2008 IFSTTAR vehicle fleet composition derived from (Hugrel & Joumard, 2004), updated in 2011, exists. We decided to compare pollutant emissions resulting from these two scenarios.

3.3 Non-calibrated Speed Flow Curves Scenario

Speed-flow curves are used in transport models to estimate traffic flow and vehicle speed on each link of the roads network during a defined time-period. These curves are an important part of the assignment model because they define the relation between travel times and flows. These curves are however rarely validated at a local scale (Bonnel, décembre 2001) because the necessary data are not always available. Generally, modellers use curves that were calibrated for other cases and places.

The model for traffic assignment takes into account BPR2 speed flow curves (eq. 1). The BPR curves were developed by the Bureau of Public Road; it is parabolic in shape and allows to distinguish the non-saturated and the saturated situations (the saturation being defined by the volume/capacity ratio). Traditionally, these curves are used for travel models (Singh, 1999).

$$\begin{cases} t = t_0 \times \left(1 + a\left(\frac{Q}{Q_{max} \times c}\right)^b \right) & for \ \frac{Q}{Q_{max}} \leq 1 \\ t = t_0 \times \left(1 + a\left(\frac{Q}{Q_{max} \times c}\right)^{b'} \right) & for \ \frac{Q}{Q_{max}} > 1 \end{cases} \quad (1)$$

Where t is the average travel time per unit distance (hours/km), t_0 is the free-flow travel time per unit distance (hours/km), Q is the demand volume (vehicles per hour), Q_{max} is the maximum capacity (vehicles per hour) and a, b, b' and c are the calibration coefficients.

In a first run, we used non-calibrated curves. Traffic indicators result thus from a simulation with coefficient corresponding to the non-calibrated curve (see Tab.1).

Table 1. Coefficient values for BPR2 curves

	Non-calibrated curve		Calibrated curve			
	a	b and b'	a	b	b'	c
Fast lanes and ring roads	1	6	5	10	10	1
Boulevards	1.5	6	5	8	10	1
Streets	2.3	6	5	6	10	1
Ring roads			4	10	10	1

In a second step, speed data experienced on the Nantes ring road were recorded, and that enables a calibration of the corresponding speed-flow curves. To calibrate the speed-flow curves, the travel times calculated by the model are compared to the observed travel times on several ring-road links to determine if the coded link speeds are accurately reflecting traffic flow conditions. It should be noted that such a calibration cannot be performed on all the network links. New coefficients are adjusted this way. The comparison of the resulting curves with the standard ones is shown in fig 2.

3.4 Akçelik Speed Flow Curves Scenario

Speed-flow curves are highly sensitive parameters of the travel models. The sensitivity of the traffic and estimations of pollutant emissions as regards such curves is analysed. A curve, which is based on some different assumptions, is applied to the traffic assignment model. The Akçelik function (Akçelik, 1991) is as follows:

$$t = t_0 + \frac{3600}{4}T\left[(x-1) + \sqrt{(x-1)^2 + \frac{16Jx}{T^2}}\right] \quad (2)$$

Where t is the average travel time per unit distance (hours/km), t_0 is the free-flow travel time per unit distance (hours/km), x is the saturation rate, T is the flow period i.e., the time interval in hours, during which an average arrival (demand) flow rate persists and J is the delay parameter

The Akçelik equation is a time-dependent modified form of the Davidson's function (Akçelik, 1991) to model flows near and above the street capacity. This curve is based on the queuing theory, assumes that speed depends on link length and saturation rate and could allow a better taking into account of the congestion effects thanks to a delay parameter corresponding to the crossing time at the intersections (Dowling Associates Inc., 2005). This curve should provide more realistic results. According to (National Cooperative Highway Research Program, 2005), Akçelik speed-flow estimates more accurately the travel delay effects of traffic congestion than other curves. (Dowling, Singh, & Cheng, 1998) compared BPR and Akçelik curves with field data and concluded that the BPR curves underestimate speeds for a saturation rate which ranges from 0.8 to 1 and overestimate speeds when the demand exceeds the road capacity.

Akçelik curves delay parameters used in our study are derived from (National Cooperative Highway Research Program, 2005). Eleven parameters are defined depending on street type and capacity.

A comparison between different speed-flow curves shapes is shown fig.2. Non-calibrated BPR2 curve rapidly decreases when the saturation rate is around 40%, i.e. the speed starts to decrease when the volume/capacity ratio reaches this limit. On the other hand, the calibrated BPR2 curve decreases after 60% and the Akçelik curve decreases more suddenly at 80% of saturation.

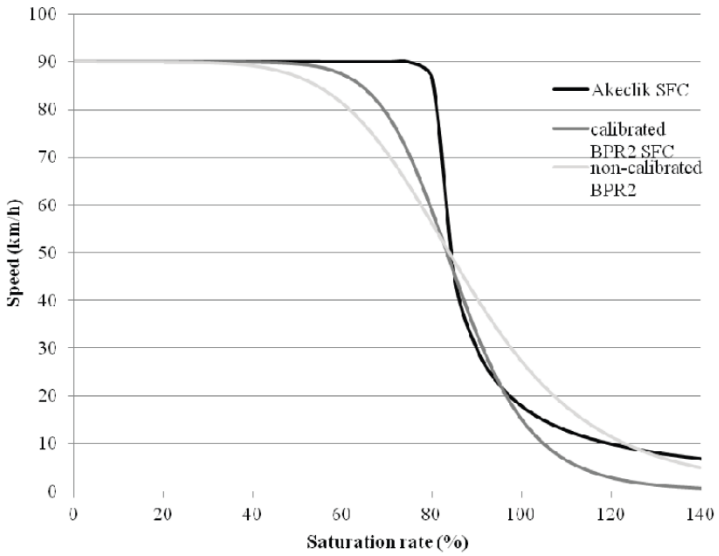


Fig. 2. Speed flow curves

4. Statistical model

Different scenarios are elaborated and computed. Variations of traffic and pollutant emission indicators are studied for the different scenarios. Then, a statistical analysis (linear regression) is carried out to test the significance of the impact of the different input parameters, as regards their impact on traffic and pollutant emissions results. Owing to a small number of observations, it is not possible to use a statistical model including all the input parameters. A statistical model for each input parameter is applied. P-value is used to characterize the influence of the different scenarios on traffic and emission indicators.

