

ARTICLES

Impact sur la qualité de l'air d'un Plan de déplacements urbains : application à l'agglomération de Saint-Étienne

Air quality impact assessment within the frame of an Urban Transportation Scheme: Case study of the Saint-Étienne metropolitan area

Lydia GABORIAUD*, Jane NOPPE**, Pierre ODENT***, Jean-Pierre VINOT****

Résumé

Avec la mise en place de la loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie, les grandes agglomérations doivent planifier l'évolution du transport urbain, à travers les Plans de déplacements urbains (PDU), et en évaluer les effets sur la qualité de l'air. Le présent article s'appuie sur l'exemple de l'agglomération de Saint-Étienne et présente les outils mis en place pour étudier l'impact des différents scénarios de transport du PDU et du Dossier de voirie d'agglomération (DVA). La chaîne de modélisation se décompose en quatre grands modules : estimation des trafics, calcul des émissions journalières par mode de transport, diffusion des émissions de polluants et évaluation des indicateurs sanitaires. Cette chaîne a été appliquée pour une journée type et deux horizons de calcul : 1995 et 2010. Cette étude montre l'évolution tendancielle des émissions et des concentrations entre 1995 et 2010, mais également l'impact sur la qualité de l'air de la mise en œuvre, à l'horizon 2010, d'un ensemble de dispositions adoptées dans le cadre du PDU et du DVA. Une forte diminution des émissions est attendue pour la période 1995-2010, due au renouvellement du parc de véhicules par des véhicules moins polluants ; en revanche les différences entre scénarios à l'horizon 2010 sont faibles, reflétant l'effet modeste, sur le trafic de l'aire d'étude, des mesures de politiques de transport urbain envisagées, qui visent pourtant à limiter les déplacements en voiture particulière dans le périmètre urbain.

Abstract

In accordance with the French law concerning air quality, larger cities (> 100 000 inhabitants) are obliged to devise and implement a long term urban transportation scheme (PDU) and estimate its effects on air quality. This paper is based on the case study of the Saint-Étienne metropolitan area ; it presents the set of tools used to assess the impact of different traffic scenarios resulting from the PDU and the DVA (city road network plan). The modelling procedure is divided in four major modules : estimation of the traffic volume, calculation of daily emissions per transportation mode, dispersion of air pollutants and evaluation of population health indicators. The calculations have been carried out for a standard day and for two different years : 1995 and 2010. This study shows the trends of emissions and concentration of air pollutants between the years 1995 and 2010 for a « business as usual » scenario as well as the impact on air quality resulting from the measures adopted within the frame of the PDU and DVA before year 2010. A strong decrease in emissions is expected over the period 1995-2010, due to the fact that existing vehicles will be replaced by less polluting ones ; on the other hand, differences between the 2010 scenarios are quite small, which reflects the modest effect on the road traffic of the area of the local urban transport policies, although their objective is to reduce private car travel within the area.

* ARIA Technologies, 17, route de la Reine, 92517 Boulogne-Billancourt Cedex.

** ADEME, 27, rue Louis Vicat, 75737 Paris Cedex 15.

*** MVA Ltd France, 12-14 rue Jules César, 75012 Paris.

**** CERTU, 9, rue Juliette Récamier, 69456 Lyon Cedex 06.

Introduction

Avec le soutien financier de l'ADEME, du CERTU, et du ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (MATE), les bureaux d'études MVA et ARIA Technologies ont réalisé une étude pilote mettant en œuvre des modèles numériques de déplacements de personnes, de trafic et d'émissions de polluants d'une part, et de dispersion de ces polluants dans l'atmosphère d'autre part, afin d'évaluer les impacts à moyen terme sur la qualité de l'air de la mise en œuvre du PDU de Saint-Étienne [1] pour le compte de l'autorité organisatrice des transports de l'agglomération stéphanoise.

Saint-Étienne compte en effet parmi les agglomérations françaises de plus de 100 000 habitants pour lesquelles l'application de la loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie a rendu obligatoire la réalisation d'un PDU et l'évaluation de ses effets sur la qualité de l'air [2].

L'intérêt local pour le projet a engendré une collaboration active des acteurs locaux, parmi lesquels :

- le STU, (Service des transports urbains) de Saint-Étienne Métropole, ex-SIOTAS, autorité organisatrice des transports urbains (AOTU) de l'agglomération stéphanoise ;
- la DDE (Direction départementale de l'équipement) de la Loire ;
- l'EPURES (agence d'urbanisme de la région stéphanoise) ;
- l'AMPASEL (Association de mesure de la pollution atmosphérique de Saint-Étienne et du département de la Loire).

Les principaux objectifs de cette étude visaient à :

- élaborer une méthode transposable et robuste pour le calcul des véhicules $\times$ kilomètres (produit du nombre de véhicules circulant par le nombre de kilomètres parcourus) et des émissions de polluants qui en résultent, dans les études de scénarios de transports urbains – notamment les PDU – en s'appuyant sur des références récentes et reconnues ;
- présenter des indicateurs pertinents pour caractériser les émissions et concentrations de polluants et leurs évolutions, afin de constituer une aide à la décision à la disposition des AOTU pour le choix de scénarios de politiques de transports urbains ;
- approcher le thème des effets sur la santé par le biais d'indicateurs sanitaires ;
- tester la sensibilité des résultats à quelques variantes méthodologiques pour le calcul des émissions de polluants.

Il convient de souligner le caractère résolument expérimental d'un tel travail destiné à explorer le champ des possibilités d'évaluations environnementales des scénarios PDU.

Il s'agit d'une étude ambitieuse dans les niveaux de désagrégation spatiale et temporelle, destinée à répondre à deux objectifs : tester certaines innova-

tions méthodologiques détaillées, et mener à bout l'enchaînement de plusieurs maillons d'une chaîne complexe de modélisation [déplacements, trafic, émissions de polluants par les véhicules, concentrations de polluants dans l'air ambiant, indicateurs sanitaires destinés à approcher l'impact sur la santé de la population locale (résidents et actifs sur leur lieu de travail)].

Glossaire

- **ADEME** : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie.
- **AMPASEL** : Association de mesure de la pollution atmosphérique de Saint-Étienne et du département de la Loire.
- **AOTU** : Autorité organisatrice des transports urbains.
- **CERTU** : Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques.
- **CETE** : Centre d'études techniques de l'équipement.
- **CITEPA** : Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique.
- **CO** : Monoxyde de carbone.
- **CO₂** : Dioxyde de carbone.
- **COPERT** : COmputer Programme to calculate Emissions from Road Transport.
- **COV** : Composés organiques volatils.
- **DDE** : Direction départementale de l'équipement.
- **DPPR** : Direction de la prévention des pollutions et des risques.
- **DVA** : Dossier de voirie d'agglomération.
- **EPURES** : Agence d'urbanisme de la région stéphanoise.
- **GSP** : Grandes sources ponctuelles.
- **HPM** : Heure de pointe du matin.
- **HPS** : Heure de pointe du soir.
- **IGN** : Institut géographique national.
- **INRETS** : Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité.
- **MATE** : Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement.
- **NO** : Monoxyde d'azote.
- **NO₂** : Dioxyde d'azote.
- **NO_x** : Oxydes d'azote.
- **PDU** : Plan de déplacements urbains.
- **PL** : Poids lourds.
- **PM₁₀** : Particulate Matter < 10 μ m, particules de diamètre < 10 μ m.

- **PRÉDIT** : Programme national de recherche et d'innovation dans les transports terrestres.
- **PRQA** : Plan régional de qualité de l'air.
- **PTU** : Périmètre des transports urbains.
- **SIG** : Système d'information géographique.
- **SIOTAS** : Syndicat intercommunal pour l'organisation des transports de l'agglomération stéphanoise.
- **SO₂** : Dioxyde de soufre.
- **STAS** : Société de transport de l'agglomération stéphanoise.
- **STU** : Service des transports urbains.
- **TC** : Transports en commun.
- **TCSP** : Transport en commun en site propre.
- **VL** : Véhicule léger (c'est-à-dire véhicule particulier et véhicule utilitaire léger).
- **VP** : Véhicule particulier.
- **VUL** : Véhicule utilitaire léger.

La chaîne de modélisation

La chaîne de modélisation comporte quatre grands modules qui s'articulent de la façon suivante :

- **Module d'estimation des trafics** : ce module met en œuvre un modèle multimodal de déplacements de personnes, internes à l'agglomération, d'un type couramment utilisé pour l'étude des politiques de transport urbain. Il s'appuie sur des données d'offre et de demande de transport sur l'agglomération de Saint-Étienne et permet de connaître les flux de véhicules légers (VL) sur chaque arc du réseau stéphanois modélisé (près de 25 000 arcs pour environ 1 000 km de voirie) à l'heure de pointe du soir (HPS) ; les véhicules légers (VL) sont composés de voitures particulières (VP) et de véhicules utilitaires légers (VUL) ;
- **Module de calcul des émissions journalières par les modes de transport** : à partir des données de trafic à l'heure de pointe du soir, ce module reconstitue les conditions de trafic sur une journée entière à l'aide de courbes débit/vitesse et de profils de débits journaliers. En se basant sur le trafic VL et sur l'offre des transports en commun, ce module calcule également les volumes et vitesses des autres types de véhicules présents sur le réseau [VP, VUL, poids lourds (PL), bus, cars, trolleybus, tramways]. Une fois ces données disponibles, l'application sur chaque type de voirie des parcs nationaux INRETS-ADEME pour connaître les proportions des différents types de véhicules [3] et de la méthodologie COPERT II (COMputer Programme to calculate Emissions from Road Transport) permet de calculer les émissions de polluants (CO, COV, NO_x, PM₁₀, CO₂) dues à chaque mode de transport pour chaque heure d'une journée type [4].

