

Sétra

Service d'études
sur les transports,
les routes et leurs
aménagement

Rapport d'études

Evaluation environnementale des projets de gestion dynamique de trafic

La qualité de l'air



Page laissée blanche intentionnellement

Préface

Ce rapport a pour objectif de présenter des éléments de méthodologie pour l'évaluation de l'impact sur la qualité de l'air d'un projet de gestion dynamique de trafic, que ce soit pour des études *a priori* ou *a posteriori*. Ce rapport aborde notamment la question du périmètre géographique et temporel de l'étude (zone d'étude, horizon d'étude), des scénarios à comparer, des indicateurs (polluants, gaz à effet de serre, consommation de carburant). Ce rapport dresse également un panorama des types de modèles mobilisables. Il s'intéresse principalement à la quantification des émissions, aborde rapidement la question des concentrations, mais ne traite pas de l'exposition des personnes.

Les éléments de méthodologie proposés s'appuient, d'une part, sur la méthodologie générale utilisée dans les volets « air et santé » des études d'impacts, qui précise le cadrage et le contenu de ces études. Elle nécessite cependant d'être adaptée à la spécificité des projets de gestion dynamique du trafic et notamment dans le choix des outils de modélisation utilisés. En effet, le modèle d'émissions doit être capable de prendre en compte des situations de trafic et des styles de conduite différents pour pouvoir les retranscrire qualitativement et quantitativement en terme d'émissions. Ainsi ce rapport effectue une analyse de plusieurs modèles d'émission au regard de cette problématique (points forts, points faibles et limites, échelles d'étude, adéquations de ces modèles avec la gestion dynamique...). Il se dégage de cette analyse que, en première approche et dans l'attente de l'amélioration et du développement de modèles plus adaptés du point de vue spatio-temporel à la gestion dynamique des trafics, les modèles à vitesse moyenne (COPERT IV) ou situation de trafic (HBEFA) aujourd'hui utilisés dans les études routières, sont les plus adaptés.

Les éléments de méthodologie proposées s'appuient, d'autre part, sur un retour d'expérience. Celui-ci a été réalisé en analysant des évaluations *a priori* ou *a posteriori* de projet de gestion de trafic traitant de la thématique de l'air. Il met en avant les tendances observées ainsi que les gains attendus. Chaque projet étudié fait l'objet d'une fiche détaillée en annexe.

Ce travail constitue une première étape dans l'élaboration d'une méthodologie et doit être complété par des études ciblées permettant d'appréhender globalement les enjeux des projets de gestion dynamique de trafic en matière de qualité de l'air et de leurs impacts sur les personnes exposées (choix d'un modèle de dispersion adapté, indicateurs d'exposition de la population, ...).

Sommaire

CHAPITRE 1. ÉVALUATION DE LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE LIÉE AUX TRANSPORTS ROUTIERS.....	9
1.1.Les études d'impact des projets d'infrastructures routières.....	10
1.2.Déroulement et contenu du volet « air et santé » d'une étude d'impact routière.....	11
1.3.Spécificité des projets de gestion dynamique de trafic.....	17
CHAPITRE 2. LES OUTILS DE MODÉLISATION.....	19
2.1.Les modèles de trafic.....	20
2.2.Les modèles d'émissions.....	21
2.3.Les modèles de dispersion.....	38
2.4.Le couplage de ces modèles.....	42
CHAPITRE 3. EXEMPLE DE MISE EN PRATIQUE DE L'ÉVALUATION DE MESURES DE GESTION DE TRAFIC.....	47
3.1..Stratégies de gestion de trafic étudiées.....	48
3.2.Péage urbain.....	52
3.3.Gestion dynamique des voies.....	52
3.4.Régulation de vitesse.....	54
3.5.Régulation d'accès.....	55
3.6.Systèmes d'aide à la gestion de trafic (SAGT).....	56
3.7.Tableau récapitulatif.....	58
CHAPITRE 4. RECOMMANDATIONS, PISTES DE PROGRÈS POUR L'APPLICATION À DES PROJETS DE GESTION DE TRAFIC.....	61
4.1.Quelle zone géographique retenir ?.....	62
4.2.Quel scénarios comparer, à quel horizon ?.....	62
4.3.Quels méthodes, outils et indicateurs choisir ?.....	65
CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	70
INTRODUCTION.....	7
BIBLIOGRAPHIE.....	112
GLOSSAIRE.....	115

Introduction

C'est dans le milieu des années 70 que l'environnement dans les projets publics a pour la première fois, fait l'objet d'une prise en compte explicite dans un texte législatif. Au départ limitée à l'étude des impacts des aménagements notamment sur la faune et la flore, elle a été par la suite étendue de façon systématique à l'analyse des effets du projet sur l'air et le climat ainsi que sur la santé des populations présentes à proximité. Les diverses évolutions législatives et réglementaires ont amené à définir une démarche méthodologique ayant pour finalité l'évaluation des effets sur la santé de la pollution atmosphérique de l'air dans les études d'impact routières.

Cette démarche d'évaluation environnementale, bien que spécifique à l'étude des projets routiers neufs ou de réaménagements sur place, est transposable dans ses grandes lignes à d'autres projets de transports et notamment aux projets de gestion dynamique des réseaux. Elle comporte plusieurs étapes successives, détaillées au chapitre I de ce rapport, allant de la modélisation des phénomènes physiques (trafics, émissions et dispersion) permettant d'estimer des indicateurs de qualité de l'air à l'utilisation de ces derniers pour le calcul des indicateurs propres à l'évaluation environnementale du projet (indicateurs d'impacts sur la zone d'étude, sur la santé des populations, monétarisation des impacts environnementaux).

Le chapitre II présente les différents types de modèles intervenant dans la chaîne de modélisation pour le calcul des indicateurs de qualité de l'air. Tout d'abord, les modèles de trafic permettent de déterminer les grandeurs cinématiques des véhicules en circulation (vitesses, accélération, débit, etc.). Ce rapport n'a pas vocation à traiter de ceux-ci en détail, c'est pourquoi une présentation rapide des deux catégories de modèles est donnée ainsi que quelques exemples de modèles commerciaux. Ensuite, à partir des données cinématiques, issues des modèles de trafic, et de lois d'émissions, les modèles d'émissions calculent les émissions de polluants des véhicules en circulation, par unité de temps ou de longueur. Cette sous-partie fait une synthèse bibliographique des principaux modèles existants. Elle présente leurs points forts et leurs limites, l'échelle d'étude à laquelle ils sont pertinents et analyse l'adéquation de ces modèles en lien avec les enjeux liées à la gestion dynamique de trafic. Enfin, une rapide présentation des modèles de dispersion est faite. Ceux-ci estiment les concentrations en polluants dans l'air ambiant en dispersant les émissions précédemment calculées dans l'atmosphère.

Le chapitre III présente un retour d'expérience des évaluations de la qualité de l'air qui ont été réalisées jusqu'à présent sur des projets de gestion de trafic. Il établit une synthèse des méthodologies utilisées et met en avant les tendances générales observées par type de mesures (péage urbain, gestion dynamique des voies, régulation de vitesse, régulation d'accès, interdiction de dépasser pour les poids lourds, systèmes d'aide à la gestion de trafic) ainsi que les gains attendus.

Enfin, sur la base des trois premières parties, le chapitre IV dresse un premier cadrage méthodologique pour réaliser une évaluation qualité de l'air d'un projet de gestion dynamique de trafic et présente des préconisations et pistes de progrès.

Chapitre 1: Évaluation de la pollution atmosphérique liée aux transports routiers

Ce chapitre rappelle le cadre réglementaire et méthodologique de l'évaluation de l'impact sur la qualité de l'air des projets routiers et traite des spécificités des projets de gestion dynamique de trafic et des contraintes qui y sont liées pour l'évaluation environnementale.

1.1. Les études d'impact des projets d'infrastructures routières

1.1.1. Une obligation réglementaire

Les études d'impact sont définies dans le code de l'environnement par les articles L122-1 à L122-3-5, pour ce qui est de la partie législative et par les articles R122-1 à R122-16 pour la partie réglementaire.

L'article R122-3 précise que « le contenu de l'étude d'impact doit être en relation avec l'importance des travaux et aménagements projetés et avec leurs incidences prévisibles sur l'environnement. ». Par ailleurs, elle doit comporter :

1. « une analyse de l'état initial du site et de son environnement [...] ;
2. une analyse des effets directs et indirects, temporaires et permanents du projet sur l'environnement, et en particulier sur la faune et la flore, les sites et paysages, le sol, l'eau, l'air, le climat, [...] et, le cas échéant, sur [...] la santé [...] ;
3. les raisons pour lesquelles, notamment du point de vue des préoccupations d'environnement, parmi les partis envisagés qui font l'objet d'une description, le projet présenté a été retenu ;
4. les mesures envisagées par le maître d'ouvrage ou le pétitionnaire pour supprimer, réduire et, si possible, compenser les conséquences dommageables du projet sur l'environnement et la santé, ainsi que l'estimation des dépenses correspondantes ;
5. une analyse des méthodes utilisées pour évaluer les effets du projet sur l'environnement mentionnant les difficultés éventuelles de nature technique ou scientifique rencontrées pour établir cette évaluation ;
6. pour les infrastructures de transport, l'étude d'impact comprend en outre une analyse des coûts collectifs des pollutions et nuisances et des avantages induits pour la collectivité ainsi qu'une évaluation des consommations énergétiques résultant de l'exploitation du projet, notamment du fait des déplacements qu'elle entraîne ou permet d'éviter. »

1.1.2. La méthodologie appliquée au volet « air et santé » des études d'impact, historique

L'article 19 de la loi n°96-1236 du 30 décembre 1996 sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie, dite LAURE, en modifiant l'article 2 de la loi n°76-629 du 10 juillet 1976, a profondément réformé le contenu des études d'impact. Les effets d'un projet ne doivent plus être appréhendés sous le seul aspect « environnement » mais aussi sous celui de la « santé » (article L122-3 II 2° du code de l'environnement). De plus, dans le cas des infrastructures de transport, une analyse des coûts collectifs des pollutions et nuisances et des avantages induits ainsi qu'une évaluation des consommations énergétiques ont également été imposées (article R122-3 II 6° du code de l'environnement).

La circulaire n°98-36 du 17 février 1998 relative à l'application de l'article 19 de la LAURE a précisé les modalités d'application de la loi. Elle donne des indications sur les niveaux d'exigence et d'approfondissement requis pour les études d'impact et sur la façon dont doit être structurée la démarche d'étude, mais ne permet

pas aux maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre et bureaux d'études de prendre en compte sur le plan technique, chacun à leur niveau, les nouvelles exigences réglementaires. Pour cela, le SETRA et le CERTU ont publié une note méthodologique en 2001, accompagnée d'une annexe technique qui contient un condensé des connaissances de l'époque dans le domaine de la pollution atmosphérique. Celle-ci a été révisée en 2005, afin de tenir compte des évolutions de la réglementation¹ et des données sanitaires récentes, et remplacée par une note méthodologique annexée à la circulaire équipement / santé / écologie du 25 février 2005. L'annexe de la note méthodologique de 2001 n'ayant pas fait l'objet d'une révision reste d'actualité.

La note de 2005 est actuellement en cours de révision et une nouvelle version devrait être publiée courant 2012.

1.2. Déroutement et contenu du volet « air et santé » d'une étude d'impact routière

La note méthodologique sur l'évaluation des effets sur la santé de la pollution de l'air dans les études d'impact routières fournit la trame méthodologique de l'élaboration et le contenu attendu des études air et santé.

1.2.1. Cadrage de l'étude

1.2.1.1. Le niveau d'étude

Le degré de précision attendu dans une étude « air et santé » dépend du niveau d'étude retenu. La note méthodologique de 2005 en définit quatre (allant de I à IV, du plus au moins exigeant, cf. tableau 1).

Le niveau d'étude est déterminé en croisant la charge prévisionnelle de trafic attendue sur l'infrastructure avec le nombre de personnes potentiellement exposées aux conséquences du projet, à travers la densité de population et la morphologie du bâti.

Trafic à l'horizon d'étude (selon tronçons homogènes de plus de 1km)	> 50 000 véh/j ou 5 000 uvp/h	25 000 à 50 000 véh/j ou 2 500 à 5 000 uvp/h	≤ 25 000 véh/j ou 2 500 uvp/h	≤ 10 000 véh/j ou 1 000 uvp/h
GI Bâti avec densité ≥10 000 hab/km ²	I	I	II	II si L projet > 5 km ou III si L projet ≤ 5 km
GII Bâti avec densité > 2 000 et <10 000 hab/km ²	I	II	II	II si L projet > 25 km ou III si L projet ≤ 25 km
GIII Bâti avec densité ≤ 2 000 hab/km ²	I	II	II	II si L projet > 50 km ou III si L projet ≤ 50 km
GIV pas de Bâti	III	III	IV	IV

Tableau 1: Critères de définition du niveau d'étude Source : circulaire du 25 février 2005

¹ Circulaire DGS/VS3/2000 N° 61 du 3 février 2000 relative au guide de lecture et d'analyse du volet sanitaire des études d'impact produit par l'INVS et la circulaire DGS2001-185 du 11 avril 2001 relative à l'analyse des effets sur la santé dans les études d'impact, Décret du 1er août 2003, qui modifie le décret n°77-1141 du 12 octobre 1977, introduit la nécessité d'une évaluation des effets des projets sur la santé ainsi qu'une procédure de concertation en cas d'impacts transfrontaliers.

L'instruction cadre relative aux méthodes d'évaluation économique des grands projets d'infrastructure de transports du 25 mars 2004 pose les bases d'une méthodologie prenant en compte les nuisances dues à la pollution atmosphérique pour l'estimation des coûts.

1.2.1.2. La zone d'étude

Les impacts du projet sont évalués sur une zone géographique, spécifique au volet « air et santé » des études d'impacts, définie par les notions de **domaine d'étude** et de **bande d'étude**.

Le **domaine d'étude** est composé du projet et de 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. Cette modification de trafic est évaluée en comparant, pour tous les axes contenus dans le modèle de trafic, les niveaux de trafic avec et sans projet au même horizon².

Les indicateurs communément utilisés pour effectuer cette comparaison sont les Trafics Moyens Journaliers Annuels (TMJA) en milieu interurbain ou les trafics aux heures de pointes en milieu urbain.

La note méthodologique définit par ailleurs une « **bande d'étude** » autour de chaque voie du domaine d'étude. Celle-ci est adaptée à l'étude de l'influence du projet sur la pollution atmosphérique à l'échelle locale (à proximité routière) résultant des polluants primaires (ne concerne pas des polluants photochimiques comme l'ozone nécessitant des zones d'étude plus vastes). Deux bandes d'étude sont définies, celle correspondant à la pollution particulaire (métaux lourds, etc.) et celle correspondant à la pollution gazeuse (dioxyde d'azote, benzène, etc.). En dehors de celles-ci, les effets de la pollution atmosphérique due à l'infrastructure sont considérées comme négligeables, car les concentrations décroissent rapidement pour revenir aux concentrations de fond de la zone d'étude lorsque l'on s'écarte de la voie.

Le tableau 2 présente les critères de définition de la largeur de la bande d'étude.

TMJA à l'horizon d'étude (veh/j)	Largeur minimale de la bande d'étude (en mètres)
> 100 000	300
50 000 à 100 000	300
25 000 à 50 000	200
10 000 à 25 000	150
≤ 10 000	100

Tableau 2: Critères de définition de la largeur minimale de la bande d'étude

Source : circulaire du 25 février 2005

1.2.1.3. Les scénarios étudiés et horizons d'étude

Trois types de scénarios sont étudiés :

- l'état actuel,
- l'état futur sans projet (scénario de référence ou fil de l'eau),
- l'état futur avec projet.

Pour la qualité de l'air, aucun texte réglementaire ne précise l'horizon à retenir pour l'étude des scénarios futurs. L'impact du projet sur la qualité de l'air doit être évalué pour la situation la plus défavorable ; en pratique, la même échéance que celle utilisée dans la réglementation sur le bruit est adoptée pour l'air, à savoir, 20 ans après la mise en service³. En toute théorie, une durée inférieure doit être considérée si les conditions résultant du niveau de trafic et de l'état du parc sont plus défavorables pour la qualité de l'air.

1.2.1.4. Les polluants étudiés

Les polluants étudiés dépendent du niveau d'étude. Le tableau 3 ci-dessous en fait la synthèse.

Tous ces polluants réglementés (article R222-1 du code de l'environnement) ou non ont été sélectionnés car ils sont émis par la circulation automobile et ont des effets avérés sur la santé humaine, à court ou long terme.

2 En référence à l'instruction cadre du 25 mars 2004 relative aux méthodes d'évaluation économique des grands projets d'infrastructures de transport.

3 Circulaire 97-110 du 12 décembre 1997 relative à la prise en compte du bruit dans la construction de routes nouvelles ou l'aménagement de routes existantes du réseau national.

	Polluants gazeux	Polluants particulaires
Niveau I (polluants de l'ERS ⁴)	Dioxyde d'azote Dioxyde de soufre Benzène Acroléine Formaldéhyde Acétaldéhyde 1,3-butadiène	Particules émises à l'échappement Benzo(a)pyrène Chrome Nickel Cadmium Arsenic Plomb Mercure (voie orale uniquement) Baryum (voie orale uniquement)
Niveau II	Oxydes d'azote (NO et NO ₂) Monoxyde de carbone (CO) Hydrocarbures Benzène	Particules émises à l'échappement Nickel Cadmium
Niveau III et IV	Dioxyde de soufre (SO ₂)	Particules émises à l'échappement Plomb Cadmium

Tableau 3: Liste des polluants à prendre en compte selon le niveau de l'étude

Source : circulaire du 25 février 2005

De plus, comme précisé dans l'article R122-3 du code de l'environnement, une évaluation des consommations énergétiques résultant de l'exploitation du projet doit être présentée dans l'étude d'impact. Ainsi, les émissions de CO₂ et la consommation de carburant sont évalués, au même titre que les polluants listés dans le tableau.

1.2.2. Contenu de l'étude

Le volet « air et santé » se décompose en trois grandes parties :

- la qualification de l'état initial,
- l'étude des impacts du projet
 - sur la zone étudiée (émissions, concentrations),
 - sur la santé, la végétation et le sol,
- la monétarisation des impacts.

1.2.2.1. Qualification de l'état initial

Cette étape permet d'établir un état « zéro » en terme de qualité de l'air, avant la réalisation du projet. Elle se décompose généralement en trois grandes phases :

- une **analyse bibliographique** des documents relatifs à la qualité de l'air sur la zone d'étude : Plan Régional de la Qualité de l'Air (PRQA) ou Schéma Régional Climat – Air – Energie (SRCAE), Plan Protection de l'Atmosphère (PPA), Plan de Déplacements Urbains (PDU), inventaires d'émissions liées au trafics routier, ...
- la **collecte et l'analyse des données de qualité** de l'air sur la zone d'étude (en général des concentrations en polluants). Selon le niveau d'étude et les informations bibliographiques disponibles par ailleurs, les données proviennent soit des stations de mesures fixes ou mobiles des AASQA⁵ soit de la réalisation de campagnes de mesure spécifiques sur le domaine d'étude, effectuées au moyen de tubes passifs ou d'analyseurs automatiques généralement groupés dans un « camion laboratoire ».

Les camions laboratoires sont des moyens de mesures lourds et coûteux, nécessitant une certaine logistique (alimentation électrique, protection du matériel, etc.). Les analyseurs installés à bord permettent de mesurer en continu les concentrations en polluants, comme les oxydes d'azote, les particules, le dioxyde de soufre, l'ozone, etc. L'agrégation des données se fait en général à l'échelle de

4 Évaluation des risques sanitaires (cf. page 12)

5 Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air

l'heure et conduit à des concentrations horaires. Les camions laboratoires peuvent aussi abriter des appareils effectuant des mesures intégratives sur plusieurs jours (métaux lourds).

Les tubes passifs sont quant à eux des systèmes de mesures simples et beaucoup moins onéreux que les camions laboratoires. Par contre, ils ne peuvent fournir qu'une concentration moyenne en polluants sur la durée d'exposition du tube et non pas une concentration horaire comme les camions laboratoire. Cependant, du fait de son faible coût, cette méthode de mesure permet de quadriller assez finement la zone d'étude et obtenir une cartographie des concentrations en polluants (dioxyde d'azote, benzène ou aldéhydes), ce qui est très intéressant dans le cadre des volets air et santé des projets routiers.

- **l'étude de l'occupation des sols** pour localiser les populations résidentes, les lieux accueillant des populations dites sensibles (enfants de moins de 18 ans et personnes âgées) et déterminer les zones à enjeu, comme les zones de cultures ou les jardins familiaux.

1.2.2.2. Impacts du projet

1.2.2.2.1. démarche générale

Pour déterminer les impacts du projet sur la zone étudiée et sur la santé des populations exposées, différents indicateurs doivent être déterminés. Certains d'entre eux sont issus directement de la modélisation et d'autres sont calculés à partir des résultats modélisés.

Les modèles d'émissions utilisent les trafics (la plupart du temps modélisés) comme données d'entrée. Les modèles de dispersion se servent des quantités de polluants calculées, mais ont aussi besoin de données telles que la météorologie, le relief, la rugosité du sol, qui ont une grande influence dans les phénomènes de dispersion.

L'illustration 1 présente de manière synthétique le schéma de principe de la démarche.

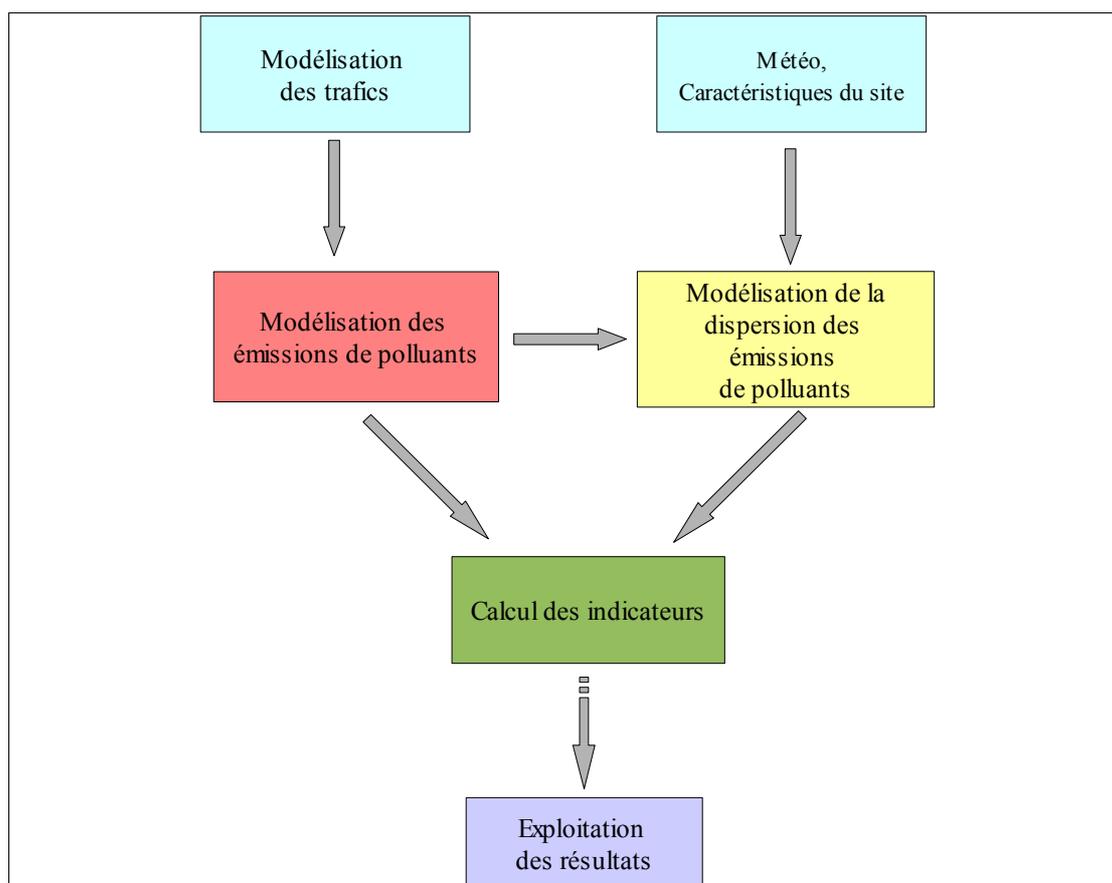


Illustration 1: Chaîne de modélisation pour les études air et santé

1.2.2.2. Impacts du projet sur la zone d'étude

Les indicateurs physiques utilisés

Pour évaluer les impacts du projet sur la qualité de l'air sur le domaine d'étude, deux indicateurs sont utilisés :

- les **émissions** de polluants, qui sont des quantités de polluants rejetées dans l'atmosphère par la circulation automobile (en unité de poids par unité de temps, exemple : en kg/j),
- les **concentrations** en polluants dans l'air ambiant, qui résultent de la dispersion des émissions dans l'atmosphère (en unité de poids par unité de volume, exemple : $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Pour les calculer, il est nécessaire d'avoir recours à de la modélisation.

Les modélisations

La plupart du temps, les deux modélisations sont réalisées pour les trois situations présentées dans le paragraphe et, dans le cas de l'état futur avec projet, pour chacune des variantes étudiées ou pour l'étude de la solution retenue⁶.

- **Modélisation des émissions**

Les données d'entrée du modèle d'émission sont les trafics. Pour la situation actuelle, ils sont en général issus de comptages et d'enquêtes sur certains axes et reconstitués sur les autres. Pour les horizons futurs, ils sont modélisés.

Les prévisions de trafic doivent distinguer les milieux urbains et interurbains car les approches sont différentes. En milieu urbain, l'analyse porte sur les épisodes de saturation du réseau. L'approche se fait alors par le biais des données de trafic à l'heure de pointe. En milieu interurbain, l'étude porte davantage sur les trafics d'une journée moyenne de l'année (TMJA). Les mesures de trafic réalisées en continu permettent d'établir par ailleurs le rapport entre le TMJA et le trafic à l'heure de pointe.

Les émissions en polluants ou en gaz à effet de serre sont calculées pour chacun des scénarios et chacune des variantes, à l'aide d'un modèle d'émission.

- **Modélisation des concentrations**

Les émissions, ainsi calculées, sont injectées dans le modèle de dispersion afin de calculer les concentrations en polluants. Ces dernières sont disponibles sur un maillage prédéfini par l'utilisateur couvrant le domaine d'étude mais peuvent aussi l'être en des points particuliers comme les bâtiments sensibles ou les bâtiments d'habitation.

Interprétation des résultats

Dans le cadre de la **comparaison des variantes**, les résultats des modélisations sont analysés et traités afin de comparer les variantes entre elles et d'identifier celle qui exposera le moins la population riveraine :

- comparaison des émissions de polluants des différentes variantes (étude niveau I, II et III),
- comparaison des concentrations entre les différentes variantes (étude niveau I et II),
- calcul d'un indicateur d'exposition de la population à la pollution atmosphérique (IPP), qui résulte, en un même lieu, du croisement des concentrations modélisées et de la population concernée par ces niveaux (étude niveau I et II). Cet indice d'exposition est utilisé comme une aide à la comparaison de situations et non pas comme le reflet d'une exposition absolue de la population à la pollution atmosphérique.

Dans le cadre de l'**étude de la solution retenue**, la même démarche est adoptée mais les comparaisons sont effectuées entre les scénarios actuels, fil de l'eau et avec projet.

1.2.2.3. Impact du projet sur la santé, la végétation et le sol

L'évaluation des effets du projet sur la santé varie selon le niveau d'étude. Elle va d'un simple rappel des effets de la pollution atmosphérique sur la santé dans les études de niveau III et IV à une véritable évaluation des risques sanitaires (ERS) pour les études de niveau I, dans le cadre de l'étude de la solution retenue. D'autres

⁶ La solution retenue résulte d'une analyse multicritère, qui prend en compte toutes les thématiques environnementales (air, acoustique, eau, faune, flore, etc.). Ainsi elle peut être différente de celle identifiée à l'issue de la comparaison des variantes de l'étude air et santé.

indicateurs spécifiques à l'ERS sont alors calculés sur la base des concentrations précédemment modélisées. En matière de végétation ou de sol, hormis l'ERS réalisée pour la voie d'exposition orale dans les études de niveau I, l'analyse des effets du projet est plutôt qualitative. Elle étudie le tracé et son insertion dans le paysage agricole.

1.2.2.3. Monétarisation des impacts des nuisances

La monétarisation des impacts consiste à mener une analyse des coûts collectifs de l'impact sanitaire des pollutions et des nuisances induits pour la collectivité. Elle permet de comparer, sur une base chiffrée, les différentes variantes d'un projet en terme d'effet de la pollution sur la santé.

L'instruction cadre du 25 mars 2004 relative aux méthodes d'évaluation économiques des grands projets d'infrastructures de transport présente la méthode pour évaluer les principaux impacts des nuisances à prendre en compte dans les bilans socio-économiques de projets d'infrastructures de transport. Cette instruction officialise les recommandations du rapport « transports : choix des investissements et des coûts des nuisances », dit rapport « Boiteux II » paru en 2001.

En ce qui concerne la pollution atmosphérique, deux évaluations doivent être chiffrées : la monétarisation des effets sur la santé et sur l'effet de serre.

Les **effets** de la pollution atmosphérique **sur la santé** dépendent d'une part des concentrations en polluants et d'autre part de l'exposition des populations dans les zones polluées, qui sera appréhendée par la densité de population. Ceci conduit à retenir des valeurs différentes de calcul en fonction du type de zone traversée : urbain dense, urbain diffus, rase campagne.

	Urbain dense	Urbain diffus	Rase campagne	Moyenne
VP	2,9	1	0,1	0,9
PL	28,2	9,9	0,6	6,2

Tableau 4: Valeur 2000 pour le transport routier, en euros pour 100 veh.km

Sources : Instruction cadre du 25 mars 2004

« Les valeurs des tableaux ci-dessus peuvent être considérées comme le produit de deux valeurs. L'une proportionnelle aux émissions polluantes, l'autre proportionnelle à la valeur de la vie humaine. La première devrait diminuer de 5,5 % par an sur la période 2000 – 2020 pour les véhicules légers, de 6,5 % par an pour les poids lourds, les bus et les cars. Quand à la valeur de la vie, elle augmente comme la dépense de consommation par tête. ». L'augmentation de la dépense de consommation est estimée comme constante et croissante de 1,9% par an (hypothèse faite dans « la demande de transports en 2025, octobre 2004 » mise à jour en 2007 établi par le Service économie, statistiques et prospectives de l'ex ministère de l'Équipement ».)

Le calcul de monétarisation des effets sur la santé est effectué à l'échelle du domaine d'étude à partir des données trafic et des résultats du calcul d'émissions et pour tous les scénarios.

Cette méthode étant basée sur un nombre de veh.km, elle ne sera pas forcément adaptable aux projets de gestion dynamique de trafic pour lesquels le nombre de kilomètres parcourus ne varie pas avec la mise en place de la mesure.

La **monétarisation de l'effet de serre** se base sur le coût d'une tonne de carbone rejetée dans l'atmosphère. La valeur retenue est de 100 euros par tonne, valeur constante entre 2000 et 2010 et augmentant de 3% par an entre 2010 et 2020. Elle est fondée sur une relation coût efficacité : il s'agit du niveau de taxation du carbone contenu dans les émissions de gaz à effet de serre qui permettrait à la France de satisfaire aux engagements issus de Kyoto.

1.2.3. Schéma synoptique synthétique

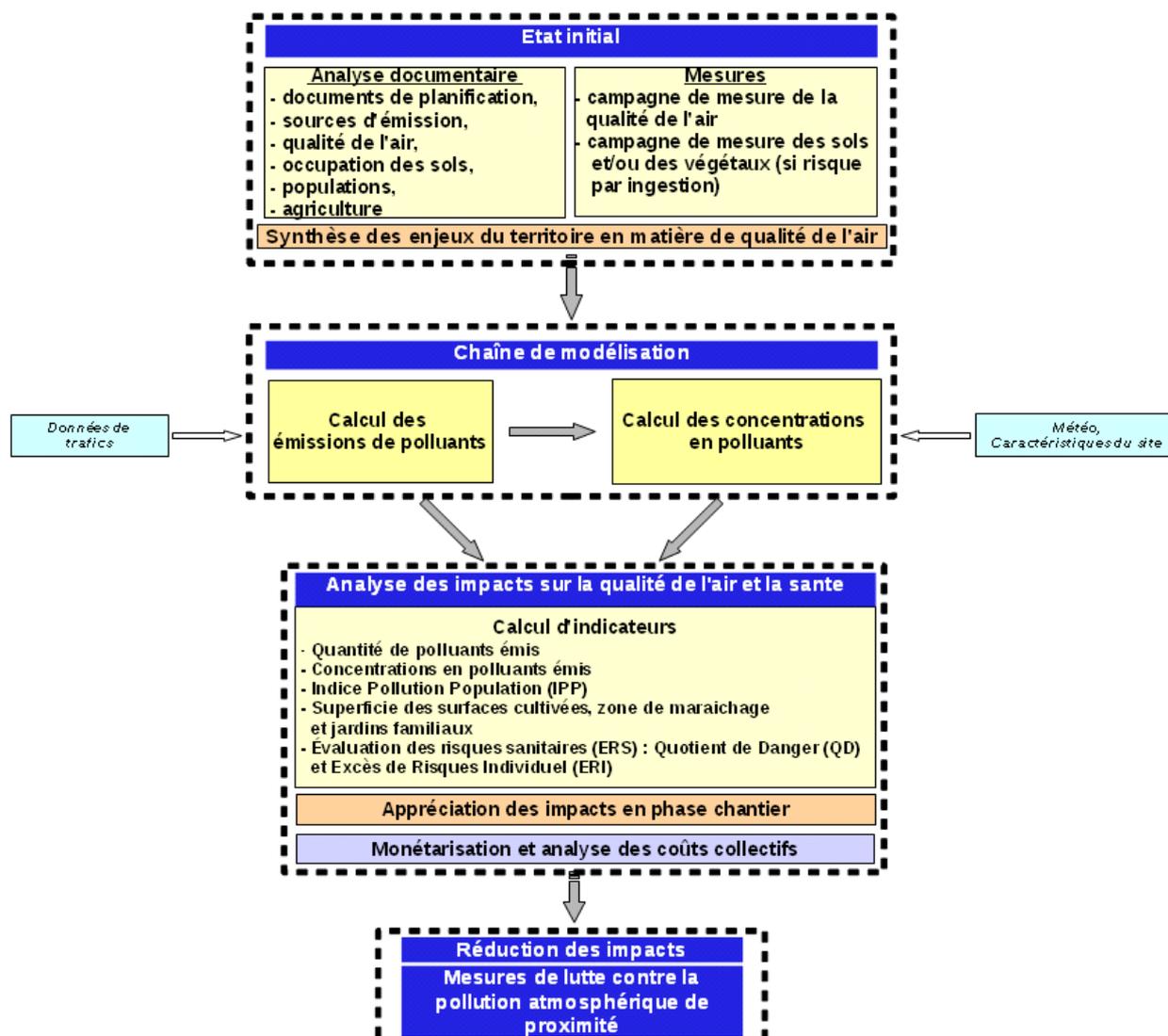


Illustration 2: Cadrage et contenu du volet "air et santé" des études d'impact

1.3. Spécificité des projets de gestion dynamique de trafic

1.3.1. Des projets au service d'une mobilité durable

Les transports routiers sont à l'origine de nombreuses nuisances environnementales et sont responsables d'au moins 20% des émissions de gaz à effet de serre et de polluants locaux en France.

Face à l'importance de ces émissions en constante augmentation et devant l'urgence climatique, les lois Grenelle ont fixé des orientations stratégiques dans le domaine des transports pour donner à la France les moyens, d'une part, de respecter les engagements internationaux et, d'autre part, de changer de paradigme en adoptant une logique de développement intégrée et multimodale et en mettant un frein à la croissance continue du transport routier.

C'est dans une tendance de recherche de mobilité durable et d'optimisation des réseaux existants que s'inscrivent les mesures de gestion dynamique de trafic. Elles permettent de répondre à une demande en mobilité toujours plus importante en améliorant l'efficacité du transport routier (réduction de la congestion, amélioration de la fiabilité, amélioration de la sécurité) tout en cherchant à réduire les impacts environnementaux.

1.3.2. Objectifs et principes

Les projets de gestion de trafic, en engendrant une modification de la dynamique des flux de véhicules, permettent de mieux gérer l'écoulement du trafic routier (limiter les encombrements et apaiser le trafic). Ils sont souvent mis en place de manière dynamique pendant les heures de pointe ou dès que l'augmentation du trafic le justifie.

Les outils de gestion dynamique du trafic peuvent contribuer à optimiser les réseaux routiers existants et à atténuer les nuisances du mode routier en :

- maximisant l'écoulement des flux et ainsi en limitant les phases de congestion (par exemple, régulation de vitesse, régulation d'accès, interdiction de dépasser pour les poids lourds),
- retardant ou constituant une alternative aux élargissements / extensions du réseau (par exemple, gestion dynamique des voies),
- favorisant un meilleur partage de la voirie actuelle, notamment pour favoriser les transports collectifs (par exemple, circulation sur la bande d'arrêt d'urgence, voie réservée, péage urbain).

L'application des technologies de l'information au système routier, et en particulier le suivi en temps réel du trafic autorise aujourd'hui le gestionnaire à réagir rapidement afin d'optimiser les flux sur son réseau.

Ces mesures de gestion dynamique du trafic doivent néanmoins s'intégrer dans des stratégies plus globales de développement de services.