5. Traffic results

In a first time, we analyse traffic indicators (mean speed and traffic volume) for the different studied scenarios and for the Morning Peak Hours (7-9 am). Results are presented for the whole Nantes Metropole area.

Table 2. Variations of the traffic indicators as regard the 2008 Reference Scenario for the Morning Peak Hours

	Reference	Demand		Non-calibrated SFC		Akcelik SFC	
		Value	Variation	Value	Variation	Value	Variation
Mean Speed (km/h)	47	42	- 10%	55	+ 17%	33	- 31%
Veh.km (veh.km x 10^6)	1.85	2.05	+ 10%	1.8	- 3%	1.83	-2%

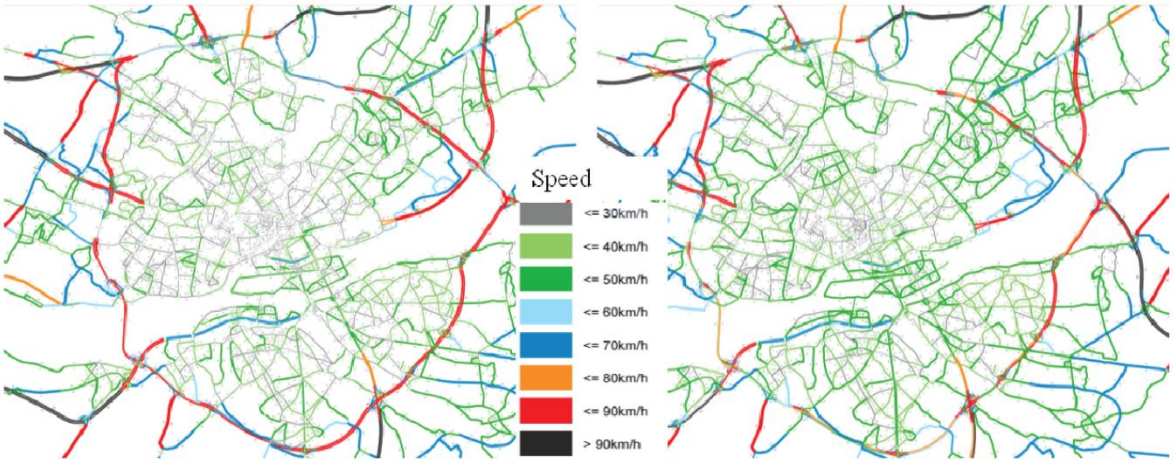


Fig. 3. Speeds distribution at Morning Peak Hours for the Akçelik SFC Scenario (left) and for the 2008 Reference Scenario (right): Speeds for the Akçelik SFC Scenario are generally lower than the speeds recorded for the 2008 Reference Scenario on the city centre roads

The table 2 shows that the Akçelik SFC scenario leds to a strong decrease of the overall mean speed by about 31 %. The speed decrease is mainly observed in the city centre (fig. 3). Indeed, on the city centre

streets, the capacity is low and when the demand exceeds the capacity, the speed decreases suddenly due to the shape of the curve. Moreover, the crossing delays taken into account in the Akçelik equation curve also reduce the speed on the city centre streets. We also notice the effect of non-calibrated curves on speeds, thus induces a speed increase of about 17%.

In the Travel Demand Scenario, the increase of travel demand mechanically induces a higher number of travel and total travel distance. The increase of traffic flux induces a decrease of mean speed.

Variations induced by the shape of the SFC (the non-calibrated SFC and the Akçelik SFC scenarios) are quite important: from 17 to 31 % for speed. And that demonstrates the necessity of a calibration of this curve, calibration that is rarely done due to the need of in-situ data. Moreover, while it is possible to calibrate curve parameters for fast lanes using travel time; it is quite difficult to calibrate them for city centre roads due to the large number of intersections and the potential impact of traffic signals.

In the context of environmental assessment of transportation policies, the observed variability could appear as a drawback. Indeed, results observed on other scenarios as with or without Bus rapid transit show that the maximum observed variability reaches 10 %. Then, variability from model hypothesis is higher than variability due to contrast transportation facilities Scenario. This observation raises up interpretation difficulties for these facilities.

6. Statistical analysis

In a second time, we analyse variations of pollutant emissions (Tab.3).

Table 3. Variations of pollutant emissions induced by each Scenario compared to the 2008 Reference Scenario

		Sensitivity to the demand	Variations on speed-flow curve		
	Reference	Demand	Non-calibrated SFC	Akçelik SFC	Fleet composition
CO2 (ton)	224	+10%	-7%	+7%	-4%
NOx (ton)	1.18	+8%	-5%	+6%	-2%
PM (ton)	0.14	+7%	-3%	+3%	-2%
Veh.km $x10^6$	1.85	+10%	-3%	-2%	0%
Speed (km/h)	47	-10%	+17%	-31%	0%

The Demand Scenario presents the largest variation compared to the 2008 Reference Scenario for all pollutants. This Scenario induces variations of traffic and speed of about 10%. But this one induces variations of pollutant emissions between 7 and 10 % depending on pollutant. As the static transportation

model does not consider congestion effects, pollutant emissions that can be induced by the multiplication of different driving phase (acceleration and deceleration) cannot be characterised. And yet, for this scenario, the increase of traffic and the decrease of the mean speed could reflect an increase of congestion effects. In this case, pollutant emissions from the model could be biased by this approximation.

The Fleet Composition Scenario induces low variations on pollutant emissions. This result could indicate that this parameter is less sensitive than the others (demand and SFC Scenarios).