Les résultats sont présentés, heure par heure ou agrégés sur la journée, sous la forme de cartes de densité linéique ou surfacique d'émissions pour chaque catégorie, mettant ainsi en évidence leur contribution respective.

- **Module de diffusion des émissions de polluants** : un premier élément de ce module permet de reconstituer des champs de vent, de température et de turbulence dans un domaine tridimensionnel en se basant sur des mesures de station(s) météorologique(s) et la topographie du site. Le second élément du module est un modèle de transport-diffusion qui permet de simuler la dispersion des polluants passifs dans un domaine tridimensionnel. Les données d'entrée de ce deuxième module sont d'une part des données d'émissions géoréférencées des sources mobiles, auxquelles on a ajouté les émissions des autres sources (cheminées industrielles et chauffage des bâtiments) et, d'autre part, les champs météorologiques générés. Les concentrations de NO_x (exprimées en équivalent NO₂) et de PM₁₀ ont été calculées heure par heure à partir des émissions afin d'obtenir l'évolution journalière des concentrations dans l'air.

Les résultats des concentrations de polluants dans l'air ambiant projetés au niveau du sol sont présentés pour des conditions météorologiques données et pour les différents scénarios modélisés.

- **Module d'évaluation des indicateurs sanitaires** : les émissions polluantes (trafic routier, sources industrielles fixes, chauffage des bâtiments) ainsi que les concentrations résultant de ces émissions ont été calculées sur la base d'un système de coordonnées cohérent. À l'aide des outils de gestion de base de données du système d'information géographique (SIG), les concentrations calculées ont été croisées avec des données de population géoréférencées dans le même système, afin de donner un indicateur sanitaire vis-à-vis des NO_x et des PM₁₀.

Cette chaîne de modélisation a été appliquée sur un domaine d'étude de 50 km × 50 km centré sur Saint-Étienne pour une journée type et deux horizons d'étude :

- 1995, correspondant à la situation de référence, qui a permis un calage des résultats du modèle de trafic grâce aux données de comptage sur voirie et une comparaison des résultats de la simulation des concentrations de polluants avec les résultats de mesures disponibles localement ;
- 2010, correspondant à l'année de pleine opérationnalité du PDU ; plusieurs scénarios du système de transport stéphanois ont été modélisés pour cet horizon.

Nous présentons ici les principaux résultats de ces quatre maillons de la chaîne de modélisation, pour la situation de référence en 1995, puis ceux résultant d'une part de l'évolution tendancielle entre 1995 et 2010, et d'autre part de la mise en œuvre, à l'horizon 2010, d'un ensemble de dispositions adoptées dans les cadres du PDU et du DVA (Dossier de voirie

d'agglomération) préparé par la DDE 42, projeté sur l'aire d'étude pour les routes et autoroutes du réseau national.

Les effets du PDU sur les déplacements et le trafic

Description des scénarios étudiés

Les quatre scénarios étudiés à l'horizon 2010 tiennent compte des mesures décrites ci-dessous, tant en aménagement de voirie qu'en offre nouvelle de transports en commun, programmées en cohérence avec l'évolution socio-économique et démographique de l'agglomération, mais aussi du renouvellement du parc automobile sur la période 1995-2010 :

Scénario 1 : tendanciel

Le scénario 1 est le scénario tendanciel qui permet d'évaluer l'évolution des émissions et

concentrations entre 1995 et 2010. Il constitue le scénario de référence.

Les évolutions par rapport à la situation de 1995 sont les suivantes :

- nouveau plan de circulation du centre de Saint-Étienne ;
- mise en site propre du tramway entre Carnot et Peuple ;
- réactivation de la ligne SNCF Saint-Étienne-Firminy avec une offre de service au niveau régional (type TER2N) ;
- voiries de protection du centre : boulevard urbain circulaire ;
- création d'un pôle d'échange multimodal régional à Châteaureux, et d'un pôle d'échange métropolitain à Firminy.

Scénario 2 : PDU adopté

Le scénario 2 est le scénario retenu à l'issue des études de PDU de Saint-Étienne.

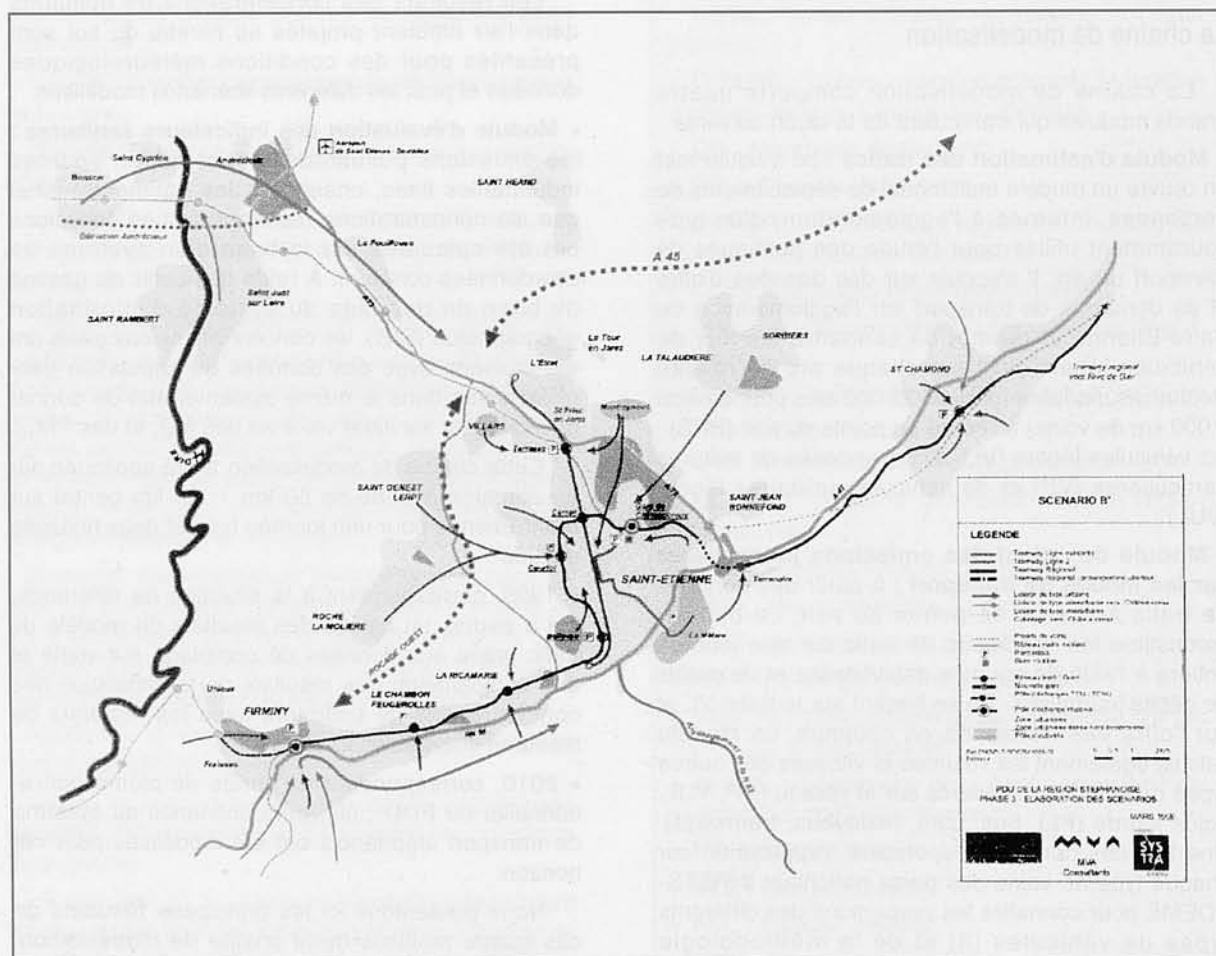


Figure 1.

Schéma décrivant le scénario de PDU adopté.

(Source : MVA). Reproduit avec l'aimable autorisation de MVA Ltd France.

Schematic description of the PDU urban transportation scheme.

(Source : MVA). Reproduced with kind permission of MVA Ltd France.

Évolutions par rapport à la situation de 1995 :

- mise en œuvre du scénario tendanciel ;
- création d'une deuxième ligne de TCSP (transport en commun en site propre) dans Saint-Étienne ;
- réalisation d'une liaison diamétrale de type péri-urbaine et urbaine (tramway régional) Firminy/Saint-Étienne/Rive-de-Gier desservant les vallées de l'Ondaine et du Gier, en liaison directe avec Saint-Étienne ;
- confortement de pôles d'échanges régionaux multimodaux (Chateaufort principalement, Firminy) ;
- fusion des PTU (périmètres des transports urbains) de Saint-Étienne et de Saint-Chamond.

Scénario 3 : DVA 1

Le scénario 3 (DVA 1) est constitué du scénario 2 (PDU) assorti de la réalisation d'un contournement à l'ouest de Saint-Étienne.