1.3.3. Impact de ces projets sur les émissions de polluants

Les projets de gestion dynamique de trafic modifient les conditions de circulation dans le temps et l'espace, mais pas les trajets effectués par les usagers qui sont souvent identiques avec ou sans projet. Par conséquent, les variations d'émissions de polluants générées par la mise en place de tels projets sont liées aux modifications dynamiques de l'écoulement du trafic (principalement vitesse et accélération) et non au nombre ou à la longueur des déplacements effectués.

Les émissions des VL varient en fonction de la vitesse. Généralement, elles suivent une courbe en forme de « U » (voir illustration 3 page 19) présentant un minimum variant entre 60 et 80 km/h en fonction du type de polluant émis. Les émissions des VL sont donc importantes pour des vitesses faibles (moteur ne fonctionnant pas à un régime optimal) mais aussi pour des vitesses élevées. De même, les émissions sont très dépendantes du niveau d'accélération, les styles de conduite influencent largement les quantités de polluants émis. Une conduite agressive (fortes accélérations, changements fréquents de vitesses, conduite aux hauts régimes moteurs...) peut générer jusqu'à 8 fois plus de polluants qu'une conduite normale. Ainsi, un écoulement du trafic en accordéon est très néfaste en terme d'émissions, car il combine des vitesses moyennes faibles, des phases d'accélération dues aux nombreux redémarrages ainsi qu'une surconsommation de carburant (augmentation du temps passé sur le réseau pour effectuer une distance donnée par rapport à une situation non congestionnée). De même abaisser la vitesse limite, de 20 km/h par exemple (mesures mises en œuvre lors de pics de pollution sur toutes les voies dont la vitesse limite est supérieure ou égale à 90km/h), permet de réduire les émissions de polluants. Sur ces exemples, l'on comprend aisément que limiter les encombrements et apaiser le trafic soient favorables à l'environnement.

A contrario, les émissions des PL ne suivent pas le même type de courbes (voir illustration 4 page 19). Du fait de leur inertie, elles sont maximales pour les basses vitesses et diminuent quand celle-ci augmente (jusqu'à 90 km/h). Ainsi la mise en œuvre de mesures de gestion dynamique de trafic, telle qu'une régulation de vitesse, peut parfois s'avérer inefficace du point de vue de l'environnement si le taux de PL est important. Il est donc nécessaire de bien prendre en compte cette catégorie de véhicules lorsque l'on veut évaluer de telles mesures sur le plan de la qualité de l'air.

La démarche générale d'évaluation environnementale présentée au début de ce premier chapitre peut être appliquée aux projets de gestion dynamique de trafic. Elle nécessite toutefois d'être adaptée à la spécificité de ce type de projets. Les modèles utilisés doivent en effet être capables de prendre en compte différentes situations de trafic et différents styles de conduite et de pouvoir les retranscrire quantitativement en terme d'émissions. Par ailleurs, ils doivent être alimentés par des données trafic suffisamment fines pour refléter correctement la dynamique de l'écoulement.

Chapitre 2: Les outils de modélisation

Une évaluation environnementale concernant la qualité de l'air doit avoir comme objectif principal de caractériser l'exposition des populations aux polluants atmosphériques et d'évaluer les risques qui en découlent pour leur santé. La chaîne de modélisation, mise en œuvre à cette fin, fait successivement intervenir un modèle de trafic, un modèle de calcul des émissions de polluants et un modèle de calcul des concentrations. Cette dernière étape de modélisation est délicate car la dispersion des polluants dans l'atmosphère est un phénomène complexe qui résulte du transport des polluants dans l'atmosphère sous l'effet des vents et des masses d'air mais aussi des transformations physico-chimiques qu'ils subissent au cours de leur transport. Pour une même quantité de polluants émis en un lieu donné, les concentrations mesurées peuvent varier dans de très larges proportions en fonction des conditions météorologiques locales. Cette difficulté, inhérente au calcul de dispersion, explique en partie pourquoi la grande majorité des études se limitent à l'estimation des émissions de polluants et des consommations énergétiques.

En toute théorie, pour les projets de gestion dynamique de trafic et notamment lorsqu'ils sont mis en œuvre dans des zones urbaines peuplées, il conviendrait d'aller jusqu'au bout de la démarche d'évaluation et de caractériser l'exposition des populations. Cependant ces mesures étant appliquées, pour certaines, de manière ponctuelle et parfois sur quelques heures seulement, il est difficile de modéliser l'évolution des concentrations en polluants (inertie des phénomènes, conditions météorologiques locales pas forcément disponibles) d'autant plus si le modèle d'émission fournit des résultats peu contrastés entre les deux situations étudiées.

C'est pourquoi, dans le cadre de cette étude, il a été choisi de se focaliser sur les émissions afin de déterminer les modèles les plus adaptés à la gestion dynamique de trafic. Ils sont détaillés dans une sous partie de ce chapitre. Les modèles de dispersion ainsi que les modèles de trafic y sont aussi présentés mais de manière plus succincte.

2.1. Les modèles de trafic

La modélisation des trafics est une étape sensible pour l'évaluation des quantités de polluants émises par le trafic routier, puisque c'est notamment à partir des données de cinématiques (vitesse moyenne ou instantanée, accélération, nombre d'arrêts, etc.) des véhicules que ces dernières sont calculées.

On peut distinguer deux grandes familles de modèles de trafic : les modèles d'affectation statique de trafic et les modèles dynamiques d'écoulement.

2.1.1. Les modèles d'affectation statique de trafic

Dans un modèle macroscopique, le trafic est assimilé à un flux homogène et sans vide, dont les caractéristiques sont le débit (Q) et la concentration (K) de véhicules. Les variations de comportement des véhicules sont négligées (variation d'un véhicule à l'autre mais aussi au cours du déplacement).

Ces modèles permettent d'estimer à l'échelle horaire les charges de trafic sur différentes sections, mais pas de variation dans la dynamique de l'écoulement. De ce fait, ils ne peuvent pas retranscrire de manière suffisamment fine la dynamique des véhicules et sont donc peu adaptés à l'évaluation environnementale des projets de gestion dynamique de trafic.

Exemple de modèles : **VISUM** (France), **CUBE** (États-Unis).

2.1.2. Les modèles dynamiques d'écoulement

Les modèles dynamiques permettent de modéliser finement l'écoulement du trafic sur une section donnée et notamment l'apparition, la propagation et la dissipation des congestions. La plupart des modèles du commerce sont microscopiques, car ils simulent les déplacements des véhicules selon le comportement individuel de chacun des conducteurs sur la route d'après leurs interactions avec les autres usagers et la signalisation. Dans le but d'imiter la complexité de la dynamique de circulation, l'écoulement du trafic est simulé à l'aide de combinaisons aléatoires de caractéristiques individuelles conducteurs – véhicules et selon des lois prédéfinies (loi de poursuite, loi de changement de file, etc.).

Ce type de modèle est adapté à l'évaluation des projets de gestion du trafic car ils peuvent simuler finement les trajectoires des véhicules et leur dynamique (accélération, arrêt, etc...). Néanmoins, certaines variables cinématiques (accélération par exemple), pourtant quantifiées par ces modèles, sont souvent entachées de très fortes incertitudes. Comme on le verra par la suite, cela peut être un frein dans le choix des modèles d'émission.

Exemple de modèles : **AIMSUN** (Espagne), **Dynasim** (France), **Paramics** (GB), **Vissim** (Allemagne), **Symuvia** (LICIT, France).

2.2. Les modèles d'émissions

2.2.1 . Généralités sur le calcul des émissions

Le principe méthodologique de calcul des émissions repose sur l'équation de base :

$$E = A * F_{em}$$

où

- E est l'émission, généralement exprimée en masse ;
- A l'activité des émetteurs (par exemple un nombre de véhicules.km ou la consommation de carburant) ;
- F_{em} le facteur d'émission unitaire (en unité de polluant par unité de l'activité de l'émetteur).

Le **facteur d'émission unitaire** permet de convertir des données quantitatives d'activité en émissions de polluants. Il désigne la quantité de polluant émis par un véhicule sur une unité de distance ou de temps et dépend de nombreux facteurs comme :

- le type de véhicule (VP, VUL<3,5t, PL),
- le mode de carburation (essence diesel),
- la cylindrée (ou de le PTAC pour les PL),
- la date de mise en circulation (pour tenir compte des normes d'émission, notamment les normes Euro, et de son âge),
- la température des organes du véhicule (moteur et dispositif de traitement des gaz d'échappement),
- le polluant considéré,
- la cinématique du véhicule lors de son trajet (vitesse, accélération),
- la pente de la voie,
- la charge du véhicule,
- etc.

Il est difficile de prendre en compte l'ensemble de ces facteurs dans une même loi d'émission. En général, les modèles proposent, pour un polluant donné, une loi d'émissions unitaires différente pour chaque classe de véhicules. Ces classes regroupent les véhicules de même type, cylindrée, motorisation ou encore norme Euro. Les lois expriment alors comment les émissions de polluants de ces classes varient en fonction de la cinématique du parcours (vitesse, accélération ou autres paramètres cinématiques).

Par exemple, l'illustration 3 met en évidence les liens entre émissions et vitesses pour les VL. On peut aussi remarquer que les facteurs d'émissions sont élevés pour les fortes et faibles vitesses et minimum pour des vitesses de l'ordre de 60km/h à 80km/h.

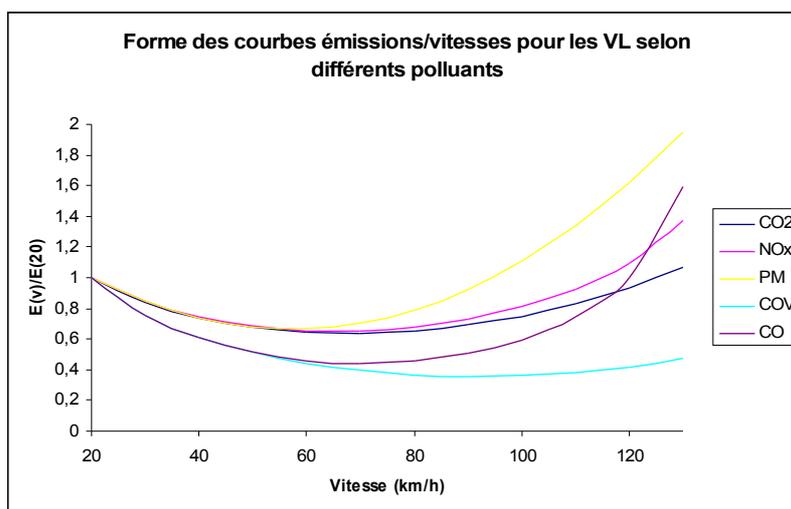


Illustration 3: Relation entre vitesse des VL et émissions de polluants
 Source : CETE de Lyon (COPERT IV)

Pour les PL, la forme des courbes émissions/vitesses est différente. Du fait de leur inertie, les PL émettent plus aux faibles vitesses qu'aux vitesses élevées.

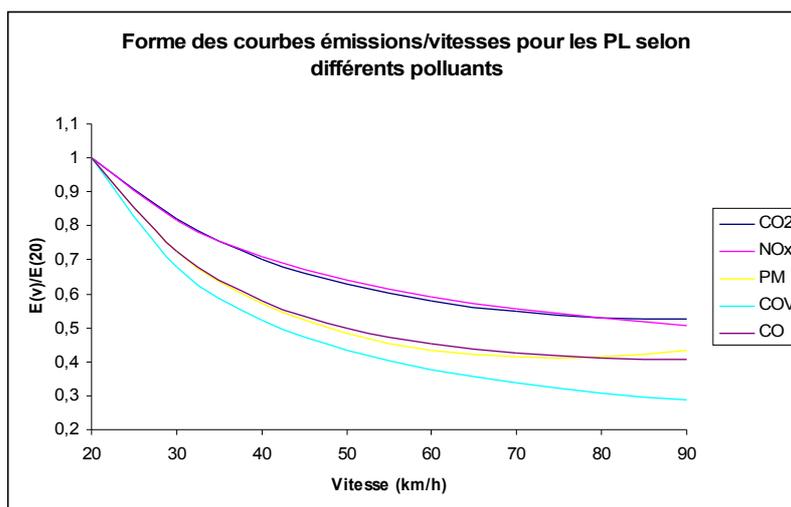


Illustration 4: Relation entre vitesse des PL et émissions de polluants
 Source : CETE de Lyon (COPERT IV)

La plupart des modèles d'émissions calculent les **émissions à chaud**⁷ avec ces facteurs d'émissions. Par contre, ils prennent peu ou pas en compte les **émissions à froid**⁸ et les **émissions par évaporation**⁹ (hydrocarbures imbrûlés).

7 Les « émissions à chaud » sont produites lorsque les « organes » du véhicule (moteur, catalyseur) ont atteint leur température opératoire normale de fonctionnement, soit en général 70 à 80°C pour les moteurs. Elles dépendent alors directement de la vitesse du véhicule.

8 Les « émissions à froid » sont produites juste après le démarrage du véhicule lorsque les « organes » du véhicule (moteur et dispositif de traitement des gaz d'échappement) sont encore froids et ne fonctionnent donc pas de manière optimale. Elles sont souvent calculées comme des surémissions par rapport aux émissions à chaud.

9 Les « émissions par évaporation » sont en général calculées pour les véhicules essence. Elles concernent les émissions liées au réservoir et celles émises par les véhicules en circulation ou après arrêt du moteur.

2.2.2. Revue bibliographique des modèles d'émissions existants

Il existe de nombreux modèles d'émissions disponibles dans la littérature. Ils peuvent être classés selon différents critères, comme par exemple les échelles auxquelles ils font référence (échelle du véhicule, de la voie et du réseau) ou auxquelles ils sont pertinents (échelle de la rue, du quartier, de la ville, de la région, de l'état), la finesse de description du trafic qu'ils nécessitent en entrée, la manière dont les lois d'émissions sont obtenues, des paramètres qui interviennent dans le module, la robustesse, *etc.*

Dans le cadre des projets de gestion dynamique de trafic, il est intéressant de voir comment les modèles d'émissions prennent en compte les phénomènes de congestion. Dans son article « Do air pollution emissions and fuel consumption models for roadways include the effects of congestion in the roadway traffic flow ? » , faisant suite à la thèse « An examination of congestion in road traffic emissions models and their application to urban road networks », Smit et al. (2008) propose une classification basée sur cette approche. Toutefois, les indicateurs utilisés pour décrire la congestion (augmentation de la densité de trafic, des temps de parcours, du nombre d'arrêt et redémarrage, *etc.*) ne sont pas toujours explicitement utilisés par ces modèles. C'est pourquoi l'auteur utilise la notion de **situations de conduite**¹⁰ (ou cycles de conduite¹¹), qui est commune à la plupart des modèles d'émissions, pour établir cette classification.

Il définit trois types de modèles. Quelques modèles sont présentés dans les sous paragraphes suivants et d'autres sont détaillés en annexes (Annexe A , Annexe B et Annexe C) :

- ceux qui requièrent des situations de conduite comme données d'entrée (type A) ;
- ceux qui génèrent des situations de conduite au cours du processus de modélisation (type B) ;
- ceux qui intègrent des situations de conduite dès la phase de développement du modèle (type C).

Alors que les modèles de type A et B sont bien adaptés à l'échelle locale (intersections, petits réseaux), les modèles de type C sont en général employés pour des échelles plus larges (aires urbaines, petites régions). Ces derniers sont par ailleurs les plus fréquemment utilisés dans le cadre des études routières (81% des 58 études analysées par Smit en 2006. L'illustration 5, donne une représentation schématique des modèles en fonctions des échelles associées.

10 « driving pattern » : quantifie une situation de trafic particulière et est définie comme un profil temps/vitesse mesurés sur route

11 « driving cycle » : c'est un profil temps/vitesse issu de plusieurs situations de trafic, représentatif de conditions de trafic et de circulation sur une zone géographique donnée. Dans son article, l'auteur ne fait pas de différence entre les notions de « driving pattern » et « driving cycle »

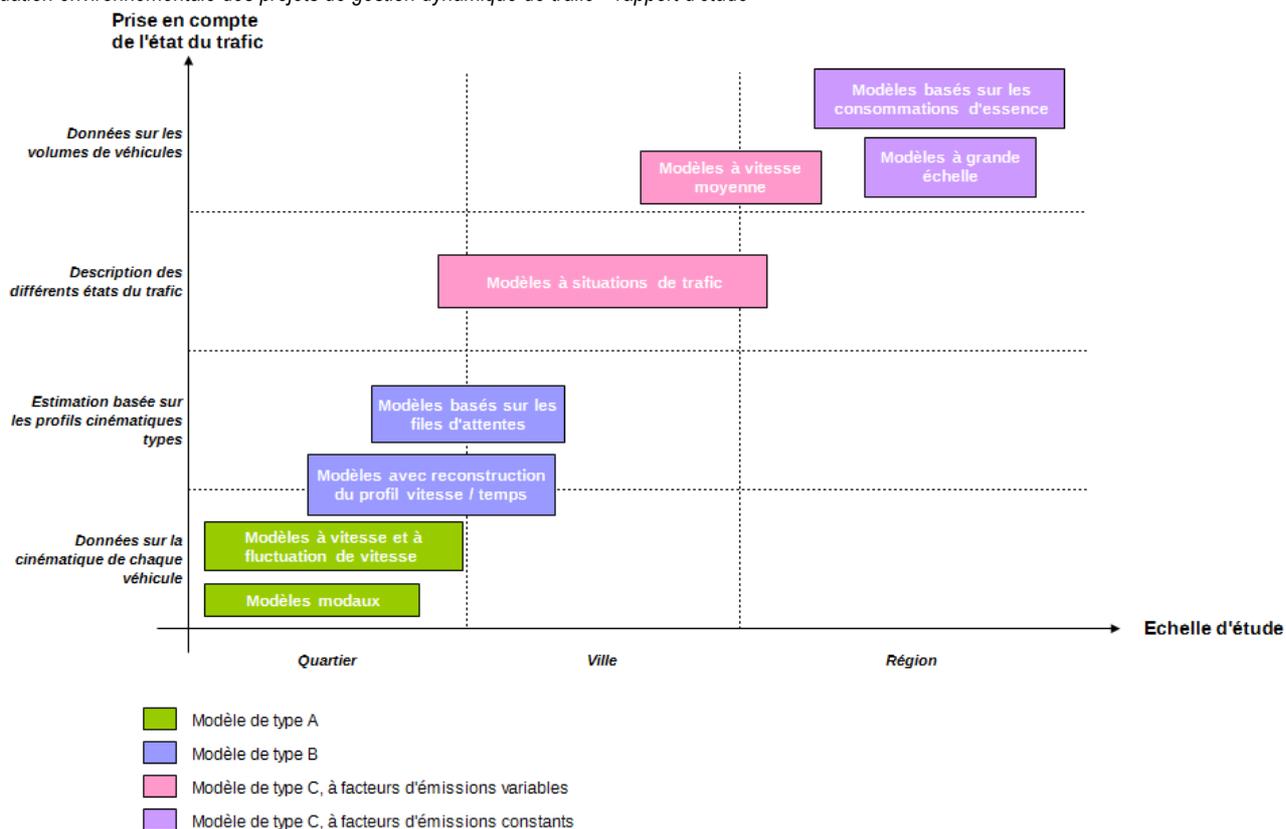


Illustration 5: Classification des types de modèles existant - Sources : [Can_2009]

Les modèles présentés dans les paragraphes suivants et/ou en annexes sont listés dans le tableau 5. Ils ont déjà fait l'objet d'un travail de présentation et d'analyse en lien avec les projets de régulation de trafic, que nous réutilisons dans ce rapport.

A noter que la plupart des modèles étudiés ne considèrent que les émissions à chaud. Les émissions à froid, par évaporation et hors échappement ne sont pas systématiquement prises en compte et/ou modélisées. Or, l'on sait que la congestion affecte les émissions à froid et par évaporation. Certains de ces modèles sous-estiment donc les émissions. Lorsque l'information est disponible, le type d'émissions calculées par les modèles est précisé. En revanche, ce paramètre n'est pas pris en compte dans l'analyse de ces modèles.

Types	Sous catégories		Nom des modèles ou des personnes les ayant développés	
A	Modèles modaux	instantanés	matriciel accélération / vitesse	Kent et Post DRIVE MODEM
			matriciel vitesse / charge du moteur	US VEMISS PHEM
			analytiques vitesse- accélération	Cernuschi VETESS VT-MICRO
			basés sur la puissance	CVEM, CSIRO CMEM
	agrégés	SIDRA LANES-SATURNE CALINE4 Taylor et Young		
	Modèle à vitesse ou fluctuation de vitesse		MEASURE VERSIT +	
B	Estimation des files d'attentes		Matzoros	
	Reconstitution du profil vitesse/temps		TEE	
C	Modèle à facteur d'émission constants	consommation de carburant	AGO IPCC	
		grande échelle		
	Modèle à facteur d'émission variables	vitesse moyennes	MOBILE EMFAC COPERT QGEPA	
		situation de trafic	HBEFA ARTEMIS MOBILE6 VERSIT+ macro	

Tableau 5: Classification des modèles d'émission

2.2.2.1. Modèles de type A

Les modèles de type A prennent en compte la congestion de manière explicite car ils nécessitent en entrée des données de situations de conduite réelles (modèles modaux) ou des variables spécifiques de congestion (modèle de régression multivariée) pour déterminer les valeurs des facteurs d'émissions. Ils peuvent donc théoriquement modéliser les effets de la congestion sur les émissions.

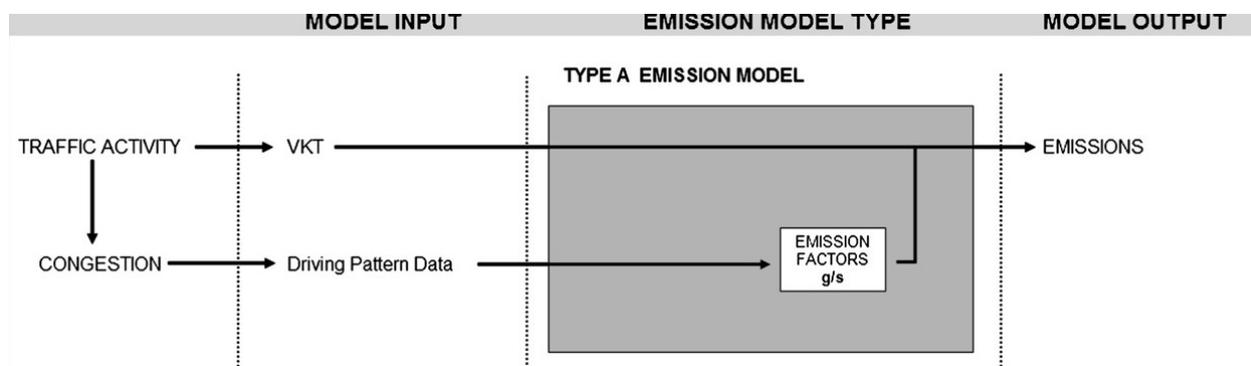


Illustration 6: Modèles de type A
Sources : [Smit_2008]

2.2.2.1.1. Modèles modaux

Le terme « modal » est utilisé pour caractériser les modèles d'émissions qui simulent explicitement les différents modes opératoires d'un véhicule.

Les modèles modaux fournissent, à partir de cycles de conduites prédéfinis, les émissions instantanées d'un véhicule (typiquement 1 seconde) en fonction des conditions de circulation (vitesse, accélération, etc.).

Smit et al. dénombrent cinq types de modèles modaux instantanés ou agrégés :

Les modèles instantanés matriciels accélération / vitesse

Ce type de modèle utilise une matrice, la plupart du temps bidimensionnelle avec en ligne des intervalles de vitesse et en colonne des intervalles d'accélération (exprimées généralement en « accélération » soit en « accélération x vitesse »), qui contient des facteurs d'émissions instantanés ($g.s^{-1}$). Ces derniers correspondent à la moyenne d'une distribution de valeurs de facteurs d'émission seconde par seconde obtenus lors d'échantillonnages d'émissions pendant un (ou plusieurs) cycle(s) de conduite.

Exemples de modèles : **Ken et Post** (Australie, années 80), **DRIVE-MODEM** (modèle européen, dès 1995). Pour plus de détails sur ces modèles, consulter l'Annexe A .

Les modèles instantanés matriciels vitesse / charge du moteur

Ce type de modèle donne l'émission instantanée ($g.s^{-1}$) produite par un moteur en fonction de sa vitesse (en tour par minute) et de sa charge. Les matrices sont générées à partir de mesures de consommation de carburant et de mesures d'émissions, réalisées sur un banc dynamométrique pour moteur ou pour véhicule et simulées pour des combinaisons constantes de vitesse de moteur et de charge. Elles sont réalisées pour une vitesse constante (« steady state ») ou pour un régime accéléré / décéléré (« transient »). Ces matrices doivent être combinées avec un modèle complémentaire permettant de définir la charge et la vitesse du moteur en fonction de la vitesse du véhicule, de la pente de la route et des changements de vitesse.

Exemples de modèles : **US-VEMISS** (modèle américain, 1995), **PHEM** (modèle européen, 2005). Pour plus de détails sur ces modèles, consulter l'Annexe A .

Les fonctions instantanées analytiques vitesse-accélération

Ce type de modèle utilise des fonctions analytiques, qui donnent l'émission instantanée de chaque polluant en fonction de la vitesse et d'une classe d'accélération, pour différents cycles de conduite. Ces lois sont construites sur la base de cycles de conduite opérés sur châssis dynamométrique, ou bien déduits de mesures in situ.

Exemples de fonctions analytiques :

$$E_n(t) = \max[E_0, f_1 + f_2 v_n(t) + f_3 v_n(t)^2 + f_4 a_n(t) + f_5 a_n(t)^2 + f_6 v_n(t) a_n(t)]$$

avec $v(t)$ et $a(t)$ vitesse et accélération instantanées

Fonction analytique de VETESS

Exemples de modèles : **Cernuschi et al.**, **VETESS**, **VT-MICRO**. Pour plus de détails sur ces modèles, consulter l'Annexe A .

Les modèles instantanés basés sur la puissance

Dans ce type de modèle, les émissions et le carburant consommé sont estimés en fonction de la puissance instantanée dépensée par le véhicule pour se déplacer (fonctionnement du moteur, des équipements annexes tels que la climatisation) et contrecarrer les différentes forces auxquelles il est soumis (forces de frottement de l'air, des contact pneu/route, pente de la route, l'inertie du véhicule, etc.).

Exemples de modèles : **CVEM** et **CSIRO** (modèles australiens), **CMEM** (modèle américain). Pour plus de détails sur ces modèles, consulter l'Annexe A .

Les modèles agrégés

Des modèles modaux plus agrégés ont aussi été développés. La philosophie est toujours la même : en s'appuyant sur un modèle modal, l'idée est de déterminer l'émission correspondante à un parcours donné. Le modèle peut alors être couplé à un modèle de trafic censé déterminer la vitesse moyenne, le nombre d'arrêts, etc.

Exemples de modèles : **SIDRA**, **LANES/SATURN**, **CALINE4**. Pour plus de détails sur ces modèles, consulter l'Annexe A .

Conclusion sur les modèles modaux

Les modèles modaux sont ceux qui offrent le plus grand niveau de détail, dans la mesure où ils permettent d'estimer la consommation énergétique et les quantités de polluants émis toutes les secondes. Ces modèles semblent être les plus adaptés pour prédire des modifications dans les styles de conduite.

En revanche, la faible précision de ces modèles a souvent été pointée (biais dans les estimations pouvant atteindre 50% par rapport aux modèles classiques). Elle est liée à de nombreux phénomènes :

- prise en compte insuffisante de l'historique du fonctionnement du moteur, qui influe largement sur les émissions ;
- difficulté de remonter dans le processus de mesure à l'instant précis où est émis le polluant, ce qui vient gêner les corrélations entre polluants émis et cinématique du véhicule ;
- rapidité du processus d'émissions dans certains cas ;
- erreur dans la constitution du parc représentatif ou d'un cycle de conduite représentatif, etc.

Néanmoins ces dernières années, des améliorations, concernant les mesures et la constitution des lois, ont été réalisées. Par exemple, une meilleure prise en compte du transport des polluants entre l'émission (au niveau de l'échappement) et le dispositif de mesure permet d'améliorer l'estimation.

L'approche agrégée semble être intéressante, car elle est basée sur des données facilement accessibles via un modèle dynamique de trafic. Toutefois ce type de modèle a été peu développé par le passé.

Dans tous les cas, les modèles modaux 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. En effet, les modèles de trafic microscopiques, qui donnent l'illusion de fournir une estimation précise de la trajectoire des véhicules présents sur le réseau, sont en réalité difficilement capables de déterminer avec exactitude les vitesses et les accélérations des véhicules à chaque instant. Ceci peut donc induire des erreurs dans l'estimation des polluants émis.

2.2.2.1.2. Modèles à vitesse et fluctuation de vitesse ou modèle de régression multivariée

Les modèles de régression multivariée nécessitent des données de situation de conduite pour quantifier les variables d'entrée du modèle, qui sont ensuite utilisées pour estimer les facteurs d'émissions (g.km^{-1} , équivalent à g.VKT^{-1}) des différentes classes de véhicules.

Les modèles à vitesse et fluctuation de vitesse s'appuient sur les profils vitesse/temps des véhicules pour estimer la quantité de polluants émise par le trafic routier. Les profils vitesse/temps sont issus soit de mesures, soit d'un outil de simulation de trafic. La quantité de polluants émise est ensuite estimée en fonction de paramètres décrivant la cinématique des véhicules, comme par exemple :

- proportion de cycle avec des accélérations supérieures à $1,34\text{m.s}^{-2}$ ou dont le terme « accélération*vitesse » excède $60\text{mph}^2/\text{s}$
- nombre d'arrêts par km,
- temps moyen des arrêts,
- pourcentage du temps à l'arrêt, en accélération et en décélération,
- vitesses moyennes et maximum,
- accélération / décélération moyenne et maximum
- etc.

Exemples de modèles : **MEASURE**, **VERSIT+** (modèle développé au Pays-Bas)

Seul le modèle VERSIT+, du fait de son intérêt, est présenté ci-dessous, l'autre est détaillé en l'Annexe A .

Le modèle **VERSIT+** a été développé par l'Université de Delft aux Pays-Bas. Alimenté en entrée par des profils vitesse/temps, il estime des grandeurs caractérisant le trafic (nombre d'arrêts par km, temps moyen des arrêts, pourcentage du temps à l'arrêt, en accélération et en décélération, vitesses moyennes et maximum, accélération / décélération moyenne et maximum et 6 paramètres décrivant les variations d'accélération) sur lesquelles s'appuiera l'estimation des polluants.

Les lois d'émissions sont construites à partir de tests réalisés sur châssis dynamométriques pour 246 classes de véhicules légers et 153 profils reproduisant les conditions de circulation réelles. Elles sont ensuite obtenues à partir de régressions linéaires multiples, basées sur 49 variables (dont les variables décrivant les conditions d'écoulement du trafic citées ci-dessus).

Les validations faites sur ce modèle sont encourageantes. Une première validation est faite sur les 62 cycles de conduite ayant servi à la constitution des lois d'émissions. Les corrélations sont excellentes concernant l'estimation de la consommation énergétique, bonnes pour les polluants (HC, CO et PM10) et un peu moins bonnes pour les NOx concernant les véhicules diesels (corrélations de l'ordre de 0.6). Une deuxième phase de validation a consisté à tester les lois d'une sélection aléatoire de 25% des points ayant servi à la constitution de la loi. Là encore les résultats sont bons. Enfin, une comparaison avec COPERT IV (cf. description du modèle page 28) a été faite, qui souligne le fait qu'à l'inverse de COPERT IV, VERSIT+ est capable de mettre en évidence des émissions différentes à une vitesse donnée pour des situations de trafic différentes.

En revanche, aucune validation *in situ* ni sur les données ayant servi à construire le modèle n'a été réalisée. Il semble que ce soit dans l'estimation des profils vitesse/temps et dans la sensibilité du modèle à ces profils, que se situent les principales sources d'erreurs de VERSIT+.

Conclusions sur les modèles à vitesse et fluctuation de vitesse

*Ce type de modèle présente une vision « intermédiaire », qui peut s'avérer moins sensible aux erreurs d'estimation commises par les modèles de trafic (notamment sur l'accélération), que des modèles modaux. En revanche, il semble que certains des paramètres cinématiques (par exemple le terme « accélération*vitesse » excédant 60mph²/s) soient difficiles à estimer par le biais d'un modèle de trafic.*

L'approche proposée par VERSIT+ est intéressante, puisque le modèle microscopique de trafic est couplé non pas à une loi instantanée, comme c'est le cas le plus souvent, mais est utilisé pour estimer des caractéristiques du trafic qui sont ensuite utilisées par les lois d'émissions (nombre d'arrêts, etc.). Cette approche semble cohérente pour estimer l'impact environnemental d'une stratégie de régulation, qui va impacter ce nombre d'arrêt (exemple : instauration d'une onde verte). Deux points doivent malgré tout être approfondis :

- *dans le cas de VERSIT+, certains paramètres, tels que la variation moyenne d'accélération seconde après seconde ou des paramètres relatifs à la puissance du véhicule, sont difficiles à déterminer. Les auteurs semblent s'être fait le reproche du trop grand nombre de paramètres (jusqu'à 50 pour décrire la cinématique des véhicules), et sont passés à une version plus « modale » pour la dernière version de VERSIT+. D'ailleurs, l'association de VERSIT+ au modèle microscopique VISSIM a sans doute contribué à cette évolution du modèle.*
- *le modèle VERSIT+ semble également pertinent à l'échelle de l'agglomération. La question se pose alors du modèle de trafic approprié pour déterminer les paramètres d'entrée du modèle. Il serait intéressant de tester une version « dégradée » de modèle à fluctuation de vitesse, c'est-à-dire s'appuyant sur un nombre plus petit de paramètres, et moins sensibles à la cinématique des véhicules. Il semble qu'une telle approche serait tout à fait pertinente pour évaluer les impacts environnementaux de stratégies à l'échelle du quartier, voire de l'agglomération.*

2.2.2.2. Modèles de type B

Les modèles de type B génèrent des situations de conduite simplifiées, qui sont fonction de variables de trafic macroscopique (débit, vitesse moyenne, densité) et des caractéristiques de l'infrastructure (longueur d'un tronçon, nombre de voies, vitesse en mode fluide, type d'intersection, coordination de feux). Ces situations de conduite sont combinées avec des facteurs d'émission instantanés (g.s⁻¹) ou utilisées pour calculer des algorithmes de correction pour les tables de facteurs d'émissions incorporées (g.km⁻¹).

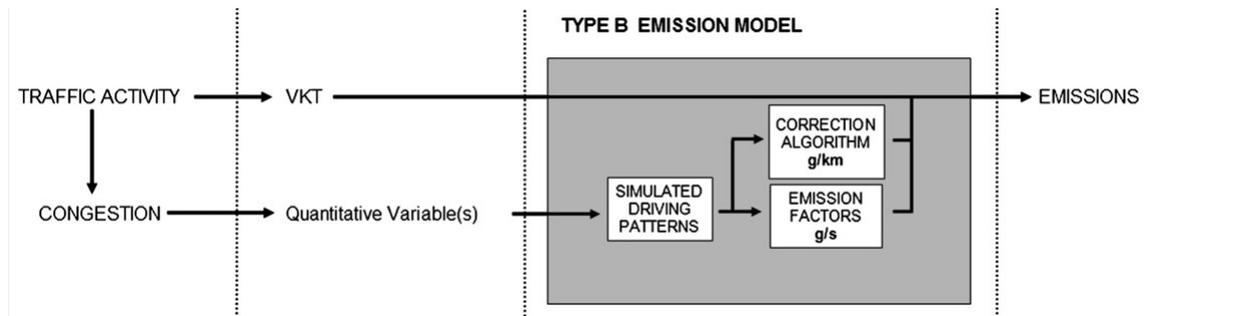


Illustration 7: Modèles de type B

Sources : [Smit_2008]

De même que les modèles de type A, les modèles de type B sont des modèles instantanés microscopiques de par les variables nécessaires à leur fonctionnement et à leurs sorties.

2.2.2.2.1. Modèle basé sur l'estimation des files d'attente

Dans les années 90 a été développé un modèle qui accepte en entrée des données de trafic du modèle de trafic SATURN et des matrices de facteurs d'émissions instantanés.

Ce modèle utilise la théorie du trafic pour prévoir les variables de changement de queue dans le temps et distingue les intersections à panneaux, sans panneaux et les ronds-points.

Ce modèle nécessite seulement les vitesses moyennes, les types d'intersections (feu, intersection à priorité ou rond point) et les réglages des feux en entrée, pour estimer les variations de la taille des files d'attentes à chaque type d'intersection à partir de la théorie des ondes cinématiques. La longueur de la file d'attente est ensuite utilisée pour prévoir le temps passé dans chacun des modes fondamentaux de conduite (vitesse stationnaire, accéléré, décéléré et à l'arrêt) pour tous les véhicules en tout point de la voie. Ensuite, une matrice des facteurs d'émission instantanés donne la distribution des émissions le long de la route.

Exemples de modèles : Matzoros et Van Vliet

Conclusion sur les modèles basés sur l'estimation des files d'attente

Cette approche semble pertinente pour l'estimation des polluants. Toutefois, il existe peu de littérature sur ce type de modèle. La question peut se poser notamment de la manière dont sont déterminés les facteurs d'émission en fonction du temps passé dans chaque mode fondamental.

2.2.2.2.2. Modèles avec reconstruction du profil vitesse / temps (modèle TEE)

Peu de littérature a été trouvée sur ce modèle ; une description rapide en est faite ci-dessous et une présentation plus détaillée se trouve en Annexe B. Elles sont inspirées de Smit.