The Akçelik Scenario induces the largest variation of speed (-31%) but this one induces variations of pollutant emissions of only some percents. That is firstly explained by the shape of emission vs. speeds curves of recent vehicle fleet composition. These curves are indeed more and more flat as the part of vehicles respecting new EURO pollutant emission standards increases. Thus, the influence of speed on variations of pollutant emissions is more and more reduced. That explains that for the Akçelik Scenario, variations of speeds as regards the Reference Scenario is important but variations of pollutant emissions are low.

The Non-Calibrated Scenario induces high variations on speed and low variations of pollutant emissions. The explanations outlined for Akcelik Scenario are unchanged for this Scenario. That could be confirmed that speeds have low effect on variations of pollutant emissions resulting, in our study, from a pollutant emissions model based on mean speed.

Regression analysis results (tab 4 and 5) corroborate variations presented in tab.3. This analysis show the significant influence of the variations of travel demand on variations of traffic (P-Value=0.008). When the demand increases, the number of travels or trip length increases, traffic then increases, these two parameters (travel demand and traffic) are logically linked. Other scenarios have a low influence on traffic (P-Values range from 0.43 to 0.86). Although Akcelik SFC Scenario induce high variations of speed, the variation of SFC shape have not a significant influence on speeds. That could be explained because variations of speeds induced by others scenario are high. Variations of CO2, NOx and PM pollutant emissions are not significantly influenced by one scenario in particular.

Table 4. Results for the different scenarios used in a regression approach

Observations	Demand	Calibration	Curve	Fleet	CO2 (ton)	NOx (ton)	PM (ton)	veh.km x 10^6	Speed (km/h)
Reference	Initial	yes	BPR2	2008 CITEPA	234	1.18	0.136	1.85	47
Demand	+ 20%	yes	BPR2	2008 CITEPA	258	1.27	0.145	2.05	42
Non-calibrated SFC	Initial	no	BPR2	2008 CITEPA	218	1.12	0.131	1.79	55
Akçelik SFC	Initial	yes	Akçelik	2008 CITEPA	250	1.26	0.139	1.83	33
Fleet composition	Initial	yes	BPR2	2008 IFSTTAR	225	1.16	0.133	1.85	47

Table 5. Results from the regression analysis of the different scenarios with P-value in brackets (NS: Non significant influence)

	Demand	Non-calibrated SFC	Akçelik SFC	Updated Fleet composition
CO2 (ton)	NS (0.18)	NS (0.27)	NS (0.48)	NS (0.48)
NOx (ton)	NS (0.24)	NS (0.19)	NS (0.40)	NS (0.62)
PM (ton)	NS (0.09)	NS (0.26)	NS (0.69)	NS (0.56)
veh.km	Significant (0.008)	NS (0.43)	NS (0.66)	NS (0.86)
Speed	NS (0.79)	NS (0.19)	NS (0.08)	NS (0.80)

7. Discussion

These results constitute a preliminary sensitivity analysis and highlight that demand is a highly sensitive parameter. We have taken into account different potential uncertainty sources, which would justify such a sensitivity analysis of models, and we have selected a couple of parameters but several complementary parameters should also be considered. In the context of a global sensitivity analysis of a transportation model, (Nicolas, 1996) compared two assignment processes: Wardrop's principle and all-or-nothing principle. He obtained variations of around 10 and 12 % on traffic. That shows that other parameters can be as sensible as those studied in this work.

Some limitations of this work could be noticed and constitute elements which need complementary work to confirm our results. First and foremost, as we change only one parameter (one scenario definition or one particular SFC) in one run, and we do not consider thus their interaction which are certain, results must be interpreted with caution and might be confirmed with complementary experimentations. Secondly, analysed scenarios are based on potential variations of the different parameters (demand, SFC, fleet composition). These potential variations influence results. A most complete work about these potential variations could support our results. Lastly, the model is only calibrated on the Reference Scenario and not for the other scenarios whereas the distortion obtained with a calibration could be important.

References

Akçelik, R. (1991). Travel Time Functions for Transport Planning Purposes: Davidson's Function, its Time-Dependent Form and an Alternative Travel Time Function. *Australian Road Research, 21*(3), 49 - 59.

Bonnel, P. (2001). *Prévision de la demande de transport*: Laboratoire d'Economie des Transports, ENTPE, Université Lumière Lyon 2, CNRS.

CETE de l'Ouest. (2011). Eval-PDU : Livrable L 2.3 : Note méthodologique, Modélisation des déplacements et du trafic

CETE Normandie Centre, & DADT Département Aménagement Durable des Territoires. (2010). *COPCETE v3, Outil de Calcul des Emissions Polluantes d'Origine Routière, Notice d'utilisation*.

CITEPA. (2010). *Parc statique et roulant 2002 et 2008 pour COPERT (inventaire national)*.

Dowling Associates Inc. (2005). *Arterial Speed Study*.

Dowling, R. G., Singh, R., & Cheng, W. W.-K. (1998). Accuracy and Performance of Improved Speed-Flow Curves. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board, 1646*(98-0146), 9 - 17.

Hugrel, C., & Joumard, R. (2004). *Transport routier- Parc, usage et émissions des véhicules en France de 1971 à 2025*: INRETS.

Mestayer, P., Abidi, A., André, M., Brocher, E., Bougnol, J., & Bourges, B. (2010). *Environmental impact assessment of urban mobility plan: a methodology including socio-economic consequences*. Paper presented at the 10th Urban Environment Symposium, 9-11 June 2010.

National Cooperative Highway Research Program. (2005). *Predicting Air Quality Effects of Traffic-Flow Improvements : Final Report and User's Guide*.

Nicolas, J.-P. (1996). *Ville, Transports et Environnement.* Université Lumière Lyon 2, Lyon.

Singh, R. (1999). *Improved Speed-Flow Relationships : Application to Transportation Planning Models*. Paper presented at the 7th TRB Conference on Application of Transportation Planning.