Évolutions par rapport à 1995 :

- mise en œuvre du scénario 2 (PDU adopté) ;
- réalisation d'une desserte SNCF cadencée Lyon – Saint-Étienne – Ondaine ;
- déviation de la RD498 ;
- requalification de l'A47 et des voies rapides urbaines de l'agglomération sans modification de capacité ;
- réalisation d'un contournement ouest proche.

Scénario 4 : DVA 2

Le scénario 4 (DVA 2) est constitué du scénario 3 (DVA 1) assorti de la réalisation de l'autoroute A45 au nord de Saint-Étienne.

Évolutions par rapport à 1995 :

- mise en œuvre du scénario 3 (PDU adopté et DVA 1) ;
- réalisation d'un contournement ouest proche avec intégration pour partie de la RD201 ;
- réalisation de l'autoroute A45.

Description du module « estimation des trafics »

Le modèle de déplacement utilisé pour estimer les trafics a été développé par MVA dans le cadre des études du Plan de déplacements urbains et du Dossier de voirie d'agglomération de Saint-Étienne ; il est mis en œuvre dans TRIPS/32, logiciel de modélisation multimodale des déplacements de personnes. Il permet de quantifier les impacts des scénarios de PDU et DVA à l'horizon 2010 sur le trafic automobile, la fréquentation des transports collectifs, et les déplacements non motorisés. Il s'agit d'un modèle multimodal des déplacements internes à l'agglomération à heure de pointe du soir.

Ce modèle de déplacements permet de connaître les flux de trafic voyageurs, mode par mode, à l'heure de pointe du soir, sur chaque arc du réseau routier de l'agglomération ; s'agissant d'un modèle de dépla-

cements de personnes, les volumes de poids lourds ne sont pas calculés par le modèle.

Devant l'importance des émissions de polluants des véhicules dédiés au transport de marchandises, il s'est avéré indispensable de prendre en compte les poids lourds en faisant les hypothèses suivantes, quel que soit l'horizon considéré :

- les volumes de poids lourds à l'heure de pointe du soir sont calculés arc par arc à partir des volumes de VL calculés par le modèle et de pourcentages dérivés des données de comptage HPS disponibles sur l'agglomération ;
- la vitesse PL est prise égale à la vitesse VL, pour chaque heure de la journée.

Les données de flux horaire de 23 stations de comptage ont été analysées afin d'obtenir une modulation de trafic heure par heure sur 5 types de voirie, puis regroupées en 6 périodes de trafic, alternant périodes creuses et périodes de pointe. Des indicateurs globaux de trafic (véhicules $\times$ kilomètres parcourus sur le réseau, véhicules $\times$ heures passées sur le réseau, vitesse moyenne) ont ensuite été établis pour la journée en réagrégeant les données horaires.

Trafics journaliers selon les différents scénarios modélisés

La figure 3, p. 395, présente des indicateurs globaux de trafic pour les différents scénarios étudiés et pour les cinq catégories de véhicules routiers étudiées : les véhicules particuliers (VP), les véhicules utilitaires légers (VUL), les poids lourds (PL), les transports en commun (TC) urbains et les cars interurbains.

Ces graphiques permettent de constater les effets des infrastructures routières réalisées dans les scénarios 3 et 4. En effet, on observe que, pour ces scénarios qui comportent la réalisation de voies rapides, la vitesse et dans une moindre mesure le nombre de véhicules $\times$ kilomètres augmentent sensiblement sur le réseau routier stéphanois.

Les effets du PDU sur les émissions journalières de polluants

Émissions de polluants pour la situation de référence (1995)

Un diagnostic complet des émissions de polluants (CO, COV, NO_x, PM₁₀, CO₂) a été réalisé, comprenant d'une part les émissions dues au trafic routier et d'autre part les émissions des sources fixes (sources industrielles et chauffage des bâtiments) provenant de l'inventaire d'émissions réalisé par le CITEPA pour l'année 1994, arrondissement par arrondissement, dans le cadre des Plans régionaux de la qualité de l'air (PRQA) [5].

Les résultats présentés dans ce paragraphe traitent dans un premier temps des émissions de l'ensemble des sources émettrices prises en considération

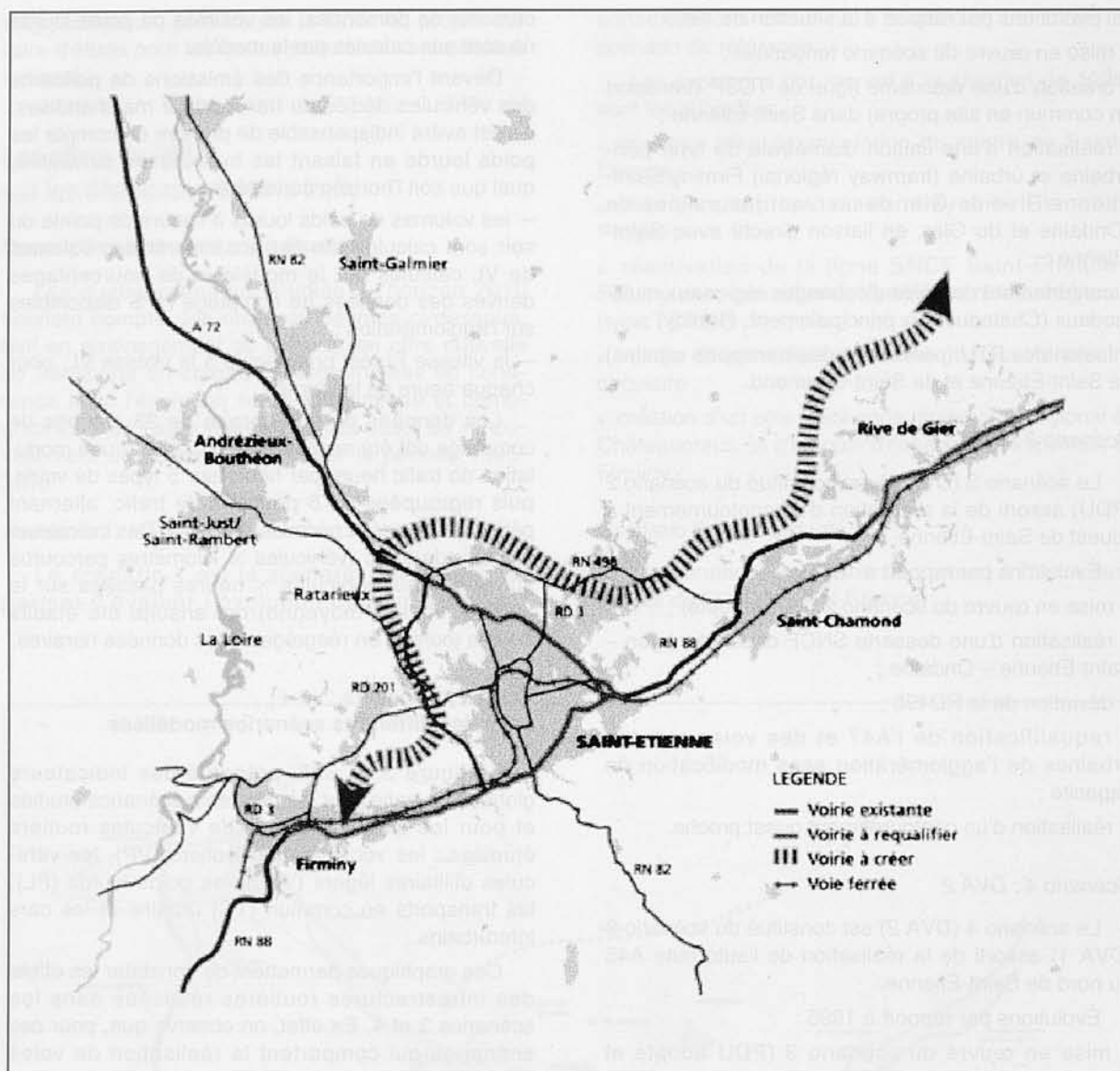


Figure 2.

Schéma décrivant le scénario de DVA 2.

(Source : MVA). Reproduit avec l'aimable autorisation de MVA Ltd France.

Schematic description of the DVA2 city road network scenario.

(Source : MVA). Reproduced with kind permission of MVA Ltd France.

(transport, industrie, chauffage des bâtiments). Dans un deuxième temps, la contribution des transports aux émissions est présentée avec davantage de détails.

Répartition des émissions globales (situation de référence 1995)

La figure 4, p. 396, présente les contributions des grandes familles de sources aux émissions journalières sur l'aire d'étude.

En 1995, les transports sont la première source d'émissions de polluants sur l'aire d'étude. Ce constat est vrai pour tous les polluants étudiés hormis le CO₂ qui est principalement émis par le chauffage des bâtiments.

Répartition des émissions transport

La figure 5, p. 396, détaille ces résultats pour les différents modes de transport pour la situation de référence (1995).

On constate que les émissions des transports collectifs représentent moins de 2 % des émissions transport, plus de 98 % de ces émissions étant produites par les VL et les PL.