Le modèle génère les profils « vitesse / temps » en fonction de la vitesse moyenne, des durées de vert, de la longueur des liens et des intersections. Il calcule une densité du trafic ainsi qu'une densité normalisée, qui est utilisée pour calculer la fraction du temps passé dans chacun des modes de conduite (accéléré, décéléré, ralenti et stationnaire). Des facteurs de corrections sont ensuite utilisés pour corriger les facteurs d'émissions utilisés (COPERT) et prendre en compte la congestion.

Exemples de modèles : TEE (« Traffic Energy and Emission »)

Conclusion sur le modèle avec reconstruction du profil vitesse / temps TEE

Le modèle présente l'avantage majeur de ne pas s'appuyer directement sur des données cinématiques, comme l'accélération, qui sont parfois difficiles à estimer mais reconstruit les profils cinématiques à partir des données fournies par le modèle de trafic (modes de conduite). Toutefois, la congestion est représentée dans TEE comme un profil additionnel de stop & go, ce qui ne semble pas très pertinent.

2.2.2.3. Modèles de type C

Dans les modèles de type C, les données mesurées au cours de situations de conduite sont utilisées pour déterminer des facteurs d'émissions relatifs à la distance (en g.km^{-1}) ou à la consommation de carburant (en g.kg^{-1} de carburant). Ces derniers sont :

- soit constants (modèles basés sur la consommation de carburant et modèles à grande échelle),
- soit fonction d'une variable qualitative de situation de conduite (modèle à vitesse moyenne) ou d'une description discrète quantitative ou qualitative d'une situation de trafic (modèle à situation de trafic).

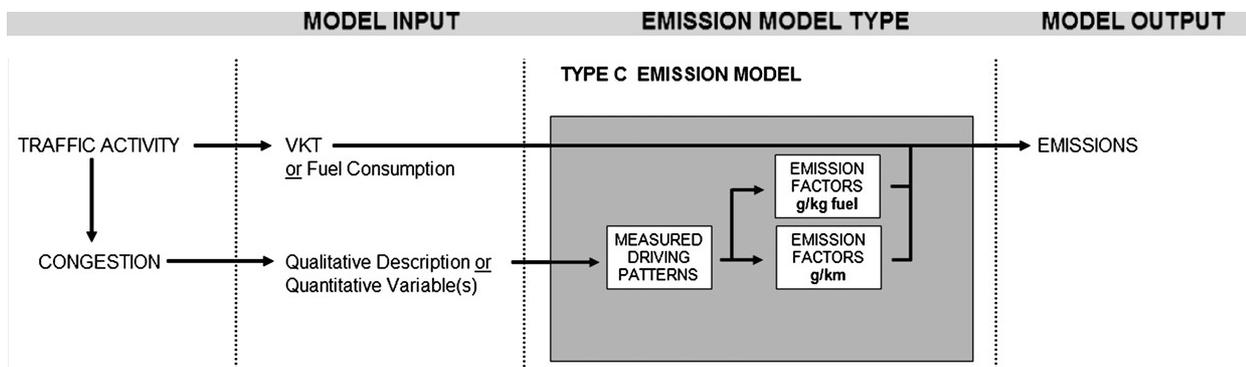


Illustration 8: Modèles de type C

Sources : [Smit_2008]

2.2.2.3.1. Modèles à facteur d'émission constants

Modèles à grande échelle

Ces modèles d'émission sont les plus agrégés. Ils utilisent des données d'activité relatives au trafic (dérivés par exemple des VKT (veh.km) issus de statistiques nationales), qui sont agrégées pour tout le domaine d'étude (souvent l'échelle nationale). Ces données sont combinées avec un unique facteur d'émission. Il est possible de désagréger spatialement et temporellement ce modèle en supposant que les émissions locales sont proportionnelles à d'autres variables (densité de population, allure du débit dans la journée...). Ces modèles ne peuvent être utilisés que pour des estimations avec faible précision spatiale (région pays) et temporelle (année).

Exemples de modèles : **Energy Workbook for Transport** (1998), modèle australien.

Modèles basés sur la consommation de carburant

Ces modèles déterminent la quantité moyenne de polluants émis par les véhicules par kg de carburant consommé. En s'appuyant sur les données de vente de fuel, il est ainsi possible d'estimer les quantités de gaz à effet de serre émises.

Exemples de modèles : **AGO 1998, IPCC1996**

Conclusion sur les modèles à facteur d'émissions constants

De tels modèles sont utilisés à très grande échelle, pour des inventaires nationaux, et non pas pour but d'évaluer l'impact environnemental de stratégies de régulation du trafic. Ils ne sont donc pas développés dans ce rapport.

2.2.2.3.2. Modèles à facteurs d'émissions variables

Modèles basés sur les vitesses de parcours moyennes

Ces modèles prédisent, pour une classe de véhicule suivant un profil de conduite donné, les facteurs d'émission moyens (c'est-à-dire les émissions en g/km) en fonction de la vitesse moyenne réalisée sur le parcours.

Exemples de modèles : **MOBILE** (US), **EMFAC** (US, Californie), **COPERT** (UE) et **QGEPA** (Australie).

Ces modèles sont tous basés sur des mesures réalisées sur des châssis dynamométriques, à partir de cycles de conduite représentatifs. Ils se distinguent en revanche par :

- la flotte de véhicules concernée,
- les cycles de conduite utilisés,
- les approches de modélisation : les modèles européens calculent les émissions en fonction de la vitesse, alors que les modèles américains les calculent pour une vitesse type de 31.5km/h, complétées par des facteurs correctifs pour les autres vitesses. Le modèle australien utilise les deux méthodes.

Seul le modèle COPERT est présenté ci-dessous, les autres sont détaillés en Annexe C .

COPERT (« Computer Programme to calculate Emissions from Road Traffic »):

Les modèles COPERT II et III ont été développés dans le cadre de l'action COST319 (*Cooperation in Science and Technology*), et du projet européen MEET (*Methodologies for Estimating air pollutants Emissions from Transport*) (cf. Annexe D), qui propose des méthodes pour calculer les émissions et consommations énergétiques en fonction du mode de transport et du type de véhicules considérés.

Le modèle COPERT IV est une évolution du modèle précédent. Il permet de calculer les émissions de tous les polluants majeurs de l'air (CO, NO_x, COV, PM, NH₃, SO₂, métaux lourds) ainsi que les gaz à effet de serre (CO₂, N₂O, CH₄) produits par différentes catégories de véhicules (VP, VL, PL, 2RM) en fonction de la vitesse moyenne.

COPERT fournit une estimation globale des émissions d'un trafic routier sur une section ou un réseau en fonction du kilométrage total parcouru sur cette section ou ce réseau et des conditions de circulation moyenne du parcours. Ces dernières sont généralement estimées via la vitesse moyenne pratiquée le long du trajet considéré. Trafic et vitesses sont à fournir par l'utilisateur du modèle, le modèle exploitant différentes lois d'émission (en g / km) pour calculer le volume total des émissions.

Les lois d'émission proposées par ces modèles sont issues de mesures d'émissions en laboratoire sur divers cycles de conduite, visant à représenter les différentes conditions de circulation réelle. Ces cycles sont constitués à partir de mesures embarquées de vitesses et accélérations instantanées. Chacun des cycles est ensuite reproduit sur bancs de test pour différentes catégories de véhicules (véhicules particuliers ou poids lourds), différentes motorisations (essence / diesel), différentes cylindrées, etc., et les émissions de polluants sont mesurées à l'échelle du cycle complet. Les émissions totales sont alors rapportées au kilométrage effectué pendant le cycle pour obtenir une émission moyenne en g/km. Ces valeurs, associées à la vitesse moyenne du cycle et juxtaposées une à une, permettent de construire des lois d'émissions continues fonction de la vitesse moyenne (cf. Illustration 9).

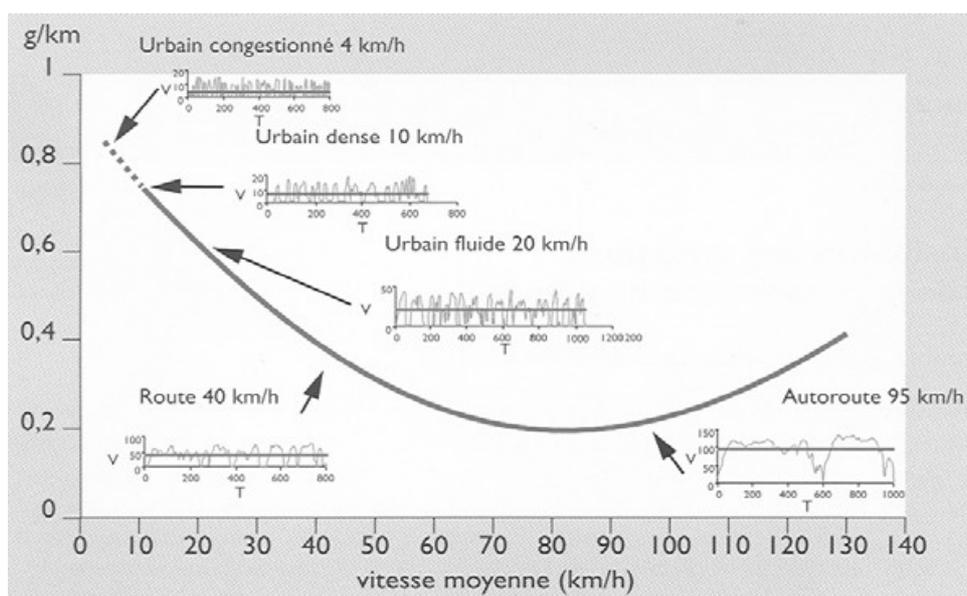


Illustration 9: Exemple de courbes émissions/vitesse dans COPERT

Source : COPERT / INRETS

La méthodologie COPERT IV intègre toutes les émissions à l'échappement (émissions à chaud, les surémissions liées au trajet « moteur froid ») prend en compte les surémissions liées à la pente et à la charge pour les poids-lourds et les émissions de COV dues aux pertes par évaporation dans les moteurs essence. Elle intègre aussi les émissions dues à l'usure des pneumatiques et des pièces mécaniques des véhicules, mais aussi des corrections pour traduire les surémissions pour les véhicules anciens et/ou pour les véhicules essences catalysés ayant un kilométrage important.

Les calculs effectués en CETE sont basés sur la méthodologie COPERT IV. L'outil utilisé a été élaboré par le réseau scientifique et technique du ministère et se nomme COPCETE. Il utilise des données relatives à la structure du parc automobile français roulant (parc INRETS¹² nouvellement IFSSTAR) et les facteurs d'émission unitaires de COPERT IV. Il a remplacé Impact Ademe 2, devenu obsolète car construit autour des facteurs d'émissions de COPERT III. L'illustration 10 schématise le mode de fonctionnement de ces deux logiciels.

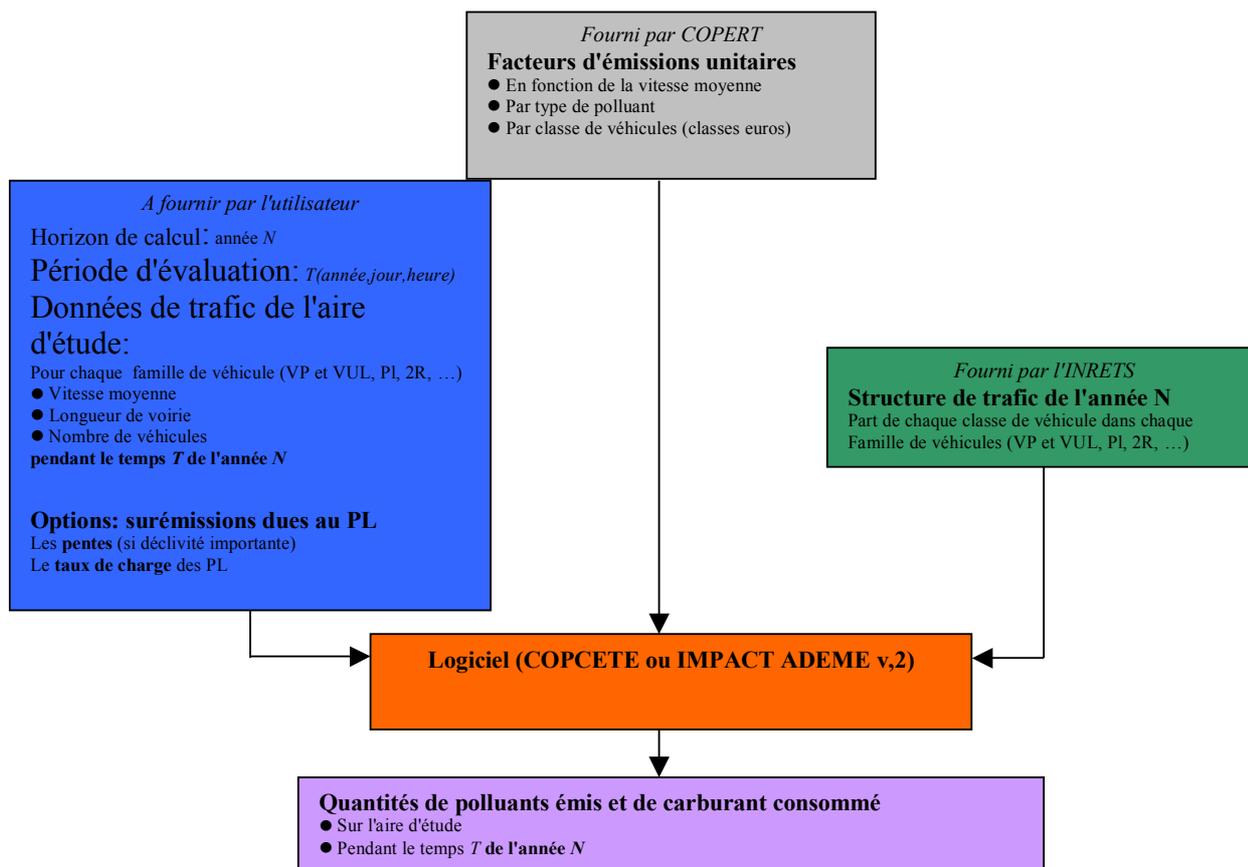


Illustration 10: Fonctionnement général du modèle utilisé

Conclusion sur les modèles basés sur les vitesses de parcours moyennes

Les mesures de gestion de trafic ont des incidences non seulement sur la vitesse moyenne mais également sur la cinématique de chaque véhicule. Ainsi les modèles à vitesse moyenne tels que COPERT, qui ne tiennent compte des conditions de circulation qu'au travers de la vitesse moyenne, sont certainement peu pertinents pour évaluer l'impact environnemental de stratégies de régulation du trafic.

Malgré tout, la congestion est appréhendée dans ces modèles de manière implicite puisqu'une partie des cycles de conduite correspond à des cycles congestionnés. En revanche, on ne sait pas si ce degré de congestion correspond à la réalité.

De plus, ces modèles ne permettent pas d'estimer la différence, pour une même vitesse moyenne, entre les quantités de polluants émises en régime fluide et en régime congestionné. Ils restent peu pertinents pour évaluer l'impact d'une stratégie de régulation modifiant le niveau de congestion.

12 Le modèle informatique mis au point par l'INRETS donne la composition du parc automobile en France de 1970 à 2025 (bientôt 2030) : le **parc statique** (véhicules qui existent) à partir du fichier des immatriculations des véhicules neufs et le **parc roulant** (véhicules qui circulent) en tenant compte de l'usage des véhicules à partir de lois de survie. Il intègre la prise en compte des normes antipollution (normes Euro) et des avancées technologiques connues, mais pas les éventuelles ruptures technologiques (énergies nouvelles). La méthode de calcul permet de connaître pour chaque année les caractéristiques (type de véhicule, motorisation, cylindrées, réglementation en terme de normes d'émissions) et l'âge des véhicules en circulation, paramètres qui conditionnent directement les émissions des véhicules. Ce modèle de parc fait l'objet de mises à jour régulières qui sont prises en compte dans l'outil COPCETE.

Le modèle COPERT est bien adapté à l'évaluation des émissions sur des échelles spatio-temporelles importantes, comme par exemple celles d'un réseau de voiries nationales à l'échelle d'une région. Il permet de dresser des inventaires d'émissions et de faire des projections dans le futur. Les données trafic très agrégées qu'il nécessite en entrée, sur de longues périodes de temps (typiquement une année), sont aisément accessibles aux exploitants routiers. Il est aussi possible d'en faire une utilisation plus locale, mais il faut veiller à ce que les conditions de circulation soient homogènes sur l'axe ou le réseau considéré et stables sur la période de temps étudiée, de façon à être correctement représentées par une vitesse moyenne.

Modèle à situation de trafic

Les modèles à situation de trafic s'appuient sur des facteurs d'émission discrets (en g/km) pour des situations de trafic prédéfinies. Ainsi, à la différence des modèles basés sur les vitesses de parcours moyennes, ces modèles tiennent compte de l'état du trafic. En entrée du modèle, il est nécessaire de pouvoir estimer le nombre de kilomètres parcourus par les véhicules dans chacun des états de trafic prédéfinis.

Exemples de modèles :

- modèles européens : **AED 2000**, **HBEFA** (*Handbook of Emission Factors*) et **ARTEMIS** (*Assessment and Reliability of Transport Emissions Models and Inventory Systems*). Ils définissent quatre niveaux de trafic : trafic fluide, trafic important, et deux états proches de la saturation (stop & go, et congestionné). Le principal défaut de ces modèles est que l'estimation de certaines situations de trafic, telles que les situations « stop & go », peut parfois s'avérer problématique.
- modèle américain : **MOBILE6**. Il est construit sur des cycles de conduite développées par l'US-EPA et faisant intervenir le LOS (LOS signifiant Level Of Service, c'est-à-dire 6 niveaux différents de congestion allant de très fluide à très congestionné).
- TNO (la « Netherland Organisation for Applied Scientific Research ») a développé un modèle concernant la conduite sur autoroute s'appuyant sur 9 cycles congestionnés.

Seul le modèle HBEFA est présenté ci-dessous, les autres sont détaillés en Annexe C .

L'action COST 319 a souligné que les modèles d'inventaires classiques, développés séparément par chacun des membres européens, contenaient des inexactitudes souvent dues à un manque de données de mesures. De plus, les cycles de conduites différents d'un pays à l'autre rendent difficile la comparaison des modèles. L'objectif du projet **ARTEMIS**, financé par la commission européenne était, d'une part, d'homogénéiser les modèles européens d'estimation des polluants (COPERT, TREMOVE¹³, MEET, et HBEFA) et, d'autre part, de développer une méthodologie harmonisée pour l'estimation des polluants à l'échelle nationale émis par tous les types de transports. Des méthodologies ont également été développées pour l'estimation des polluants à plus petite échelle .

Le projet a abouti à l'élaboration d'un logiciel gratuit, disponible sur internet¹⁴. Celui-ci étant difficile à appréhender sans connaissances approfondies du modèle ARTEMIS, la version bêta (0.4d) n'a jamais débouché sur une version stable. Ainsi ARTEMIS a été abandonné au profit de HBEFA (*Handbook of Emission Factors*).

HBEFA est un logiciel de modélisation des émissions de polluants routiers initialement développé par les agences environnementales suisse, allemande et autrichienne, qui ont été rejointes par les agences suédoise, norvégienne et française. Le projet ARTEMIS ayant été clos en 2007, HBEFA a hérité de la méthodologie ARTEMIS (présentée en Annexe C), notamment avec la définition et la description de situations de trafics.

La version, présentée dans ce paragraphe, est HBEFA 3.1 qui est disponible depuis janvier 2010.

HBEFA est basé sur la description de situations de trafic permettant de prendre en compte la dynamique du trafic. Les 276 situations de trafics présentes dans la version 3.1 du modèle ont été développées dans le cadre d'ARTEMIS et adaptées à HBEFA. Elles sont définies à partir de 5 types de voies, 4 niveaux de service (régime fluide, chargé, saturé/congestionné, stop & go) et de 69 vitesses limites (cf. tableau 6). Chaque situation de trafic est caractérisée par un mode de conduite spécifique (c'est-à-dire une courbe vitesse/temps).

¹³ Modèle d'évaluation des politiques de transport conçu pour évaluer les impacts de différents scénarios de politiques publiques sur les émissions du secteur des transports. TREMOVE s'appuie sur COPERT pour l'estimation des véhicules routiers.

¹⁴ <http://www.trl.co.uk/ARTEMIS/>

Zone	Type de voie	Niveaux de service	Vitesse limite (km/h)													
			30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	>130		
Rurale	Autoroute	4 niveaux														
	Voie rapide	4 niveaux														
	Nationale	4 niveaux														
	Départementale	4 niveaux														
	Départemental sinueuse	4 niveaux														
	Locale	4 niveaux														
	Locale sinueuse	4 niveaux														
	Résidentielle	4 niveaux														
Urbaine	Autoroute nationale	4 niveaux														
	Voie rapide urbaine	4 niveaux														
	Nationale	4 niveaux														
	Principale urbaine	4 niveaux														
	Secondaire	4 niveaux														
	Locale	4 niveaux														
	Résidentielle	4 niveaux														

Tableau 6: Situations de trafic HBEFA

Source : [Manuel_HBEFA]

Le développement du modèle s'est déroulé en deux temps, d'une part la construction des cycles de conduite et d'autre part le développement des cartes d'émissions d'échappement. Ces dernières ont été élaborées sur la base de tests dynamométriques réalisés sur différentes catégories de véhicules et conduisant à la détermination de facteurs d'émissions pour une large gamme de situation de trafic.

Actuellement, HBEFA intègre les parcs automobiles roulant de l'Allemagne, l'Autriche, la Suisse et la Norvège. Début 2012, la version 3.2 comprendra aussi celui de la France.

Le parc automobile français est en cours de préparation par l'IFSTTAR. Il couvrira la période 1990-2030 et les données seront disponibles année par année.

De plus, l'ADEME souhaite développer une version de HBEFA spécifique à la France. Le bureau d'étude suisse INFRAS, qui est en charge du développement de HBEFA, pourrait se charger de cette mission. Cette version permettrait, tout comme Impact Ademe, de calculer les émissions pour un tronçon donné. Elle serait développée sur la même plate-forme logicielle que HBEFA ce qui simplifierait les mises à jours et la maintenance de l'outil.

A l'heure actuelle, peu d'études mettent en pratique cet outil. Il est donc difficile d'avoir un retour d'expérience. Néanmoins, se basant sur les situations de trafic d'ARTEMIS, il y a fort à penser que les mêmes difficultés d'utilisation soient rencontrées.

Conclusion sur les modèles à situation de trafic

Les modèles à situation de trafic, tels qu'HBEFA, s'appuient sur une description sommaire des conditions de circulation. Ils sont donc peu appropriés pour l'évaluation de stratégies fines (échelle du quartier ou d'un aménagement urbain) qui correspondent à une dimension spatiale moindre que celle utilisée pour construire les cycles de conduite de ces modèles. En revanche, ils peuvent être appropriés pour estimer à l'échelle d'une agglomération l'impact d'une modification du plan de circulation ou l'application de stratégies de régulation de trafic, par exemple. Toutefois, cela implique :

- que le couplage avec un modèle de trafic soit capable, à l'échelle de l'agglomération, de mettre en évidence l'impact de telles stratégies sur l'écoulement du trafic (volumes, vitesses moyennes, etc.) ;
- que ce couplage permette de définir la proportion à allouer à chacun des cycles définis dans le modèle d'émission (se pose alors la question de savoir définir cette proportion à partir de grandeurs du trafic estimées).

2.2.2.4. Conclusion sur les modèles d'émission

La présentation des modèles semble souligner les limites des différentes approches pour l'estimation des polluants liés au trafic routier. Le tableau 7 présente une synthèse des avantages / inconvénients des trois types de modèles.

Les modèles de type A, du fait de la finesse des résultats qu'ils sont capables de donner, semblent être les

mieux adaptés à l'évaluation environnementale de la qualité de l'air résultant des mesures de gestion dynamique de trafic. Les modèles à fluctuation de vitesse semblent être moins sensibles aux erreurs d'estimation commises par les modèles de trafic que les modèles modaux, mais requiert certains paramètres cinématiques difficiles à estimer (exemple le produit de accélération avec la vitesse n'excédant pas 60mph/s). Pour déterminer le type de modèle le plus adapté à ces mesures dynamiques, il est nécessaire de s'assurer que le modèle de trafic est capable de retranscrire la stratégie mise en place et de déterminer l'erreur qu'il commet sur l'estimation des vitesses et accélérations (étude de sensibilité en cours au LICIT). Sans cela, les résultats issus de ces modèles doivent être appréhendés avec précaution.

En ce qui concerne les modèles de type B, les approches utilisées par les modèles étudiés semblent être pertinentes pour ce type d'évaluation. En reconstruisant les profils cinématiques à partir des données fournies par le modèle de trafic, ils sont moins directement tributaires des données de sortie du modèle de trafic. De plus, ils semblent pouvoir être associés à certains modèles de type C (une étude en cours au LICIT a pour objectif d'établir un lien entre les données cinématiques requises par le modèle et les situations de trafic de HBEFA). Cependant, les modèles sont soit peu développés soit nécessitent des paramètres cinématiques encore difficiles à déterminer à partir des données des modèles de trafic. Ces modèles doivent encore faire l'objet de développements avant de pouvoir être utilisé pour évaluer l'impact environnemental de mesures de gestion dynamique de trafic.

Enfin pour les modèles de type C, les modèles à situation de trafic, tel que HBEFA, semblent :

- être plus pertinents pour évaluer des mesures de gestion du trafic pérennes dans le temps (péage urbain, plan de circulation),
- montrer des limites pour tester des stratégies de régulation de trafic modifiant le comportement de conduite des véhicules.

Les modèles à vitesse moyenne, tels que COPERT, sont certainement les moins adaptés à l'évaluation de mesures dynamiques de gestion de trafic. Cependant, cet outil n'est pas forcément à mettre de côté car c'est un modèle robuste, qui a fait l'objet de validations et qui s'appuie sur de très nombreux tests sur véhicules pour établir les lois d'émissions. Son utilisation peut être pertinente sous certaines conditions qui restent encore à préciser notamment du point de vue temporel. Des éléments de réponse pourront être donnés à l'issue de l'étude en cours au CETE de Lyon dans le cadre de l'ERA¹⁵ 38 du PCI RDRT¹⁶.

Actuellement seuls les modèles de type C sont disponibles, il faut donc les utiliser au mieux. En revanche, les modèles de type A et B sont plus adaptés, mais ne peuvent pas encore être utilisés en l'état. Ils doivent encore progresser et seront certainement les modèles de demain.

15 Équipe de Recherche Associée

16 Pôle de Compétence et d'Innovation Régulation Dynamique des Réseaux de Transports

Type	Avantages	Inconvénients / Limites	Échelles	Modèles étudiés dans ce rapport	Adéquation du modèle avec de la GDT	
A	Modèles modaux	- estimation à la seconde des quantités de polluants émis et de la consommation énergétique - modèle adapté pour prédire des modifications dans les styles de conduite	- faible précision des modèles (erreurs pouvant atteindre 50%) - nécessité de caractériser l'impact des erreurs commises sur la cinématique des véhicules	Aménagement urbain / Quartier	VETESS, VT-MICRO, CMEM, PHEM	 actuellement
	Fluctuation de vitesse	- moins sensibles aux erreurs d'estimation commises par les modèles de trafic que les modèles modaux - utilise les données trafic pour déterminer des caractéristiques du trafic qui traduisent de l'écoulement dynamique	- difficulté pour estimer certains paramètres cinématiques - nécessité de s'assurer que les variables retenues par le modèle sont bien sensibles aux situations de trafic envisagées	Quartier / Ville / Agglomération	VERSIT +	
B	Files d'attente	- approche semblant pertinente pour l'estimation de polluants	- peu de littérature sur ce modèle	Aménagement urbain / Quartier / Ville	Matzoros et Van Vliet	 à l'avenir
	Reconstruction du profil vitesse/temps	- reconstruction des profils cinématiques à partir de données fournies par le modèle de trafic	- certaines difficultés pour capturer les effets de la congestion	Quartier / Ville	TEE	
C	Facteurs d'émissions constants	- données d'entrée du modèle facilement accessibles (vente de carburant au niveau national)	- modèle trop macroscopique	Région / Pays	Energy Workbook for Transport	
	Vitesses moyennes	- modèle adapté à l'évaluation des émissions sur des échelles spatialement importantes (région/nation) - données d'entrée aisément accessibles auprès des exploitants routiers	- la congestion est prise en compte de manière implicite - ne tient compte des conditions de circulation qu'au travers de la vitesse moyenne	Ville / Région / Pays	COPERT	
	Situation de trafic	- prise en compte de la dynamique du trafic par le biais de situations de trafic basées sur la vitesse réglementaire, le type de routes, et les niveaux de service	- difficulté pour affecter les tronçons d'un réseau aux différentes situations de trafic définies (pourcentage du temps passé dans chacune des situations recensées)	Ville / Agglomération	HBEFA	

Tableau 7 : Synthèse avantages / inconvénients des modèles étudiés. Pertinence du modèle pour l'évaluation des mesures de gestion dynamique de trafic

- Légende :
-  adapté à la régulation dynamique des trafics
 -  moyennement adapté, à ajuster en fonction des échelles d'étude
 -  adapté sous réserve de conditions d'utilisation particulières
 -  non adapté

2.3. Les modèles de dispersion

2.3.1. Généralités

La dispersion atmosphérique désigne l'ensemble des mécanismes physiques, chimiques et photochimiques de mélange et de dispersion d'une substance dans l'air. C'est un phénomène complexe, qui dépend de nombreux paramètres comme le vent, la température et son gradient vertical, la turbulence atmosphérique, les molécules en présence, mais aussi de facteurs physiques comme des irrégularités géométriques du sol ou la topographie.

La modélisation de ces phénomènes permet d'évaluer les concentrations atmosphériques sur la base des émissions préalablement calculées et ce en différents points d'un site.

Ces modèles requièrent en entrée différents types de données :

- des données **d'émissions**, calculées avec un modèle d'émission,
- des données relatives à la caractérisation du **site** : les dimensions de domaine d'étude, modèle numérique de terrain en présence de relief, description éventuelle des bâtiments influents (position, dimensions), valeur de rugosité du sol,
- des données **météorologiques** représentatives des conditions locales, mesurées sur site ou provenant de la station Météo France la plus proche : vitesse et direction du vent, température, nébulosité, précipitations pour le calcul du dépôt humide. Ces données sont fournies sous forme de rose des vents (données moyennées sur plusieurs années) ou sous forme de données séquentielles horaires ou tri-horaires sur une année.

Les modèles numériques de dispersion peuvent se ranger par ordre de complexité croissante en trois principales familles :

- les modèles **analytiques**, basés sur la solution **gaussienne** de l'équation de diffusion,
- les modèles **intégraux**, basés sur l'intégration dans le temps et dans l'espace des équations fondamentales de la mécanique des fluides,
- les modèles **tridimensionnels** ou **CFD** (Computational Fluid Dynamics) basés sur l'intégration dans le temps des équations fondamentales de la mécanique des fluides.

Globalement, les deux premiers types d'outils s'attachent à modéliser la dispersion à partir d'équations paramétrées et simplifiées. Les temps de calcul sont relativement courts, de l'ordre de la minute. Ils peuvent être mis en œuvre à partir d'un matériel informatique de type PC.

La troisième famille résout directement le système d'équations décrivant les mécanismes physiques de la dispersion. Les temps de calcul sont plus longs, de l'ordre de l'heure, voire de la journée. Ce type d'outil fonctionne généralement sous station de calcul.

Trois types d'outils de calcul existent :

- les modèles **gaussiens**, généralement stationnaires, distribution gaussienne des panaches autour de l'axe de dispersion qui permettent d'estimer la dispersion
- les modèles **eulériens** : discrétisation 3D de l'atmosphère par maille élémentaires, référentiel fixe, calcul des paramètres atmosphériques et météorologiques (CFD : Computational Fluid Dynamics)
- les modèles **lagrangiens** : résolution du système d'équation dans un repère lié à la trajectoire du panache, généralement utilisation d'une météo pré-calculée ; basés sur le suivi de la dispersion d'un grand nombre de particules élémentaires émises à la source, prise en compte de processus de transformation simple (ex : modèle à particules, modèle à bouffée gaussiennes)

2.3.2. Quelques exemples de modèles

2.3.2.1 ADMS

Les études air et santé des projets routiers ont pour finalité d'évaluer l'effet du projet sur l'environnement et en particulier sur la santé des populations. Ainsi les indicateurs calculés doivent pouvoir être comparés à des valeurs de référence ou des valeurs seuils au dessus desquelles un impact sanitaire est possible pour les populations proches du projet. Ces valeurs sont des concentrations¹⁷ en polluants dans l'air, qui sont issues de différentes directives européennes sur la qualité de l'air ambiant, retranscrite en droit français par des arrêtés. C'est pourquoi, la modélisation de la dispersion est une étape nécessaire dans les études air et santé.

ADMS (Atmospheric Dispersion Modelling System) est développé par le CERC (Cambridge Environmental Research Consultants) et commercialisé en France par Numtech. Il a fait l'objet de nombreuses validations, parmi lesquelles des tests de comparaison avec d'autres modèles numériques et une confrontation aux résultats des stations automatiques de mesure de la qualité de l'air en Grande-Bretagne.

Cet outil est conçu pour la modélisation de la dispersion atmosphérique à l'échelle locale. Il est aussi bien adapté à la modélisation de sources de pollution ponctuelles (cheminée industrielle), de sources surfaciques (zone urbaine) ou encore linéiques (infrastructures routières). Il permet de calculer les concentrations dans l'air ambiant des polluants courants (voir exemple de carte de concentration en illustration 11), à partir des quantités d'émissions et des conditions météorologiques qui lui sont données en entrée. Il utilise des modules complémentaires intégrés permettant d'affiner la modélisation :

- module photochimique, qui prend en compte les réactions chimiques dans l'atmosphère ce qui permet d'avoir une bonne représentation temporelle de l'évolution de certains polluants (le NO₂ notamment),
- module pour la rugosité du sol et le relief, qui permet de modéliser les effets de la topographie et des variations de rugosité sur le domaine d'étude,
- module de déposition, qui permet de calculer les dépôts secs et humides et par conséquent la modification de la concentration des polluants dans l'atmosphère suite à ces flux de déposition,
- module météorologique, qui permet de calculer certains paramètres météorologiques qui n'ont pas été directement entrés par l'utilisateur.

¹⁷ On appelle concentration en polluant le nombre de molécules de polluant présentes dans un volume d'air déterminé, sur une zone donnée (pouvant être réduite à un point) et à un instant donné. Elle est exprimée en unité de masse par unité de volume 'exemple : µg/m³)

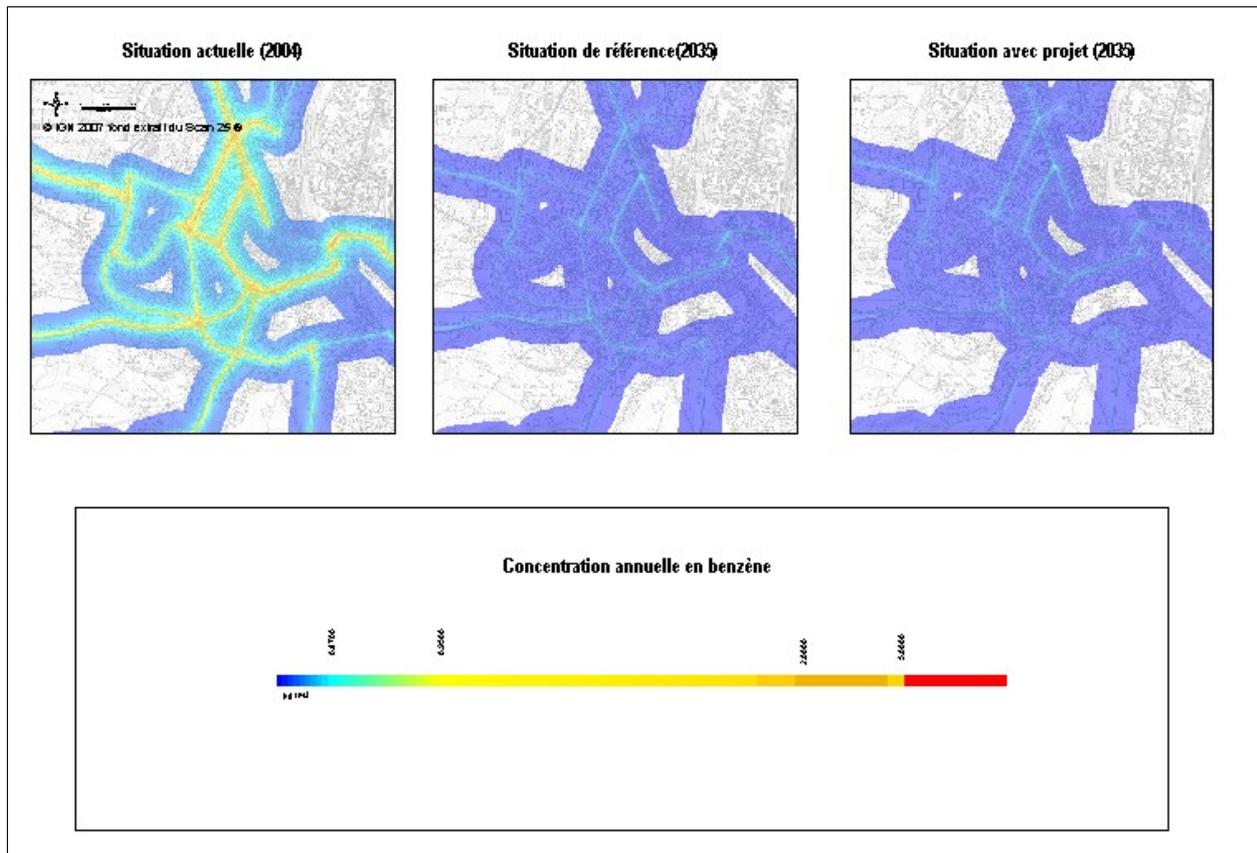


Illustration 11: Exemple de carte de concentration de benzène réalisées à partir des concentrations calculées par ADMS

Sources : CETE de Lyon , Volet air et santé du contournement sud d'Auxerre

La dispersion et le transport des polluants dans l'air sont très variables dans le temps et dans l'espace, et dépendent de l'état de l'atmosphère, des conditions météorologiques, des facteurs topographiques, des facteurs anthropiques et des éléments propres aux polluants. Contrairement aux émissions qui ont un caractère instantané, les concentrations sont tributaires d'une double inertie, temporelle et spatiale (molécules émises à un instant donné et un endroit donné, ou à un instant antérieur au même endroit ou encore à un instant antérieur et à un endroit différent). Elles sont donc plus difficiles à modéliser sur des échelles spatiales réduites et des temps courts.