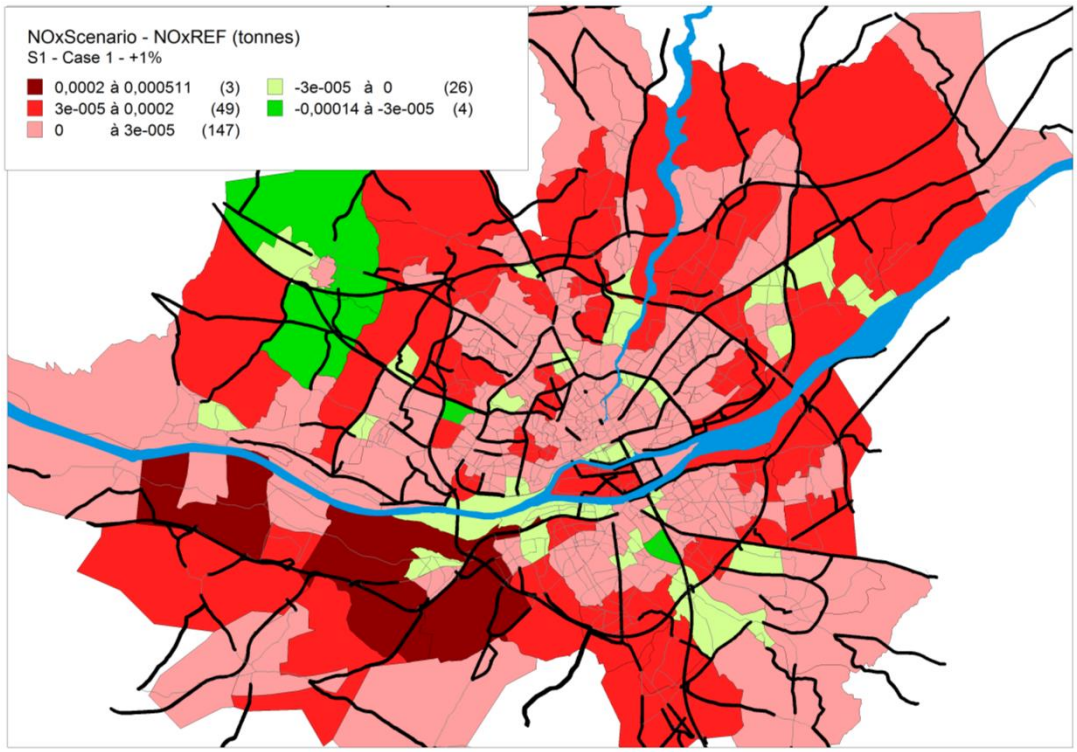
Vestreng, V., Nitziachristos, L., Semb, A., Reis, S., Isaksen, I. S. A., & Tarrason, L. (2009). Evolution of NOx emissions in Europe with focus on road transport control measures. *Atmospheric Chemistry and Physics, 9*, 1503 - 1520.

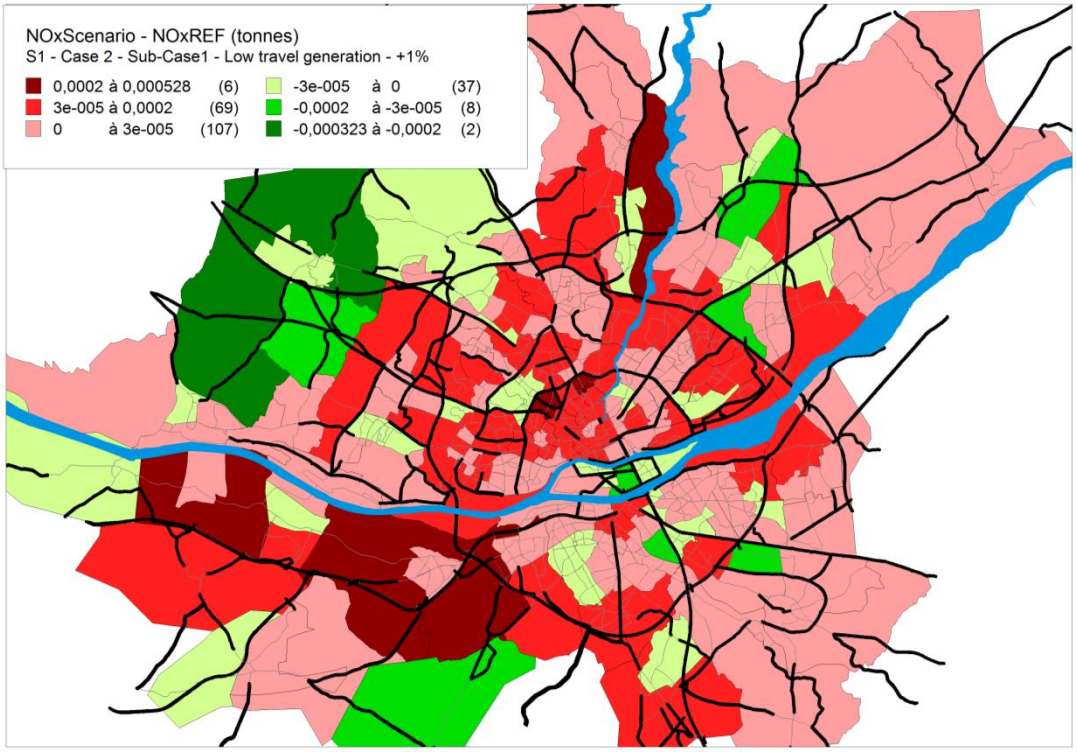
Annexe 7 : Validité des simulations et analyse du taux de saturation