Le poids des émissions des VL et PL dépend fortement du polluant considéré :

- CO : les VL sont responsables de 96 % des émissions de CO ;
- COV : les VL sont responsables de 83 % des émissions de COV et les PL de 16 % ;

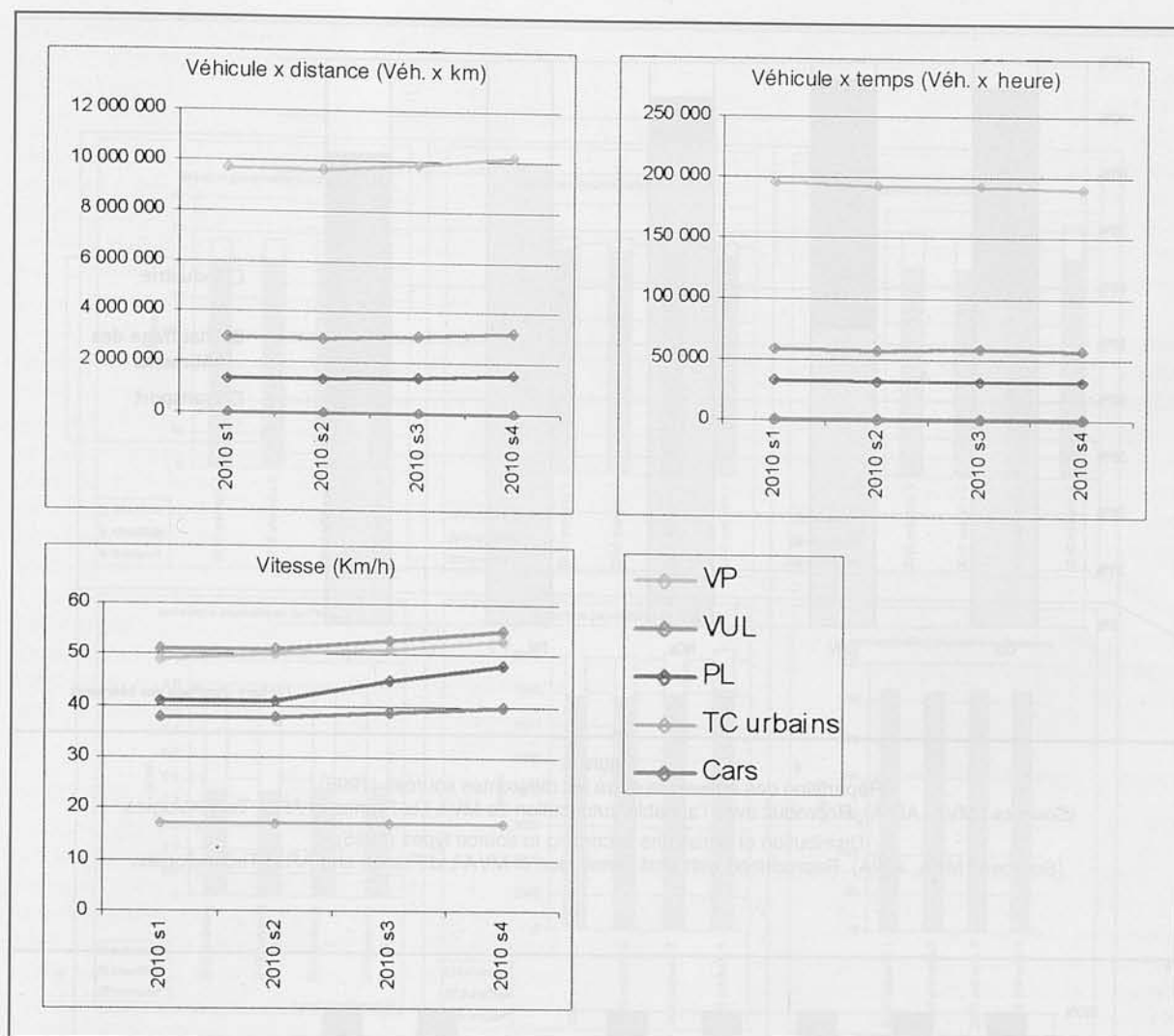


Figure 3.
Indicateurs de trafic des différents modes de transport.
(Source : MVA). Reproduit avec l'aimable autorisation de MVA Ltd France.
Traffic indicators for different transportation modes.
(Source : MVA). Reproduced with kind permission of MVA Ltd France.

- NO_x : les VL et les PL sont chacun responsables de 49 % des émissions de NO_x ;
- PM_{10} : les VL sont responsables de 57 % des émissions de PM_{10} et les PL de 41 % ;
- CO_2 : les VL sont responsables de 64 % des émissions de CO_2 et les PL de 35 %.

Bien qu'ils ne représentent que 9 % du kilométrage journalier parcouru dans l'aire d'étude, les poids lourds contribuent fortement aux émissions totales, notamment pour les NO_x , PM_{10} et CO_2 . Il convient néanmoins de rappeler les fortes incertitudes sur les flux de poids lourds dans l'agglomération.

Les résultats au regard des enjeux PDU-DVA

Nous présentons ici les émissions moyennes journalières de polluants et les consommations de carburants, pour les différents scénarios du PDU et

du DVA de l'agglomération stéphanoise à l'horizon 2010.

Les histogrammes de la figure 6, p. 397, présentent les valeurs des principaux indicateurs sur l'ensemble de l'aire d'étude pour les quatre scénarios étudiés ; les résultats ont été agrégés sur la journée à partir de calculs effectués heure par heure.

On notera que les chiffres présentés ici pour les sources fixes industrielles et le chauffage des bâtiments ne prennent en compte aucune éventuelle évolution de la réglementation sur ce type d'émissions.

Les impacts des scénarios étudiés sur les émissions pour l'ensemble de l'aire d'étude sont différents selon le polluant considéré (voir Figure 6) :

- le scénario 2 (PDU) fait baisser très légèrement les émissions des NO_x , de PM_{10} et de CO_2 par rapport au scénario tendanciel, alors que ces émissions augmentent dans les scénarios 3 et 4 ;

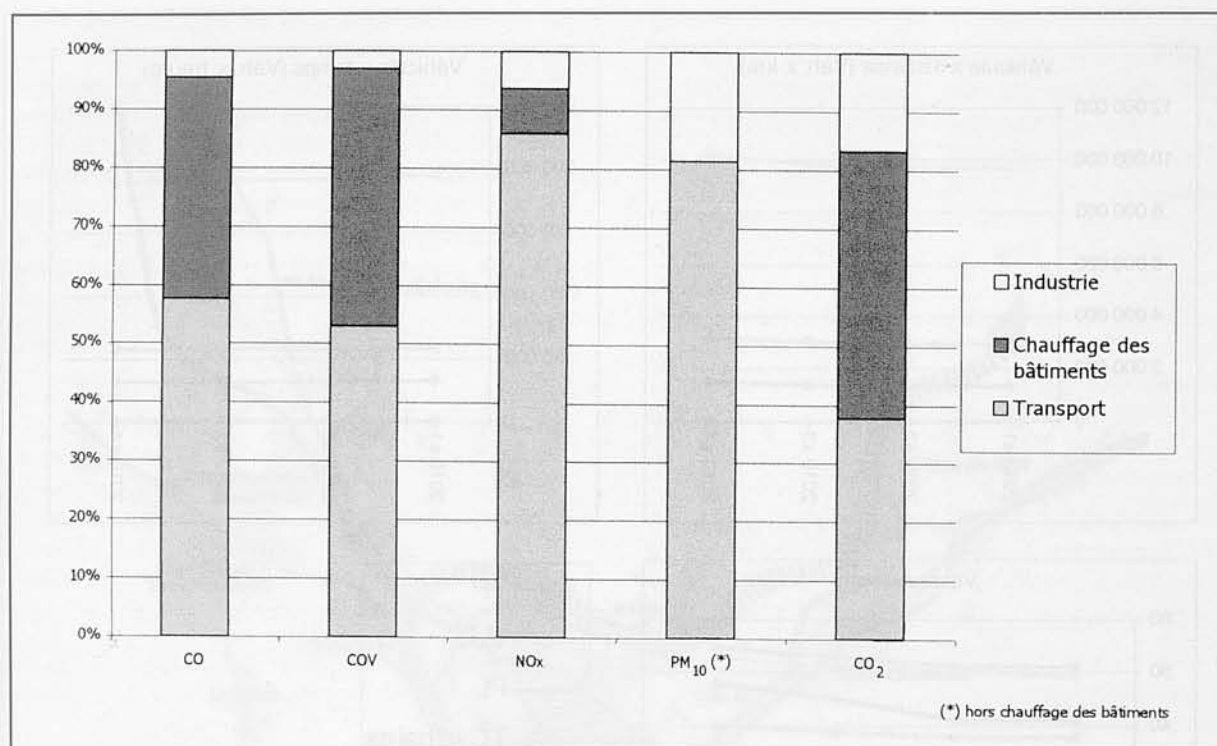


Figure 4.

Répartition des émissions entre les différentes sources (1995).

(Sources : MVA, ARIA). Reproduit avec l'aimable autorisation de MVA Ltd France et ARIA Technologies.

Distribution of emissions according to source types (1995).

(Sources : MVA, ARIA). Reproduced with kind permission of MVA Ltd France and ARIA Technologies.