ADMS est un outil pertinent pour modéliser des concentrations annuelles autour d'infrastructures de transport et permettre des comparaisons avec les valeurs réglementaires. Par contre, il montre ses limites pour modéliser les concentrations élevées, et notamment à proximité immédiate de la source. De plus, il ne permet pas de suivre l'évolution des concentrations avec un pas de temps inférieur à l'heure, ce qui est un facteur limitant pour les stratégies de régulation de trafic, mais qui s'explique par les phénomènes assez lents de dilution, de dispersion et de transformation des polluants dans l'air.

2.3.2.2. Polyphemus

Le CERE¹⁸ travaille depuis quelques années au développement de modèles de dispersion atmosphériques, notamment de modèles gaussiens. Une thèse est en cours sur « la modélisation de l'impact du trafic routier sur la qualité de l'air ». Elle a pour objectif de combiner en un seul outil de calcul, la modélisation de la pollution à proximité des voies, réalisée par les modèles gaussiens, avec celle de la pollution urbaine de fond, effectuée par des modèles eulériens à mailles tri-dimensionnelles.

Une partie de la thèse comporte le développement d'un modèle gaussien pour les sources linéiques intégré à la plate-forme Polyphemus du CERE¹⁸ (<http://cerea.enpc.fr>). Ce modèle est en phase de test au sein du RST (CETE Nord Picardie, CETE de Lyon) et pourrait, à terme, être utilisé dans tous les CETE.

Le CETE Nord Picardie en collaboration avec le CERE¹⁸ a déjà testé l'outil en comparant les concentrations modélisées en NO₂ (seul polluant actuellement disponible) obtenues avec Polyphemus avec ADMS et les concentrations mesurées par tubes passifs. Les premiers résultats sont encourageants :

- le modèle donne de bons résultats pour des situations de références connues,
- par ailleurs, les écarts de concentrations entre Polyphemus et ADMS sont très faibles.
- Polyphemus semble mieux restituer les concentrations élevées en proximité trafic (amplitudes plus importantes) qu'ADMS.

Pour l'instant seul le NO₂ peut être modélisé, mais le modèle pouvant évoluer rapidement, l'intégration de la modélisation des particules ainsi que des dépôts secs et humides est envisagée.

2.3.2.3. SIRANE

SIRANE est un modèle de dispersion atmosphérique en milieu urbain à l'échelle d'un quartier (échelle de l'ordre du kilomètre, qui a été développé dans le cadre d'une thèse de doctorat au Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique de l'École Centrale de Lyon.

Il permet de décrire les concentrations en polluants dans des zones constituées essentiellement de rues bordées de bâtiments. Il couvre une échelle spatiale allant de la rue à l'agglomération. D'un point de vue temporel SIRANE est adapté à des échelles caractéristiques de l'ordre de l'heure. Il peut traiter des sources d'émissions linéiques ou ponctuelles.

Il prend en compte les principaux effets qui agissent sur la dispersion de polluants à l'échelle d'un quartier :

- phénomène de rue canyon
- échange de polluants au niveau des carrefours
- transport de polluants au dessus des toits
- caractéristiques du vent extérieur (vitesse, direction, turbulence, stabilité thermique)
- transformations chimiques simples (cycle de Chapman, NO, NO₂, O₃)
- dispersion des particules
- lessivage par précipitation

Ce modèle semble adapté à la spécificité des projets de gestion de trafic. Il conviendrait très certainement de faire l'objet d'une étude plus approfondie dans le cadre d'un travail similaire à celui-ci, dédié aux modèles de dispersion.

2.4. Le couplage de ces modèles

Un couplage entre deux modèles permet de les faire fonctionner successivement sans que l'utilisateur n'ait à retravailler les données de sortie du premier (structure, type) pour alimenter le deuxième. L'interface entre ces deux modèles a donc un rôle capital dans la procédure.

18 Centre d'Enseignement et de Recherche en Environnement Atmosphérique

2.4.1. Exemples de couplage modèle de trafic / modèle d'émission

2.4.1.1. Les modules environnementaux « intégrés » aux modèles de trafics

Certains modèles de trafic, disponibles sur le marché, possèdent un module environnemental permettant de calculer les émissions en polluants et la consommation énergétique.

Exemple de VISUM

VISUM propose un tel module¹⁹. Une analyse de ce module est donnée par Cheynet et est reprise ci-dessous :

Le module environnemental implémente assez fidèlement la méthodologie et les algorithmes de calcul de HBEFA 3.1:

- les parcs proposés par l'outil sont ceux d'HBEFA (Allemagne, Autriche, Suisse, Suède et Norvège). Le parc utilisé pour chaque tronçon peut être défini de manière globale pour les calculs ou ajusté tronçon par tronçon (exemple : répartition entre les différentes catégories de véhicules).
- parmi les paramètres définissant les situations de trafic de HBEFA, trois d'entre eux (type de zone, type de voie, vitesses limites) correspondent à des attributs définis pour chaque tronçon lors de leur construction. Le quatrième paramètre est plus difficile à caractériser puisqu'il correspond au niveau de service sur le tronçon. Pour finaliser l'affectation des tronçon, VISUM utilise le ratio volume sur capacité (v/c) ou le rapport vitesse en charge sur vitesse libre.

Zone	Type de voie	Niveaux de service	Vitesse limite (km/h)													
			30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	>130		
Rurale	Autoroute	4 niveaux														
	Voie rapide	4 niveaux														
	Nationale	4 niveaux														
	Départementale	4 niveaux														
	Départemental sinueuse	4 niveaux														
	Locale	4 niveaux														
	Locale sinueuse	4 niveaux														
	Récréative	4 niveaux														
Urbaine	Autoroute nationale	4 niveaux														
	Voie rapide urbaine	4 niveaux														
	Nationale	4 niveaux														
	Principale urbaine	4 niveaux														
	Secondaire	4 niveaux														
	Locale	4 niveaux														
	Récréative	4 niveaux														

Source : Manuel utilisateur De VISUM

Autoroute
 Rural
 Urbain

Tableau 8: Implémentation des situations de trafic HBEFA dans VISUM

Sources : [Denis_Cheyne]

- prise en compte des démarrages à froid pouvant être différente selon les zones définies dans VISUM.
- prise en compte de la pente. Cet attribut existe par ailleurs dans VISUM en dehors du module environnemental, mais qui permet une plage de valeurs plus étendues que HBEFA. Le tableau donne la correspondance entre la valeur VISUM et la valeur HBEFA.

19 <http://www.ptv-vision.com/software/transportation-planning-traffic-engineering/software-system-solutions/visum/visum-add-on-modules/detailed-visum-add-on-modules/hbfa-emission-calculation/> - consulté le 23/02/2012

Valeur DaVISUM	Correspondance HBEFA
< -5%	-6%
-5% à moins de -3%	-4%
-3% à moins de -1%	-2%
-1% à moins de 1%	0%
1% à moins de 3%	2%
3% à moins de 5%	4%
5% et plus	6%

Tableau 9: Implémentation des niveaux de pente HBEFA dans VISUM

Sources : [Denis_Cheyne]

Le module environnemental de VISUM fournit les données des émissions pour la même liste de polluants que HBEFA. Le logiciel permet par ailleurs d'établir des cartographies de polluants.

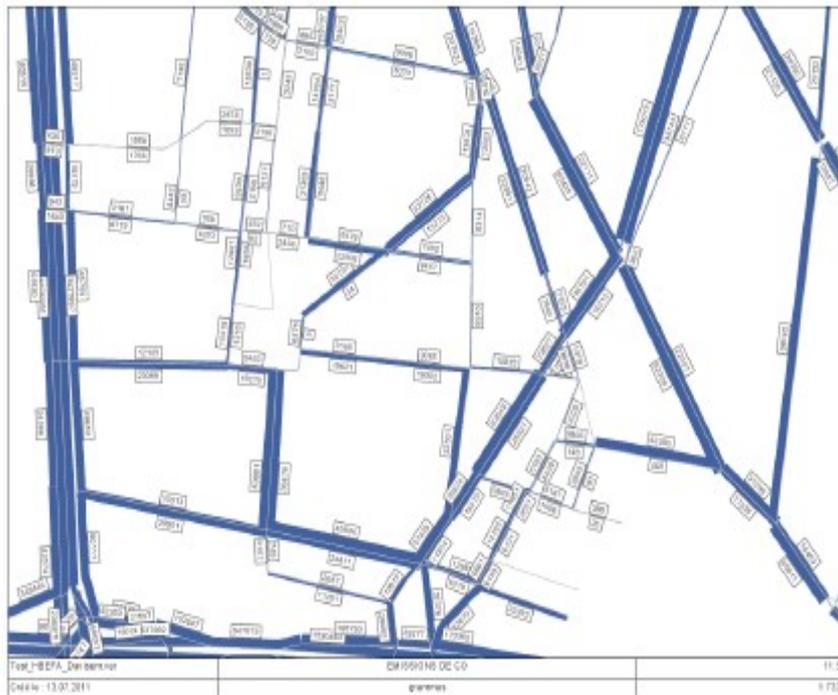


Illustration 12: Exemple de cartographie de polluant réalisée avec VISUM

Illustration 13: Exemple de cartographie de polluant réalisée avec VISUM Sources : [Denis_Cheyne]

Exemple de AIMSUN

AIMSUN propose aussi un module environnemental qui donne accès à la consommation énergétique et aux émissions instantanées et totales de polluants (CO, NO_x, hydrocarbures). Toutefois, celui-ci reste très sommaire et empirique et s'appuie sur un parc de véhicules roulant britannique datant de 1992. Les résultats ne peuvent pas être représentatifs du parc français actuel ou futur.

Conclusion

hormis pour VISUM, la plupart des modules environnementaux sont des « boîtes noires ». Il est souvent difficile de connaître la méthodologie sur laquelle ils s'appuient ainsi que le parc automobile utilisé. Ils doivent donc être utilisés avec grande prudence.

2.4.1.2. Les couplages « non intégrés »

Un certain nombre d'études ont permis de montrer les limites des modèles de trafic dans ce type de couplage. L'incertitude porte sur la capacité des modèles de trafic à représenter correctement l'impact des stratégies sur la cinématique du trafic, d'une part, et sur la validité de l'utilisation en entrée des modèles d'émissions de variables de sorties des modèles de trafic à la validation incertaine, d'autre part.

Des exemples sont donnés ci-dessous, ils sont issus du travail bibliographique réalisé par Can :

DRACULA / VETESS

Un couplage entre les lois d'émission de VETESS et le modèle microscopique DRACULA est réalisé pour mesurer l'impact d'un ISA (Intelligent Speed Adaptation) sur les émissions de polluants. L'ISA est introduite par simulation dans DRACULA. L'impact est estimé sur un scénario test à Ghent, à partir des quantités de polluants émises. Il s'avère que la mise en place de l'ISA réduit légèrement les vitesses et les accélérations. Ceci n'a vraisemblablement pas d'influence significative sur les émissions de NO_x, de CO₂ (ou sur la consommation de fuel) et de PM. On constate en revanche une légère augmentation de l'émission de COV. La principale limite de ce type d'études est que l'on ne sait pas dans quelle mesure l'effet réel de l'ISA est bien reproduit. Les auteurs s'accordent d'ailleurs à dire qu'il reste beaucoup de travail en terme de modélisation de l'écoulement du trafic sur la validation des accélérations estimées.

VISSIM / CMEM

L'objectif de l'étude est de tester dans quelle mesure la diminution des quantités de polluants émis, obtenue en lissant l'écoulement du trafic (passage d'un tronçon d'autoroute de 3 voies à 4 voies), est compensée par une augmentation du trafic induite par l'augmentation de la capacité. L'article montre que le gain obtenu par l'amélioration des conditions de trafic est compensé (et en particulier pour les véhicules récents et pour les émissions de CO et de HC), par une augmentation du trafic de l'ordre de 20%.

PARAMICS / CMEM

L'objectif du couplage est de tester l'impact environnemental des HOV (voies réservées aux véhicules à fort taux d'occupation sur autoroute). L'article compare deux types de HOV en termes d'impact sur les émissions : HOV à accès limité et HOV à accès continu. L'étude conclue que les HOV à accès continu génèrent moins de pollution (CO, HC, NO_x et CO₂), pour des conditions de trafic identiques. Les auteurs expliquent ceci par des comportements de conduite plus agressifs pour les HOV à accès limité, notamment aux extrémités des limites d'accès. Ces comportements de conduite consistent en un nombre plus grand d'accélérations fortes (pour prendre des créneaux), qui génèrent davantage de polluants. La question peut être posée de la validité de ces conclusions, puisque l'article ne questionne pas la pertinence du modèle de trafic pour représenter les HOV.

Une autre étude a été menée avec ce couplage pour déterminer l'impact environnemental d'un système d'écoconduite sur autoroute. Le système ISA donne une consigne en temps réel aux véhicules, en fonction du niveau de congestion de l'autoroute, pour lisser le trafic. L'étude montre que la réduction de consommation énergétique se situe entre 10 et 20%. Cette réduction dépend du niveau de congestion : si la congestion est forte, une réduction de plus de 25% du CO₂ et de plus de 30% de l'essence, est obtenue (en supposant que 20% des véhicules suivent la consigne). L'article fournit la modification des comportements mesurés in situ, mais pas le retour sur la qualité de l'estimation de PARAMICS. On ne sait donc pas la pertinence des résultats avancés.

Modèle de trafic / MOBILE6

En plus des études d'inventaires classiques, **MOBILE6** a été couplé à des modèles de trafic afin d'estimer les émissions en prenant en compte la variabilité du trafic. Des questions se posent sur les couplages utilisés dans les différentes approches testées. Même si le modèle de trafic donne en apparence accès à la dynamique du trafic et donc à l'évolution des quantités de polluants émises, il est probable que l'échelle du couplage ne soit pas adaptée, dans la mesure où MOBILE est davantage conçu pour estimer des émissions à une échelle spatiale plus grande.

AIMSUN / Facteurs d'émissions d'ARTEMIS

La DRIEA²⁰ Ile-de-France a développé un programme automatisé pour calculer les émissions à partir de données issues d'un modèle de trafic (soit microscopique Aimsun soit macroscopique MODUS²¹) et des facteurs d'émissions disponibles dans la méthodologie Artemis (soit ceux de l'approche à vitesse moyenne -type COPERT- soit ceux de l'approche à situation de trafic).

On ne peut pas à proprement parlé de couplage, comme dans les cas précédents, car le programme n'utilise pas directement le modèle d'émission mais seulement certaines de ses données (ex : formules de calcul des émissions, facteurs d'émissions à chaud). Il ne semble donc pas prendre en compte les autres types d'émissions comme par exemple les émissions à froid.

Le programme SAS (Statistical Analysis System) utilise sept ou huit fichiers d'entrée (en fonction du type d'approche choisie), dont une table Access, produite par Aimsun, qui contient les données trafic et des fichiers Excel qui sont différents en nombre et en contenu selon l'approche retenue (à vitesse moyenne ou à situation de trafic).

L'outil permet de s'affranchir de la préparation du réseau Ainsun en amont et donne des résultats en seulement quelques heures. En pratique, les deux approches sont utilisées de manière concomitante pour déterminer une fourchette d'émission. Les écarts sont souvent peu importants pour le CO₂ et le CO (quelques pourcents), plus important pour les NOx et les hydrocarbures (une vingtaine de pourcents) et parfois plus pour les PM. Actuellement ces couplages sont utilisés pour évaluer l'impact des projets de gestion de trafic, comme par exemple la création d'une voie supplémentaire sur une autoroute ou le réaménagement d'un échangeur.

Conclusion

Le couplage des modèles de trafic microscopiques (Symuvia, Aimsun, Vissim, Paramics, etc.) avec des modèles d'émission modaux semble être facilement réalisable puisqu'ils travaillent tous deux sur des valeurs instantanées. Les données calculées par les premiers relatives à la cinématique du véhicule peuvent alimenter directement les deuxièmes pour le calcul des émissions. Toutefois, il n'y a aucune garantie sur la pertinence d'un tel couplage, qui dépend de la capacité du modèle de trafic à fournir les données requises par le modèle d'estimation des polluants, ainsi que de la cohérence de l'interfaçage entre les modèles.

De plus, cette question du couplage nécessite de se poser la question de l'influence des erreurs faites par le modèle de trafic sur l'estimation des vitesses et accélérations. L'ensemble de ces questions fait l'objet de travaux de recherche, notamment menées par le LICIT.

2.4.2. Le couplage modèle de trafic (PARAMICS) / modèle d'émission (VETESS) / modèle de dispersion

En termes de couplage, il est précisé que les émissions sont agrégées par tronçon de 1 mètre pour permettre le calcul de dispersion. Les scénarios d'aménagements urbains de la ville de Ghent (réduction des vitesses, alternance de la circulation, etc.) ont été comparés à l'aide de ce couplage.

Le modèle estime les émissions de PM, COV, NO_x et CO₂ à chaque pas de temps en fonction du véhicule, de sa vitesse et de son accélération ; le calcul de dispersion permet ensuite de voir l'exposition à l'échelle du centre-ville.

L'étude montre que les standards d'émission Européens vont amener des réductions des polluants atteignant 70% en 2010. En revanche, les plans de déplacements locaux semblent avoir peu d'effets sur les polluants.

Les limites de l'étude résident dans le fait que les politiques de gestion du trafic soient bien reproduites par le modèle de trafic ou non.

20 Direction Régionale et Interdépartementale de l'Équipement et de l'Aménagement

21 Modèle statique de déplacements sur l'Ile de France mis en œuvre par le service de la connaissance, des études et de la prospective de la DRIEA.

Chapitre 3:

Exemple de mise en pratique de l'évaluation de mesures de gestion de trafic

3.1. Stratégies de gestion de trafic étudiées

Les évaluations a priori ou a posteriori des projets de gestion de trafic disponibles à ce jour ne traitent pas systématiquement de la qualité de l'air (émissions de polluants, gaz à effet de serre et consommation de carburant).

Lorsque cette thématique est abordée, le contenu est très hétérogène d'une étude à l'autre.

Deux raisons peuvent être avancées, la première est qu'il n'existe actuellement pas de méthodologie très formalisée pour mener ces études et la deuxième réside dans la difficulté de mesurer directement les effets des projets de gestion de trafic sur la qualité de l'air.

Cette dernière nécessite d'avoir recours à de la modélisation et de faire appel, en plus des spécialistes « trafic/exploitation » habituellement mobilisés pour l'évaluation de projet de gestion de trafic, à des spécialistes « air » capables de modéliser les phénomènes d'émission notamment.

Dans ce chapitre du rapport, nous avons choisi de nous limiter aux stratégies de gestion de trafic suivantes, qui peuvent être mise en œuvre de manière dynamique ou non :

- **Le péage urbain ;**

Cette mesure consiste à faire payer les usagers voulant accéder à une zone prédéfinie, généralement le centre ville. L'objectif est de limiter les congestions en diminuant le nombre de véhicules circulant dans la zone.

- **La gestion dynamique des voies (voies réversibles, utilisation BAU, affectation dynamique des voies);**

L'objectif de la mesure est d'augmenter ponctuellement et temporairement l'offre routière et/ou améliorer l'offre de transports en commun et/ou le covoiturage. Elle est mise en place souvent pendant les heures de pointe sur les sections rencontrant des congestions récurrentes. Il peut s'agir de faire circuler des véhicules sur la bande d'arrêt d'urgence, de créer une voie réservée en fonction de l'usage (bus, covoiturage, taxis), de créer des voies réversibles selon la période de la journée.

- **La régulation de vitesse ;**

La mesure consiste à limiter de façon dynamique la vitesse réglementaire afin d'homogénéiser les flux et ainsi augmenter le débit et retarder l'apparition de la congestion. Les vitesses régulées sont affichées sur des panneaux à message variable. Cette mesure est appliquée uniquement sur des portions de voies avec un déclenchement en fonction de la charge de trafic mesurée en temps réel.

- **La régulation d'accès ;**

Cette mesure permet de limiter les encombrements sur une section de route, souvent une VRU, grâce au contrôle des entrées sur cette section. Le nombre de véhicules entrant est ainsi redistribué dans le temps de manière à ce que ce flux ne vienne pas détériorer l'écoulement en section courante. Pour cela, les véhicules voulant s'insérer sont « stockés » sur la bretelle grâce à un feu lorsque le flux mesuré en temps réel sur la section courante atteint le seuil défini. Les véhicules de la bretelle sont ensuite libérés soit en pelotons, soit au goutte-à-goutte.

- **L'interdiction de dépasser pour les poids lourds .**

Le but de l'interdiction de dépasser pour les poids lourds est d'éviter les ralentissements occasionnés sur la voie de gauche par les dépassements de PL pour fluidifier le trafic et le rendre plus homogène. Elle est appliquée sur des tronçons de route, soit de façon permanente, soit selon des plages horaires prédéfinies, soit en fonction de l'atteinte d'un seuil de trafic défini.

- **Les systèmes d'aide à la gestion de trafic**

Le système d'exploitation de voies rapides urbaines d'une agglomération comporte des outils informatiques communs d'aide à la gestion du trafic et de nombreux équipements terrain dédiés à la régulation du trafic et l'information des usagers (Panneaux à messages variables, boucles de comptage...). Il est présent dans le Centre d'Ingénierie et de Gestion du Trafic (CIGT) qui gère les VRU.

Pour l'interdiction de dépasser pour les poids lourds, aucun rapport d'évaluation prenant en compte l'environnement n'a été trouvé.

Pour l'évaluation des systèmes globaux d'exploitation, la ZELT-CETE du Sud-Ouest a publié en juillet 2008 une note méthodologique intitulée « Évaluation a posteriori des projets de gestion de trafic et d'information des usagers » (en cours de refonte), qui traite en partie du sujet.

Le tableau suivant liste les évaluations étudiées dans le rapport et faisant l'objet de fiches dans l'Annexe E :

	Lieu	À partir de données trafic	Calcul des indicateurs environnementaux	Date de mise en place de la mesure	Type et date de publication de l'évaluation	Service auteur de l'évaluation
Péage urbain	Stockholm, Suède	Modélisation	Outil SamKalk	Du 3 janvier 2006 au 31 juillet 2006	<i>A priori</i> , Juin 2006	Transek AB
		Données réelles, matrices origine-destination	ARTEMIS et mesures de qualité de l'air		<i>A posteriori</i> , décembre 2006	Transek AB
	Londres, Grande-Bretagne	Modélisation	Outil	Depuis février 2003	<i>A posteriori</i> , juin 2007	Transport for London
Gestion dynamique des voies	A1, Paris (voie réservée bus-taxis)	Modélisation (AIMSUM)	IMPACT, ARTEMIS, modèle modal	Printemps 2009	<i>A priori</i> , 2009	DREIF
		Non précisé	Non précisé		<i>A posteriori</i> , mai 2010	Non précisé
	M42, Londres, Grande-Bretagne (circulation sur BAU)	Véhicules instrumentés	MODEM, PHEM	Septembre 2006	<i>A posteriori</i> , juin 2008	Highways Agency
	A4x86, Val-de-Marne (circulation sur BAU)	Stations de comptage	IMPACT-ADEME	Été 2005	<i>A posteriori</i> , octobre 2007	INRETS
	A48, Grenoble (voie spécialisée partagée)	Stations de comptage	IMPACT-ADEME	Depuis le 3 septembre 2007	<i>A posteriori</i> , Aout 2008	ZELT-CETE Sud-Ouest
Régulation de vitesse	Sillon Lorrain	Modélisation (AIMSUM)	COPCETE		<i>A priori</i> , juin 2011	CETE de Lyon / PCI RDRT
	A7	Stations de comptage	IMPACT-ADEME	Août 2004 et juillet-août 2005	<i>A posteriori</i> , juin 2008	INRETS-LEE
Régulation d'accès	Réseau autoroutier Est de l'Ile-de-France (A86, A4 et A6)	Stations de comptage	Formules du projet INRESPONSE	Janvier 2008	<i>A posteriori</i> , mars 2009	INRETS
Interdiction de dépasser PL	Aucune évaluation environnementale identifiée pour ce type de mesures					

	Lieu	À partir de données trafic	Calcul des indicateurs environnementaux	Date de mise en place de la mesure	Type et date de publication de l'évaluation	Service auteur de l'évaluation
Systèmes globaux d'exploitation	Gentiane Grenoble	Stations de comptage et extrapolation des trafics	Courbes INRETS-ADEME	État zéro 2002 Situation de référence 2007	<i>A priori</i> , Novembre 2004	ZELT-CETE Sud-Ouest
	Gutenberg, Strasbourg	Stations de comptage et extrapolation des trafics	Courbes INRETS-ADEME	État zéro 2002 Situation de référence 2006	<i>A priori</i> , Aout 2003	ZELT-CETE Sud-Ouest
		Stations de comptage	IMPACT et mesures qualité de l'air	Situation de référence 2002 Situation avec projet 2007	<i>A posteriori</i> , Mars 2009	ZELT-CETE Sud-Ouest
	ERATO, Toulouse	Stations de comptage	IMPACT et mesures qualité de l'air	Situation de référence 2004 Situation avec projet 2008	<i>A posteriori</i> , Janvier 2010	ZELT-CETE Sud-Ouest
	CIGT de Nantes	Stations de comptage et extrapolation des trafics	Courbes INRETS-ADEME	État zéro 2004 Situation de référence 2011	<i>A priori</i> , Juillet 2005	ZELT-CETE Sud-Ouest
	Hyronnelle, Saint-Etienne	Stations de comptage et extrapolation des trafics	Courbes INRETS-ADEME	État zéro 2001 Situation de référence 2008	<i>A priori</i> , Juillet 2005	ZELT-CETE Sud-Ouest

Il conviendra de se reporter aux rapports d'évaluation cités dans la bibliographie pour avoir des informations supplémentaires par rapport à l'Annexe E sur les projets et leurs résultats.

3.2. Péage urbain

3.2.1. Péage urbain de Stockholm

Les objectifs de l'expérimentation du péage urbain de Stockholm, mis en place de janvier à juillet 2006, sont les suivants :

- réduire le nombre de véhicules entrant ou sortant de la zone de péage urbain pendant les périodes de pointe du matin et de l'après-midi/soir de 10 à 15%,
- améliorer le flux de trafic dans les rues et routes les plus fréquentées de Stockholm,
- réduire les émissions de CO₂, NO_x et autres particules dans l'air du centre ville,
- améliorer l'environnement urbain perçu par les résidents de Stockholm.

Cette mesure a fait l'objet de deux évaluations :

- L'analyse des coûts-bénéfices effectuée par Transek AB a permis de faire en 2006 une évaluation *a priori* de l'expérimentation avant sa mise en place.
- Après mise en place du dispositif en 2006, l'expérimentation a donné lieu à une évaluation *a posteriori* par Transek AB et reprise par la suite par la ville de Stockholm en décembre 2006.

3.2.2. Péage urbain de Londres

Le péage urbain est opérationnel depuis le 17 février 2003 dans le centre de Londres.

Il contribue directement à quatre des priorités en terme de transports de la mairie :

- réduire la congestion,
- faire des améliorations radicales dans les services de bus,
- améliorer la fiabilité des temps de parcours pour les usagers de voitures,
- rendre la livraison des marchandises et des services plus efficaces.

De façon plus générale, il génère des revenus utilisés pour soutenir la stratégie de la mairie dans le domaine des transports.

Transport for London (TFL) a réalisé une évaluation *a posteriori* de cette mesure en juin 2007.

3.2.3. Tendances générales et gains attendus

Le péage urbain laisse espérer une réduction globale des émissions d'environ 15% pour le CO₂ dans la zone du péage. Pour les autres polluants, leur diminution est comprise entre 8 et 14%. Cependant cette amélioration doit être nuancée par la dégradation observée à l'extérieur de la zone.

3.3. Gestion dynamique des voies

3.3.1. Voie réservée bus-taxis sur l'A1 en région parisienne

Au printemps 2009, une voie réservée pour les taxis et les transports en commun a été mise en place sur l'A1 dans le sens Roissy-Paris entre Roissy-Charles de Gaulle et Paris Porte de la Chapelle. Cette voie, celle de gauche, est réservée de 7h à 10h sur 4,5km. Les objectifs étaient de fluidifier la circulation des taxis tout en minimisant la gêne et la congestion pour les autres usagers en gardant un bon niveau de sécurité.

Cette mesure a fait l'objet de deux évaluations :

- Chanut, dans sa thèse professionnelle [Chanut], a étudié l'impact environnemental *a priori* de cette voie à l'aide de plusieurs modèles.
- Les résultats partiels d'une étude *a posteriori* ont été extraits d'un article de la Revue Générale des Routes et des Aéroports (RGRA) publié en mai 2010.

3.3.2. Circulation sur bande d'arrêt d'urgence, M42, Londres, Grande-Bretagne

Dans le rapport publié en juin 2008 par Highways Agency, le projet anglais ATM sur la M42 entre Londres et Birmingham a été évalué *a posteriori*.

Les problèmes identifiés sur la section Londres-Birmingham de la M42 étaient :

- un fort trafic dans les deux sens de circulation de l'autoroute,
- des problèmes au niveau des insertions sur des échangeurs,
- un taux d'accident plus élevé que la moyenne associé avec les insertions,
- de la congestion à l'heure de pointe du matin,
- des problèmes associés avec un fort volume de bus et cars (Palais des Congrès, aéroport).

Le principal objectif du projet ATM (« Active Traffic Management ») est de réduire les congestions en autorisant l'usage dynamique de la bande d'arrêt d'urgence comme voie de circulation pendant les heures de pointe et les périodes de congestion ou d'incidents.

De plus, le projet comporte des mesures complémentaires, à savoir, l'utilisation de limites de vitesses réglementaires dynamiques, la création de refuges pour les véhicules en panne et l'installation de portiques avec des panneaux à messages variables.

L'analyse compare deux situations :

- la situation avant : la situation de référence avant projet ATM étudiée sur la période 2002-2003
- la situation après : l'opération « limite de vitesse variable 4 voies » (c'est-à-dire le projet complet depuis septembre 2006) étudiée entre octobre 2006 et septembre 2007

La période phase intermédiaire « limite de vitesse variable 3 voies » (c'est-à-dire le projet partiel entre mars 2003 et septembre 2006) a été étudiée entre janvier et août 2006 et a seulement fait l'objet d'une comparaison partielle avec la situation du projet complet.

L'évaluation environnementale a uniquement été faite entre la situation avant et la situation après entre les hivers 2003 et 2006.

3.3.3. Circulation sur bande d'arrêt d'urgence, A4-A86, Val-de-Marne

La mise en place de la mesure d'utilisation de la bande d'arrêt d'urgence sur l'A4-A86 en région parisienne a fait l'objet d'une évaluation *a posteriori* par l'INRETS en 2007.

Afin de diminuer les importantes congestions récurrentes sur le tronç commun A4-A86, la DIRIF a décidé d'expérimenter l'utilisation de la bande d'arrêt d'urgence comme voie de circulation auxiliaire. L'expérimentation a débuté à partir de l'été 2005 sur une distance de 2200m, uniquement pendant les heures de pointe, c'est-à-dire pendant les périodes de forte demande.

Des mesures complémentaires ont aussi été mises en œuvre pour fluidifier l'amont de la zone d'expérimentation : toutes les bretelles d'insertion ont été équipées de feux de régulation d'accès et les insertions sur la section courante ont été aménagées. Un système de détection automatisée des incidents, ainsi que des radars viennent compléter le projet.

La voie auxiliaire a pour objectif de traiter à la fois la congestion récurrente (demande devient supérieure à l'offre) et la congestion accidentelle (due à un accident/incident, des travaux).

3.3.4. Voie Spécialisée Partagée A48, Grenoble

La voie spécialisée partagée (VSP) de Grenoble est l'aménagement de la bande d'arrêt d'urgence en voie de circulation pour les autocars des lignes régulières aux heures de pointe, notamment le matin.

Son objectif est d'améliorer la vitesse commerciale des transports en commun passant par l'A48. Elle est opérationnelle depuis le 3 septembre 2007.

Elle est ouverte uniquement en période de congestion dès lors que les vitesses moyennes parcourues sur la section courante passent en dessous d'un certain seuil. En cas d'incident, elle est automatiquement fermée. Quand la VSP est activée, la vitesse est limitée à la fois sur la section courante et sur la VSP.

La ZELT a produit une évaluation *a posteriori* de cet aménagement en 2008.

3.3.5. Tendances générales et gains attendus

Globalement la gestion dynamique des voies a pour effet de réduire les émissions de polluants et de CO₂. Les gains pour les différents polluants oscillent entre 3 et 5% avec un gain de 10% pour les particules. Le choix du modèle et des données d'entrée semblent avoir un impact important sur ces résultats.

3.4. Régulation de vitesse

3.4.1. Régulation de vitesse sur le Sillon Lorrain

La décision de mettre en place la régulation de vitesse dans le Sillon Lorrain a été prise suite à l'actualisation de l'APS relatif à la gestion des trafics sur le Sillon Lorrain.

En effet, l'objectif était d'optimiser le fonctionnement de ses axes et de permettre une meilleure maîtrise des flux de trafic en déployant des mesures dynamiques de gestion de trafic. Le CETE de Lyon a produit en 2011 une évaluation *a priori* de cette mesure.

La régulation de vitesse a été appliquée sur 2 sections disjointes, 1 seul sens à la fois à l'heure de pointe soit du matin, soit du soir.

3.4.2. Régulation de vitesse sur l'A7

L'INRETS dans son guide méthodologique de 2008 sur la régulation de vitesse consacre un chapitre à l'évaluation *a posteriori* de la mesure de régulation de vitesse sur l'A7. L'autoroute A7 rencontre depuis longtemps des problèmes de congestion lors des grandes migrations estivales. Il est donc logique qu'elle ait fait l'objet d'une expérimentation de régulation de vitesse en 2004.

Dans un premier temps, la régulation a été activée dans le seul sens Sud-Nord pendant le mois d'août, avant qu'elle ne soit testée dans les deux sens pendant les mois de juillet et août 2005. La régulation est uniquement activée en phase de pré-congestion.

L'évaluation présente les résultats pour le sens Sud-Nord en 2004 et en 2005, ainsi que pour le sens Nord-Sud en 2005 en prenant uniquement en compte les périodes d'activation du dispositif.

3.4.3. Tendances générales et gains attendus

La régulation de vitesse permet de diminuer les émissions en homogénéisant et en abaissant les vitesses des véhicules vers une vitesse pour laquelle le facteur d'émission du modèle est minimum.

Les gains sont toutefois très dépendants de la section où la mesure est appliquée et, dans une moindre mesure, de la plage horaire.

Les gains atteignent en général 2-3% pour la consommation de carburant et 2-4% pour le CO₂. Pour les polluants locaux (NO_x, PM), on peut espérer une réduction de l'ordre de 2-4%. Le gain le plus important est obtenu pour le CO avec entre 5% et 12% de diminution.

Toutefois, l'impact de la mesure dépend aussi de la fréquence à laquelle elle est activée et de la pertinence du moment de son déclenchement.

3.5. Régulation d'accès

3.5.1. Régulation d'accès généralisée sur l'est de l'Ile-de-France

La DIRIF a mis en place en janvier 2008 la régulation d'accès sur 17 accès situés à l'est de Paris sur les autoroutes A86 dans les deux sens de circulation (intérieur « I » et extérieur « E »), A4 dans les deux sens (Y et W) et A6BY dans le sens province.

Les gains attendus sont les suivants:

- Réduction de temps de parcours global.
- Augmentation de la vitesse moyenne de circulation sur le tronçon concerné.
- Diminution significative des bouchons.
- Stabilisation des temps de parcours sur un même trajet.

Cette mise en place a eu lieu dans le cadre d'un programme plus global d'équipement de 74 bretelles autour de l'autoroute A86, principal diffuseur du trafic vers Paris et vers la province, dans les 2 sens et dans sa totalité.

L'INRETS a évalué *a posteriori* l'impact sur les conditions de trafic de la régulation d'accès généralisée sur cette partie est des autoroutes de l'Ile de France. Cette évaluation comporte une partie environnementale.

3.5.2. Tendances générales et gains attendus

La régulation d'accès permet de diminuer les temps de parcours, en augmentant toutefois les distances parcourues par les véhicules.

L'évaluation étudiée a permis d'observer des gains de l'ordre de 1% à 30% selon l'axe et la période. Toutefois la méthode est basique et ne prend pas nécessairement en compte l'impact environnementale des phases d'accélération et de décélération sur les bretelles.

3.6. Systèmes d'aide à la gestion de trafic (SAGT)

3.6.1. Projet Gentiane à Grenoble

L'opération Gentiane est le projet d'exploitation des VRU de la communauté d'agglomération grenobloise, en particulier avec la création du PC d'exploitation des VRU mutualisé, appelé aujourd'hui PC Gentiane à Grenoble. La ZELT a produit une évaluation *a priori* du projet.