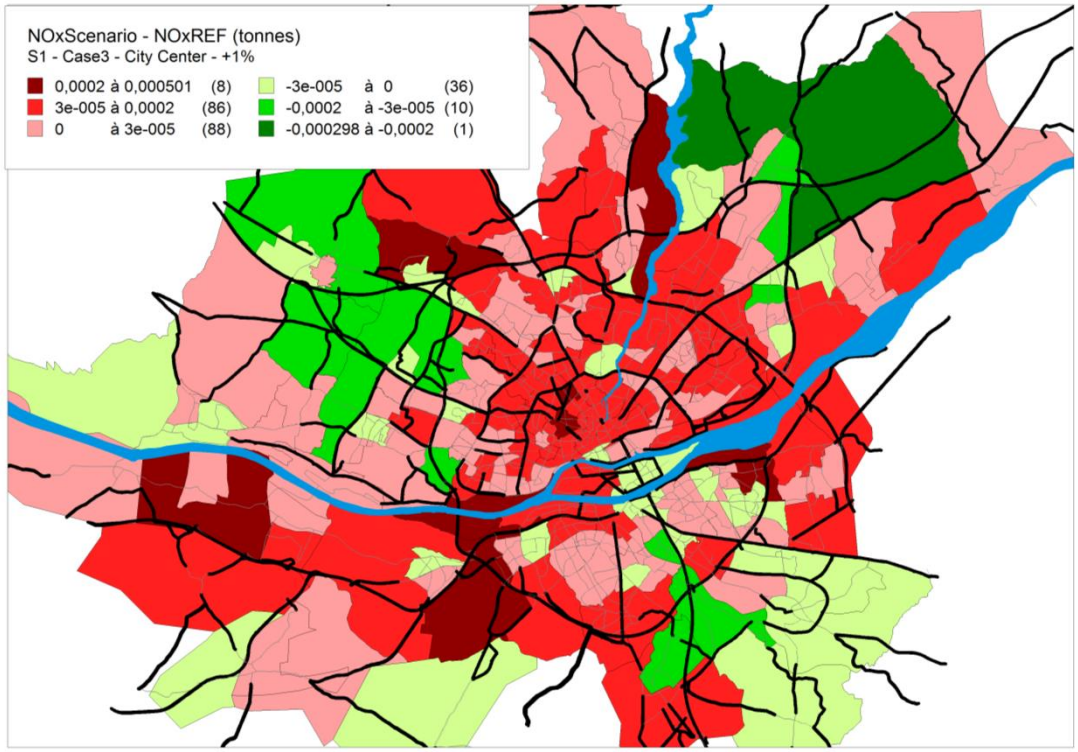
Simulation	% de liens avec Ts > 90%	Simulation	% de liens avec Ts > 90%	Simulation	% de liens avec Ts > 90%
REF	1,68	ZP+4	1,81	403+2	1,74
G-50	0,50	ZP+5	1,91	403+5	2,84
G-30	0,74	ZP+10	2,44	ODZ+75	1,68
G-25	0,80	IDN-1	1,58	ODZ+10	8,21
G-20	0,92	IDN+1	1,66	ODZ+5	2,94
G-15	1,03	IDN+2	1,66	ODZ+2	1,91
G-10	1,18	IDN+4	1,72	407et1+75	1,70
G-5	1,32	IDN+5	1,81	407et1+10	3,40
G-4	1,41	IDN+10	2,77	407et1+5	2,04
G-2	1,51	2016+75	1,66	407et2+75	1,70
G-1	1,66	2016+10	3,38	407et2+10	2,82
G+1	1,72	2016+1	1,66	407et2+5	1,93
G+2	1,72	407+75	1,70	407+5	2,27
G+4	1,70	407+10	4,16	408et1+75	1,70
G+5	1,76	407+1	1,72	408et1+10	3,53
G+10	1,91	403+75	1,68	408et1+5	2,04
G+15	2,21	403+10	5,32	408et2+75	1,70
G+20	2,44	403+1	1,70	408et2+10	2,86
G+25	2,92	408+75	1,70	408et2+5	1,93
G+30	3,40	408+10	4,58	CG+5	1,30
G+40	4,24	408+1	1,74	CG-5	1,93
G+50	5,50	OD+75	1,66	CHC-5	1,68
ZP-2	1,60	OD+10	4,85	Péri-5	1,70
ZP-1	1,62	OD+1	1,72	Péné-10	1,68
ZP+1	1,70	OD+5	2,31		
ZP+2	1,76	408+5	2,42		

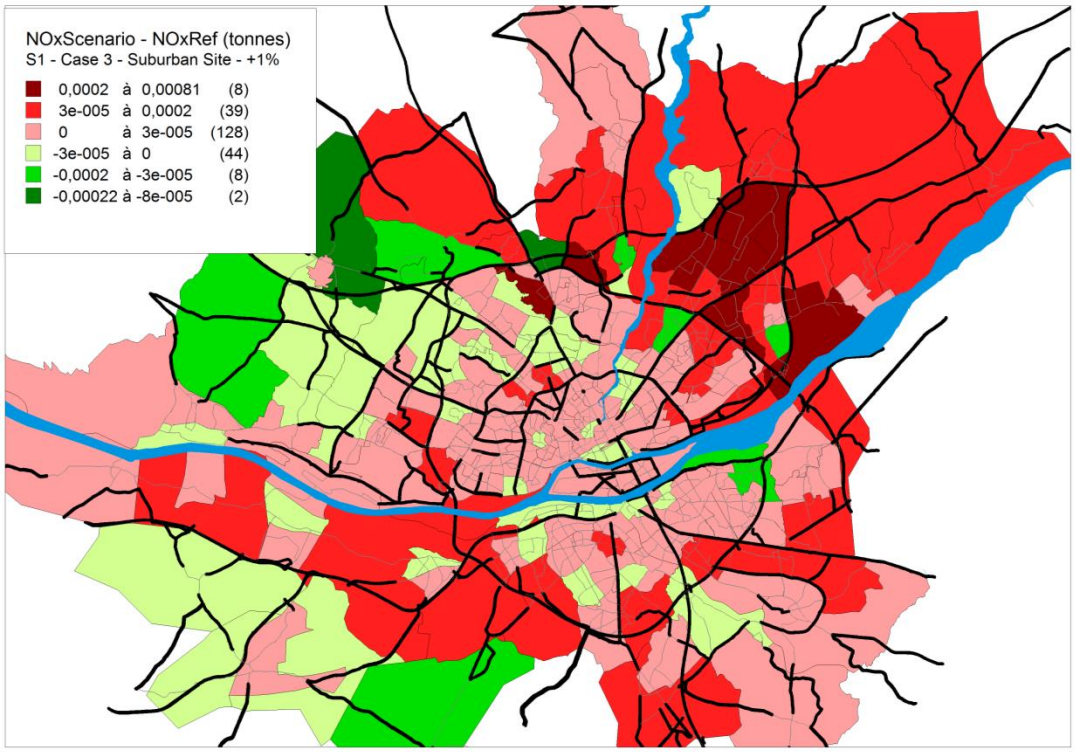
Les simulations soulignées en jaune sont définies comme en dehors du domaine de validité des modèles. Elles sont donc exclues des analyses. L'ensemble des simulations qui ont plus de 2,5% de tronçons avec un taux de saturation supérieur à 90% possède aussi des tronçons pour lesquels la variation du taux de saturation entre la situation de référence et la simulation dépasse les 50%.