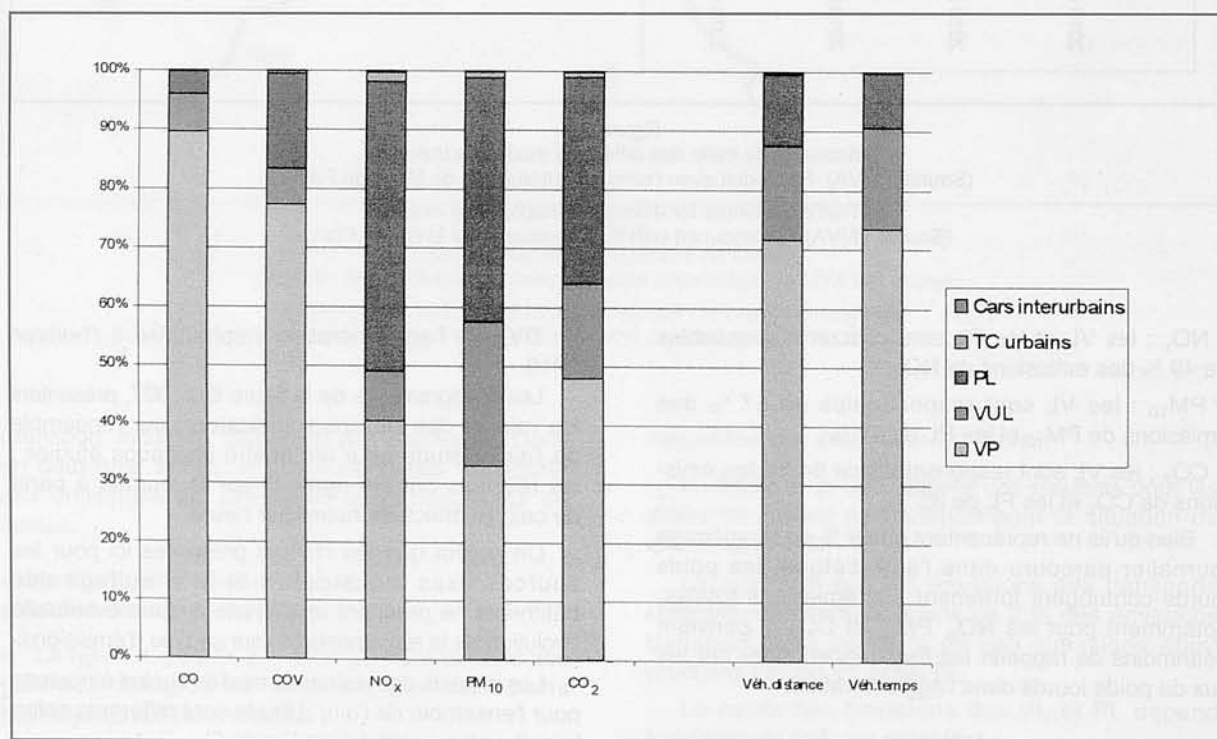


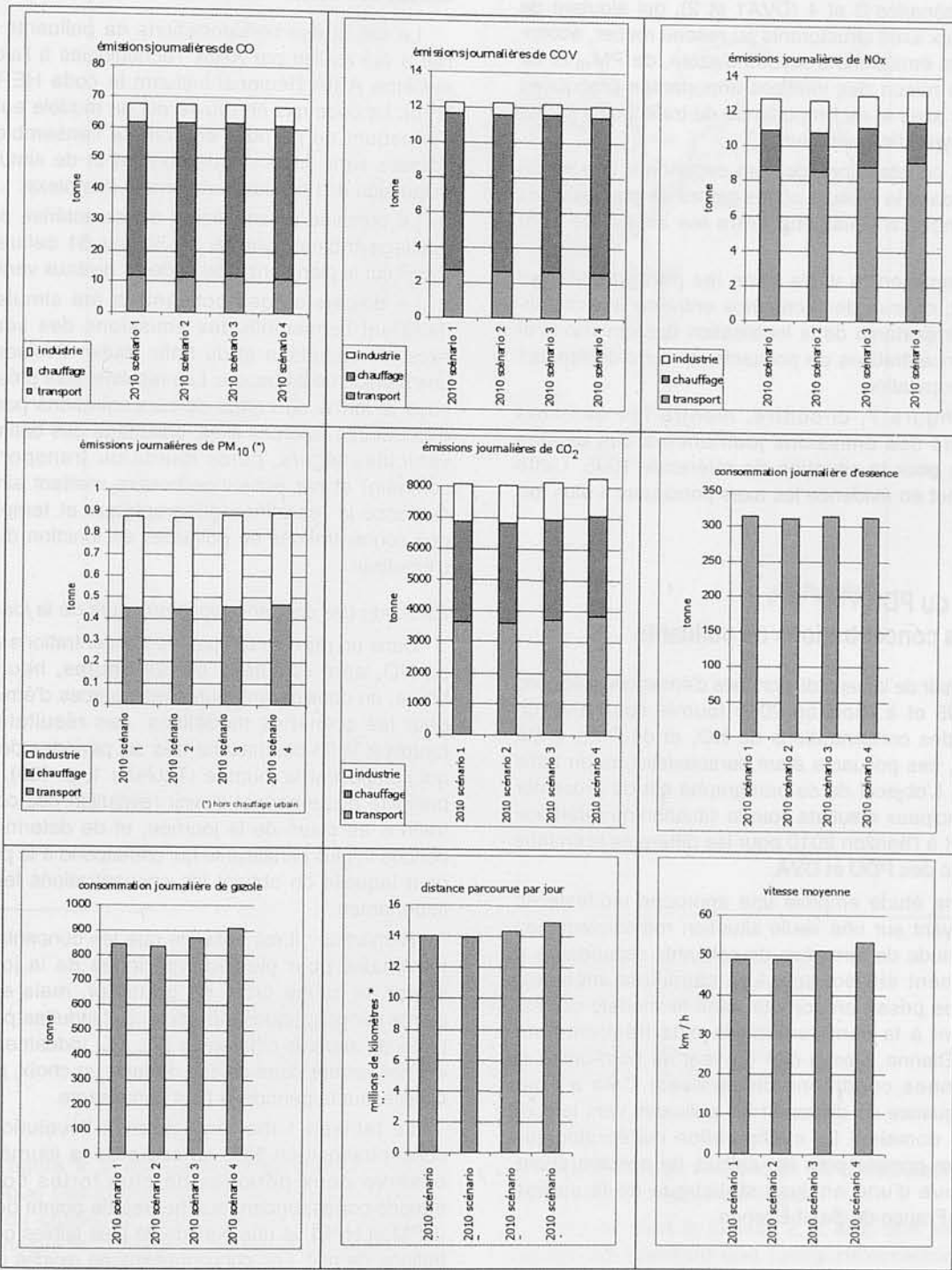
Figure 5.

Répartition des émissions entre les différentes catégories de véhicules routiers.

(Source : MVA). Reproduit avec l'aimable autorisation de MVA Ltd France.

Distribution of emissions according to vehicle categories.

(Source : MVA). Reproduced with kind permission of MVA Ltd France.



(*) les émissions de PM₁₀ du chauffage des bâtiments ne sont pas comptabilisées dans ce bilan.

Figure 6.
Histogrammes des émissions, consommations et indicateurs de trafic.
(Source : MVA). Reproduit avec l'aimable autorisation de MVA Ltd France.
Bar charts of emissions, fuel consumption and traffic indicators.
(Source : MVA). Reproduced with kind permission of MVA Ltd France.

- le scénario 4 (DVA2) fait baisser les émissions de CO et de COV par rapport au scénario tendanciel, de manière plus importante que les autres scénarios ;
- les scénarios 3 et 4 (DVA1 et 2), qui ajoutent de nouveaux axes structurants au réseau routier, accentuent les émissions d'oxydes d'azote, de PM₁₀ et de CO₂ en raison des vitesses importantes pratiquées sur ces axes et de l'importance du trafic poids lourds sur ce type d'infrastructure.

Ces constatations doivent cependant être relativisées dans la mesure où les ordres de grandeur des différences d'émissions entre les scénarios sont faibles.

Comme on le verra dans les paragraphes qui suivent, chacun des scénarios entraîne une modification importante de la localisation des émissions et des concentrations de polluants, et donc de l'impact sur la population.

La figure 7, ci-contre, montre les densités linéaires des émissions journalières des oxydes d'azote pour la situation de référence 1995. Cette carte met en évidence les axes principaux à plus fort trafic.

Effets du PDU sur les concentrations de polluants

À partir de la base de données d'émissions calculées en 1995 et à l'horizon 2010 fournie sous SIG, un calcul des concentrations de NO_x et de PM₁₀ a été réalisé, ces polluants étant caractéristiques du trafic routier. L'objectif de ce paragraphe est de présenter les principaux résultats pour la situation de référence 1995 et à l'horizon 2010 pour les différents scénarios de trafic des PDU et DVA.

Cette étude emploie une approche modeste en s'appuyant sur une seule situation météorologique ; toute étude de formation de polluants secondaires a également été écartée. Les conditions météorologiques prises en compte dans le modèle correspondent à la configuration la plus fréquente sur Saint-Étienne, c'est-à-dire un vent de nord-ouest et de bonnes conditions dispersives. Cela a pour conséquence de disperser les polluants vers le sud-est du domaine. La configuration météorologique prise en compte pour les calculs de concentrations est issue d'une analyse statistique de la station Météo-France de Saint-Étienne.