Les objectifs du projet Gentiane affichés dans le rapport *a priori* de la ZELT en novembre 2004 étaient les suivants :

- Améliorer la sécurité,
- Faciliter les reports modaux,
- Limiter la dureté des encombrements,
- Gérer les crises,
- Favoriser l'intermodalité,
- Appliquer le plan pollution de l'air.

Pour ce dernier point, les stratégies prévues afin de diminuer les congestions étaient les suivantes :

- L'information des usagers,
- La limitation des vitesses à 70km/h,
- Le contrôle des vitesses,
- Favoriser le covoiturage.

L'impact sur les congestions récurrentes des stratégies suivantes est envisagé dans le rapport *a priori* de la ZELT pour le projet Gentiane : la régulation de vitesse, la régulation d'accès, l'incitation au report modal, l'information avant le déplacement.

3.6.2. Gutenberg, Strasbourg

Le projet Gutenberg est le projet d'exploitation des VRU de Strasbourg avec la création d'un PC du même nom.

Les objectifs du projet affichés sont les suivants :

- Améliorer l'intervention sur accident,
- Limiter sur le réseau les répercussions dues aux perturbations non récurrentes prévisibles (travaux) et non prévisibles (accidents),
- Assurer la continuité des autoroutes de liaison et maintenir la capacité,
- Gérer les situations de pics de pollution.

La ZELT a produit deux évaluations du projet : une *a priori* et une *a posteriori*.

3.6.3. ERATO, Toulouse

ERATO est le Centre d'Ingénierie et de Gestion du Trafic des VRU de Toulouse. La ZELT a produit une évaluation a posteriori du projet.

3.6.4. CIGT de Nantes

Le projet intitulé Projet 44 est le projet d'exploitation des VRU de Nantes avec entre autres la création d'un PC. La ZELT a produit une évaluation a priori du projet.

3.6.5. Hyrondelle, Saint Étienne

Le projet Hyrondelle est le projet d'exploitation des VRU de Saint Étienne avec la création d'un PC du même nom. La ZELT a produit une évaluation a priori du projet.

3.6.6. Tendances générales et gains attendus

Ce type de projet est évalué de manière macroscopique avec une méthode qui ne prend pas en compte les variations de vitesses des usagers suite au projet.

Dans les études *a priori*, les gains environnementaux sont négligeables par rapport à ceux gagnés sur le temps perdu et la sécurité. Cela est sans doute dû aux valeurs tutélaires communément utilisées, qui ne prennent pas en charge l'impact sur les personnes sensibles de manière aussi directe. Une réflexion sur le sujet est sans doute nécessaire.

Pour les études a posteriori, il faut éviter la confusion entre les concentrations mesurées et les émissions modélisées pour valider ou non une cohérence entre les deux. Pour ce faire, l'emploi d'un modèle calculant les concentrations (modèle de dispersion) est indispensable.

3.7. Tableau récapitulatif

Stratégie	Méthode	Zone géographique prise en compte	Situation comparée dans l'évaluation	Polluants estimés	Tendance générale	Nombre d'études
Péage urbain	<i>A priori</i> ; données de trafic modélisées ou réelles couplées à un modèle environnemental.	Zone d'application du péage urbain, ainsi que l'agglomération/région	2-3 ans après (suite à 7 mois d'expérimentation)	CO ₂ .	Diminution de 2,7% des gaz à effet de serre dans la région	1
	<i>A posteriori</i> ; matrices origine-destination ; Artémis sur un jour ouvrable avec un découpage heure de pointe/heure creuse	Zone d'application du péage urbain, ainsi que l'agglomération/région	Situation sans la mesure	CO ₂ , NO _x , (CO), PM10, (COV)	Environ 15% de réduction pour le CO ₂ dans le zone de péage, 13-14% de réduction pour les polluants locaux Bilan plus mitigé à l'extérieur de la zone	2
Gestion dynamique des voies	<i>A priori</i> ; Données de station de comptage avec modélisation environnementale	Les axes directement impactés par la mesure	1 an après, voire 2 ans après la mise en place.	CO ₂ , consommation de carburant, CO, NO _x , hydrocarbures, PM10	Les gains pour les différents polluants oscillent entre 3 et 5% avec un gain de 10% pour les particules. Le choix du modèle et des données d'entrées semble avoir un impact important sur ces résultats.	1
	<i>A posteriori</i> ; données de trafic réelles avec IMPACT-ADEME	Les axes directement impactés par la mesure	3 à 4 ans après la mise en place.	CO ₂ , consommation de carburant, CO, NO _x , hydrocarbures, PM10, (SO ₂), (COV)	Gains se situant entre 3% et 5%, et jusqu'à 10% pour les particules	4
Régulation de vitesse	<i>A priori</i> ; étude sur les plages horaires de régulation, couplage avec modèle de modélisation de trafic entre l'état sans régulation et l'état régulé	Les axes directement impactés par la mesure	Situation sans la régulation	CO ₂ , CO, NO _x , COV, PM10, consommation de carburant	Gains allant jusqu'à 6% des émissions pour le CO, gains jusqu'à 3% pour les autres polluants, le CO ₂ et la consommation de carburant	1
	<i>A posteriori</i> ; IMPACT-ADEME plus macro que <i>a priori</i> : à partir du nombre de VL et de PL concernés et de la vitesse moyenne tous véhicules	Les axes directement impactés par la mesure	Situation sans la régulation	CO ₂ , CO, NO _x , PM10, consommation de carburant	Gains jusqu'à 12% pour le CO, les autres réductions sont comprises entre 1% et 6%	1
Régulation d'accès	<i>A posteriori</i> ; Formules simplifiées, comparaison avec et sans la mesure	Les axes concernés par la mesure, ainsi que leurs accès	Situation sans la régulation	CO, hydrocarbures, consommation de carburant	De 1% à 30% de gains, mais dépend fortement de l'axe et de la période de la journée	1

Stratégie	Méthode	Zone géographique prise en compte	Situation comparée dans l'évaluation	Polluants estimés	Tendance générale	Nombre d'études
<i>Interdiction de dépasser PL</i>	Aucune évaluation environnementale identifiée pour ce type de mesures					0
<i>Systèmes d'aide à la gestion de trafic</i>	<i>A priori</i> ; comparaison entre la date où l'APS a été fait et la date estimée de mise en service ; calcul de veh.km et valeurs tutélaires de Chapulut	Le réseau géré par le PC	Généralement de 4 à 7 ans entre l'état zéro et la situation de référence avec projet	consommation de carburant, émissions de polluants, émissions de gaz à effet de serre	Ce type de projet a globalement un impact positif sur les émissions par la gestion des événements pour limiter les congestions. Mais les évaluations restent très orientées socioéconomiques et donc macroscopiques.	4
	<i>A posteriori</i> ; mesures qualité de l'air et modélisation des émissions	Le réseau géré par le PC	4-5 ans entre la situation de référence sans projet et la situation de référence avec projet	consommation de carburant, CO, NO _x , COV, particules, CO ₂ , SO ₂ .	Ce type de projet a globalement un impact positif sur les émissions par la gestion des événements pour limiter les congestions. Mais les évaluations restent très orientées socioéconomiques et donc macroscopiques.	2

En résumé, les résultats sont souvent divergents d'un projet à un autre du même type, suivant la méthode employée.

Les résultats des études *a posteriori* sont grisés.

Il serait intéressant de voir l'évaluation après un an de fonctionnement de l'expérimentation de la voie réversible de Saint Nazaire (ouverte depuis la fin de l'été 2010), qui devrait comporter une partie environnementale contrairement à l'évaluation après 3 mois.

Chapitre 4: Recommandations, pistes de progrès pour l'application à des projets de gestion de trafic

Les recommandations données dans ce chapitre, se basent sur les retours d'expérience présentés dans le chapitre précédent, les méthodologies disponibles pour certains types de mesures de gestion dynamique de trafic et la méthodologie relative aux volet air et santé des études d'impact. Elles concernent l'ensemble des mesures de gestion dynamique de trafic présentées dans le chapitre III.

Ce chapitre vise à donner des éléments de méthodologie pour conduire une évaluation environnementale des mesures de gestion de trafic sur le plan de la qualité de l'air, que ce soit pour des études *a priori* ou *a posteriori*.

4.1. Quelle zone géographique retenir ?

Pour pouvoir évaluer l'impact d'une stratégie de gestion du trafic sur la qualité de l'air et prendre en compte tous les effets potentiels de la mesure, il faut étudier ce qui se passe :

- sur la (ou les) voie(s) concernée(s) ou section(s) de voie sur laquelle la mesure de gestion de trafic est mise en place (étude des effets directs de la mesure). Dans certains cas, il peut aussi être nécessaire de prendre en compte les sections situées en aval ou en amont de la section concernée. En général, la zone doit s'étendre jusqu'au premier bouchon aval ;
- sur les voies secondaires impactées de manière indirecte par la mesure. Par exemple, en cas de régulation des accès, certains usagers peuvent choisir de rester sur le réseau secondaire plutôt que d'attendre aux feux mis en place sur les bretelles. Il faut alors disposer de références et de moyens de comptage sur le réseau secondaire pour évaluer les variations de trafics enregistrées ; ce cas de figure reste toutefois exceptionnel, car les mesures de gestion dynamique ne sont pas réputées engendrer de modifications significatives de la demande (hors gestion dynamique des voies -où une offre supplémentaire est créée- et régulation d'accès -où des reports sont susceptibles d'être observés-). Les voies secondaires impactées doivent donc être déterminées au cas par cas.

La zone d'étude est composée, au minimum, de l'ensemble des voies concernées par la mesure de gestion de trafic ainsi que de toutes les voies impactées de manière directe ou indirecte par la mise en œuvre du projet.

4.2. Quel scénarios comparer, à quel horizon ?

4.2.1 . Terminologie : scénario de référence et scénario avec projet

L'évaluation *a priori* ou *a posteriori* des impacts d'un projet consiste à définir des indicateurs d'impact et d'en étudier leurs variations entre deux situations, en général une situation avec projet à une situation de référence. Les indicateurs environnementaux relatifs à la qualité de l'air étant calculés à partir des données trafic, les situations de référence et projet sont définies dans la suite sous cet aspect « trafic ».

La **scénario de référence** correspond à la situation future sans projet (fil de l'eau), c'est-à-dire celle qui existerait s'il n'y avait pas de projet. Ce scénario est étudié aussi bien pour les évaluations *a priori* que les évaluations *a posteriori* et est toujours modélisé.

Sa détermination est souvent un des points les plus délicats d'une évaluation. Pour ce faire, il est souvent nécessaire de conduire une étude prospective (études *a priori*) ou rétrospective (études *a posteriori*) des déplacements dans l'agglomération concernée et de prendre en compte les projets de politique des transports. Le modèle de trafic doit alors pouvoir être capable de prendre en compte ces données et de les retranscrire. De plus, comme le précise Chapulut, la question de la capacité d'adaptation des usagers face à une situation contrainte (qui peut conduire, par exemple, à l'étalement des pointes) ne doit pas être occultée dans les hypothèses d'évaluation des trafics.

Le **scénario projet** correspond à la situation future après la mise en œuvre du projet ; ce scénario est modélisé pour les études *a priori* et mesuré pour les études *a posteriori*.

Dans les cas où la mesure de gestion de trafic génère un report de trafic sur les voiries secondaires (exemples cités au §), il est souvent difficile de disposer de trafic mesurés sur tous les axes concernés. Le scénario avec projet nécessite alors d'être modélisé pour les études *a posteriori*.

4.2.2. La comparaison des scénarios

Pour les études *a priori* les deux scénarios à comparer étant modélisés, il est préalablement nécessaire de mesurer les trafics existants (état zéro sur l'illustration 14) de manière à calibrer le modèle de trafic qui est utilisé pour la modélisation.

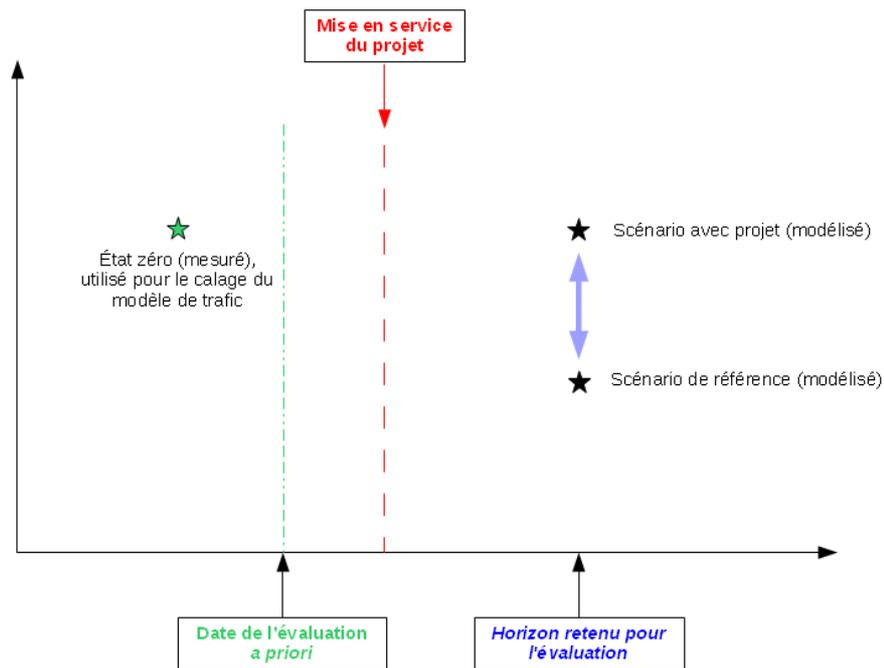


Illustration 14: Études a priori

Pour les études *a posteriori*, le scénario avec projet est en général mesuré et celui de référence est modélisé.

Le scénario de référence modélisé lors de l'évaluation a priori peut être utilisé pour la comparaison de scénario, à condition de vérifier qu'il reste pertinent. Dans le cas contraire, il convient de le reconstituer, compte tenu des modifications de l'environnement technique et économique de la demande et l'offre constatée lors de l'analyse *a posteriori*.

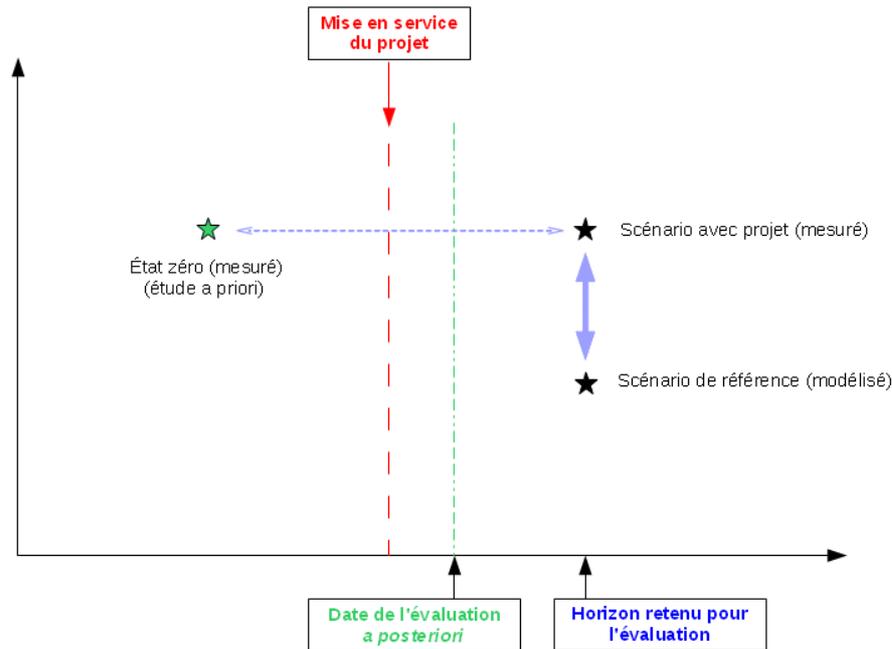


Illustration 15: Études a posteriori

Lorsque l'on dispose de trafics mesurés à une situation antérieure à la date de mise en service du projet (par exemple dans le cadre d'une évaluation *a priori*), il est possible, sous certaines conditions, de comparer le scénario avec projet mesuré avec le scénario état zéro, lui aussi mesuré. Pour cela, il faut notamment s'assurer que :

- le délai entre les mesures réalisées pour l'état zéro et celles pour le scénario avec projet soit aussi proche que possible ;
- les mesures réalisées ne soient pas perturbées par des phénomènes exceptionnels (en particulier travaux sur voirie) ;
- le réseau reste stable (examen de similitude, voir Annexe F) : longueur et nature des voies, capacités, etc. ;
- les mesures ont été réalisées pendant des périodes similaires en terme de conditions de trafic, conditions météorologiques et autres caractéristiques importantes du contexte (exemple : péage urbain de Stockholm, comparaison hiver 2003 / hiver 2006).

4.2.3. Les horizons

Il convient de distinguer l'horizon auquel l'évaluation environnementale est faite de la période de temps sur laquelle les indicateurs environnementaux sont calculés.

Pour l'évaluation socio-économique des systèmes d'exploitation de la route, Chapulut prend comme horizon 15 ans après la mise en service (correspondant à la durée de vie moyenne des équipements) et cumule les avantages sur cette période. Ces préconisations sont effectivement pertinentes étant donné l'objectif poursuivi, qui est de déterminer les conditions de la rentabilité du projet pour la collectivité en mesurant le degré d'efficacité de l'opération vis à vis des objectifs attendus. De telles évaluations doivent donc prendre en compte non seulement les mesures de gestion dynamique pouvant être appliquées (régulation d'accès, de vitesse, etc.) mais aussi le déploiement des équipements nécessaires à la mise en œuvre des premières (surveillance du réseau, détection automatique des incidents, traitement des données, etc.).

Dans le cadre d'une évaluation environnementale de mesures de gestion dynamique de trafic, l'objectif est différent. On ne se base plus sur des critères de rentabilité mais sur des critères environnementaux. Pour la qualité de l'air, on cherche à quantifier les gains en terme d'émissions de polluants ou de consommation de carburant et, dans l'idéal, à évaluer l'exposition des personnes aux abords du projet.

Dans les études d'impacts routières, l'impact du projet sur la qualité de l'air doit être évalué pour la situation la plus défavorable. L'horizon choisi doit prendre en compte non seulement les niveaux de trafic mais aussi l'état du parc automobile. En pratique jusqu'à présent, un horizon à 20 ans après la mise en service était systématiquement étudié car l'augmentation du trafic compensait très largement les gains obtenus grâce aux améliorations technologiques des véhicules. Les hypothèses de croissance du trafic étant depuis quelques années revues à la baisse, cet horizon n'est certainement plus très pertinent. C'est pourquoi des situations plus proches de la mise en service de l'infrastructure sont dorénavant étudiées.

Ainsi, dans le cas des projets de gestion dynamique de trafic, il est proposé de prendre un horizon proche de la mise en service de la mesure mais qui, par ailleurs, laissent aux usagers le temps de s'y adapter (apprentissage, acquisition de nouvelles habitudes) ou de s'y familiariser (dans le cas de stratégies mises en œuvre de manière plus ponctuelle), par exemple dans l'année qui suit.

En fonction des stratégies de régulation étudiées, la période de temps sur laquelle l'évaluation est menée peut être différente :

- quelques mois (exemple du péage urbain de Stockholm,
- les jours type d'une semaine (jours ouvrables, samedi et dimanche),
- une période moyenne de 24h (évolution heure par heure) ,
- sur les heures de pointes du matin et du soir,
- sur la durée totale d'activation de la mesure et du nombre de véhicules soumis à cette mesure.

La période de temps sur laquelle les indicateurs environnementaux sont calculés dépend du type de projet et doit être adaptée au cas par cas.

4.3. Quels méthodes, outils et indicateurs choisir ?

4.3.1. Émissions et/ou concentrations ?

En matière de qualité de l'air, deux indicateurs sont communément utilisés pour caractériser les polluants :

- les **émissions**, qui sont les quantités de polluants rejetées dans l'atmosphère par les activités humaines (exemple : circulation automobile, chauffage urbain, etc.) ou par des sources naturelles (volcans, ou composés émis par la végétation et les sols). Elles sont souvent exprimées en unité de poids par unité de temps (kilogrammes ou tonnes par an, par jour ou par heure).

Cette grandeur est difficilement mesurable, c'est pourquoi elle est systématiquement modélisée.

- les **concentrations**, qui caractérisent la qualité de l'air que l'on respire. Elles résultent de la dispersion et du transport des polluants émis dans l'atmosphère, soumis à des phénomènes météorologiques, physiques ou chimiques²² complexes. Elles s'expriment en général en microgrammes par mètre cube ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Cette grandeur, utilisée par la réglementation française pour la définition de valeurs seuils²³, peut facilement être mesurée et faire l'objet d'un suivi²⁴. Elle peut aussi être

22 Action du vent et de la pluie, dépôt ou réactions chimiques des polluants entre eux ou sous l'action des rayons du soleil

23 Seuils à ne pas dépasser ou vers lesquels il faut tendre pour éviter, prévenir ou réduire les effets nocifs des polluants sur la santé (article R221-1 du code de l'environnement.).

24 Dans le cas des polluants réglementés notamment

modélisée, notamment dans le cadre d'études prospectives (projet à un horizon futur, évaluation a priori des mesures de gestion dynamique de trafic), sur la base des émissions.

Dans le cadre d'une évaluation *a posteriori*, il pourrait être envisageable de mesurer des concentrations dans l'air aux abords des voies concernées (par exemple ce qui a été fait sur la M42 en Angleterre). De même, pour les évaluations *a priori* il pourrait être intéressant de modéliser les concentrations en ces mêmes lieux. Cependant cette grandeur, bien qu'incontournable pour qualifier la qualité de l'air ambiant et évaluer les effets sur la santé, n'est pas un indicateur très approprié pour l'évaluation environnementale des projets de gestion dynamique de trafic. Plusieurs raisons à cela :

- observer l'impact d'une mesure de gestion dynamique de trafic sur les concentrations, nécessite de détecter les variations de cette grandeur sur un court pas de temps. Pour cela, il est nécessaire de disposer de moyens de mesure en continu, qui ne sont pas toujours accessibles (proximité immédiate d'une station fixe d'une AASQA) ou qui sont coûteux à mettre en œuvre (camion laboratoire). ;
- les concentrations en polluants en un lieu sont fortement tributaires des conditions météorologiques locales. Des émissions de polluants équivalentes en lieu et en intensité, peuvent conduire, en fonction des conditions météorologiques, à des concentrations dans l'air variant de manière significative. Ainsi, une mesure de gestion de trafic peut avoir un impact positif sur les quantités de polluants émises sans pour autant en avoir sur les concentrations mesurées à proximité de la voie où s'applique la mesure. Cette grandeur ne peut donc pas être utilisée pour comparer des scénarios (avec et sans projet de gestion dynamique, par exemple) sans une analyse préalable des conditions météorologiques ;
- les concentrations mesurées dans l'air ambiant résultent de la dispersion et de la transformation dans l'atmosphère des polluants issues de sources multiples, il n'est donc pas aisé de déterminer l'impact potentiel du projet sur cette grandeur ;

Des mesures de concentrations ont été faites sur la M42 en Angleterre, lors de la mise en place de la régulation de vitesse (2006) et ont été comparées à celles mesurées avant (2003). Une diminution des concentrations moyennes de CO a été observée (les concentrations en NO₂ sont restées stables entre les deux horizons), mais l'étude n'est pas arrivée à déterminer quelle était la part du projet dans la réduction des concentrations ambiantes de CO (conditions météorologiques différentes, modification du parc de véhicules roulant entre ces deux horizons, amélioration de la qualité de carburants, etc.)

- en modélisation, pour des conditions météorologiques identiques, la faible différence d'émissions observée entre deux scénarios se traduit souvent par un écart non significatif sur les concentrations modélisées associées au regard des incertitudes pesant sur les données d'entrée (émissions, météorologie, relief, etc.) et la modélisation elle-même ;
- de manière similaire, pour retranscrire des variations des concentrations par modélisation avant et après, il faut disposer de données météo locales très précises, chose qui n'est pas toujours possible ;

Ainsi, dans le cadre des projets de gestion de trafic, où les gains sur les émissions ne sont souvent que de quelques pour-cents (cf. Chapitre III), les émissions sont plus adaptées que les concentrations pour comparer des scénarios, que ce soit pour des études a priori ou a posteriori. Elles permettent de s'affranchir des conditions météorologiques, dont le rôle est essentiel dans la dispersion des polluants et l'évaluation des concentrations, et d'une modélisation supplémentaire à laquelle sont associées des

incertitudes supplémentaires.

Néanmoins, quelques cas particuliers peuvent faire exception :

- pour les études a posteriori et si l'on dispose à proximité immédiate d'une station fixe d'une AASQA, il peut être intéressant d'étudier une éventuelle évolution des concentrations (comme cela a été fait dans le cadre de la régulation de vitesse sur la M42). Mais l'analyse des résultats devra se faire avec précautions et notamment au regard des conditions météorologiques locales.
- dans le cas de péage urbain, il peut être intéressant de surveiller l'évolution des concentrations ambiantes, avec les stations de mesures urbaines situées dans la ville et / ou l'agglomération.

4.3.2. Quels modèles d'émission utiliser ?

Dans l'attente d'améliorations des modèles de type A et B, les seuls modèles disponibles et utilisables actuellement sont ceux de type C (cf. 2.2.2.4. Conclusion sur les modèles d'émission page 31).

Les **modèles à vitesse moyenne** sont les moins adaptés à l'évaluation de mesures dynamiques de gestion de trafic. Cependant, COPERT est un modèle robuste et très complet, qui a fait l'objet de nombreux tests et validations. Son utilisation peut être pertinente dans certaines conditions, comme par exemple des conditions de circulation homogènes et stables sur la période de temps considérée de façon à être correctement représenté par une vitesse moyenne. Ces conditions restent à préciser notamment en terme d'échelle spatio temporelle. Une étude en cours au CETE de Lyon permettra d'apporter des éléments de réponse.

Les **modèles à situations de trafic**, tels que HBEFA, semblent être plus pertinents pour ce type d'évaluation :

- il utilise et reprend à son compte les travaux et résultats obtenus dans le cadre des programmes européens réalisés au cours des années 1990-2000 (cf. Annexe D). C'est un modèle bien abouti ;
- de plus, dans les mois qui viennent, la nouvelle version de HBEFA comprendra le parc roulant français (disponible à l'année, de 1990 à 2030) élaboré par l'IFSTTAR. HBEFA3.2 permettra donc de réaliser des calculs d'émissions sur la base d'un parc français et non sur celle d'un parc étranger (comme par exemple le parc allemand dans Cheynet. Le parc automobile roulant de l'IFSTTAR étant prospectif, il permettra de réaliser des études *a priori* ;
- enfin, dans un futur proche, il est prévu que l'Ademe utilise HBEFA pour élaborer un logiciel français, qui pourra être mis à la disposition du grand public, comme l'était précédemment Impact-Ademe. Il deviendra très certainement le logiciel de référence auprès des bureaux d'études.

En revanche, à l'heure actuelle, cet outil n'a pas encore été utilisé par les CETE dans le cadre d'études opérationnelles, le retour d'expérience est donc très limité. Pour pouvoir utiliser et tester un tel modèle il faudra attendre la sortie de la version 3.2.

A signaler qu'une étude comparative entre COPCETE(COPERT) et HBEFA est en cours au CETE Normandie Centre pour évaluer les performances de ces modèles dans le cas d'une régulation de vitesse sur autoroute.

4.3.3. Les polluants et gaz à effet de serre à étudier

Ce paragraphe a pour objectif de lister les polluants et GES à prendre en compte dans les évaluations environnementales des projets de gestion dynamique de trafic. On distingue :

- les polluants locaux, qui contribuent à la pollution de proximité²⁵ et ont des effets avérés sur la

25 Phénomène rencontré près des sources d'émissions (routes, industries, résidentiel) la plupart du temps en zone urbaine ou périurbaine.

santé humaine (ex : gêne respiratoire, asthme, substances cancérigène, etc.) ;

- les gaz à effet de serre, dont les concentrations dans l'atmosphère augmentent du fait des activités humaines, qui contribuent au changement climatique.

4.3.3.1. Les polluants locaux

- les **oxydes d'azote** (NO_x), comprenant le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote (NO₂). Le NO est émis à l'échappement des véhicules, lors de la combustion à haute température de combustibles fossiles, et rapidement oxydé dans l'air en NO₂. Le NO₂ est un polluant traceur de la circulation automobile car émis à 54% par les transports routiers (inventaire CITEPA). C'est un gaz irritant pour les bronches. Ses concentrations dans l'air sont réglementées au niveau européen et français et il fait parti des indicateurs pris en compte pour définir l'indice ATMO (indice de qualité de l'air).
- les **particules de diamètre inférieur à 10 µm** (PM10) et les **particules de diamètre inférieur à 2,5 µm** (PM2,5) qui, dans le secteur des transports, sont émises à l'échappement principalement par les véhicules diesel et hors échappement (usure des pièces mécaniques par frottement, des pneumatiques...). Ces particules, qui véhiculent des métaux lourds et des hydrocarbures, sont d'autant plus toxiques qu'elles pénètrent profondément dans le système respiratoire. Ce polluant est associé à une augmentation de la mortalité pour causes respiratoires ou cardiovasculaires. Elles font actuellement l'objet d'un contentieux lancé par la Commission européenne contre la France pour le non-respect des valeurs limites.
- le **monoxyde de carbone** (CO), qui provient d'une combustion incomplète de carburants, est émis à 18,9% par le transport routier. Il peut conduire à des intoxications dans le cas des fortes teneurs (local mal ventilé). Toutefois dans l'air ambiant, les teneurs en CO sont rarement très élevées, même en bordure de voie, et restent très en dessous des valeurs limites. Le CO n'est donc pas pris en compte dans l'évaluation des projet de gestion de trafic.
- les **composés organiques volatiles** (COV) regroupent une multitude de substances chimiques de famille et de propriétés différentes, dont les hydrocarbures, le benzène, les aldéhydes composés qui peuvent pour certains être cancérigènes pour l'homme. Ils sont émis à environ 10% par les transports routiers.
- le **dioxyde de soufre** (SO₂) est un polluant aujourd'hui essentiellement d'origine industrielle. En effet, depuis la baisse des teneurs en soufre des carburants, les émissions induites par les transports routiers sont négligeables. Il n'y a donc pas lieu de le prendre en compte dans l'évaluation des projet de gestion de trafic.

Il est à noter que les **hydrocarbures aromatiques polycycliques** (HAP), émis à 25% par les transports routiers, ne sont pas pris en compte dans l'évaluation des projets de gestion dynamique de trafic. Les émissions à l'échappement n'étant pas réglementés par les normes Euro, elles sont en constante augmentation depuis 1990. Le **benzo[a]pyrène**, un HAP particulier, est cancérigène pour l'homme. A compter du 31/12/2012, ses concentrations dans l'air ambiant seront réglementées et feront l'objet d'un suivi systématique par les AASQA. Il est donc important de retenir a minima le benzo[a]pyrène dans la liste à étudier ou, si le modèle d'émission le permet, la famille des HAP.

4.3.3.2. Les gaz à effet de serre (GES)

Le **dioxyde de carbone** (CO₂) est un gaz naturellement présent dans l'atmosphère. En France, il est émis à plus de 30% par le transport routier. Les autres gaz à effet de serre, dont les émissions sont suivies par le CITEPA, sont peu ou pas émis par les véhicules. Ainsi, pour l'évaluation des projets de gestion dynamique de trafic, seul le CO₂ est retenu.

NB : on rappelle que l'ozone est un GES naturellement présent dans l'atmosphère. En revanche, contrairement au CO₂, c'est un polluant secondaire qui n'est pas directement émis par les véhicules. Sa formation résulte de la transformation de polluants primaires sous l'effet du rayonnement solaire et de phénomènes chimiques complexes. Ainsi, **il n'est pas possible d'en modéliser les émissions** et ne peut donc pas être retenu comme polluant indicateur.

Les émissions de CO₂ étant directement liées à la **consommation de carburant**, cette dernière est aussi retenue comme indicateur complémentaire.

Liste des polluants à prendre en compte :

Polluants locaux : - Oxydes d'azote : NO_x (NO+NO₂)
- Particules : PM10 et PM2,5
- Composés organiques volatils (COV) dont les hydrocarbures
- Hydrocarbure aromatiques polycyclique (HAP) ou à défaut le benzo[a]pyrène (BaP)

Gaz à effet de serre : CO₂
en lien avec la consommation de carburant

4.3.4. Interprétation des indicateurs

Les quantités de polluants émises et la consommation de carburant sont calculées pour les deux scénarios (avec projet et de référence) à un horizon donné et sur une période de temps donnée. Comme on l'a vu au paragraphe page 59, cette dernière peut être variable selon les stratégies de régulation étudiées. Les résultats sont exprimés en masse et peuvent, si nécessaire, être ramenés à une unité de distance, de temps ou de véhicule pour obtenir des émissions unitaires (exemple : en kilogramme par kilomètre parcouru).

Les indicateurs calculés pour les deux scénarios sont ensuite comparés pour estimer les gains éventuels liés à la mise en place de la mesure de gestion. La comparaison se fait en valeur absolue (variation donnée en unité de masse) ou/et en valeur relative (variation donnée en pourcentage). La première donne l'ordre de grandeur des gains obtenus et la deuxième fournit un résultat pour lequel les incertitudes des modèle d'émission peuvent en partie se compenser (si l'on travaille sur le même parc de véhicule).

A noter qu'il est important de calculer les émissions de polluants et la consommation de carburant à partir d'un parc le plus complet possible c'est-à-dire comprenant au minimum les VL et les PL. S'affranchir des émissions des PL, lors de l'évaluation d'une mesure de régulation de vitesse par exemple, peut conduire à fausser les résultats de l'étude (les courbes émissions / vitesses des PL sont différentes de celles des VL, voir Illustration 4).

Conclusion et perspectives

Le principal objectif de cette étude était de proposer un des premiers éléments méthodologiques pour réaliser une évaluation de la qualité de l'air d'un projet de gestion dynamique de trafic. Ce rapport a étudié les différents modèles intervenant dans la chaîne de modélisation et en s'appuyant sur le retour d'expérience d'évaluations déjà réalisées.

Au delà de son contenu technique, ce rapport est aussi un outil pédagogique qui permettra de rapprocher deux communautés qui ont peu l'habitude de travailler ensemble, les spécialistes trafics et les spécialistes de qualité de l'air, autour d'un thème commun.

Ce travail est une première étape et nécessite d'être complété et approfondi.

En ce qui concerne les modèles de trafic, il serait intéressant d'étudier comment les stratégies de régulation dynamique de trafic sont prises en compte dans les modèles de trafic et de déterminer quels sont ceux qui les retranscrivent le mieux.

Un travail d'analyse des modèles d'émissions existants a été mené afin d'identifier les modèles les plus aptes à prendre en compte la dynamique du trafic et à en retranscrire les impacts sur les émissions de polluants et de gaz à effet de serre. Cependant, comme on a pu le voir, il n'existe aujourd'hui aucun modèle d'émission réellement adapté à la présente problématique. Les modèles d'émission de type A et B, qui sont les plus prometteurs, doivent encore faire l'objet d'approfondissements pour pouvoir être utilisés dans ce type de projets. Les modèles de type C, même s'ils sont moins adaptés, sont les seuls outils dont on dispose à l'heure actuelle. Ils peuvent être utilisés moyennant quelques précautions. Des études complémentaires doivent être menées pour cadrer leur usage et préciser leur domaine de validité dans ce type de projet.

Le couplage des modèles de trafic avec des modèles d'émissions reste encore délicate, notamment en ce qui concerne l'interfaçage. Il pourrait être intéressant d'inciter les développeurs de modèles de trafic à y intégrer des modules environnementaux. En revanche, il est très important que l'utilisateur puisse disposer d'informations claires et précises sur les méthodes de calcul utilisées, les facteurs d'émissions, le parc automobile pris en compte, etc. afin qu'il puisse faire une analyse objective des performances du modèle et de la fiabilité des résultats qu'il donne.

Les politiques publiques relatives à la qualité de l'air ambiant mises en œuvre en France depuis la loi sur l'air de 1996 ont toutes pour objectif la protection de la santé des populations. Une évaluation environnementale des mesures de gestions dynamiques de trafics sur la qualité de l'air ne peut se limiter à l'évaluation des émissions, mais doit aller jusqu'à l'évaluation des niveaux de polluants dans l'air ambiant pour caractériser l'exposition des populations présentes à proximité des voies concernées. Pour cela, il convient de réaliser une étude bibliographique des modèles de dispersion, similaire à celle qui a été menée dans ce rapport sur les modèles d'émissions, pour déterminer le(s) modèle(s) le(s) plus adapté(s) à ce type de projet. Celle-ci doit, par ailleurs, être complétée par un travail sur la définition d'indicateurs.

La monétarisation des impacts n'a pas été traitée dans ce rapport, car l'étude est ciblée sur les modèles physiques. Toutefois, sans réouvrir le débat sur la monétarisation des effets sanitaires des polluants, il semble important de souligner que les valeurs tutélaires communément utilisées (issues du rapport Boiteux) ne sont pas adaptées aux stratégies de gestion dynamique de trafic. En effet, elles se rapportent à un nombre total de kilomètres parcourus qui ne varient pas avec la mise en place de la mesure. Une approche basée sur le coût associé à chaque polluant serait plus pertinente et mériterait d'être développée²⁶.

26 Le rapport Boiteux II souligne d'ailleurs la nécessité d'approfondir les connaissances en matière d'impact sanitaire de la pollution atmosphérique et préconise de prolonger les travaux pour l'évaluation du coût de ces impacts en différenciant notamment des coûts selon les polluants et prenant en compte l'évolution de leurs émissions.