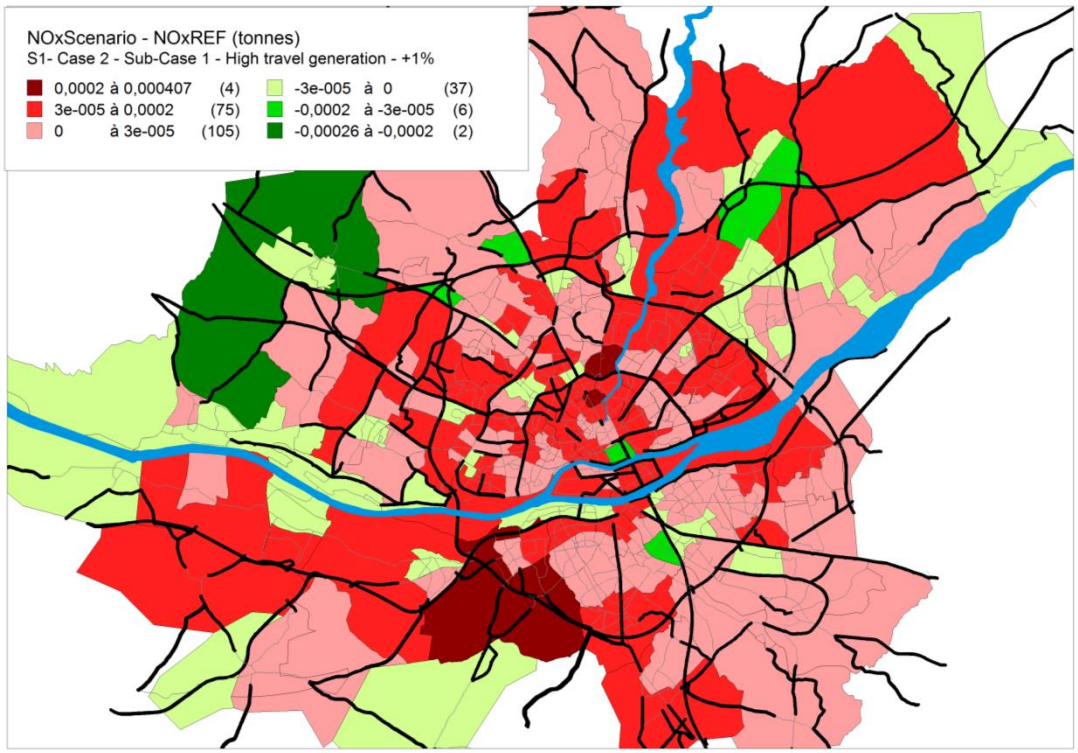
Annexe 8 : Répartition spatiale des émissions de NOx pour les simulations représentant le Stimulus 1






NOxScenario - NOxREF (tonnes)
S1 - Case3 - City Center - +1%
0,0002 à 0,000501 (8)
3e-005 à 0,0002 (86)
0 à 3e-005 (88)
-3e-005 à 0 (36)
-0,0002 à -3e-005 (10)
-0,000298 à -0,0002 (1)


NOxScenario - NOxRef (tonnes)
S1 - Case 3 - Suburban Site - +1%
0,0002 à 0,00081 (8)
3e-005 à 0,0002 (39)
0 à 3e-005 (128)
-3e-005 à 0 (44)
-0,0002 à -3e-005 (8)
-0,00022 à -8e-005 (2)


NOxScenario - NOxREF (tonnes)
S1- Case 2 - Sub-Case 1 - High travel generation - +1%
0,0002 à 0,000407 (4)
3e-005 à 0,0002 (75)
0 à 3e-005 (105)
-3e-005 à 0 (37)
-0,0002 à -3e-005 (6)
-0,00026 à -0,0002 (2)

Annexe 9 : Quantification des impacts globaux pour chaque simulation

Stimulus	Case	Sub-Case	Variation	Simulation	Veh.km NM	Variation Veh.km par rapport au Scénario de Reference	Total CO2 (tonnes)	Total NOx (tonnes)
1	1		global	-50%	642 419	-284886	157.55	0.9063
				-30%	755 041	-172264	180.11	0.9984
				-25%	783 034	-144271	185.98	1.0222
				-20%	811 814	-115491	192.25	1.0478
				-15%	840 795	-86510	198.63	1.0737
				-10%	869 641	-57664	205.09	1.0994
				-5%	898 550	-28755	211.85	1.1270
				-4%	904 053	-23252	213.15	1.1319
				-2%	915 769	-11536	215.89	1.1426
				-1%	921 491	-5814	217.26	1.1481
				0	927 305	0	218.7	1.1538
				+1%	933 191	5886	220.05	1.1591
				+2%	938 948	11643	221.52	1.1649
				+4%	949927	22622	224.12	1.1751
				+5%	955 623	28318	225.68	1.1813
				+10%	984 842	57537	233.00	1.2100
				+15%	1 014 531	87226	241.10	1.2427
				+20%	1 044629	117324	249.44	1.2753
				+30%	1 104 426	177121	266.59	1.3424
				+40	1 164 859	237554	284.66	1.4107
				+50	1 227794	300489	305.57	1.4905
	2	1 Low travel generation	local	-25%	927 001	-304	218.63	1.1536
				-50%	926 675	-630	218.53	1.1532
				-75%	926 401	-904	218.48	1.1529
				+25%	927 630	325	218.76	1.1542
				+50%	928 024	719	218.89	1.1547
				+75%	928 390	1085	218.94	1.1548
			global	+1%	933 790	6485	220.27	1.1600
				+2	941 703	14398	222.47	1.1690
				+5	971 196	43891	231.43	1.2050
				+10	1 024 409	97104	249.51	1.2773
		1 High travel generation	local	-75	926 064	-1241	218.39	1.1526
				-50	926 487	-818	218.47	1.1529
				-25	926 910	-395	218.60	1.1535
				+25	927 845	540	218.81	1.1543
				+50	928 336	1031	218.91	1.1546
				+75	928 635	1330	219.00	1.1550
			global	+1	934 490	7185	220.46	1.1610
				+2	943 269	15964	222.92	1.1710
				+5	976 316	49011	233.20	1.2131
				+10	1 042 990	115685	256.89	1.3091
		2 Low travel generation 1st area	local	-25	927 093	-212	218.63	1.1535
				-50%	926 731	-574	218.52	1.1531
				-75%	926 416	-889	218.43	1.1527
				+25	927 606	301	218.73	1.1540
				+50	928 075	770	218.84	1.1544
				+75	928 331	1026	218.93	1.1547
			global	+1	934 534	7229	220.40	1.1606
				+2	940 933	13628	220.04	1.1673
				+5	965 553	38248	229.19	1.1964