Reconstitution du champ de vent

La figure 8 (p. 400) montre, à gauche, la rose des vents générale obtenue à partir des cinq années de mesures du 01-01-94 au 31-12-98 (la flèche indique la direction de vent sélectionnée pour la simulation) et, à droite, le champ de vent reconstitué sur le domaine de simulation (résolution de 1 × 1 km sur un domaine 50 × 50 km) à partir du modèle diagnostique MINERVE [6] pour une configuration académique représentative du site. On notera

l'influence de la topographie sur l'écoulement, avec des sur- et sous-vitesses de l'ordre de 2 m/s.

Calcul des concentrations

Le calcul des concentrations de polluants dans l'air a été réalisé par ARIA Technologies à l'aide du système ARIA Régional incluant le code HERMES [7, 8]. Le code mis en œuvre est un modèle eulérien permettant de prendre en compte l'ensemble des sources sans limitation de nombre et de simuler la dispersion des polluants sur terrain complexe.

Le domaine de simulation est caractérisé par un maillage tridimensionnel de 51 par 51 cellules de 1 km² sur le plan horizontal et de 21 niveaux verticaux.

La dispersion des polluants a été simulée en intégrant l'ensemble des émissions des sources fixes, du chauffage et du trafic routier évoluant sur une période de 24 heures. Les résultats sont présentés sous la forme de cartes de concentrations par type d'émissaires (sources fixes, chauffage des bâtiments, véhicules légers, poids lourds ou transports en commun) et par échéance horaire mettant ainsi en évidence la répartition géographique et temporelle des concentrations de polluants en fonction du type d'émetteur.

Évolution des concentrations au cours de la journée

Dans un premier temps, les concentrations au sol en NO_x sont calculées sur 24 heures, heure par heure, en considérant toutes les sources d'émission, pour les scénarios modélisés. Les résultats sont fournis à la fin de chacune des six périodes de trafic qui composent la journée (Tableau 1, p. 400). Cette première étape permet d'avoir l'évolution des concentrations au cours de la journée, et de déterminer la période la plus pénalisante qui correspond à la période pour laquelle on obtient les concentrations les plus importantes.

Remarque : il est possible que les concentrations maximales pour plusieurs périodes de la journée soient du même ordre de grandeur, mais en des points géographiques différents, car induites par des types de sources différentes (VL, PL, industries...). Il est nécessaire dans ce cas de faire un choix, parfois difficile, sur la période la plus pénalisante.

Le tableau 1 met en évidence l'évolution des concentrations en NO_x au cours de la journée : on observe deux périodes de plus fortes concentrations correspondant aux heures de pointe de trafic (HPM et HPS), et une période de plus faibles concentrations de nuit. Les concentrations en oxydes d'azote calculées tout au long de la journée peuvent passer du simple au double. On constate que la période la plus pénalisante correspond à la période de 6 h à 8 h, soit la période « heures de pointe du matin » (HPM).

On constate également que les concentrations, à l'instar des émissions, diminuent fortement entre 1995 et 2010. Cependant, il existe peu de différence de concentrations entre les scénarios de trafic à l'horizon 2010.

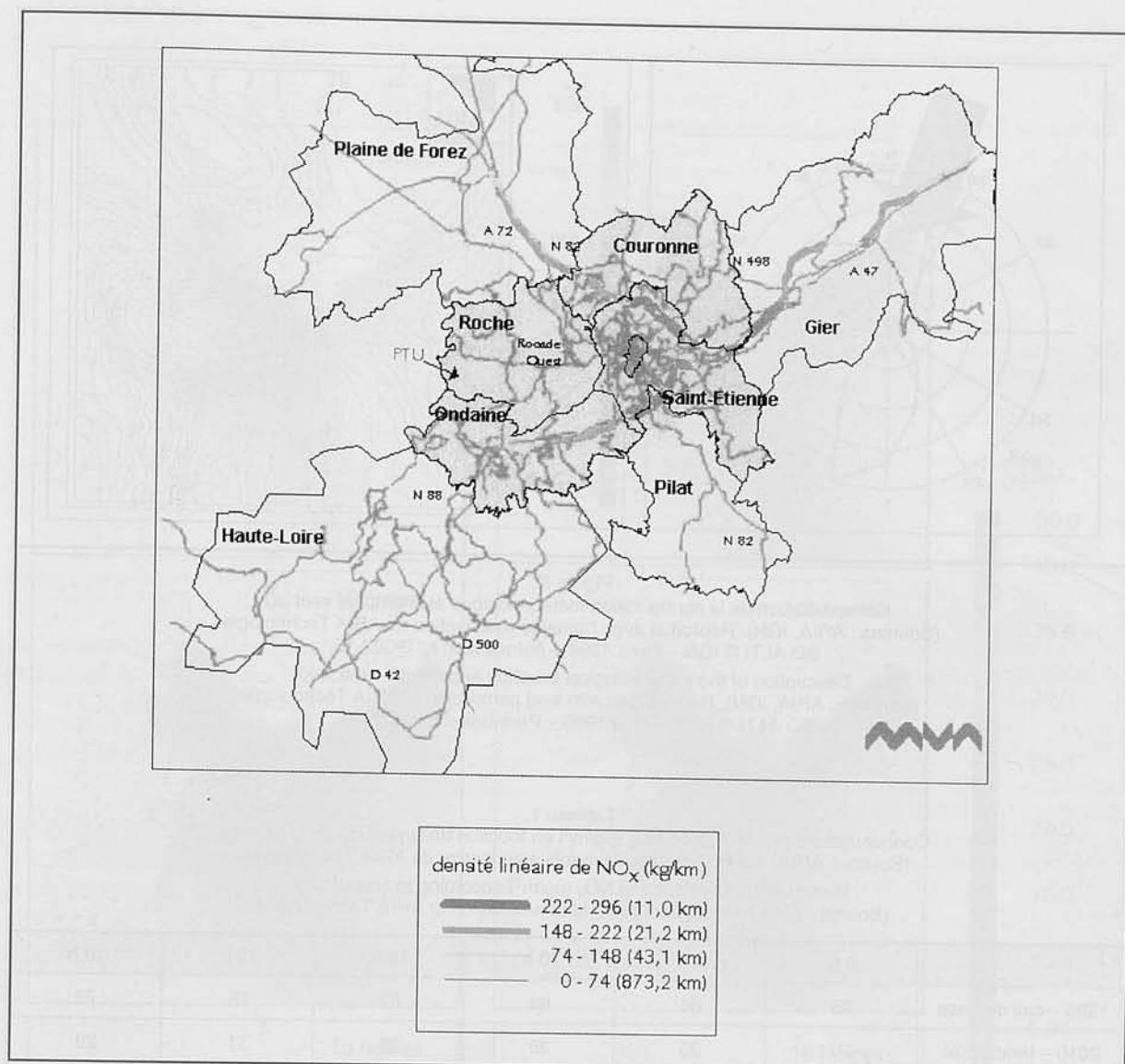


Figure 7.

Densité linéaire d'émissions de NO_x en kg/km pour la situation de référence 1995.
(Sources : MVA, IGN). Reproduit avec l'aimable autorisation de MVA Ltd France.
GEOROUTE © IGN - Paris 1996 - Autorisation n° GC02-15.

Linear density of NO_x emissions in kg/km for the reference year 1995.
(Sources : MVA, IGN). Reproduced with kind permission of MVA Ltd France.
GEOROUTE © IGN - Paris 1996 - Permission n° GC02-15.

La figure 9, p. 401, montre la distribution géographique des concentrations en NO_x calculées à partir du champ de vent présenté sur la figure 8, pour chaque fin de période qui décompose la journée et pour le scénario tendanciel 2010. On note que les polluants sont principalement concentrés dans le centre de la commune de Saint-Étienne.

Contributions respectives de chaque catégorie de sources à l'échéance la plus pénalisante

On détermine la part de chaque source à partir de la modélisation toutes sources confondues, à l'heure la plus pénalisante, c'est-à-dire pour la période

6 h-8 h (HPM), en moyennant les concentrations sur l'ensemble du domaine d'étude.

On note dans le tableau 2, p. 402, que les poids lourds représentent une catégorie émettrice très importante (environ 50 % des NO_x) et que les transports en commun ne contribuent que très faiblement à la pollution de l'air (environ 1 % des NO_x).

On constate qu'il n'y a pas de différence significative entre les scénarios de 2010 en terme de contribution des différentes sources.