Annexes

Annexe A Modèles d'émission de type A

1 Modèles modaux

Les modèles instantanés matriciels accélération / vitesse

Ce type de modèle utilise une matrice, la plupart du temps bidimensionnelle avec en ligne des intervalles de vitesse et en colonne des intervalles d'accélération, qui contient des facteurs d'émissions instantanés ($g.s^{-1}$). Ces derniers correspondent à la moyenne d'une distribution de valeurs de facteurs d'émission seconde par seconde obtenus lors d'échantillonnages d'émissions pendant un (ou plusieurs) cycle(s) de conduite.

On compte parmi ces modèles :

- celui de **Kent et Post**, développé en Australie dans les années 80 pour estimer les émissions et la consommation de carburant à chaud. Ils ont utilisé les tests réalisés sur 164 véhicules légers essence et 16 véhicules légers diesel pour 2077 cycles de conduites. L'analyse de ces matrices a montré des bonnes corrélations entre les valeurs des facteurs d'émission de la matrice et la puissance de sortie instantanée du véhicule. Ces résultats ont été à l'origine du développement des modèles basés sur la puissance qui sont présentés plus loin (cf. page 70).
- le modèle européen **DRIVE-MODEM** (dès 1995) pour les émissions à chaud. Ce modèle présente les facteurs d'émission dans une matrice vitesse et « accélération x vitesse ». Il est basé sur des tests en laboratoire de 129 véhicules légers essence (catalytiques et non-catalytiques) et 21 véhicules légers diesel et utilise 14 cycles de conduite « MODEM », qui ont été développés à partir d'équipements de mesures embarqués dans six aires urbaines européennes. Ces cycles de conduite ont été construits afin d'être statistiquement représentatifs d'une large base de données couvrant différentes situations de conduites.

Joumard et al. analyse les résultats de ce modèle en mesurant les émissions moyennes lors des 14 cycles et en les comparant aux prédictions du modèle. Les erreurs du modèle varient entre 51 et 57 % selon le cycle considéré et le type de véhicule.

Les modèles instantanés matriciels vitesse / charge du moteur

Ce type de modèle donne l'émission instantanée ($g.s^{-1}$) produite par un moteur en fonction de sa vitesse (en tour par minute) et de sa charge. Les matrices sont générées à partir de mesures de consommation de carburant et de mesures d'émissions, réalisées sur un banc dynamométrique pour moteur ou pour véhicule et simulées pour des combinaisons de vitesse de moteur et de charge constantes. Elles sont réalisées pour une vitesse constante (« steady state ») ou pour un régime accéléré / décéléré (« transient »).

Ces matrices doivent être combinées avec un modèle complémentaire permettant de définir la charge et la vitesse du moteur en fonction de la vitesse du véhicule, de la pente de la route et des changements de vitesse.

Les modèles américain US VEMIS et européen PHEM sont basés sur ce principe :

- Le modèle **US VEMISS** (1995) est un exemple de modèle d'émission « steady-state » et de consommation de carburant. Il est basé sur les tests dynamométriques de 29 véhicules légers utilisant 3 cycles de conduite. Le modèle de simulation de véhicule **DCMOB** (1995) est également un exemple australien de ce type de modèle.
- Le modèle européen **PHEM** (*Passenger car and Heavy-duty vehicle Emission Model*) (2005) est basé sur des tests dynamométriques réalisés sur des VL (nombre non précisé) pour 15 cycles de conduite et des PL (nombre de cycle de conduite non spécifié). Il a été développé dans de nombreux projets nationaux et internationaux tels qu'ARTEMIS (cf. page 76), le projet COST 346 et la coopération Germano-Autrichienne-Suisse sur le « Manuel des facteurs d'émission » (HBEFA, cf. page 30). A partir d'un cycle de conduite représentatif d'une situation de trafic donnée, PHEM calcule à chaque point de la courbe vitesse/temps les émissions et la consommation énergétique instantanées en fonction du couple, du régime moteur, de l'accélération et de la pente. Il s'appuie pour cela sur des cartographies d'émissions établies à

partir de mesures sur des bancs d'essais de moteurs pour les PL ou des bancs d'essais et de mesures in situ pour les véhicules légers. Ces émissions sont ensuite sommées pour obtenir les facteurs d'émissions des PL dans ARTEMIS et des VL et VUL dans HBEFA.

Les fonctions instantanées analytiques vitesse-accélération

Ce type de modèle utilise des fonctions analytiques, qui donnent l'émission instantanée de chaque polluant en fonction de la vitesse et d'une classe d'accélération, pour différents cycles de conduite. Ces lois sont construites sur la base de cycles de conduite opérés sur châssis dynamométrique, ou bien déduits de mesures in situ :

- **Cernuschi et al.** ont développé un tel modèle en 1995, qui donne les émissions de CO, et COV et de NO_x en fonction de la vitesse instantanée, pour 5 classes d'accélérations : faible et forte accélération, vitesse constante, faible et forte décélération. Les résultats ont été déduits de 4 cycles de conduite résultant de mesures in situ : le cycle urbain réglementaire ECE/15 et 3 autres cycles (congestionné, conduite fluide, et conduite rapide).
- Le modèle **VETESS**, développé par VITO, s'appuie sur des lois d'émissions analytiques reliant l'émission à un instant donné à la vitesse et l'accélération du véhicule. Par principe, ces lois sont faites pour être couplées à des modèles microscopiques d'écoulement de trafic.

Elles s'appuient sur des mesures *in situ* réalisées en milieu urbain grâce à des véhicules instrumentés (25 véhicules : 17 voitures dont 12 essences et 5 diesels, 6 bus et 2 poids lourds) qui mesurent simultanément la cinématique du véhicule et les quantités de polluants émises (en g/s ou en g/km). Les véhicules sont suivis sur une durée de 30 min à 3 heures. L'échantillon de véhicules instrumentés étant faible, les lois sont donc données pour un parc très agrégé de véhicules (1 véhicule léger essence, 1 véhicule léger diésel, 1 véhicule léger GPL, un poids lourd et un bus).

Les lois d'émissions ont été développées pour plusieurs polluants (NO_x, COV, CO₂²⁷ et PM) et prennent en compte implicitement les émissions à froid et l'influence de l'historique.

$$E_n(t) = \max[E_0, f_1 + f_2 v_n(t) + f_3 v_n(t)^2 + f_4 a_n(t) + f_5 a_n(t)^2 + f_6 v_n(t) a_n(t)]$$

avec v(t) et a(t) vitesse et accélération instantanées

Fonction analytique de VETESS

Polluant	Vehicule type	E ₀	f ₁	f ₂	f ₃	f ₄	f ₅	f ₆
CO ₂	Petrol car	0	5.53e-01	1.61e-01	-2.89e-03	2.66e-01	5.11e-01	1.83e-01
	Diesel car	0	3.24e-01	8.59e-02	4.96e-03	-5.86e-02	4.48e-01	2.30e-01
	LPG car	0	6.00e-01	2.19e-01	-7.74e-03	3.57e-01	5.14e-01	1.70e-01
	HDV	0	1.52e+00	1.88e+00	-6.95e-02	4.71e+00	5.88e+00	2.09e+00
NO _x	Bus	0	9.04e-01	1.13e+00	-4.27e-02	2.81e+00	3.45e+00	1.22e+00
	Petrol car (a ≥ -0.5 m/s ²)	0	6.19e-04	8.00e-05	-4.03e-06	-4.13e-04	3.80e-04	1.77e-04
	Petrol car (a < -0.5 m/s ²)	0	2.17e-04	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00
	Diesel car (a ≥ -0.5 m/s ²)	0	2.41e-03	-4.11e-04	6.73e-05	-3.07e-03	2.14e-03	1.50e-03
	Diesel car (a < -0.5 m/s ²)	0	1.68e-03	-6.62e-05	9.00e-06	2.50e-04	2.91e-04	1.20e-04
	LPG car (a ≥ -0.5 m/s ²)	0	8.92e-04	1.61e-05	-8.06e-07	-8.23e-05	7.60e-05	3.54e-05
	LPG car (a < -0.5 m/s ²)	0	3.43e-04	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00
VOC	HDV	0	3.56e-02	9.71e-03	-2.40e-04	3.26e-02	1.33e-02	1.15e-02
	Bus	0	2.36e-02	6.51e-03	-1.70e-04	2.17e-02	8.94e-03	7.57e-03
	Petrol car (a ≥ -0.5 m/s ²)	0	4.47e-03	7.32e-07	-2.87e-08	-3.41e-06	4.94e-06	1.66e-06
	Petrol car (a < -0.5 m/s ²)	0	2.63e-03	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00
	Diesel car (a ≥ -0.5 m/s ²)	0	9.22e-05	9.09e-06	-2.29e-07	-2.20e-05	1.69e-05	3.75e-06
	Diesel car (a < -0.5 m/s ²)	0	5.25e-05	7.22e-06	-1.87e-07	0.00e+00	-1.02e-05	-4.22e-06
	LPG car (a ≥ -0.5 m/s ²)	0	1.44e-02	1.74e-07	-6.82e-09	-8.11e-07	1.18e-06	3.96e-07
PM	LPG car (a < -0.5 m/s ²)	0	8.42e-03	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00
	HDV	0	1.04e-03	4.87e-04	-1.49e-05	1.27e-03	2.10e-04	1.00e-04
	Bus	0	1.55e-03	8.20e-04	-2.42e-05	1.86e-03	3.21e-04	1.36e-04
	Petrol car	0	0.00e+00	1.57e-05	-9.21e-07	0.00e+00	3.75e-05	1.89e-05
	Diesel car	0	0.00e+00	3.13e-04	-1.84e-05	0.00e+00	7.50e-04	3.78e-04
	LPG car	0	0.00e+00	1.57e-05	-9.21e-07	0.00e+00	3.75e-05	1.89e-05
	HDV	0	2.14e-04	3.35e-04	-2.22e-05	2.07e-03	1.80e-03	2.27e-04
Bus	0	2.23e-04	3.47e-04	-2.38e-05	2.08e-03	1.76e-03	2.23e-04	

Illustration 16: Lois du modèle VETESS - Source : [Int Panis et al]

Ce modèle a des limites. Outre le fait que les lois d'émission ont été construites sur un faible parc de véhicules, on ne sait pas si les cycles ont été dimensionnés pour prendre spécifiquement en compte les émissions à froid, ni s'ils sont représentatifs de situations de conduite urbaines. Il est important de connaître ce dernier paramètre car les lois ne peuvent être valides que sur un parcours similaire à celui sur lequel les lois ont été construites.

- Le modèle **VT-MICRO** s'appuie également sur des fonctions analytiques. Il estime les quantités de polluants émis (HC, CO, NO_x et CO₂) en fonction de la vitesse et de l'accélération instantanée. La régression est une combinaison, pour chaque polluant, du produit de la vitesse et de l'accélération à des puissances 0, 1, 2 et 3, soit un total de 16 paramètres. Le modèle a été construit à partir de mesures sur châssis dynamométrique, réalisées sur les cycles définis par l'EPA²⁸, qui ont aussi servi à la construction de MOBILE6 (cf. page 75) ; on peut donc supposer que les lois obtenus sont assez proches. Les véhicules sont classés en 7 catégories, chacune regroupant des véhicules d'émission similaires. Ils sont alloués à l'une de ces catégories, en fonction de leur âge et taille du moteur. Le modèle présente un bon ajustement ($R^2 > 0.92$) pour les cycles sur lesquels il a été construit. On ne sait cependant pas le comportement des lois sur d'autres cycles, il est donc difficile d'évaluer sa robustesse.

VT-Micro semble sensible aux conditions de circulation (comme VETESS), dans la mesure où la vitesse et l'accélération instantanées des véhicules interviennent dans les relations proposées. En revanche, on ne sait pas si les quantités de polluants émises instantanément sont fiables (en raison par exemple de l'historique du fonctionnement du moteur).

La question de la finesse de la représentation de l'accélération dans les modèles basés sur des fonctions instantanées analytiques vitesse / accélération est cruciale. Les modèles du type VETESS, qui utilisent explicitement la valeur de l'accélération peuvent sembler plus précis que les modèles basés sur des classes d'accélération comme celui de Cernuschi *et al.*. En pratique, ceci n'est pas nécessairement vrai, car les modèles de trafic estiment actuellement peu précisément les valeurs d'accélération. La question de la sensibilité des modèles aux erreurs qui peuvent être commises par les modèles de trafic sur les valeurs d'accélération se pose donc.

Les modèles instantanés basés sur le puissance

L'approche de ces modèles est moins empirique que celle utilisée pour les modèles précédents.

Dans ce type de modèle, les émissions et le carburant consommé sont estimés en fonction de la puissance instantanée dépensée par le véhicule pour se déplacer (fonctionnement du moteur, des équipements annexes tels que la climatisation) et contrecarrer les différentes forces auxquelles il est soumis (forces de frottement de l'air, des contacts pneu/route, pente de la route, l'inertie du véhicule, etc.).

Les premiers exemples de ces types de modèles sont ceux développés par Kent et Post entre 1982 et 1985, puis par Biggs et Akcelik vers 1986. Toutefois, ces modèles n'ont pas été mis à jour avec les nouvelles flottes de véhicules. En revanche, deux modèles récents sont basés sur cette approche :

- **CVEM, CSIRO** sont des modèles Australiens basés sur des mesures de véhicules récents. Le facteur d'émission (g/s) dépend de la capacité du moteur et de la puissance instantanée, elle-même dépendante de la pente de la route, de la traînée aérodynamique, de l'aire frontale du véhicule et de sa masse. CVEM ajoute ensuite des modèles supplémentaires pour les performances catalytiques et les émissions à froid. Les références sur ces modèles sont disponibles à l'adresse suivante : <http://www.ephc.gov.au/taxonomy/term/70>.
- **CMEM** (« Comprehensive Modal Emissions Model ») a été développé aux Etats-Unis pour pouvoir tester l'impact environnemental de stratégies de régulation locales, qui modifient le comportement de conduite des utilisateurs. Il peut être utilisé à différentes échelles temporelles : estimation seconde après seconde des émissions, ou bien estimation des émissions sur un cycle complet de conduite. C'est un modèle physique qui a pour ambition de décrire précisément les processus engagés lors de l'émission de polluants par un moteur. Le terme « comprehensive » souligne que la loi est sensée prendre en compte les différents états de fonctionnement des

véhicules (fonctionnement normal, véhicule détérioré, véhicule fonctionnant mal). Le modèle tient compte des conditions de démarrages (froid ou chaud) et du fonctionnement du moteur (stoechiométrique, enrichissement ou appauvrissement), en déterminant le ratio air/fuel.

Il calcule les émissions de polluants (CO, CO₂, HC, NO_x) à chaque seconde en effectuant le produit de la consommation énergétique (fuel rate FR en g.s⁻¹) avec des indices d'émission (en g. de polluants émis par g. d'essence consommée) et de la fraction due à la catalyse.

Les lois CMEM donnent une estimation de la consommation énergétique ou de la quantité de polluants émis 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).

Les lois ont été construites à partir de mesures instantanées des vitesses, accélérations, et quantités de polluants émis réalisées sur châssis dynamométriques pour :

- 3 cycles de conduite :
 - *3-bag FTP* : cycle utilisé comme référence (cycle de conduite standard, fonctionnement stoechiométrique)
 - *High speed US06* : cycle de conduite qui zoome sur les périodes de fortes émissions (vitesses importantes),
 - *MEC01* (modal emission cycle) : cycle construit pour les besoins du modèles visant à reproduire les différents états de fonctionnement du moteur. Il comprend 5 sections :
 - une section à fonctionnement stoechiométrique (pour mesurer les émissions à vitesse constante),
 - une section à puissance constante (définition de 5 sous-cycles où la puissance est constante),
 - une section à accélération (définition de plusieurs classes d'accélération en fonction de la vitesse),
 - une section pour estimer l'importance de l'historique (reproduit la première section mais dans un ordre différent) et
 - une section dédiée à l'air conditionné (reproduit la première section avec la climatisation en marche).

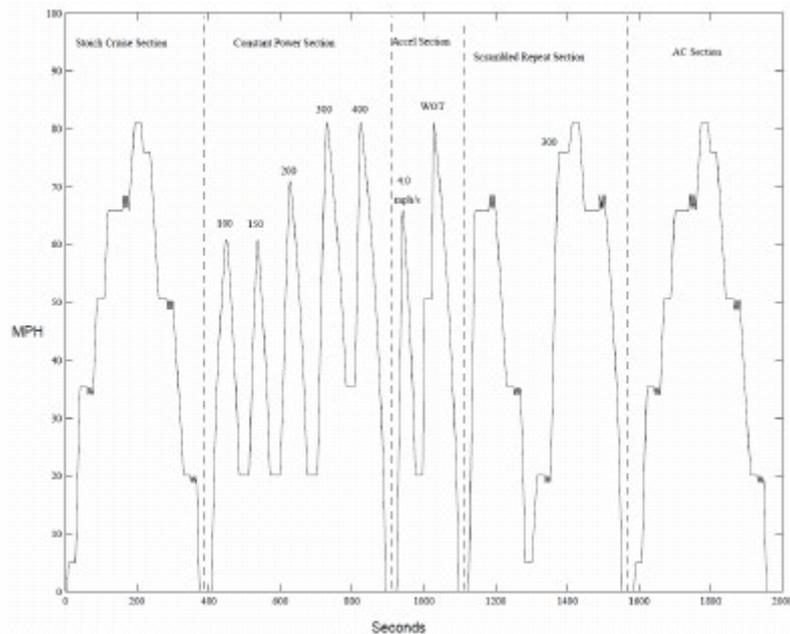


Illustration 17: Cycle MEC01 - Source :[CMEM_2000]

- et 24 classes de véhicules, définies en fonction des polluants émis et non de leur représentativité dans le parc automobile, créées en fonction du type de carburant (essence, diesel), du kilométrage, du ratio poids/puissance, du niveau de certification d'émission et la catégorie d'émission (TIER1 ou TIER0, ce dernier représentant les véhicules les plus émetteurs).

La validation du modèle a été faite sur des cycles différents (FTP et US06) du cycle sur lequel le calibrage a été réalisé (MEC01). Elle a été réalisée sur deux types de tests :

- La validation sur l'ensemble du cycle montre que les résultats sont globalement bons pour les 3 échantillons testés.
- La validation seconde par seconde met en évidence une erreur moyenne de l'ordre de 20% entre les émissions estimées et mesurées. On rappelle toutefois que ce modèle n'est pas fait pour estimer des grandeurs instantanées, mais bien pour estimer des grandeurs agrégées sur un parcours.

En revanche, le modèle montre ses limites notamment à basses vitesses et fortes accélérations. De plus, la prise en compte de l'historique à court terme dans les lois d'émissions reste vague. Elle intervient très certainement dans le calcul du ratio air/fuel, mais aucun détail n'est donné (comme par exemple, quelle durée de l'historique doit être enregistrée ?)

- Le couplage entre le modèle de trafic et les lois d'émissions est supposé parfait. Il n'est cependant pas certain que, même si l'estimation de la vitesse et de l'accélération d'un véhicule à un instant t est exacte, la quantité de polluants estimée par CMEM soit juste. Les lois CMEM restent plus pertinentes pour estimer les quantités de polluants émises sur un cycle, qu'à un instant t .

Les modèles agrégés

Des modèles modaux plus agrégés ont aussi été développés. La philosophie est toujours la même : en s'appuyant sur un modèle modal, l'idée est de déterminer l'émission correspondante à un parcours donné. Le modèle peut alors être couplé à un modèle de trafic censé déterminer la vitesse moyenne, le nombre d'arrêts, etc. :

- **SIDRA** est un modèle d'intersection déterminant la vitesse moyenne, le nombre d'arrêts. Trois profils de conduite types ont été définis à proximité d'un rond point (profil sans arrêt, profil avec un arrêt, et profil avec multiples arrêts). Les grandeurs de sortie du modèle permettent de déterminer la proportion de véhicules soumis à chacun de ces profils. Ensuite, un modèle d'émission modal (basé sur les puissances des véhicules), permet d'associer les émissions à chacun de ces profils.
- Le modèle **LANES/SATURN**, sur la base du modèle modal d'émission DRIVE-MODEM, détermine les émissions à partir d'une fonction analytique utilisant les kilomètres totaux parcourus par les véhicules (VKT en veh.km), la vitesse moyenne, le temps total et le nombre total d'arrêts premiers et secondaires (pour les arrêts en congestion).
- Le modèle américain **CALINE4** utilise des algorithmes qui déduisent les émissions modales de CO (g/s) à partir des facteurs d'émission de CO (g/km) et des vitesses moyennes.
- Taylor et Young ont développé au cours des années 90 un modèle pour estimer les émissions de CO par unité de distance en fonction du temps passé dans chaque mode de conduite et des vitesses associées.

2 Les modèles d'émissions à vitesse et fluctuation de vitesse

Les modèles de régression multivariée nécessitent des données de situation de conduite pour quantifier un ensemble suffisamment important de variables d'entrée du modèle, qui est ensuite utilisé pour estimer les facteurs d'émissions (g.km^{-1} , équivalent à g.VKT^{-1}) des différentes classes de véhicules.

Les modèles à vitesse et fluctuation de vitesse s'appuient sur les profils vitesse/temps des véhicules pour estimer la quantité de polluants émise par le trafic routier. Les profils vitesse/temps sont issus soit de mesures, soit d'un outil de simulation de trafic. La quantité de polluants émise est ensuite estimée en fonction de paramètres décrivant la cinématique des véhicules :

- Les premiers modèles de ce type ont été développés par Watson, Wilkins et Marchal entre 1980 et 1983. Ils ne seront pas développés ici car ils s'appuient sur des mesures obsolètes.
- Le modèle **MEASURE** (« Mobile Emissions Assessment System for Urban and Regional Evaluation ») intègre des travaux plus récents. Les quantités instantanées de polluants émises sont estimées en fonction de paramètres déduits du profil cinématique moyen des véhicules et pour un cycle de conduite donné, tels que : la proportion de cycles de conduite avec des accélérations supérieures à $1,34\text{m.s}^{-2}$, la proportion des cycles de conduite dont le terme « accélération*vitesse » excède $60\text{mph}^2/\text{s}$, une variable pour les véhicules à 5 vitesses ayant un kilométrage inférieur à 25 000miles, etc.

Annexe B Modèles d'émission de type B

Modèles basés sur l'estimation des files d'attente

Le modèle d'estimation des polluants, développé par Matzoros et Van Vlieten 1992, s'appuie sur des données trafic provenant du modèle de trafic SATURN. Ce modèle nécessite seulement les vitesses moyennes, les types d'intersections et les réglages des feux en entrée, pour estimer les variations de la taille des files d'attente à chaque type d'intersection (feu, intersection à priorité ou rond point). Ces données sont utilisées pour déduire le temps passé dans chacun des 4 modes fondamentaux : vitesse stationnaire, accéléré, décéléré et à l'arrêt. Ensuite, une matrice des facteurs d'émission instantanés donne la distribution des émissions le long de la route.

Modèles avec reconstruction du profil vitesse / temps (modèle TEE)

Peu de littérature a été trouvée sur ce modèle ; la description présentée est inspirée de Smit. Le modèle TEE (« trafic Energy and Emission ») incorpore quatre modèles d'émission différents :

- un modèle de vitesse moyenne, équivalent au COPERT model.
- un modèle de vitesse moyenne avec correction (TEE-KCF) ;
- un modèle de cycle simplifié (TEE-REC), pour lequel le cycle de conduite est reconstruit à partir des modes de conduite (accéléré, décéléré, ralenti et stationnaire) et des niveaux de vitesse et d'accélération instantanés ;
- un modèle détaillé de cycles de vitesses, équivalent au modèle instantané européen DRIVE-MODEM ;

Le modèle TEE génère les profils « vitesse / temps » en fonction de la vitesse moyenne, des durées de vert, de la longueur des liens et des intersections. Le modèle déduit alors la densité du trafic en fonction du débit et de la vitesse et du nombre de voies sur le lien. Elle est ensuite divisée par la densité maximum K_{max} pour obtenir une densité normalisée, qui représente la présence des autres véhicules. Celle-ci est utilisée pour calculer la fraction du temps passé dans chacun des 4 modes de conduite à l'aide d'une courbe (ces informations sont issues de la littérature, en particulier de l'US Highway Capacity Manual). La présence de feu est simulée par l'ajout d'un segment « décélération-arrêt-accélération ».

Le modèle TEE-KCF corrige les facteurs d'émission donnés par COPERT III par le biais d'un facteur de correction (KCF, « kinematic correction factor ») de manière à prendre en compte la congestion. Ce facteur dépend de la densité, du temps de vert, de la vitesse moyenne sur les liens, et de constantes, qui sont calibrées sur 500 liens fictifs dont l'émission est calculée en parallèle avec le modèle détaillé DRIVE-MODEM.

L'approche intermédiaire présentée dans TEE-REC semble intéressante du point de vue du trafic. Le modèle ne s'appuie pas directement sur des données cinématiques comme l'accélération, qui sont parfois difficiles à estimer, mais reconstruit au contraire les profils cinématiques à partir des données fournies par le modèle de trafic. Toutefois, la congestion est représentée dans TEE comme un profil additionnel de stop & go, ce qui ne semble pas très pertinent.

Annexe C

Modèles d'émission de type C

1 Modèles à facteur d'émission constants

Modèle à grande échelle

Le modèle australien « Energy Workbook for Transport » est utilisé pour calculer les émissions de gaz à effet de serre annuelles nationales et d'autres émissions provenant des transports. Les facteurs d'émission des véhicules à l'échappement sont déterminés à partir de tests dynamométriques. Il part de l'hypothèse que la consommation de carburant et les émissions se produisent à un taux moyen constant. Ce modèle est donc utilisé pour des études se plaçant sur de larges échelles temporelle (annuelles) et spatiale (nationale).

Modèle basé sur la consommation de carburant

On recense en Australie, l'«Energy Workbook for Transport » (cf. ci-dessus) et la méthode pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre de l'IPCC. Aux USA, les résultats issus de ces modèles sont comparés à des modèles existants à vitesse moyenne (EMFAC ou MOBILE).

En Europe, les inventaires basés sur COPERT sont vérifiés en comparant la consommation totale en carburant estimée par le modèle aux ventes de carburant. Les inventaires d'émissions peuvent alors être calibrés en changeant certaines variables du modèle susceptibles d'être incertaines, comme les VKT totaux.

2 Modèles à facteurs d'émissions variables

Modèles basés sur les vitesses de parcours moyennes

MOBILE :

Le modèle MOBILE développé aux États-Unis (EPA) est apparu sous le nom MOBILE1 en 1978 et a depuis été périodiquement mis à jour selon le développement des tests de facteurs d'émission, des systèmes de contrôle d'émission, des normes d'émission et l'amélioration de la compréhension des différents phénomènes liés aux émissions des véhicules. La version la plus récente est MOBILE6.

Le modèle MOBILE6 détermine le « taux basique d'émission » à chaud (BERs), en g/mile, pour une vitesse de 31.5km/h, pour des véhicules légers essence classés par année de sortie du modèle et par technologie du véhicule. Pour des vitesses différentes de 31,5 km/h, les BERs sont ajustés en fonction d'un facteur de correction (SCF), qui dépend de la vitesse, du type de polluant (CO, HC, NO_x), du type de route (autoroutes, artères, rampe accès autoroute, rues locales) et du niveau d'émission du véhicule (3 classes). Les taux d'émissions ont été déterminés sur la base de cycles de conduite représentatifs. Toutefois, certains chercheurs remettent en cause l'hypothèse que les cycles de conduite construits à partir de données recueillies sur un site seraient transposables à d'autres situations.

Ce modèle est basé sur une large base de données incluant des milliers de tests d'émission sur un large nombre de véhicules.

EMFAC (« Emissions FACtor model »):

EMFAC est l'un des quatre modèles de la « Motor Vehicle Emission Inventory » utilisés pour réaliser des inventaires d'émissions en Californie. Il est périodiquement mis à jour depuis 1988. La version la plus récente date de septembre 2011.

Le modèle EMFAC donne les BERs (g/mile) pour les véhicules légers essence, classés en fonction de leur année de sortie, de la technologie du véhicule (carburateur, carburateur asservi, injection directe) et du niveau d'émission (normal, modéré, élevé, très élevé, super) pour trois polluants (CO, HC, NO_x) ainsi

que le CO₂. De même que pour MOBILE, des facteurs de correction de vitesse sont utilisés (la vitesse de base ici est 39.9km/h). Des facteurs d'ajustement sont également utilisés pour inclure la température, la détérioration des véhicules, l'air conditionné, l'humidité, l'altitude, la volatilité et la composition du carburant. Des modèles séparés sont utilisés pour les émissions à froid et les émissions d'évaporation.

COPERT (« Computer Programme to calculate Emissions from Road Traffic »):

Modèle présenté dans le corps du rapport en page 28.

QGEPA (« Queensland Government Environmental Protection Agency ») :

Le modèle QGEPA a été développé sur un parc de véhicules australiens. Comme pour MOBILE, les émissions basiques à chaud (BERS) sont déterminées pour une vitesse de 31.5km/h. Les polluants accessibles sont CO, HC, PM et NO_x, et quelques autres polluants non réglementés. Les mêmes correctifs de vitesse (SCF) que dans MOBILE6 sont appliqués pour les vitesses différentes de 31.5km/h. Au final les taux d'émissions sont connus pour 11 vitesses différentes. En revanche, les cycles de conduite utilisés pour les tests dynamométriques diffèrent selon le type d'allumage du moteur, FTP72 pour les véhicules à essence ou à GPL et CUEDC pour les véhicules diesel, qui sont des cycles spécifiques au milieu urbain. Enfin, des modèles spécifiques estiment les émissions à froid (sans tenir néanmoins compte de la vitesse) et les émissions d'évaporation.

Modèle à situation de trafic

HBEFA

Modèle présenté dans le corps du rapport en page 30.

ARTEMIS

ARTEMIS estime les quantités de polluants émises à l'échappement (à chaud et à froid) et hors échappement (émissions évaporatives). Il s'appuie sur une distribution de la flotte nationale de véhicules, qui dépend du pays et du kilométrage réalisé pour chacune des situations de trafic répertoriées. Un total de 276 situations de trafic sont répertoriées avec 69 types de routes et 4 types d'écoulements (libre, chargé, congestionné, et stop & go).

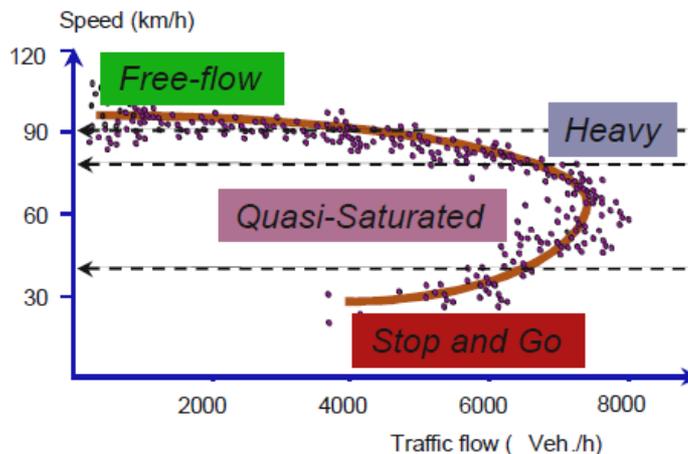


Illustration 18: Les différents écoulements de trafic

Source : Artemis Final Report

A chaque situation de conduite est associée un cycle de conduite pour lequel les facteurs d'émission sont calculés à l'aide du modèle PHEM.

Source : Artemis final report

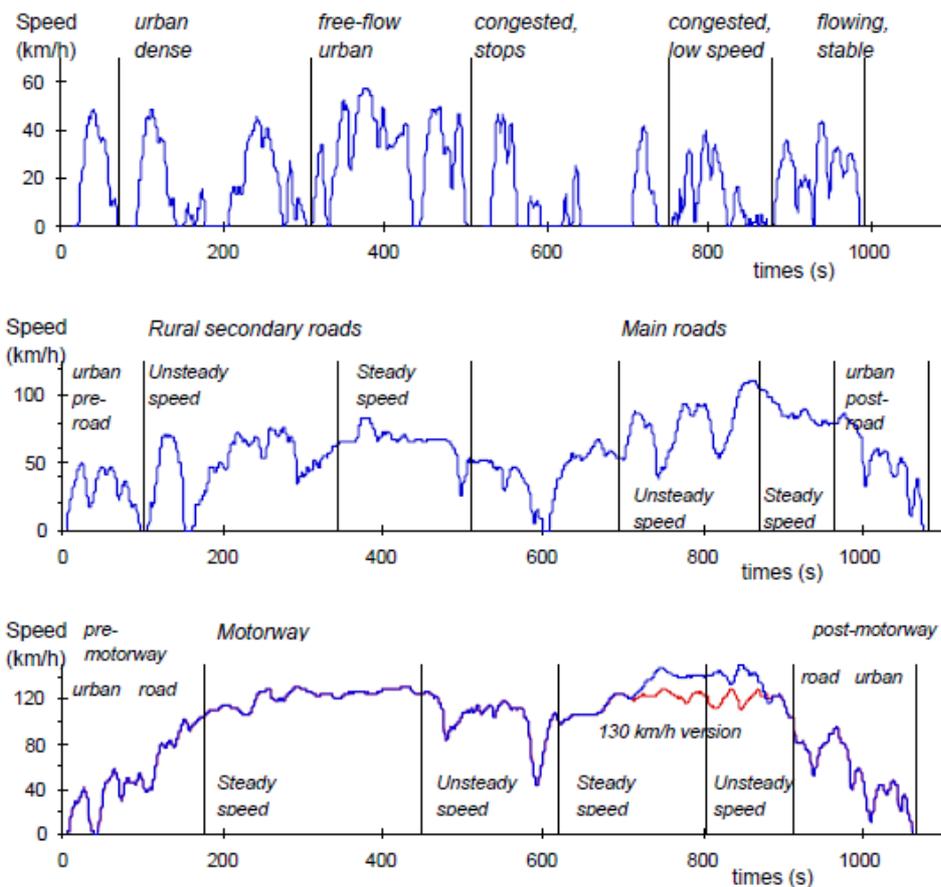
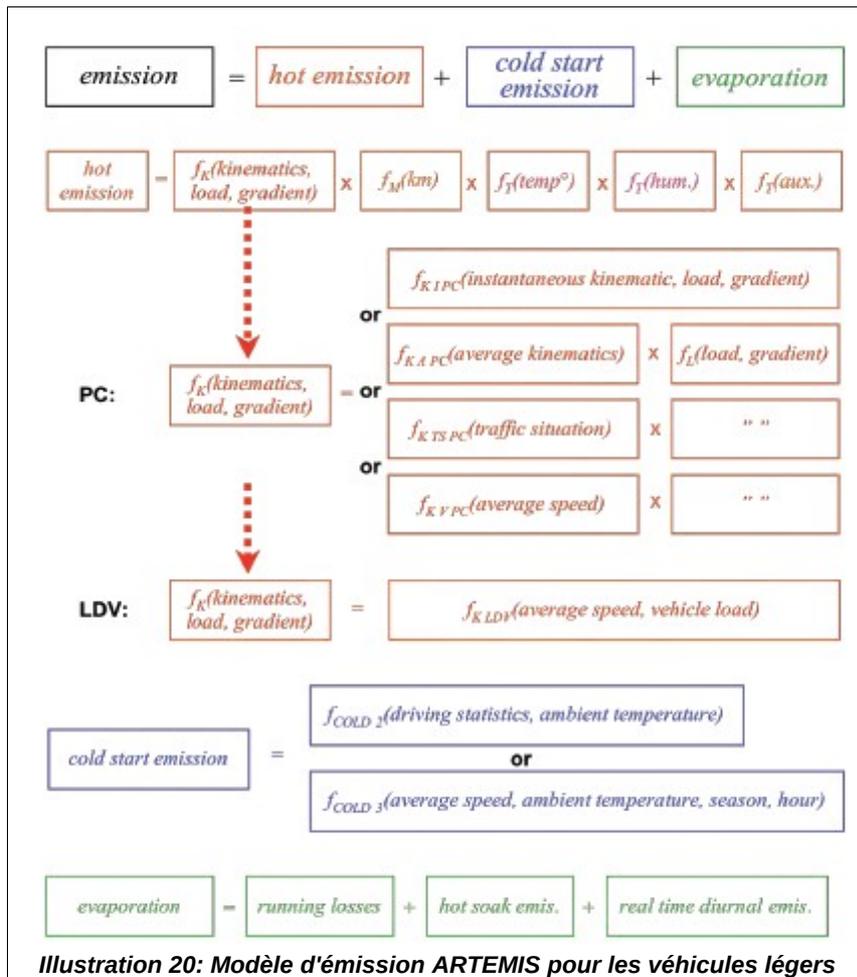


Illustration 19: Exemple de cycles de conduites ARTEMIS

Les facteurs d'émissions (en g/km) sont calculés à partir de mesures réalisées sur châssis dynamométriques, pour des cycles de conduite statistiquement représentatifs des situations de trafic. Ils sont donnés par type de véhicule et pour chaque situations de trafic.

L'illustration 20 présente la structure du modèle, qui tient compte des émissions à chaud, à froid et des émissions évaporatives. Les émissions à chaud dépendent de nombreux paramètres comme la pente, la charge, la température ambiante, l'humidité, la situation de trafic, la vitesse moyenne, etc. ARTEMIS permet de calculer les émissions pour de nombreux polluants, notamment CO, HC, NO_x, COV, HAP, PM et CO₂.