				+10	1 017 910	90605	246.18	1.2651
		2 Low travel generation 2nd area	Local	-25	927 034	-271	218.53	1.1531
				-50	926 726	-579	218.53	1.1531
				-75	926 413	-892	218.41	1.1526
				+25	927 747	442	218.79	1.1541
				+50	928 094	789	218.88	1.1546
				+75	928 355	1050	218.91	1.1547
			global	+1	934 476	7171	220.37	1.1606
				+2	941 084	13779	222.04	1.1674
				+5	964 429	37124	228.51	1.1935
				+10	1 009 399	82094	242.06	1.2480
		2 High travel generation 1st area	local	-25	925 172	-2133	219.18	1.1557
				-75	920 987	-6318	217.21	1.1478
				-50	923 110	-4195	218.66	1.1497
				+75	934 016	6711	220.31	1.1604
			global	+1	934 760	7455	220.48	1.1612
		2 High travel generation 2nd area	Local	-75	926 095	-1210	218.35	1.1524
				+75	928 618	1313	218.97	1.1549
			global	+1	934 706	7401	220.50	1.1613
		3	global	-2	908 690	-18615	214.50	1.1377
				-1	917 915	-9390	216.56	1.1457
				+1	936 100	8795	220.79	1.1619
				+2	945 303	17998	223.01	1.1702
				+4	963 001	35696	227.98	1.1879
		Specific sub case	global	-1	920 162	-7143	217.16	1.1475
				+1	934 721	7416	220.23	1.1600
				+2	942 485	15180	222.04	1.1674
				+4	958612	31307	225.90	1.1827
	3	City Center	local	-75%	925 664	-1641	218.27	1.1522
				-50%	926 215	-1090	218.40	1.1527
				-25%	926 820	-485	218.57	1.1533
				+25%	928 027	722	218.88	1.1546
				+50%	928 715	1410	219.01	1.1550
				+75%	929 238	1933	219.15	1.1556
			global	+1%	935 768	8463	220.96	1.1626
				+2%	944 115	16810	223.35	1.1718
				+5%	977 961	50656	234.04	1.2146
				+10%	1 054 913	127608	261.16	1.3237
		Suburban Site	local	-75	916 996	-10309	216.31	1.1445
				-50	920 428	-6877	217.08	1.1475
				-25	923 973	-3332	217.89	1.1505
				+25	930 853	3548	219.47	1.1565
				+50	933 439	6134	219.99	1.1583
				+75	937 754	10449	221.09	1.1626
			global	+1	936 103	8798	220.61	1.1604
				+2	945 038	17733	222.97	1.1693
	4	1	Local	-75	926 741	-564	218.57	1.1533
				-50	926 933	-372	218.61	1.1534
				-25	927 132	-173	218.65	1.1536
				+25	927 573	268	218.69	1.1537
				+50	927 754	449	218.76	1.1541
				+75	927 889	584	218.81	1.1543
			global	+1	939 283	11978	221.70	1.1657
		2	local	-75	923 129	-4176	217.59	1.1491

				-50	924 434	-2871	217.95	1.1508
				-25	925 855	-1450	218.28	1.1520
				+25	928 793	1488	219.03	1.1552
				+50	930 193	2888	219.32	1.1561
				+75	931 544	4239	219.69	1.1576
			global	+1	937 499	10194	221.30	1.1641
2	1			-5	922 973	-4332	220.20	1.1579
				+5	930 771	3466	217.39	1.1503
	2			-5	927 620	315	218.79	1.1543
				+5	927 216	-89	218.61	1.1534
	3			-5	923 217	-4088	218.7	1.1529
				+5	929 917	2612	218.30	1.1534
	4			-5	927 394	89	218.70	1.1538
				-10	927 317	12	218.66	1.1533
				+5	927 523	218	218.65	1.1534
				+10	927 347	42	218.65	1.1536
3	1	Parc2010					219.03	1.0394
		Parc2015					219.62	0.7459
		Parc2020					220.18	0.4273
	2	1					218.82	1.1371
		2					219.17	1.0948

Résumé

Dans un contexte d'émergence des enjeux environnementaux liés aux transports, une large palette de mesures de gestion des déplacements et du trafic (développement des transports en commun, mise en place de Zone d'Actions Prioritaires pour l'Air, développement du concept de voiture partagée…) est mise en œuvre ou envisagée. Les effets réels de ces mesures sur les émissions de polluants, à court ou long terme sont difficilement évaluables selon des méthodes non rationalisées.

Il s'agit ici de mener une réflexion scientifique sur l'évaluation environnementale. Le questionnement concerne les trafics, les émissions de polluants, la pertinence des outils de modélisation et la compréhension des mécanismes d'action.