Par ailleurs, le manque d'informations sur les grandes sources ponctuelles (GSP) nous a conduit à faire l'hypothèse que les émissions sont constantes entre 1995 et 2010, ce qui induit vraisemblablement

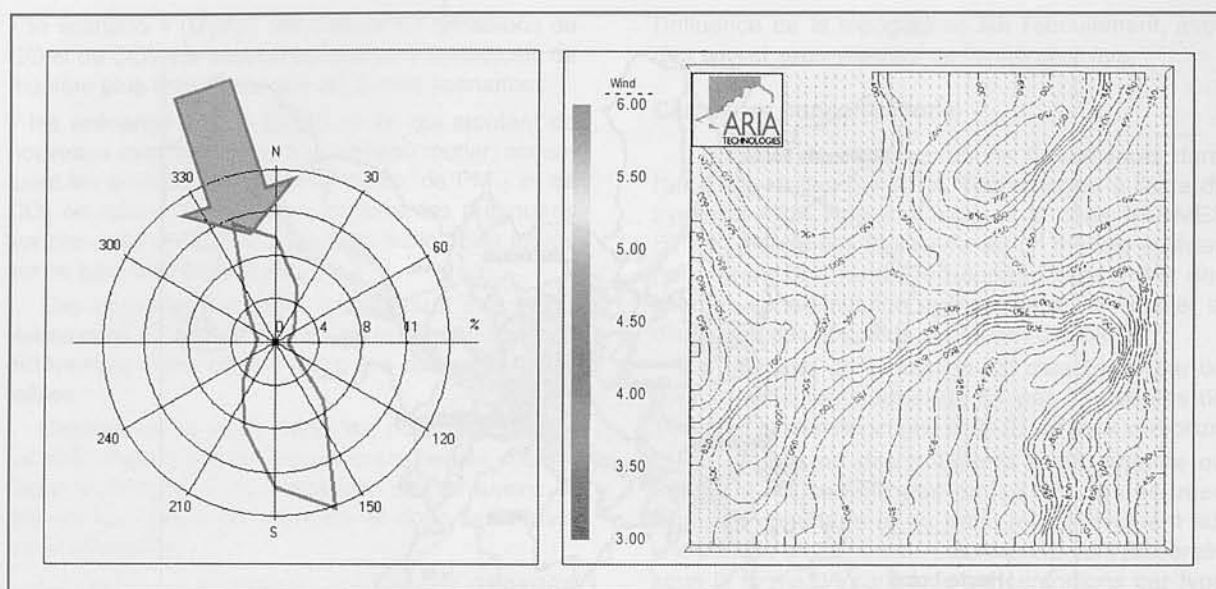


Figure 8.

Caractérisation de la configuration météorologique et champ de vent 3D.
(Sources : ARIA, IGN). Reproduit avec l'aimable autorisation de ARIA Technologies.
BD ALTI © IGN – Paris 1996 – Autorisation n° GC02-15.

Description of the meteorological situation and the 3D wind field.
(Sources : ARIA, IGN). Reproduced with kind permission of ARIA Technologies.
BD ALTI © IGN – Paris 1996 – Permission n° GC02-15.

Tableau 1.

Concentrations maximales en NO_x ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en fonction de la période de la journée.

(Source : ARIA). Reproduit avec l'aimable autorisation de ARIA Technologies.

Maximum concentration of NO_x ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) according to time of day.

(Source : ARIA). Reproduced with kind permission of ARIA Technologies.

	6 h	8 h	10 h	13 h	15 h	18 h
1995 – cas de base	25	88	80	65	75	73
2010 – tendanciel	20	35	35	28	31	29
2010 – PDU	20	34	34	27	30	28
2010 – DVA 2	22	34	34	27	29	27

une surestimation des émissions à l'horizon 2010, car les nouvelles normes de rejets industriels ne sont pas prises en compte. Ainsi, la part liée au chauffage des locaux pour les NO_x devient importante en 2010.

Comparaison avec les mesures AMPASEL

Les concentrations horaires calculées pour la situation de référence 1995 ont ensuite été moyennées sur la journée. Elles peuvent ainsi être comparées avec les données fournies par le réseau de surveillance de la qualité de l'air AMPASEL. Il s'agit des statistiques pour 1997 à 1999 (moyennes annuelles) calculées pour le dioxyde d'azote (NO_2) et le monoxyde d'azote (NO).

Les concentrations de NO et NO_2 mesurées par AMPASEL permettent d'estimer les concentrations moyennes annuelles pour les NO_x calculées en équi-

valent NO_2 , ainsi que le rapport moyen NO_2/NO_x égal à 0,44. Ces valeurs de NO_x permettent de comparer les données simulées par le modèle avec les valeurs mesurées par le réseau de surveillance de la qualité de l'air pour le cas de base 1995.

La valeur maximale en NO_x , calculée par le modèle de dispersion pour la période la plus pénalisante, est observée dans l'hypercentre de Saint-Étienne et vaut $88 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les oxydes d'azote, ce qui équivaut environ à $39 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en NO_2 en utilisant le rapport moyen NO_2/NO_x estimé à partir des mesures disponibles de l'AMPASEL. Cette valeur est assez importante comparée à la valeur limite ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour le NO_2) fixée par la directive européenne 1999/30/CE du 22 avril 1999.

La comparaison des résultats du cas de base 1995 avec les mesures du réseau de surveillance est

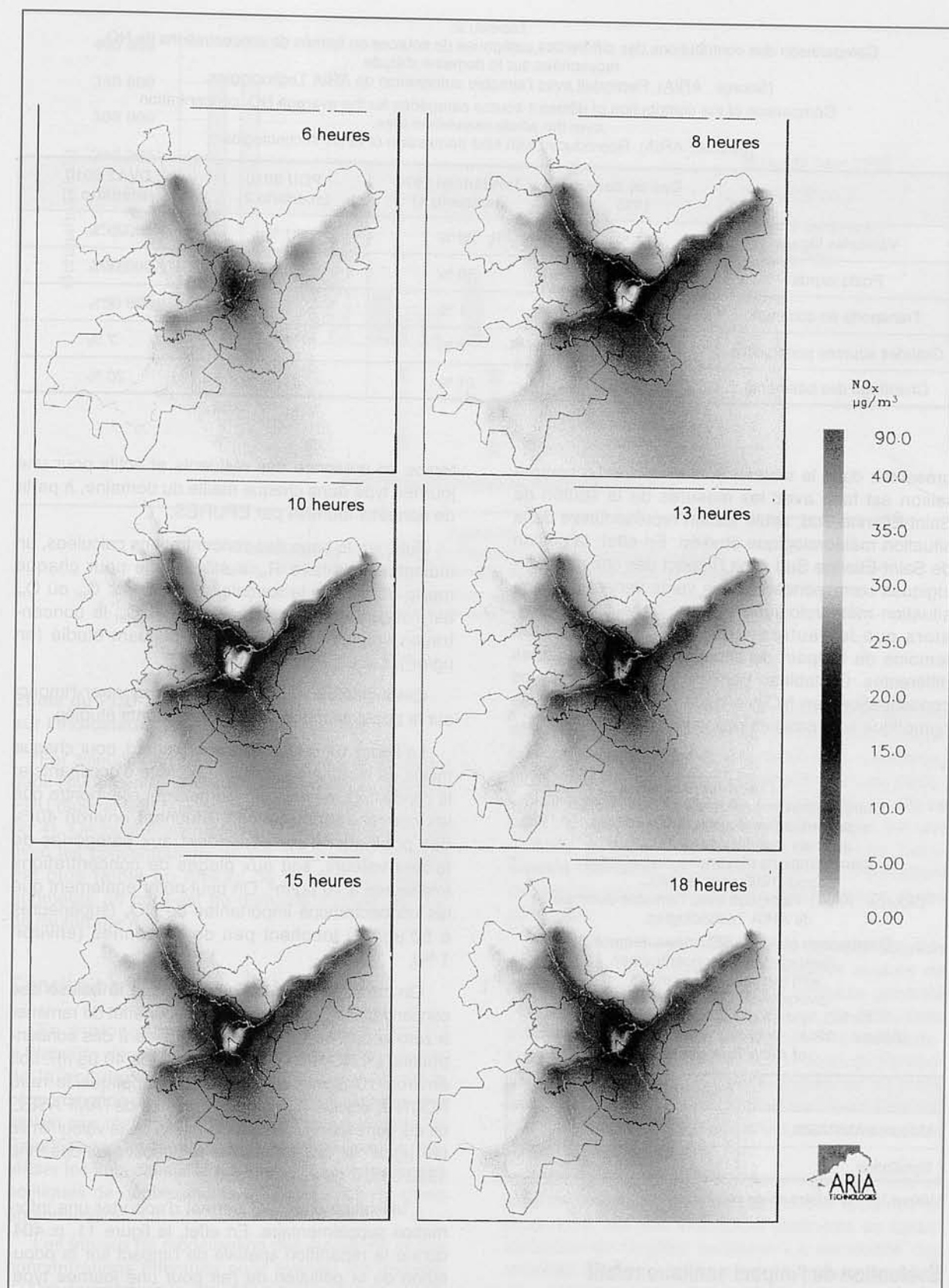


Figure 9.

Évolution des concentrations au sol en NO_x pour le scénario tendanciel 2010.
 (Sources : ARIA, IGN). Reproduit avec l'aimable autorisation de ARIA Technologies.
 BD CARTO © IGN – Paris 1996 – Autorisation n° GC02-15.

Evolution of ground-level concentrations of NO_x for the « business as usual » scenario 2010.
 (Sources : ARIA, IGN). Reproduced with kind permission of ARIA Technologies.
 BD CARTO © IGN – Paris 1996 – Permission n° GC02-15.

Tableau 2.

Comparaison des contributions des différentes catégories de sources en termes de concentrations de NO_x moyennées sur le domaine d'étude.

(Source : ARIA). Reproduit avec l'aimable autorisation de ARIA Technologies.

Comparison of the contribution of different source categories for the average NO_x concentration over the whole calculation area.

(Source : ARIA). Reproduced with kind permission of ARIA Technologies.