Sources :Joumard et al, 2007

A l'heure actuelle, peu de CETE ont utilisé ARTEMIS dans le cadre de ses études, à l'exception du CETE Nord Picardie qui l'a mis en œuvre sur le territoire de l'agglomération lilloise dans le cadre d'une étude relative au PDU. La première partie de l'étude consiste à décrire les différentes situations de trafic rencontrées sur l'agglomération lilloise²⁹, la deuxième correspond à l'application concrète du modèle Artemis au calcul des émissions routières et à la comparaison des résultats obtenus avec ceux issus de COPERT. Cette étude a montré la difficulté à affecter les tronçons du réseau aux différentes situations de trafic définies dans ARTEMIS. De plus, l'analyse des résultats n'a pas mis en évidence d'influence notable des périodes de la journée (heures creuses de nuit, heures creuses de jour, heure de pointe du matin et de pointe du soir) sur les émissions à chaud, quel que soit le type de véhicule (VL ou PL) et la méthodologie utilisée (ARTEMIS ou COPERT III). En revanche, ARTEMIS fait ressortir la majoration des émissions liées aux conditions de trafic chargés (saturé ou stop&go), même si la proportion de stop&go sur le réseau lillois est faible³⁰.

La difficulté de mise en œuvre d'ARTEMIS réside dans la constitution d'un parc de véhicules représentatif et la détermination des situations de trafic, c'est-à-dire du pourcentage des kilomètres parcourus affecté à chacune des 276 situations de trafic répertoriées dans le modèle. De ce fait, le logiciel reste assez difficile d'utilisation, car il s'appuie sur des grandeurs pas toujours disponibles.

MOBILE 6

29 Les 276 situations de trafics d'ARTEMIS ont été réduites à 120, compte tenu des vitesses limites réglementaires françaises, puis à 59 pour l'agglomération lilloise.

30 Cette faible proportion de stop&go peut s'expliquer par le pas de temps horaire des données trafic qui est trop important pour mettre en évidence ces phénomènes.

La prise en compte de l'état du trafic est faite dans MOBILE6, par le biais de l'introduction du LOS (Level of Service). Les cycles de conduite sont construits autour de cette variable, qui quantifie le degré de congestion (6 niveaux de congestion, allant de A : très fluide, à F : congestionné).

Toutefois, la caractérisation des états de trafic congestionnés peut être discutée, dans la mesure où l'état F correspond à un état de trafic assez peu congestionné.

Cette approche est similaire à celle proposée dans Artémis et en a les mêmes limites. De plus, la question du couplage avec les modèles de trafics doit être posée, de manière à définir l'échelle temporelle et spatiale la plus pertinente pour cette approche.

VERSIT+macro

En s'appuyant sur VERSIT+, 18 situations de trafic ont été prédéfinies, en fonction des vitesses pratiquées, de la concentration, et éventuellement du ratio concentration/capacité (cette approche est donc proche des LOS de MOBILE6 ou de la prise en compte des situations de trafic dans ARTEMIS). VERSIT+macro a vocation à être utilisé à une échelle plus grande, de l'ordre de l'agglomération.

Les modèles à situation de trafic ne permettent pas de prendre précisément en compte l'impact environnemental de variations de l'état du trafic, étant donné que la congestion est définie de manière statique. De plus, leur utilisation est difficile puisqu'ils nécessitent d'estimer la part du trafic dans chacune des situations de trafic.

Annexe D Articulation des différents projets européens

Depuis une vingtaine d'année, de nombreux programmes de recherche européen sur la modélisation des polluants issus des transports ont été menés. Ils ont permis de définir les éléments méthodologiques et recenser les données nécessaires aux calculs d'émissions. Ils sont à l'origine des principaux logiciels de modalisation européens présentés dans ce rapport.

Guide méthodologique (inventaire des polluants atmosphériques et méthodologie de référence) : CORINAIR³¹ de 1985 à 1994 puis EMEP³² / EEA³³ depuis 1994

Projets de recherche :

- COST 319 de 1993 à 1998 (
- MEET de 1996 à 1998
- ARTEMIS de 2000 à 2007
- PARTICULATES de 2000 à 2005
- PHEM de 2000 à 2005

Principaux outils découlant de ces projets de recherche:

- COPERT
- HBEFA

L'illustration 21 replace ces différents projets dans le temps et décrit les liens qui existent entre eux.

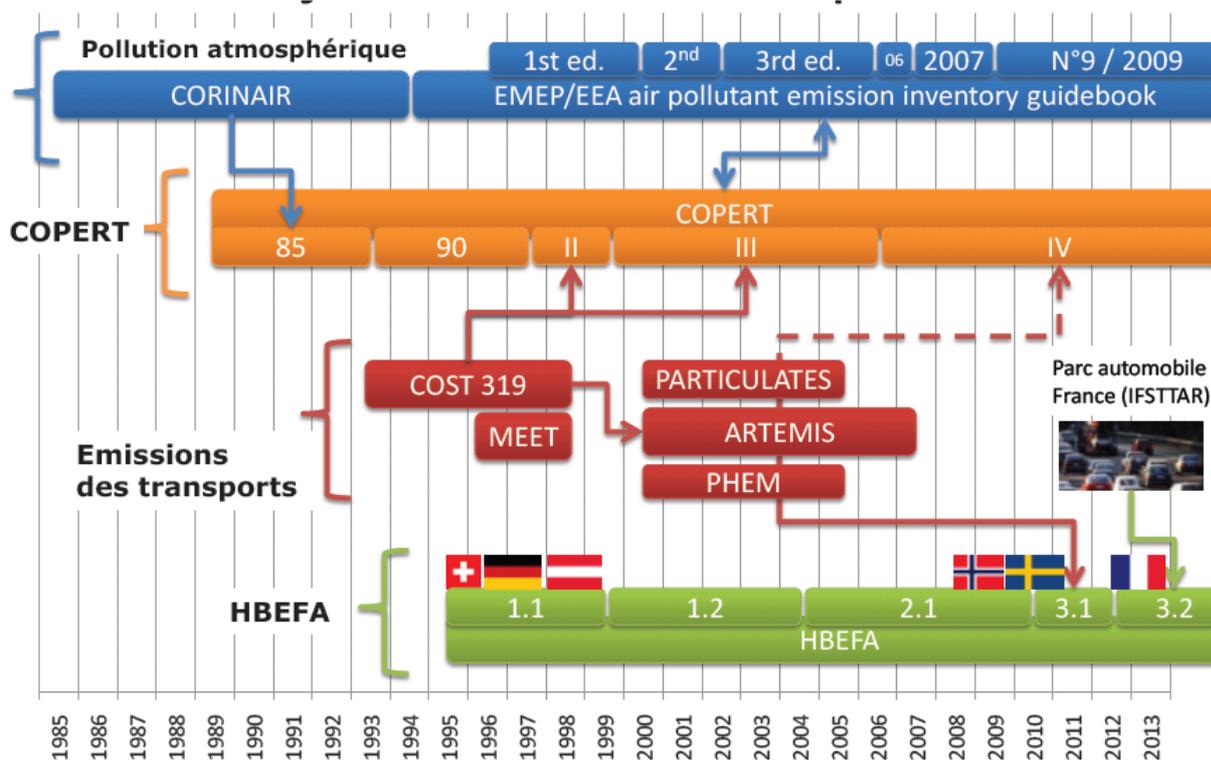


Illustration 21: Projets de recherche et outils européens

Sources : Denis Cheynet

31 Inventory of AIR emissions in Europe

32 European Monitoring and Evaluation Programme

33 European Environment Agency

1 Péage urbain

1.1 Péage urbain de Stockholm

Le péage urbain de Stockholm, mis en place de janvier à juillet 2006, a fait l'objet de deux types d'évaluations : une *a priori* par Transek AB et une *a posteriori* par la ville de Stockholm .

Projet

Les objectifs de l'expérimentation du péage urbain de Stockholm sont les suivants :

- réduire le nombre de véhicules entrant ou sortant de la zone de péage urbain pendant les périodes de pointe du matin et de l'après-midi/soir de 10 à 15%,
- améliorer le flux de trafic dans les rues et routes les plus fréquentées de Stockholm,
- réduire les émissions de CO₂, NO_x et autres particules dans l'air du centre ville,
- améliorer l'environnement urbain perçu par les résidents de Stockholm.

L'étude a priori

L'analyse des coûts-bénéfices effectuée par Transek AB a permis de faire en 2006 une évaluation *a priori* de l'expérimentation avant sa mise en place.

Elle aboutit à une monétarisation du projet, parfois sans préciser le détail des paramètres suivis, comme par exemple la liste des polluants autres que le CO₂ suivis.

A noter que le péage urbain a été couplé à une extension des services de bus (favoriser le changement de mode de transport) qui s'est révélée décevante du point de vue de cette analyse.

Polluants suivis

Les polluants suivis sont le CO₂, ainsi que d'autres polluants non listés dans l'étude.

Méthode

L'outil SamKalk a été utilisé pour calculer les émissions annuelles. Cet outil travaille avec comme données d'entrée les flux de trafic, qui dans la mesure du possible, correspondent aux flux surveillés et pour les flux restants (non surveillés), des liens sont calculés suivant le modèle pour correspondre aux flux surveillés.

Résultats/Analyse

Pour la période d'expérimentation d'une durée de 7 mois, l'étude estime, à l'aide de données de trafic calculées/simulées, la réduction des émissions de CO₂ à 43 kilotonnes par an (-2,7% de gaz à effet de serre dans le Comté de Stockholm), soit un gain annuel d'environ 590 millions € (64 millions de couronnes suédoises) pour la société.

Pour les autres émissions de polluants nocifs pour l'homme et l'environnement, on peut espérer une diminution entre -1,4% et -2,8% dans le Comté, soit un gain estimé à 100 millions € (11 millions de couronnes suédoises).

Globalement les bénéfices (en terme de trafic, de sécurité, d'environnement/santé, etc.), sont moins importants que les coûts générés (investissements et fonctionnement).

L'étude a posteriori

Après mise en place du dispositif en 2006, l'expérimentation a donné lieu à une évaluation *a posteriori* par Transek AB et reprise par la suite par la ville de Stockholm en décembre 2006.

Polluants suivis

Les polluants suivis sont le CO₂, ainsi que les NO_x, le CO, les particules PM10 et les COV.

Méthode

La situation avec le péage a été comparée avec celle imaginée pour l'année 2006 entière sans l'expérimentation.

Les calculs de l'évaluation des effets environnementaux sont basés sur les analyses de trafic faites en lien avec l'expérimentation. De plus, avant et pendant celle-ci, la qualité de l'air a été suivie à l'aide d'environ 20 stations dans la zone du grand Stockholm.

L'évaluation a été menée à différentes échelles : le centre ville de Stockholm, la ville de Stockholm et le Grand Stockholm (zone de 35 km x 35 km autour du centre ville).

Une simulation des émissions plus poussée a ensuite été faite à l'aide du logiciel ARTEMIS par catégorie de véhicules³⁴. Dans les deux situations (avec et sans le péage urbain), les calculs ont été faits pour un jour de semaine sur une période de 24h découpée en 4 plages horaires selon les heures de pointe/heures creuses³⁵.

Résultats/Analyse

Les résultats obtenus sont les suivants :

- pour le centre ville de Stockholm, les gains annuels en CO, PM10, COV et en CO₂ sont de l'ordre de -13/-14%,
- pour la ville de Stockholm, les gains en pourcentage sont moins importants, à savoir suivant les polluants, ils sont compris entre -2,7% pour les NO_x et -5,4% pour le CO₂. Cela est logique, vu que l'expérimentation du péage urbain a été faite uniquement pour le centre de Stockholm,
- pour le grand Stockholm (zone de 35 km x 35 km autour du centre ville), les gains oscillent entre -13% pour les NO_x et -2,9% pour le CO et les COV.

La simulation avec ARTEMIS a donné les résultats suivants.

Dans la zone à l'intérieur du péage urbain :

La réduction en terme de trafic total (km parcourus) est d'environ 15%, et de presque 18% pendant les heures de pointe. En général, les émissions diminuent dans les mêmes proportions.

La réduction des congestions diminue les émissions de 1% supplémentaire sur une période de 24h et de 2-3% en période de pics de trafic. Mais une plus grande proportion du trafic lourd, en particulier les bus, entraîne une augmentation des émissions, mais différemment selon les substances.

Dans le comté de Stockholm en dehors de la zone du péage urbain :

La réduction en nombre de km parcourus est moindre par rapport à la zone du péage urbain avec sur 24 heures une réduction de 1,58% et jusqu'à 2,70% pendant les heures de pointe.

Dans les deux cas, seul le nombre de km parcourus par les bus augmente, mais c'était prévisible vu que le péage urbain a été couplé à une extension des services de bus.

34 Cinq catégories : véhicules personnels (VP), véhicules utilitaires légers (VUL), poids lourds (PL), bus de ville, cars interurbains. La composition de la flotte de véhicules a été tirée du Swedish Motor Car Registry (registre d'immatriculation) du Comté de Stockholm.

35 Quatre plages horaires : 6h-9h, 9h-15h, 15-18h, 18-6h

Pour les deux zones, les émissions calculées avec ARTEMIS (NO_x, PM10, CO₂, CO, hydrocarbures) ont permis de voir quel était le pourcentage de réduction attendu et celui-ci a été comparé à la réduction en terme de km parcourus. Dans le cas de différences significatives, des explications sont fournies.

Comparaison a priori et a posteriori

Dans le centre de Stockholm, là où le péage urbain est appliqué, les gains a priori et a posteriori sont du même ordre de grandeur, sauf pour les particules où les résultats divergent. Toutefois, les résultats de l'étude a priori restent inférieurs en terme de tonnage à ceux de l'étude a posteriori.

Par contre, dans le Grand Stockholm, les résultats a priori en terme de tonnage sont clairement inférieurs à ceux a posteriori.

Centre	Gain en tonnes par an			Gain annuel %		
	PRIORI	POSTERIORI ³⁶	meilleur gain	PRIORI	POSTERIORI	meilleur gain
NO _x	-39 t/an	-45 t/an	posteriori	-6,8%	-8,5%	posteriori
CO	--	-670 t/an	--	--	-14%	--
PM10	-1,64 t/an	-21 t/an	posteriori	-9,4%	-13%	posteriori
COV	--	-110 t/an	--	--	-14%	--
CO ₂	-26 000 t/an	-36 000 t/an	posteriori	-14%	-13%	priori
CO	-312 t/an	--	--	Plus de -16%	--	--
hydrocarbures	-52 t/an	--	--	-15,4%	--	--

Comté	Gain en tonnes par an			Gain annuel %		
	PRIORI	POSTERIORI	meilleur gain	PRIORI	POSTERIORI	meilleur gain
NO _x	-10 t/an	-55 t/an	posteriori	-0,2 %	-1,3%	posteriori
CO	--	-770 t/an	--	--	-2,9%	--
PM10	0,410 t/an	-30 t/an	posteriori	-0,3 %	-1,5%	posteriori
COV	--	-130 t/an	--	--	-2,9%	--
CO ₂	16 000 t/an	-41 000 t/an	posteriori	-1,24 %	-2,7%	posteriori
CO	338 t/an	--	--	-2,3 %	--	--
hydrocarbures	44 t/an	--	--	-1,85%	--	--

36 Les données de l'évaluation correspondent à une période de 24h un jour de semaine. Afin de pouvoir comparer les deux études, on a multiplié les valeurs par 260 (nombre de jours de semaine par an).

1.2 Péage urbain de Londres

Projet

Le péage urbain est opérationnel depuis le 17 février 2003 dans le centre de Londres.

Il contribue directement à quatre des priorités en terme de transports de la mairie :

- réduire la congestion,
- faire des améliorations radicales dans les services de bus,
- améliorer la fiabilité des temps de parcours pour les usagers de voitures,
- rendre la livraison des marchandises et des services plus efficaces.

De façon plus générale, il génère des revenus utilisés pour soutenir la stratégie de la mairie dans le domaine des transports.

Transport for London (TFL) a réalisé une évaluation *a posteriori* de cette mesure en juin 2007.

Polluants suivis

Les polluants suivis sont le CO₂, les NO_x et les particules PM10.

Méthode

La différence en terme de véhicules kilomètres par an a été calculée par modélisation pour un coût de péage de £5 et un de £8 en comparant les années 2002 et 2003. Les véhicules pris en considération sont ceux qui ont 4 roues et plus hors bus et cars.

Ensuite, une économie en litres de carburant réalisée par an a été déduite.

L'étude considère par la suite un taux d'émission moyen en CO₂ d'un litre de carburant est de 2,5kg de CO₂ (en se basant sur un taux d'émission standard de 2,4kg par litre pour l'essence et de 2,7kg par litre pour le diesel) pour calculer un gain annuel en CO₂.

Résultats/Analyse

La réduction en émissions de polluants ne peut être seulement attribuée au péage urbain, mais aussi à l'évolution du trafic en général, et à l'amélioration des moteurs des véhicules. Le rapport a évalué la part attribuable au péage urbain.

Le péage urbain a tendance à faire diminuer les émissions dans la zone de péage : les émissions de NO_x ont diminué de 13,4% entre 2002 et 2003, dont 8% pouvant être attribué au seul péage, la différence pouvant être attribuée au changement de parc automobile entre ces deux années. A l'intérieur de la ceinture périphérique de Londres, les émissions ont diminué de 7%, dont 0,2% attribué au péage.

Pour les particules, dans la zone de péage, la diminution est de 16%, dont 6% peut être attribué au péage. Par contre, à l'intérieur de la ceinture périphérique, bien que les chiffres montrent une réduction globale de 7%, on observe une augmentation de 3% des émissions due au péage.

Le rapport prévoit une augmentation de 20% du trafic de bus et de cars. Bien que certains automobilistes se soient reportés sur les transports en commun (métro, train, bus) devenus plus attractifs, l'impact net est négligeable. Le gain monétaire est considéré en se basant sur des études antérieures comme marginal. D'après la note rédigée par l'AURIF à partir du site du péage urbain londonien la hausse de fréquentation pendant la période 7h-10h est estimée à 19%, passant de 76 000 à 91 000 passagers après 6 mois. Il est aussi estimé que le taux d'occupation moyen des voitures particulières entrant dans la zone a progressé de 10%.

Il s'agit d'un des effets pervers du péage urbain à Londres : il y a moins de circulation dans la zone de péage donc les émissions ont tendance à diminuer en centre ville. Par contre, l'effet est quasi-nul, voir négatif pour la zone plus étendue de Londres car les véhicules roulent plus pour contourner la zone de péage et créent un trafic additionnel.

2 Gestion dynamique des voies

2.1 Voie réservée bus-taxis sur l'A1 en région parisienne

Projet

Au printemps 2009, une voie réservée pour les taxis et les transports en commun a été mise en place sur l'A1 dans le sens Roissy-Paris entre Roissy-Charles de Gaulle et Paris Porte de la Chapelle. Cette voie, celle de gauche, est réservée de 7h à 10h sur 4,5km. Les objectifs étaient de fluidifier la circulation des taxis tout en minimisant la gêne et la congestion pour les autres usagers en gardant un bon niveau de sécurité.

L'étude a priori

Chanut, dans sa thèse professionnelle a étudié l'impact environnemental a priori de cette voie à l'aide de plusieurs modèles.

Polluants suivis

Les polluants suivis sont le CO₂, la consommations de carburant, le CO, les NO_x, les hydrocarbures et les particules.

Méthode

L'écoulement du trafic a été simulé à l'aide du logiciel AIMSUM pour deux situations distinctes :

- la situation de référence, sans la voie réservée
- le situation projet, avec la voie réservée

Pour chacune des deux situations, les véhicules ont été séparés suivant leur gabarit et leur circulation ou non sur la voie réservée en différentes classes : VL, PL, taxis, bus.

Il est prévu que la voie réservée soit ouverte de 7h à 10h. Afin d'appréhender au mieux les situations de congestion, la plage horaire de simulation est de 6h à 13h.

L'étape suivante de modélisation des émissions est différente suivant le type de modèle d'émissions utilisé.

Pour les modèles agrégés (IMPACT, ARTEMIS), le réseau a été découpé en tronçons homogènes du point de vue de la géométrie, de la demande de trafic, du nombre de voies, des limitations de vitesse. Ces sections ne contiennent pas d'échangeurs entre ses extrémités. Les bretelles d'entrée/sortie sont des tronçons à part. Les tronçons font en général autour d'un kilomètre. La voie réservée a été traitée comme un réseau en parallèle. Les données AIMSUM sont calculées toutes les minutes

Pour le modèle instantané utilisé (appelé « INST » et construit sur mesure), les émissions sont calculées véhicule par véhicule à partir des vitesses et accélérations instantanées. Le pas de calcul choisi pour AIMSUM est de 2 secondes pour des raisons de temps de génération de données et de calcul. Tous les calculs ont été faits en ne prenant pas en compte l'accélération dans le modèle, sauf pour le CO₂ et les consommations où les deux cas ont été modélisés.

Résultats/Analyse

La comparaison des résultats pour la situation de référence des trois modèles montre qu'ils sont cohérents en ce qui concernent les émissions de CO₂ et les consommations de carburants. Par contre les émissions de CO et de NO_x peuvent varier du simple au double selon le modèle utilisé : ARTEMIS a un résultat 2 fois plus élevé pour le CO et IMPACT donne 2 fois moins d'émissions de NO_x. Les hydrocarbures et les particules émis comportent des différences notables.

La prise en compte de l'accélération dans INST majore les émissions de CO₂ et les consommations.

L'analyse plus en détail de l'impact du projet suivant les sections montre que INST paraît plus efficace pour modéliser les sur-émissions dues aux congestions.

Les résultats globaux montrent des disparités suivant le modèle employé. Les gains sont compris entre 4 et 19% pour le CO. Des sur-émissions sont observées pour le CO₂, les hydrocarbures et les consommations de carburants, respectivement de l'ordre de +0,3 / +8%, +10 / +18% et +0,3 / +4%.

Certains polluants présentent des résultats divergents : les émissions de NO_x varient entre -1% et +7% et celles des particules entre -11% et +4%.

L'étude a posteriori

Les résultats de l'étude *a posteriori* sont partiels et sont extraits de l'article de la Revue Générale des Routes et des Aéroports (RGRA) publié en mai 2010.

Polluants suivis

Les polluants suivants sont les gaz à effet de serre, sans plus de précisions.

Méthode

La méthode utilisée n'est pas explicitée.

Résultats/Analyse

L'évaluation des impacts environnementaux montre une augmentation globale de 3% des gaz à effet de serre sur l'A1. Celle-ci est en particulier plus significative sur une des sections du fait de la conjugaison des facteurs d'émissions due à l'accroissement des trafics et la diminution des vitesses sur les voies non réservées.

Comparaison a priori et a posteriori

L'augmentation de 3% des gaz à effet de serre de l'étude a posteriori est compatible avec les émissions modélisées de l'étude a priori comprises entre +0,3% et 8%.

2.2 Circulation sur bande d'arrêt d'urgence, M42, Londres, Grande-Bretagne

Projet

Dans le rapport publié en juin 2008 par Highways Agency, le projet anglais ATM sur la M42 entre Londres et Birmingham a été évalué.

Les problèmes identifiés sur la section Londres-Birmingham de la M42 étaient :

- un fort trafic dans les deux sens de circulation de l'autoroute,
- des problèmes au niveau des insertions sur des échangeurs,
- un taux d'accident plus élevé que la moyenne associé avec les insertions,
- de la congestion à l'heure de pointe du matin,
- des problèmes associés avec un fort volume de bus et cars (Palais des Congrès, aéroport).

Le principal objectif du projet ATM (« Active Traffic Management ») est de réduire les congestions en autorisant l'usage dynamique de la bande d'arrêt d'urgence comme voie de circulation pendant les heures de pointe et les périodes de congestion ou d'incidents.

De plus, le projet comporte des mesures complémentaires, à savoir, l'utilisation de limites de vitesses réglementaires dynamiques, la création de refuges pour les véhicules en panne et l'installation de portiques avec des panneaux à messages variables.

L'analyse compare deux situations :

- la situation avant : la situation de référence avant projet ATM étudiée sur la période 2002-2003
- la situation après : l'opération « limite de vitesse variable 4 voies » (c'est-à-dire le projet complet depuis septembre 2006) étudiée entre octobre 2006 et septembre 2007

La période phase intermédiaire « limite de vitesse variable 3 voies » (c'est-à-dire le projet partiel entre mars 2003 et septembre 2006) a été étudiée entre janvier et août 2006 et a seulement fait l'objet d'une comparaison partielle avec la situation du projet complet.

L'évaluation environnementale a uniquement été faite entre la situation avant et la situation après entre les hivers 2003 et 2006.

Polluants suivis

Les polluants qui ont été suivis sont le CO, les particules PM10, le CO₂, les NO_x, les hydrocarbures et la consommation de carburant.

Méthode

La méthodologie adoptée pour évaluer l'impact de la mesure a consisté à mesurer les caractéristiques de conduite avant et après l'implémentation du projet ATM. Les données des véhicules instrumentés ont été évaluées en utilisant les modèles MODEM (pour les voitures) et PHEM (pour les poids lourds) afin d'estimer les émissions à chaque voyage. Les émissions ont été évaluées pour différentes catégories de véhicules et différents standards Euro pour refléter les variations d'émissions de véhicules d'âges différents.

Ces émissions ont ensuite été combinées en se basant sur la composition de la flotte nationale prévue et sur les trafics horaires pour obtenir les émissions totales sur l'autoroute.

Les changements autres que le projet intervenus entre 2003 et 2006, mais pouvant avoir eu une influence sur le projet, sont listés.

La suite du rapport d'évaluation se penche sur l'estimation des concentrations de CO et NO₂ à l'aide de mesures périodiques et à long terme. Cet aspect n'est pas abordé dans la suite, se référer au rapport si de plus amples informations sont nécessaires.

Résultats/Analyse

Une fois l'influence des autres paramètres autres que l'ATM soustraite, les émissions de CO ont diminué de 4% entre l'hiver 2003 et l'hiver 2006, celles de particules de 10%, celles de CO₂ de 4% et celles des NO_x de 5%. La consommation de carburant a diminué de 4%.

Les émissions d'hydrocarbures ont augmenté de 3%. Cette hausse est considérée dans le rapport comme une anomalie probable dans le procédé de modélisation. Elle apparaît uniquement pour les voitures, c'est-à-dire qu'elle réside à l'intérieur du modèle MODEM.

La réduction des émissions s'explique par la réduction des vitesses hautes, une homogénéisation des profils de vitesses et une réduction des périodes congestionnées à faible vitesses.

Le rapport considère que ce genre de système peut permettre de diminuer les émissions de 5 à 10%, mais que cette réduction sera toujours moins importante que celle obtenue par les technologies de contrôle des émissions.

Le rapport précise que les réductions d'émissions sont similaires à celles obtenues dans deux études sur l'impact de la régulation de vitesse sur la M25.

De plus, entre 2003 (lancement du projet sur la M42) et 2006 (évaluation), il y a eu un certain nombre de facteurs qui ont influencé les changements dans la qualité de l'air ambiant. Bien que ATM soit un des facteurs ayant eu de l'influence, il n'est pas possible d'isoler son impact sur la qualité de l'air.

2.3 Circulation sur bande d'arrêt d'urgence, A4-A86, Val-de-Marne

Projet

La mise en place de la mesure d'utilisation de la bande d'arrêt d'urgence sur l'A4-A86 en région parisienne a fait l'objet d'une évaluation *a posteriori* par l'INRETS en 2007.

Afin de diminuer les importantes congestions récurrentes sur le tronçon commun A4-A86, la DIRIF a décidé d'expérimenter l'utilisation de la bande d'arrêt d'urgence comme voie de circulation auxiliaire. L'expérimentation a débuté à partir de l'été 2005 sur une distance de 2200m, uniquement pendant les heures de pointe, c'est-à-dire pendant les périodes de forte demande.

Des mesures complémentaires ont aussi été mises en œuvre pour fluidifier l'amont de la zone d'expérimentation : toutes les bretelles d'insertion ont été équipées de feux de régulation d'accès et les insertions sur la section courante ont été aménagées. Un système de détection automatisée des incidents, ainsi que des radars viennent compléter le projet.

La voie auxiliaire a pour objectif de traiter à la fois la congestion récurrente (demande devient supérieure à l'offre) et la congestion accidentelle (due à un accident/incident, des travaux).

Polluants suivis

Les polluants suivis sont le CO, les NO_x, le SO₂, les particules, les COV, ainsi que la consommation de carburant. Pour les gaz à effet de serre, une valeur en équivalent CO₂ a aussi été évaluée à partir des concentrations des 3 gaz suivants : CO₂, CH₄ et N₂O.

Méthode

L'évaluation environnementale a consisté à comparer la situation 2003 avant aménagement (situation de référence : 4 voies avec BAU) avec la nouvelle configuration 2006 après aménagement (4 voies avec voie auxiliaire).

Les trafics ont été mesurés par le biais de stations de comptage. Ces données, ainsi que la longueur des tronçons étudiés ont ensuite été importées dans des modèles de calcul appropriés, en particulier IMPACT-ADEME (modèle Copert III) pour évaluer les émissions.

Les six tronçons, deux sens confondus, ont des longueurs comprises entre 6 et 14km. Les données de trafic entrées sont les débits journaliers par type de véhicules (VL,PL) et les vitesses moyennes sur 24h et par type de jours (jours ouvrables, samedis ou dimanches).

Résultats/Analyse

Les émissions par type de jours sont disponibles dans le rapport. Globalement, l'impact environnemental de la mesure est positif sur le réseau d'influence. Les émissions et la consommation diminuent. La réduction atteint 20% pour les oxydes d'azote, 39% pour le monoxyde de carbone et plus de 85% pour le dioxyde de soufre. Elle est de 4,25% pour les gaz à effet de serre, de 15% pour la consommation d'essence et de 1% environ pour le diesel.

Elle est attribuée à l'amélioration du niveau de service de circulation, suite à l'utilisation de la voie auxiliaire et dans une moindre mesure à l'effet de la réglementation, l'évolution du parc et de l'amélioration des carburants entre les années 2003 et 2006.

2.4 Voie Spécialisée Partagée A48, Grenoble

Projet

La voie spécialisée partagée (VSP) de Grenoble est l'aménagement de la bande d'arrêt d'urgence en voie de circulation pour les autocars des lignes régulières aux heures de pointe, notamment le matin.

Son objectif est d'améliorer la vitesse commerciale des transports en commun passant par l'A48. Elle est opérationnelle depuis le 3 septembre 2007.

Elle est ouverte uniquement en période de congestion dès lors que les vitesses moyennes parcourues sur la section courante passent en dessous d'un certain seuil. En cas d'incident, elle est automatiquement fermée. Quand la VSP est activée, la vitesse est limitée à la fois sur la section courante et sur la VSP.

Le ZELT a produit une évaluation de cet aménagement en 2008.

Polluants suivis

Les polluants qui ont été suivis sont le CO, les NO_x, les COV, les particules, le CO₂ et le SO₂. La consommation de diesel et d'essence a aussi été estimée.

Méthode

L'outil qui a été utilisé pour élaborer l'évaluation environnementale est IMPACT-ADEME 2.0.

En entrée du modèle, la plupart des données sont fixes :

- la zone d'étude a été découpée en deux tronçons de 1,8 km : un avant et un après la bifurcation
- le trafic horaire est celui mesuré en juin 2008 par deux stations de comptage SIREDO en amont et en aval de la bifurcation.
- la proportion de PL est fixe, soit 8% en amont de la bifurcation et 2% en aval
- le nombre de cars circulant par jour est fixé à 15 par heure.
- le coefficient de charge des PL a une valeur de 50%
- la clé de répartition des véhicules particuliers dans les véhicules légers est de 77%.

Seules les vitesses varient :

- celles des cars sont issues de mesures manuelles en juin 2008 et en juin 2006.
- la vitesse des autres véhicules a été supposée
 - constante avant la bifurcation (45km/h, vitesse moyenne pondérée de la station)
 - réduite de 4km/h par rapport à la vitesse moyenne après la bifurcation à cause de la diminution de la vitesse réglementaire en section courante quand la voie est ouverte.

La plage horaire d'étude est 7h-9h, 185 jours par an (jours ouvrables hors vacances scolaires)

Résultats/Analyse

L'impact de la voie spécialisée partagée est visible pour les cars pouvant circuler sur la bande d'arrêt d'urgence :

- une réduction de 3,8% de la consommation de diesel, 3,7% pour les particules, 3,6% pour le SO₂, 3,9% pour le CO₂
- une augmentation des émissions en NO_x de 0,6%, mais surtout 7,1% de composés organiques volatils en plus.

Par contre, quand on prend en compte tous les véhicules, les variations globales sont négligeables, étant généralement inférieures à 1%.

3 Régulation de vitesse

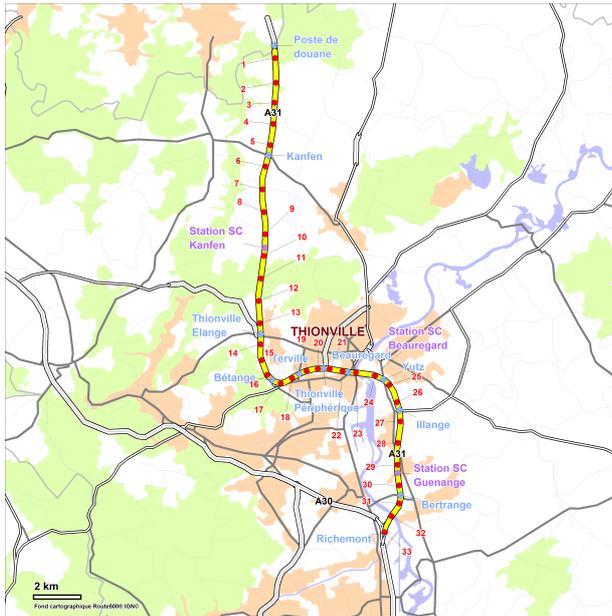
3.1 Régulation de vitesse sur le Sillon Lorrain

Projet

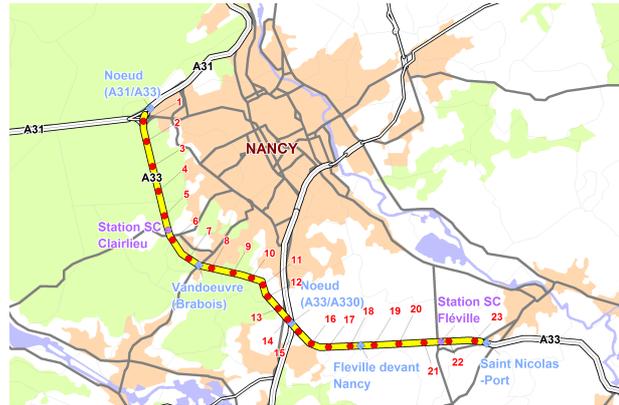
La décision de mettre en place la régulation de vitesse dans le Sillon Lorrain a été prise suite à l'actualisation de l'APS relatif à la gestion des trafics sur le Sillon Lorrain (MYRABEL). En effet, l'objectif était d'optimiser le fonctionnement des axes et de permettre une meilleure maîtrise des flux de trafic en déployant des mesures dynamiques de gestion de trafic. Le CETE de Lyon a produit en 2011 une évaluation *a priori* de cette mesure.

La régulation de vitesse a été appliquée sur 2 sections disjointes, 1 seul sens à la fois à l'heure de pointe soit du matin, soit du soir.

Section Nord (régulation SN matin et NS soir)



Section Sud (régulation EO matin)



Polluants suivis

Les polluants suivis ont été les gaz à effet de serre (CO_2) et les polluants locaux (CO, NO_x , COV, PM10 et consommation de carburant)

Méthode

La comparaison des émissions de polluants sans régulation (état 0) et avec régulation s'est faite à partir des résultats de la simulation dynamique (logiciel AIMSUM) où ont été modélisés les débits et vitesses VL et PL en différents points du réseau toutes les 6 minutes, uniquement pendant les plages de mise en place de la régulation.

Le réseau simulé a été découpé finement en tronçons de 800 m en moyenne (de 0,500 à 1km), suivant les échangeurs et les pentes. AIMSUM a permis d'obtenir des données (débit et vitesse) toutes les 6 min, pour les VL et les PL.

Ces données ont ensuite été insérées dans le logiciel COPCETE, qui à partir de paramètres globaux de conditions d'écoulement du trafic, a estimé pour chaque état les émissions suivantes :

- la consommation de carburant ;
- les émissions d'un gaz à effet de serre (GES) : dioxyde de carbone (CO_2) ;
- les émissions de polluants locaux : monoxyde de carbone (CO), oxyde d'azote (NO_x), composés organiques volatiles (COV), particules.

Les réglages suivants ont été faits dans COPCETE, vu que le réseau concerné était autoroutier : pas de prise en compte des évaporations, pas de démarrage à froid, pas d'arrêts pendant la période, utilisation du parc INRETS, réglage des autres paramètres avec les valeurs par défaut du logiciel.

Les valeurs retenues pour la monétarisation des émissions de polluants sont issues, pour le carburant, du rapport Chapulut, pour le CO_2 , du rapport Boiteux, et pour les polluants locaux, des valeurs du guide méthodologique du Victoria Transport Policy Institute, reprenant un rapport précédent de la Commission européenne.

Ces valeurs ont été actualisées en euros 2010.

Résultats/Analyse

Pour chacun des scénarii de régulation, les gains en émission de polluants ont été calculés avec COPCETE sur la plage horaire de régulation par jour, ainsi que pour une activation de 150 jours/an.