L'évaluation des mesures de gestion du trafic et des déplacements se heurte à leur diversité, la complexité et l'interaction des mécanismes d'effet, et à leur représentation dans les modèles. Dans une approche de caractérisation des effets et de représentation de l'impact des mesures, nous définissons des actionneurs (stimuli), composantes des entités trafic/déplacements ou émissions de polluants, déclinées suivant la localisation de leur action et par lesquels les différentes mesures peuvent être traduites. La demande en déplacements en Véhicules Particuliers, la capacité de la voirie, y compris dans leur dimension spatiale, et la composition du parc automobile ont été identifiées et permettent de caractériser un grand nombre de mesures (demande, changement modal, gestion locale du trafic, politiques de parking, etc.). Leurs actions sont étudiées sous différents scénarios (variation de la demande, de sa localisation, de la capacité, etc.). On analyse ainsi la réponse à ces stimuli en termes de trafic et d'émissions. Ces travaux sont effectués sur la plate forme de calcul sur l'aire de Nantes Métropole (modèle Visem/Visum/modèle CopCETE) et permettent l'esquisse d'une approche d'évaluation de mesures individuelles. La méthode est démontrée sur le cas de la mise en place d'un Transport en Commun en Site Propre.

Mots clés : évaluation environnementale, mesures de gestion des déplacements, trafic, modèle statique de déplacements, modèle d'émissions, émissions de polluants, méthode d'évaluation

Abstract

Due to the appearance of environmental issues linked to transport, a large range of mobility/traffic measures (public transport development, Low Emission Zones, development of sharing car concept...) is implemented or planed. Short or long-term real effects of these measures on pollutant emissions are hard to assess from non rational methodologies.

In this work, we start a reflection about environnemental assessment through an important literature review. The questioning is related to the traffic, pollutant emissions, the relevance of modeling tools and the understanding of occurring mechanisms.

Assessment of measures is difficult due to their variety, the complexity and the interaction of occurring mechanisms, as well as the representation of their effects in the modeling tools. In order to characterize their effects and to represent the emissions impact, we have defined three stimuli which are given depending on the localization of their action and for which the effects of different measures could be represented. The stimuli are: the Passenger Cars travel demand, the road network capacity and the vehicle fleet composition. They allow to characterize a large range of measures (variations in travel demand, modal share, traffic management, parking policies). Their actions are studied through different scenari (variation of trips generation, global demand…). In this way, we analyze the pollutant emissions and traffic responses to mobility/traffic measures. These testing are approached according to traffic and emission models (Visem/Visum/CopCETE) on the Nantes Metropole area. They allow to outline an assessment approach based on individual measures. The method is demonstrated on the assessment of a Bus rapid Transit System.

Keywords : environmental assessment, mobility and traffic measures, traffic, transportation model, pollutant emissions model

FOLIO ADMINISTRATIF

THESE SOUTENUE DEVANT L'ECOLE NATIONALE DES TRAVAUX PUBLICS DE L'ETAT

NOM : BRUTTI-MAIRESSE DATE de SOUTENANCE : 12/03/2013

Prénoms : Eugénie, Marie

TITRE :

Réflexion sur les méthodes d'évaluation environnementale des mesures de gestion des déplacements et du trafic : analyse critique et proposition d'un nouveau cadre conceptuel

NATURE : Doctorat Numéro d'ordre : 2013-ENTP-0002

Ecole doctorale : Mécanique, énergétique, génie civil et acoustique (MEGA)

Spécialité : Génie civil

Cote B.I.U. - / et bis CLASSE :

RESUME :
Dans un contexte d'émergence des enjeux environnementaux liés aux transports, une large palette de mesures de gestion des déplacements et du trafic (développement des transports en commun, mise en place de Zones à Actions Prioritaires pour l'Air, développement du concept de voiture partagée…) est mise en œuvre ou envisagée. Les effets réels de ces mesures sur les émissions de polluants, à court ou long terme sont difficilement évaluables selon des méthodes non rationalisées.
Il s'agit ici de mener une réflexion scientifique sur l'évaluation environnementale à travers une importante analyse bibliographique. Le questionnement concerne les trafics, les émissions de polluants, la pertinence des outils de modélisation et la compréhension des mécanismes d'action.
L'évaluation des mesures de gestion du trafic et des déplacements se heurte à leur diversité, la complexité et l'interaction des mécanismes d'effet, et à leur représentation dans les modèles. Dans une approche de caractérisation des effets et de représentation de l'impact des mesures, nous définissons des actionneurs (stimuli), composantes des entités trafic/déplacements ou émissions de polluants, déclinées suivant la localisation de leur action et par lesquels les différentes mesures peuvent être traduites. La demande en déplacements Véhicules Particuliers, la capacité de la voirie, y compris dans leur dimension spatiale, et la composition du parc automobile ont été identifiées et permettent de caractériser un grand nombre de mesures (demande, changement modal, gestion locale du trafic, politiques de parking, etc.). Leurs actions sont étudiées sous différents scénarios (variation de la demande, de sa localisation, de la capacité, etc.). On analyse ainsi la réponse à ces stimuli en termes de trafic et d'émissions. Ces travaux sont effectués sur la plate forme de calcul sur l'aire de Nantes Métropole (modèle Visem/Visum/modèle CopCETE) et permettent l'esquisse d'une approche d'évaluation de mesures individuelles. La méthode est démontrée sur le cas de la mise en place d'un Transport en Commun en Site Propre.

MOTS-CLES : évaluation environnementale, mesures de gestion des déplacements, trafic, modèle statique de déplacements, modèle d'émissions, émissions de polluants, méthode d'évaluation

Laboratoire (s) de recherche :

Laboratoire Transport Environnement (LTE), IFSTTAR

Directeurs de thèse: Leclercq Ludovic et André, Michel

Président de jury :

Composition du jury :

Hégron, Gérard	Miramond, Marcel
Cornélis, Eric	Leclercq, Ludovic
Bourges, Bernard	André, Michel