Les gains espérés pour chacune des sections sont les suivants:

Partie Nord, sens SN, 6h30-9h15	Écart journalier	Gain annuel (en tonnes d'émission)*
<i>Consommation de carburant</i>	-278 kg (-1,95%)	41,797
CO ₂	-870 kg (-1,94%)	130,573
CO	-2,55kg (-3,37%)	0,382
NO _x	-6,49kg (-3,07%)	0,974
COV	-0,17kg (-1,76%)	0,026
<i>Particules</i>	-0,63kg (-2,42%)	0,094

Partie Nord, sens NS, 16h30-19h	Écart journalier	Gain annuel (en tonnes d'émission)*
<i>Consommation de carburant</i>	-305 kg (-3,01%)	45,873
CO ₂	-957 kg (-3,00%)	143,526
CO	-2,61 kg (-5,14%)	0,392
NO _x	-5,01 kg (-3,27%)	0,752
COV	-0,39kg (-5,70%)	0,058
<i>Particules</i>	-0,23kg (-1,19%)	0,034

* Activation de la régulation 150 jours par an

Partie Sud, sens EO, 7h15-9h45	Écart journalier	Gain annuel (en tonnes d'émission)*
<i>Consommation de carburant</i>	- 375 kg (-0,47%)	5,620
<i>CO₂</i>	- 117 kg (-0,47%)	17,524
<i>CO</i>	- 0,56kg (-1,34%)	0,084
<i>NO_x</i>	- 0,57kg (-0,46%)	0,085
<i>COV</i>	+ 0,05kg (+0,96%)	-0,007
<i>Particules</i>	- 0,15kg (-0,91%)	0,023

Les gains environnementaux sont plus significatifs sur la partie nord que la partie sud.

La valorisation socio-économique laisse espérer un gain annuel global de l'ordre de 850 k€ au total sur les 3 sections, apportés à 60 % par des gains de temps, mais également à plus de 25% par des gains de sécurité et 10 % par des gains environnementaux.

3.2 Régulation de vitesse sur l'A7

Projet

L'INRETS dans son guide méthodologique de 2008 sur la régulation de vitesse consacre un chapitre à l'évaluation *a posteriori* de la mesure de régulation de vitesse sur l'A7. L'autoroute A7 rencontre depuis longtemps des problèmes de congestion lors des grandes migrations estivales. Il est donc logique qu'elle ait fait l'objet d'une expérimentation de régulation de vitesse en 2004.

Dans un premier temps, la régulation a été activée dans le seul sens Sud-Nord pendant le mois d'août, avant qu'elle ne soit testée dans les deux sens pendant les mois de juillet et août 2005. La régulation est uniquement activée en phase de pré-congestion.

L'évaluation présente les résultats pour le sens Sud-Nord en 2004 et en 2005, ainsi que pour le sens Nord-Sud en 2005 en prenant uniquement en compte les périodes d'activation du dispositif.

Polluants suivis

Les polluants suivis sont la consommation de carburant, le CO, le CO₂, les NO_x et les particules (PM).

Méthode

L'évaluation se base sur des calculs effectués avec IMPACT-ADEME, en séparant deux situations : la situation de pré-congestion où la mesure est activée et la situation de congestion sur laquelle la mesure peut avoir une influence (moment d'apparition, dureté, durée de la congestion).

Les paramètres suivants ont été entrés dans le logiciel : 77% de voitures particulières parmi les véhicules légers, 50% pour le taux de chargement des PL et maximum 100 km/h pour ces derniers.

Pour chacune des situations, on compare les périodes où la mesure a été activée dans le sens Sud-Nord en 2004 avec ces mêmes périodes sans régulation, avec comme données d'entrée, le nombre de VL et de PL régulés et la vitesse moyenne des véhicules sans distinction VL/PL.

La même opération est faite pour chacun des sens pour l'année 2005.

Les impacts sont calculés en fonction de la durée totale d'activation par sens et par année et du nombre de véhicules soumis à la régulation.

Les émissions en phase de pré-congestion sont ensuite transformées en gains, à l'aide du prix moyen du litre de carburant en 2004 et 2005 (deux sens combinés).

En situation de congestion, les gains environnementaux sont calculés à partir du volume d'encombrement à l'aide du rapport Boiteux 2.

Résultats/Analyse

En situation de pré-congestion où la régulation de vitesse est appliquée, on observe les variations d'émissions suivantes :

Variation avec/ sans régulation	Pré-congestion 2004 Sud-Nord	Pré-congestion 2005 Nord-Sud	Pré-congestion 2005 Sud-Nord
CO	-12%	-7%	-6%
CO ₂	-4%	-2%	-2%
NO _x	-3%	-1%	-2%
PM	-6%	-3%	-3%
Consommation essence	-5%	-2%	-3%
Consommation diesel	-4%	-2%	-1%
Vitesse moyenne	-3,4 km/h	-3,1 km/h	-2 km/h
Proportion de PL	10%	10%	13%
Véhicules régulés	466 012 VL 51 779 PL	508 531 VL 56 507 PL	699 264 VL 104 488 PL

Les gains les plus importants sont observés pour le CO avec des baisses comprises entre 6 et 12%. Les autres gains sont compris entre -1% et -6%.

Les gains en 2005 sont du même ordre de grandeur pour les deux sens de circulation, même si le nombre de véhicules régulés dans chaque sens n'est pas équilibré (+37% de VL et +85% de PL dans le sens SN).

La valorisation des gains de la régulation de vitesse lors de la situation de pré-congestion et de celle de congestion donne :

	Pré-congestion 2004	Pré-congestion 2005	Congestion 2004	Congestion 2005	Total
Consommation essence	60 489€	160 259€	38 466€	348 640€	607 854€
CO ₂	13 150€	26 476€	8 343€	57 138€	105 107€
Pollution atmosphérique	5 452€	11 735€	1 278€	8 815€	27 280€
Total	79 091€	198 470€	48 093€	414 593€	740 247€

4 Régulation d'accès

4.1 Régulation d'accès généralisée sur l'est de l'Île de France

Projet

La DIRIF a mis en place en janvier 2008 la régulation d'accès sur 17 accès situés à l'est de Paris sur les autoroutes A86 dans les deux sens de circulation (intérieur « I » et extérieur « E »), A4 dans les deux sens (Y et W) et A6BY dans le sens province.

Les gains attendus sont les suivants:

- Réduction de temps de parcours global.
- Augmentation de la vitesse moyenne de circulation sur le tronçon concerné.
- Diminution significative des bouchons.
- Stabilisation des temps de parcours sur un même trajet.

Cette mise en place a eu lieu dans le cadre d'un programme plus global d'équipement de 74 bretelles autour de l'autoroute A86, principal diffuseur du trafic vers Paris et vers la province, dans les 2 sens et dans sa totalité.

L'INRETS a évalué *a posteriori* l'impact sur les conditions de trafic de la régulation d'accès généralisée sur cette partie est des autoroutes de l'Île de France. Cette évaluation comporte une partie environnementale.

Polluants suivis

Les polluants suivis sont les hydrocarbures et le CO, ainsi que la consommation de carburant.

Méthode

Le réseau a été découpé en cinq morceaux selon le nom de l'axe et le sens : A4W, A4Y, A86I, A86E et A6BY. Ces tronçons font entre 12 et 23 km.

L'évaluation est découpée en deux parties : sans accident sur le réseau et avec accident. Ensuite chaque tronçon est évalué par période (6h30-20h, 6h30-10h30, 15-20h) en comparant la situation sans régulation (c'est-à-dire sans contrôle) et avec.

La consommation de carburant en véhicules-litres est calculée par une formule complexe extraite de Jurvillier.

Les émissions de polluants sont calculées à l'aide de formules numériques fonction de la variation totale du temps de parcours (temps total passé ou TTP) en véhicules-heures et de la variation totale de la longueur de parcours (distance parcourue totale ou DTP) en véhicules-kilomètres, afin de ne pas avoir à recourir à des calculs complexes nécessitant une connaissance approfondie du parc de véhicules et de ses formules d'émissions par type de véhicules.

Les formules simplifiées sont issues du projet européen INRESPONSE et sont le résultat d'un étalonnage des valeurs d'émissions moyennes pour un véhicule moyen du parc fournies par le projet européen MEET.

Elles se retrouvent aussi dans le guide sur la régulation de vitesse de l'INRETS où elles sont appelées « modèle analytique ADEME-INRETS » et permettent de calculer les émissions de CO, CO₂, hydrocarbures, ainsi que la consommation de carburant. Cette dernière formule pour la consommation est plus simple que celle utilisée dans l'évaluation de la régulation d'accès.

Les paramètres à entrer dans les formules sont calculés à partir des données des stations de comptage : le TTP est estimé à partir du taux d'occupation des véhicules et le DTP à partir du débit.

Résultats/Analyse

La régulation d'accès a un impact positif quelque soit l'axe considéré. On observe une variation selon l'axe et la période des deux paramètres présents dans les formules :

- le temps passé diminue entre 3% et 15%, ce qui aurait tendance à faire diminuer les émissions et la consommation.
- la distance parcourue augmente entre 2% et 12%, ce qui aurait comme conséquence d'augmenter les émissions et la consommation.

Bien que la relation entre les émissions et ces deux paramètres soient linéaires, globalement on observe un gain des émissions de l'ordre de 1% à 30% selon l'axe et la période.

5 Systèmes d'aide à la gestion de trafic (SAGT)

5.1 Projet Gentiane à Grenoble

Projet

L'opération Gentiane est le projet d'exploitation des VRU de la communauté d'agglomération grenobloise, en particulier avec la création du PC d'exploitation des VRU mutualisé, appelé aujourd'hui PC Gentiane à Grenoble. La ZELT a produit une évaluation *a priori* du projet.

Les objectifs du projet Gentiane affichés dans le rapport *a priori* de la ZELT en novembre 2004 étaient les suivants :

- Améliorer la sécurité,
- Faciliter les reports modaux,
- Limiter la dureté des encombrements,
- Gérer les crises,
- Favoriser l'intermodalité,
- Appliquer le plan pollution de l'air.

Pour ce dernier point, les stratégies prévues afin de diminuer les congestions étaient les suivantes :

- L'information des usagers,
- La limitation des vitesses à 70km/h,
- Le contrôle des vitesses,
- Favoriser le covoiturage.

L'impact sur les congestions récurrentes des stratégies suivantes est envisagé dans le rapport *a priori* de la ZELT pour le projet Gentiane : la régulation de vitesse, la régulation d'accès, l'incitation au report modal, l'information avant le déplacement.

Polluants suivis

Les polluants suivants ont été pris en compte dans l'évaluation : la consommation de carburant, les émissions de polluants et celles des gaz à effet de serre.

Méthode

L'évaluation calcule les gains annuels que l'on peut attendre grâce à la mise en place du système. La comparaison se fait entre la situation avant la mise en place du projet et la situation projetée une fois le système en place. La méthode est de calculer le nombre de véhicules.kilomètres (veh.km) évités et ensuite de le multiplier par les valeurs tutélaires du rapport Chapulut.

Le calcul des veh.km se fait à partir du temps épargné dans les bouchons et en supposant que les vitesses passent de 30km/h à 50km/h avec le projet Gentiane.

Afin de simplifier les calculs, des valeurs moyennes ont été prises pour le carburant : la même densité pour l'essence et le diesel ; et une valeur tutélaire moyenne pour la consommation de carburant pour tous les véhicules, véhicules légers ou poids lourds.

Pour les gains de carburants, un modèle a été développé par l'INRETS et l'ADEME (évoqué par Zerguini), sous forme de courbes représentant la consommation de carburant (essence ou diesel) en fonction de la vitesse.

Le calcul des gains en émissions de polluants est calqué sur le calcul des gains sur les coûts d'exploitation des véhicules.

Les calculs des gains en émissions en gaz à effet de serre ont été faits à partir de la consommation de carburants.

Résultats/Analyse

Les différents gains annuels sont évalués à environ 0,03 million d'euros₂₀₀₃ pour la consommation de carburants, 0,01 million d'euros₂₀₀₃ pour les émissions de polluants et 7 000euros₂₀₀₃ pour les gaz à effet de serre. Ces gains sont négligeables par rapport à ceux gagnés sur le temps perdu et la sécurité.

Le rapport porte aussi un regard critique sur la méthode d'évaluation utilisée et sur les données d'entrée qui donnent une estimation très approximative. En particulier, sur le fait que l'impact est minoré par la non prise en compte des variations de vitesse, surtout son augmentation suite à la baisse du volume de congestion entraînant moins d'émissions.

Les différents gains calculés sont tous proportionnels à la distance parcourue et varient donc dans les mêmes proportions. On ne prend en compte que le report de trafic en veh.km et non les véhicules qui bénéficient des modifications de vitesse.

5.2 Gutenberg, Strasbourg

Le projet Gutenberg est le projet d'exploitation des VRU de Strasbourg avec la création d'un PC du même nom.

Projet

Le projet Gutenberg est le projet d'exploitation des VRU de Strasbourg avec la création d'un PC du même nom.

Les objectifs du projet affichés sont les suivants :

- Améliorer l'intervention sur accident,
- Limiter sur le réseau les répercussions dues aux perturbations non récurrentes prévisibles (travaux) et non prévisibles (accidents),
- Assurer la continuité des autoroutes de liaison et maintenir la capacité,
- Gérer les situations de pics de pollution.

La ZELT a produit deux évaluations du projet : une *a priori* et une *a posteriori* .

L'étude a priori

Polluants suivis

Sont estimés dans l'évaluation de la ZELT, le gain en consommation de carburants et celui des impacts des polluants.

Méthode

Deux situations ont été comparées :

- la situation prévisible en 2006 en absence du projet : il s'agit d'une extrapolation de la situation de référence mesurée en 2002 ;
- la situation prévisible en 2006 après mise en œuvre du projet GUTENBERG

Les mêmes courbes du modèle INRETS-ADEME que pour l'évaluation *a priori* de Gentiane ont été utilisées. Les seules différences sont que l'on suppose que les vitesses passent de 45 à 65km/h avec le projet Gutenberg, et que les véhicules reportés considérés sont tous des véhicules légers.

Les gains sont calculés à partir du nombre de véhicules kilomètres (veh.km) évités et de valeurs tutélaires du rapport Chapulut.

Résultats/Analyse

Les différents gains annuels sont évalués à environ 6000 euros pour la consommation de carburants, 2000 euros₂₀₀₃ pour les émissions de polluants (pollution de l'air et gaz à effet de serre). Ces gains sont marginaux par rapport à ceux gagnés sur le temps perdu et la sécurité.

L'étude a posteriori

Polluants suivis

Les polluants suivis sont les suivants : CO₂, CO, SO₂, COV, particules, NO_x. La consommation de carburants est aussi utilisée pour mesurer l'impact environnemental du projet.

Méthode

L'évaluation des impacts environnementaux s'est déroulée de deux façons :

- par le recueil des données (concentrations) de stations de mesures de l'agence strasbourgeoise de l'air (ASAP) à proximité du réseau Gutenberg, soit 3 stations de mesures,
- par modélisation avec IMPACT-ADEME des émissions de polluants à partir des débits et des vitesses moyennes par sections supposées homogènes dans la zone d'influence des stations SIREDO disponibles en 2002 et 2007, soit 16 stations de comptage.

Résultats/Analyse

Les stations de mesures de qualité de l'air de l'ASAP utilisées sont :

- la station Clémenceau est jugée proche de la station SIREDO Cronembourg et traduit la situation au centre du réseau Gutenberg
- la station Illkirch est proche de la station SIREDO Vigie et traduit la situation dans la partie sud du réseau Gutenberg.

Les moyennes calculées sur la période de 30 jours font apparaître les fluctuations suivantes :

mesures	CO	NO ₂		NO		particules
Variations	-37%	+7%	+27%	-14%	-7%	+20%
Stations mesures	Clémenceau	Illkirch	Clémenceau	Illkirch	Clémenceau	Clémenceau

Pour le logiciel IMPACT-ADEME, le calcul est fait sur une base horaire et concatène une situation moyenne de la pointe du matin (7h-9h30) et de la pointe du soir (16h30-19h). Les résultats font apparaître sur la section Cronembourg du réseau Gutenberg une stagnation de la consommation de diesel et une baisse de 22 % de la consommation d'essence.

Pour les émissions de polluants calculées avec IMPACT, on obtient :

Impact Ademe	CO ₂	CO	NO _x	SO ₂	COV	particules
section Cronembourg	-5%	-51%	-31%	-85%	-45%	-46%

Il semble qu'il y ait confusion entre concentration et émission dans le rapport, puisque il est noté qu'il existe des divergences dans les résultats obtenus entre les mesures de qualité de l'air (concentrations) et les sorties IMPACT (émissions), alors expliquées par la différence de pas de temps pris en compte : respectivement moyenne journalière et estimation aux heures de pointe.

5.3 ERATO, Toulouse

Projet

ERATO est le Centre d'Ingénierie et de Gestion du Trafic des VRU de Toulouse. La ZELT a produit une évaluation *a posteriori* du projet.

Polluants suivis

Les polluants suivis sont la consommation de carburant (essence et diesel), le CO, les NO_x, les COV, les particules, le CO₂ et le SO₂.

Méthode

La méthodologie employée consiste à comparer la situation de référence de 2004 et la situation avec projet de 2008 en utilisant le logiciel IMPACT-ADEME avec comme données d'entrée des données de comptage. Le périmètre d'étude est l'ensemble du périphérique et des pénétrantes ASF, soit 48km.

Des mesures de qualité de l'air ont aussi été effectuées par l'Observatoire Régional de l'Air Midi-Pyrénées grâce à une station installée en décembre 2005 sur une section du périphérique intérieur.

Afin de mieux dissocier l'effet de la composition de la flotte par rapport à l'effet des données de trafic d'entrée, différents scénarii ont été testés pour deux stations de trafic et comparés dans IMPACT-ADEME. Il en ressort que l'effet de la flotte est prépondérant sur l'effet trafic pour la plupart des émissions des polluants suivis, mis à part pour la consommation de diesel où l'effet flotte est négligeable et le CO₂ où l'effet trafic est 2 à 3 fois supérieur à l'effet flotte.

Du coup, le rapport préfère ne pas apporter de conclusion concernant la qualité de l'air.

Résultats/Analyse

Les sorties d'IMPACT montrent qu'entre 2004 et 2008, avec les données des heures de pointe, la consommation d'essence a diminué de -13,3%, celle de diesel de -0,2%. Pour les polluants, sur la même période, on observe une diminution de -46,5% pour le CO, -23,2% pour les NO_x, -35,4% pour les COV, -41,3% pour les particules, -3% pour le CO₂, -85,2% pour le SO₂ et -2,7% pour les gaz à effet de serre.

Il semble qu'il y ait confusion entre concentration et émission quand le rapport précise que les résultats IMPACT et les mesures ORAMIP sont cohérents entre eux alors que l'on compare des émissions avec des concentrations.

5.4 CIGT de Nantes

Projet

Le projet intitulé Projet 44 est le projet d'exploitation des VRU de Nantes avec entre autres la création d'un PC. La ZELT a produit une évaluation *a priori* du projet.

Polluants suivis

Les polluants suivants ont été pris en compte dans l'évaluation : la consommation de carburant, les émissions de polluants et celles des gaz à effet de serre.

Méthode

L'évaluation calcule les gains annuels que l'on peut attendre grâce à la mise en place du système en comparant deux états de référence :

- la situation prévisible en 2011 sans le projet, obtenue par extrapolation à partir de l'état zéro mesuré avant mise en place du projet, ici, l'année 2004
- la situation prévisible en 2011 (il était prévu que le projet soit achevé courant 2010) avec le projet, obtenue par extrapolation et à partir d'hypothèses sur les impacts du projet.

.Pour les gains de carburant, les mêmes courbes du modèle INRETS-ADEME que pour l'évaluation *a priori* de Gentiane ont été utilisées.

Le calcul des veh.km se fait à partir du temps épargné dans les bouchons et en supposant que les vitesses passent de 30km/h (en congestion) à 50km/h avec le projet Gentiane pour les véhicules ayant pu modifier leur itinéraire ou leurs horaires de déplacement.

La méthode consiste à calculer le nombre de véhicules.kilomètres (veh.km) évités et ensuite de le multiplier par les valeurs tutélares du rapport Chapulut.

Résultats/Analyse

Les différents gains annuels sont évalués à environ 0,033 million d'euros₂₀₀₅ pour la consommation de carburants, 0,014 million d'euros₂₀₀₅ pour les émissions de polluants et 7000euros₂₀₀₅ pour les gaz à effet de serre. Ces gains sont négligeables par rapport à ceux gagnés sur le temps perdu et la sécurité.

5.5 Hyrondelle, Saint Étienne

Projet

Le projet Hyrondelle est le projet d'exploitation des VRU de Saint Étienne avec la création d'un PC du même nom. La ZELT a produit une évaluation *a priori* du projet.

Polluants suivis

Les polluants suivants ont été pris en compte dans l'évaluation : la consommation de carburant, les émissions de polluants et celles des gaz à effet de serre.

Méthode

Deux états de référence ont été comparés :

- la situation prévisible en 2008 (année de référence de l'évaluation) en absence du projet : il s'agit d'une extrapolation de la situation de l'état zéro mesuré en 2001 lors du diagnostic de l'APS ;
- la situation prévisible en 2008 après mise en œuvre du projet Hyrondelle

Les mêmes courbes du modèle INRETS-ADEME que pour l'évaluation *a priori* de Gentiane ont été utilisées. Le calcul des veh.km se fait à partir du temps épargné dans les bouchons et en supposant que les vitesses passent de 30km/h à 50km/h avec le projet Gentiane.

Les gains sont calculés à partir du nombre de véhicules kilomètres (veh.km) évités et de valeurs tutélaires du rapport Chapulut.

Résultats/Analyse

Les différents gains annuels sont évalués à environ 0,01 million d'euros₂₀₀₂ pour la consommation de carburants, 0,02 million d'euros₂₀₀₂ pour les émissions de polluants et 2 000euros₂₀₀₃ pour les gaz à effet de serre. Ces gains sont négligeables par rapport à ceux gagnés sur le temps perdu et la sécurité.

Annexe F

Examen de la similitude du contexte

La note méthodologique de la ZELT explicite les principaux paramètres à étudier pour s'assurer que les situations de référence et projet peuvent être comparées :

« La question posée est de déterminer si les contextes des situations comparées présentent ou non des différences pouvant influencer sur l'évaluation. Sans chercher à dresser une liste exhaustive des points à examiner (qui peuvent être différents suivant les projets) on peut avancer que ceux qui suivent devront l'être dans tous les cas :

1. L'infrastructure est-elle restée stable entre les 2 situations ? Si ce n'est pas le cas on examinera l'importance de la modification et on dressera la liste des impacts qui peuvent en être affectés. On notera qu'une modification de l'infrastructure peut facilement devenir rédhibitoire, c'est-à-dire empêcher toute comparaison pertinente entre les deux situations.
2. La matrice OD des déplacements a-t-elle subi des modifications notables, par exemple en raison de la création de nouveaux générateurs de trafic (grande surface, zone industrielle, etc.) ? Même commentaire que ci-dessus.
3. Sur les principaux tronçons du réseau la demande a-t-elle évolué dans des proportions importantes ? Si l'évolution est modérée et connue, il est généralement possible de procéder à de (prudentes) corrections des résultats pour en tenir compte.
4. La composition du trafic (pourcentage de poids-lourds) a-t-elle évolué ? Même réponse que ci-dessus.
5. Une offre nouvelle en matière de transports en commun a-t-elle vu le jour entre les deux périodes examinées ? Compte tenu des répartitions modales observées aujourd'hui dans la plupart des grandes villes, cet aspect ne sera pris en compte que si l'offre nouvelle est de grande capacité et concerne des flux majeurs de déplacements (par exemple la création d'une nouvelle ligne de métro ou de tramway).
6. La réglementation nationale ou locale a-t-elle été modifiée sur un point majeur, susceptible de se traduire par une modification de comportement des usagers ? S'il s'agit, par exemple, d'une modification de la vitesse maximum réglementaire, des expériences récentes ont montré qu'on peut prévoir des impacts sensibles en termes de congestion, de sécurité et d'environnement. Il est très probable qu'une part importante des variations d'impact résultera de cette modification et ne pourra être imputée au projet que si la modification est considérée comme faisant partie des mesures de gestion de trafic du projet.
7. En matière de sécurité routière la politique de l'État s'est-elle traduite, entre les deux périodes examinées, par des campagnes de sensibilisation fortement médiatisées (respect des vitesses, respect des intervalles, lutte contre la conduite en état d'ivresse ou sous l'emprise de remèdes ou de drogues, etc.) ? On s'attachera à déterminer s'il existe une évolution tendancielle nationale qu'il convient de prendre en compte.
8. L'une des deux périodes étudiées a-t-elle été marquée par des perturbations programmées de grande ampleur (événements sportifs par exemple) ? Ce cas est cité pour mémoire car, s'agissant d'événements programmés, donc prévus, le planning de l'évaluation les a, en principe, pris en compte.
9. L'une des deux périodes étudiées a-t-elle été marquée par des perturbations imprévisibles de grande ampleur (catastrophe naturelle, événements sociaux non prévus et de longue durée, etc.) ? Les conséquences sont à envisager au cas par cas, mais on peut craindre leur caractère rédhibitoire. »

Bibliographie

- [1] : SETRA, CERTU, Note méthodologique sur les études d'environnement dans les projets routiers - "Volet air", 2001
- [2] : SETRA, CERTU, Les études d'environnement dans les projets routiers - "Volet air" - Annexe technique à la note méthodologique sur les études d'environnement dans les projet routiers "Volet air",
- [3] : SETRA, CERTU, Note méthodologique sur l'évaluation des effets sur la santé de la pollution de l'air dans les études d'impact routières, 2005
- [4] : METATTM, Instruction cadre relative aux méthodes d'évaluation économique des grands projets d'infrastructures de transport, 25 mars 2004, mise à jour le 27 mai 2005
- [5] : Boiteux M., Baumstark L., Transports : choix des investissements et coût des nuisances, juin 2001
- [6] : SESP, La demande de transport en 2025 Projection des tendances et des inflexions, 2007
- [7] : Smit R., Brown A., Chan A.L., Do air pollution emissions and fuel consumption models for roadways include the effects of congestion in the roadway traffic flow ?, Environmental Modelling & Software, 2008, 1262-1270
- [8] : Smit R., An examination of congestion in road traffic emission models and their application to urban road networks, PdH Report, 2006
- [9] : Can A., Estimation des consommations énergétiques et des polluants émis par le trafic routier - Revue bibliographique des modèles existants, Rapport LICIT, Juillet 2009
- [10] : Esposito M.C., Evaluation des stratégies de régulation à l'échelle de la ville - Un premier pas vers le calcul des externalités environnementales, Rapport de MASTER, 2008
- [11] : Cernuschi S., Giugliano M., Cemin A., Giovannini I., Modal analysis of vehicle emission factors - Facteurs d'émissions modaux des véhicules, The Science of the Total Environment, 1995, 169, 175-173
- [12] : Joumard R., Philippe F., Vidon R., Reliability of the current models of instantaneous pollutant emissions, The Science of the Total Environment, 1999, 235, 133-142
- [13] : Smit R., Smokers R., Rabé E., New modelling approach for road traffic emissions: VERSIT+, Transportation Research Part D, 2007, 12, 414-422
- [14] : Smit R., Poelman M., Schrijver J., Improved road traffic emission inventories by adding mean speed distributions, Atmospheric Environment , 2008, 42, 916-928
- [15] : André M., Keller M., Sjödin A., Gradat M., Mc Rae I. A., The ARTEMIS European tools for estimating the pollutant emissions from road transport and their application in Sweden and France, 17th International Conference 'Transport and Air Pollution' 2008, Graz , 2006
- [16] : Keller M., Handbook Emission Factors For Road Transport 3.1, Quick Reference, 2010
- [17] : CERE, CETE Nord Picardie, Mise en oeuvre du modèle gaussien Polyphemus - Comparaison avec des mesures in situ, Septembre 2011
- [18] : Cheynet D., Modélisation des impacts environnementaux. Quelles applications dans le domaine des transports ?, Master Transports Urbains et Régionaux de Personnes, Septembre 2011

- [19] : Transport Simulation Systems, Aimsun 6.1 User's Manual, Juin 2010
- [20] : Panis L., Broekx S. et Liu R., Modelling instantaneous traffic emission and the influence of traffic speed limits, Science of the Total Environment, 2006,371, 270-285
- [21] : Nolan R.B., Quddus M.A., Flow improvements and vehicle emissions : effect of trip generation and emission control technology, Transportation Research Part D, 2006, 11, 1-14
- [22] : Boriboonsomsin K. Barth M., Impacts of freeway high-occupancy vehicle lane configuration on vehicle emissions, Transportation Research Part D, 2008, 13, 112-125
- [23] : Barth M., Boriboonsomsin K., Energy and emissions impacts of a freeway-based dynamic eco-driving system, Transportation Research Part D, 2009
- [24] : Mensik C., Cosemans G., From traffic flow simulations to pollutant concentrations in street canyons and backyards , Environmental Modelling & Software, 2008,23, 288-295
- [25] : Transek AB, Cost-benefit analysis of the Stockholm Trial, 2006
- [26] : City of Stockholm, Congestion Charge Secretariat, Facts and results from the Stockholm Trials, Final version, décembre 2006
- [27] : TFL, Central London Congestion Charging Scheme: ex-post evaluation of the quantified impacts of the original scheme, juin 2007
- [28] : Revue Générale des Routes et des Aéroports, La gestion dynamique des voies, un outil d'exploitation efficace des autoroutes ?, avril-mai 2010
- [29] : Highways Agency, ATM Monitoring and Evaluation 4-Lane Variable Mandatory Speed Limits 12 Month Report (Primary and Secondary Indicators), juin 2008
- [30] : INRETS, Tronc commun A4-A86 Impact de l'utilisation de la voie auxiliaire sur les nuisances, octobre 2007
- [31] : ZELT, Création d'une voie spécialisée partagée sur la bande d'arrêt d'urgence de l'A48, rapport intermédiaire d'évaluation, Août 2008
- [32] : CETE de Lyon, Régulation de vitesses sur le sillon lorrain, Évaluation a priori des impacts, juin 2011
- [33] : INRETS, Enjeux des mesures de régulation dynamique des vitesses, 2008
- [34] : INRETS, Évaluation de la Régulation d'accès généralisée sur la partie Est de l'Île de France, 2009
- [35] : ZELT, Projet Gentiane à Grenoble – évaluation a priori, novembre 2004
- [36] : ZELT, Évaluation a priori des impacts de Gutenberg, août 2003
- [37] : ZELT, Réseau routier Gutenberg - Système d'aide à la gestion du trafic et d'information des usagers - Évaluation des impacts, mars 2009
- [38] : ZELT, Système d'aide à la gestion de trafic sur les VRU toulousaines ERATO – rapport intermédiaire de diagnostic, janvier 2010
- [39] : ZELT, Projet d'évaluation du périphérique de l'agglomération nantaise, juillet 2005
- [40] : ZELT, Projet Hyrondelle à Grenoble – évaluation a priori, juillet 2005
- [41] : Chapulut J.N, Conseil Général des Ponts et Chaussées, Evaluation socioéconomique des systèmes d'exploitation de la route en milieu urbain, Rapport du groupe de travail, Août 2004

[42] : CETE Sud Ouest / ZELT, Evaluation a posteriori des projets de gestion du trafic et d'information des usagers - Note méthodologique, 2008

[43] : CITEPA, Inventaire des émissions de polluants atmosphériques en France - Séries sectorielles et analyses étendues - Format SECTEN, MAJ, Avril 2011

[44] : Décret 2010-1250 du 21 octobre 2010 relatif à la qualité de l'air

[45] : Comprehensive modal emission model, version 2, User's Guide

[46] : CETE Nord Picardie, Test et application de modèle Artemis à l'agglomération Lilloise. Phase 1 : Description des situations de trafic en agglomération lilloise, Juin 2008

[47] : CETE Nord Picardie, Test et application de modèle Artemis à l'agglomération Lilloise. Phase 2 : Application du modèle Artemis, Août 2010

[48] : Louis SERVANT (IAURIF), LE PEAGE URBAIN DE LONDRES Bilan après 6 mois de fonctionnement - Les impacts sur les transports et les activités londoniennes, décembre 2003

[49] : Chanut S., Méthodologie d'évaluation de la nouvelle politique routière en Ile-de-France. Etude des impacts environnementaux : émissions de gaz à effet de serre et de polluants locaux, Thèse professionnelle, 2009

[50] : Victoria Transport Policy Institute, Transportation cost and benefit analysis – Techniques, estimates and implications, seconde édition, Janvier 2009

[51] : Jurvillier, J.C., Simulation de temps de parcours et modèle de consommation sur une autoroute urbaine. Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité, 1982

[52] : INRESPONSE, Deliverable WP9-D91, Evaluation Plan and Methodology, Projet Européen TR1030. , 1998

[53] : ADEME, Émission de Polluants et consommation liée à la circulation routière- Paramètres déterminant et méthodes de quantification, 1998

[54] : ZERGUINI , Seghir, Contribution à l'analyse économique de l'exploitation de la route, 26 mai 1998

Glossaire

A

- AASQA : Associations Agréées pour la Surveillance de la Qualité de l'Air
- ADMS : Atmosphéric Dispersion Modelling System
- APS : Avant Projet Sommaire
- ARTEMIS : Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems
- ASF : Autoroute du Sud de la France
- ASPA : Dénomination de l'AASQA en Alsace
- ATM : Active trafic Management
- ATMO : indice de qualité de l'air utilisé en France

B

- BAU : Bande d'arrêt d'urgence
- B[a]P : Benzo(a)pyrène

C

- CH₄ : Méthane
- C₆H₆ : Benzène
- CERC : Cambridge Environmental Reseach Consultants
- CERTU : Centre d'Études sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions
- CEREA : Centre d'Enseignement et de Recherche en Environnement Atmosphérique
- CETE : Centre d'Études Techniques de l'Équipement
- CFD : Computational Fluid Dynamics
- CIGT : Centre d'Ingénierie et de Gestion du Trafic
- CITEPA : Centre Interprofessionnel Technique d'Études de la Pollution Atmosphérique
- CO : Monoxyde de carbone
- CO₂ : Dioxyde de carbone
- COPERT : COmputer Program to calculate Emission from Road Transport
- COST : Cooperation in Science and Technology
- COV : Composés Organiques Volatils

D

- DIRIF : Direction des Routes Ile-de-France
- DGS : Direction Générale de la Santé

E

- ERS : Évaluation des Risques Sanitaires

H

- HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques
- HBEFA : Handbook of Emissions Factors

I

- IFSTTAR : Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux
- INRETS : Institut National de REcherche sur les Transports et leur Sécurité
- IPP : Indice Pollution Population

L

- LAURE : Loi sur l'Air et l'Utilisation Rationnelle de l'Énergie
- LICIT : Laboratoire Ingénierie Circulation Transports

N

- NO : Monoxyde d'azote
- NO₂ : Dioxyde d'azote
- NO_x : Oxyde d'azote
- N₂O : Protoxyde d'azote

M

- MEET : Méthodologies for Estimating air pollutants Emissions from Transport
- METATM : Ministère de l'Équipement, des Transports, de l'Aménagement du Territoire et de la Mer

O

- O₃ : Ozone
- OMS : Organisation Mondiale de la Santé

P

- PCI RDRT : Pôle de Compétence et d'Innovation Régulation Dynamique des Réseaux de Transport
- PDU : Plan de Déplacements Urbains
- PL : Poids Lourds
- PM : Particules Matters
- PM10 : Particules de diamètre inférieur à 10 µm
- PM2,5 : Particules de diamètre inférieur à 2,5 µm
- PPA : Plan de Protection de l'Atmosphère
- PRQA : Plan Régional de la Qualité de l'Air
- PTAC : Poids Total Autorisé en Charge

R

- 2RM : Deux roues motorisées
- RGRA : Revue Générale des Routes et Aérodrômes

S

- SAGT : Système d'Aide à la Gestion de Trafic
- SETRA : Service d'Études sur les Transports, les Routes et leurs Aménagements
- SIREDO : Système Informatisé de Recueil de DONnées
- SO₂ : Dioxyde de soufre
- SRCAE : Schéma Régional Climat Air Énergie

T

- TFL : Transport For London
- TMJA : Trafic Moyen Journalier Annualisé

V

- VL : Véhicule Léger
- VP : Véhicule Particulier
- VRU : Voie Rapide Urbaine

Z

- ZELT : Zone Expérimentale et Laboratoire de Trafic (CETE Sud Ouest)

Rédacteurs

Karine MULLER-PERRIAND - CETE Lyon

téléphone : 33 (0)4 72 14 31 40

mél : Karine.Muller-Perriand@developpement-durable.gouv.fr

Charlotte PIERREFEU – CETE Lyon

téléphone : 33 (0)4 74 27 51 29

mél : Charlotte.Pierrefeu@developpement-durable.gouv.fr

Correspondants techniques

Marie-Christine ESPOSITO – Sétra

téléphone : 33 (0)1 60 52 31 31

mél : Marie-christine.Esposito@developpement-durable.gouv.fr

Anne-Laure BADIN – Sétra

téléphone : 33 (0)1 60 52 31 07

mél : anne-laure.badin@developpement-durable.gouv.fr

Le Sétra appartient
au Réseau Scientifique
et Technique
du Medde

Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements

BP 214 – 77487 PROVINS CEDEX – France

téléphone : 33 (0)1 60 52 31 31 – télécopie : 33 (0)1 60 52 31 69

Document consultable et téléchargeable sur les sites web du Sétra :

- Internet : <http://www.setra.developpement-durable.gouv.fr>
- Intranet (Réseau ministère) : <http://intra.setra.i2>

Ce document ne peut être vendu. La reproduction totale du document est libre de droits.

En cas de reproduction partielle, l'accord préalable du Sétra devra être demandé.

c) 2012 Sétra – Référence : 1215w – ISRN : EQ-SETRA—12-ED10—FR