	Cas de base 1995	Tendanciel 2010 (scénario 1)	PDU 2010 (scénario 2)	DVA2 2010 (scénario 4)
Véhicules légers	41 %	20 %	21 %	20 %
Poids lourds	47 %	50 %	50 %	51 %
Transports en commun	2 %	1 %	1 %	1 %
Grandes sources ponctuelles	3 %	7 %	7 %	7 %
Chauffage des bâtiments	7 %	21 %	21 %	20 %

présentée dans le tableau 3, ci-dessous. La comparaison est faite avec les mesures de la station de Saint-Étienne Sud, seule station représentative de la situation météorologique étudiée. En effet, la station de Saint-Étienne Sud subit l'impact des cas météorologiques correspondant à des vents venant du nord, situation météorologique simulée dans cette étude, alors que les autres stations de mesures sont témoins de l'impact de situations météorologiques différentes. Ce tableau permet de constater que les concentrations en NO_x calculées à l'aide du modèle numérique sont proches des valeurs de l'AMPASEL.

Tableau 3.

Comparaison des mesures de l'AMPASEL (concentrations moyennes annuelles) avec les résultats des simulations (concentrations moyennes journalières) pour 1995 pour les NO_x.

(Source : ARIA). Reproduit avec l'aimable autorisation de ARIA Technologies.

Comparison of AMPASEL measurement data (average yearly concentration) with the calculation results (average daily concentration) for NO_x and for the reference year 1995.

(Source : ARIA). Reproduced with kind permission of ARIA Technologies.

	Saint-Étienne Sud (µg/m ³)
Mesures AMPASEL	42*
Simulation	39

* Valeur 1997 (première année de service).

Évaluation de l'impact sanitaire relatif aux concentrations journalières moyennes

Indicateurs sanitaires relatifs aux concentrations moyennes journalières

Dans un premier temps, le nombre d'occupants O_m de chaque maille a été évalué au prorata du

temps de présence des résidents et actifs pour une journée type dans chaque maille du domaine, à partir de données fournies par EPURES.

Puis, sur la base des concentrations calculées, un indicateur sanitaire R_m a été calculé pour chaque maille à l'aide de la formule : $R_m = O_m \times C_m$ où O_m est l'occupation sur la maille m, et C_m la concentration moyenne journalière du polluant étudié (en µg/m³), calculée pour la maille m.

Cet indicateur a pour objectif de montrer l'impact sur la population des différents polluants étudiés.

La figure 10, ci-contre, met en regard, pour chaque maille du modèle de calcul, le nombre d'occupants et la concentration moyenne journalière ; elle montre que les concentrations de NO_x touchant environ 40 % des populations correspondent aux catégories de faibles valeurs, soit aux plages de concentrations inférieures à 10 µg/m³. On peut noter également que les concentrations importantes de NO_x (supérieures à 50 µg/m³) touchent peu de personnes (environ 1 %).

On constate dans la figure 10, que la baisse des concentrations à l'horizon 2010 a pour effet de ramener à zéro la part de l'occupation exposée à des concentrations en NO_x dépassant la valeur de 40 µg/m³, soit environ 18 µg/m³ de NO₂, si l'on applique le ratio NO₂/NO_x calculé à partir des mesures de l'AMPASEL, ce qui correspond à environ la moitié de la valeur limite (40 µg/m³ de NO₂) fixée par la directive européenne 1999/30/CE du 22 avril 1999.

L'utilisation d'un SIG permet d'apporter une information supplémentaire. En effet, la figure 11, p. 404, donne la répartition spatiale de l'impact sur la population de la pollution de l'air pour une journée type. Cette figure montre une cartographie de cet indicateur sanitaire calculé sur un maillage régulier de 1 km² pour la situation de référence 1995.

On constate que le centre-ville de Saint-Étienne est une zone où une population importante est exposée à des concentrations élevées de NO_x.

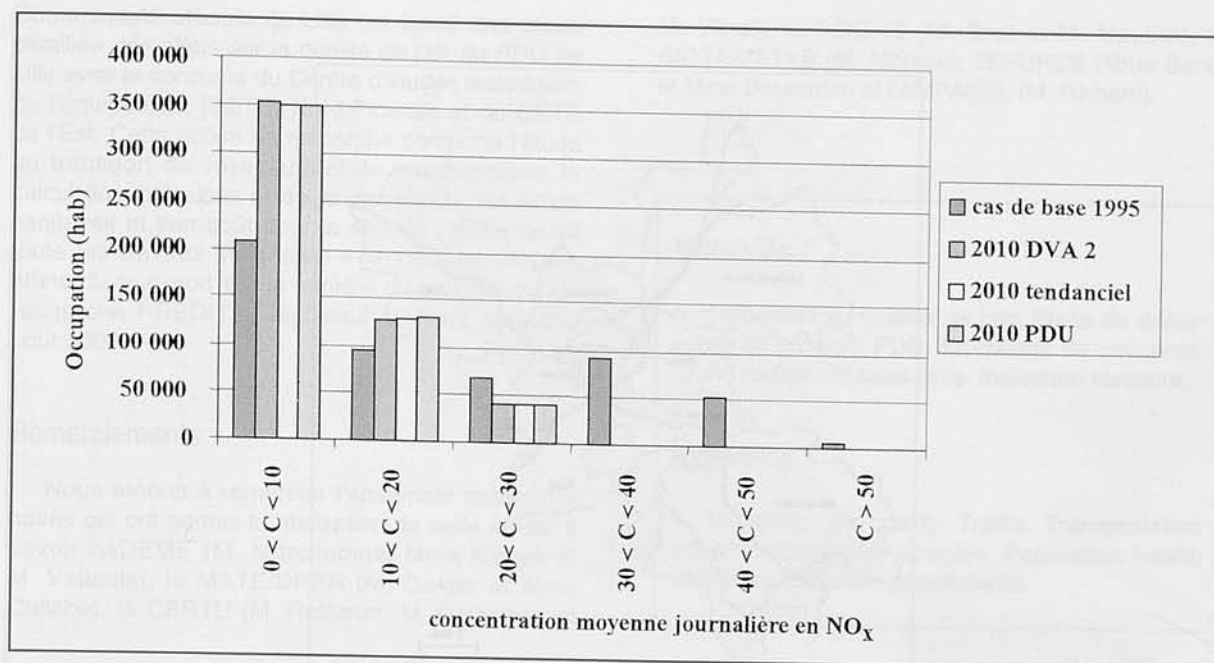


Figure 10.

Répartition de l'occupation en fonction de la concentration calculée.
(Source : ARIA). Reproduit avec l'aimable autorisation de ARIA Technologies.

Distribution of population present versus calculated concentration.
(Source : ARIA). Reproduced with kind permission of ARIA Technologies.

Effets du PDU sur l'indicateur sanitaire de concentration

Par ailleurs, l'indicateur sanitaire est plus important dans l'hypercentre de Saint-Étienne pour le scénario PDU (scénario 2) que pour le scénario DVA2 (scénario 4). On peut également noter que, en cohérence avec les concentrations au sol, l'indicateur sanitaire est plus faible au niveau de l'autoroute A45 et augmente au nord-est du domaine d'étude, le long de l'autoroute A47.

Conclusion

En prolongement du guide ADEME-CERTU « Plans de déplacements urbains – prise en compte de la pollution atmosphérique, du bruit et de la consommation d'énergie » [2], cette étude vient illustrer sur un cas réel, celui du PDU de l'agglomération de Saint-Étienne, la méthodologie proposée pour caractériser les impacts sur la pollution atmosphérique des politiques de déplacements urbains à l'échelle d'une agglomération.

Les travaux de modélisation des émissions et des concentrations effectués pour évaluer les impacts des diverses situations étudiées ont montré la nécessité de mettre en place des échanges rigoureux de données géographiques entre les partenaires locaux : DDE, autorité organisatrice des transports urbains, réseau de surveillance de la qualité de l'air et agence d'urbanisme. En outre, cette étude a révélé à chacun les connaissances des autres partenaires, néces-

saires pour mener à bien un tel travail interdisciplinaire et tout l'intérêt des systèmes d'information géographique qui permettent à ces partenaires d'échanger et de valoriser les bases de données mises en place : population, trafics, émissions, concentrations... De ce point de vue, l'étude pilote de Saint-Étienne est une réussite puisque, d'ores et déjà, le STU de Saint-Étienne Métropole, la DDE 42 et EPURES travaillent ensemble pour partager ces informations et les pérenniser.

Cette étude a donné lieu à sept rapports détaillés (disponibles sous forme informatique auprès de l'ADEME ou du CERTU) et à une synthèse générale [1]. Outre la présentation de quelques résultats, cette synthèse décrit les développements méthodologiques réalisés, leurs limites et leur degré de transposabilité. Signalons qu'un travail similaire est en cours pour la prise en compte du bruit sur Saint-Étienne, afin de compléter l'étude des effets environnementaux de ce PDU.

L'étude illustre une méthode reproductible et robuste, s'appuie sur des références récentes et reconnues, fixe des indicateurs pertinents de caractérisation de l'impact sanitaire. La sensibilité des résultats à quelques variantes du module de calcul des émissions a été testée. Bien qu'aucune étude systématique des incertitudes et de leur propagation dans la chaîne de modélisation n'ait été conduite, chaque jeu de données utilisé, chaque paramètre d'entrée des modèles, chaque module de simulation est, de toute évidence, entaché d'incertitudes sur les valeurs absolues des résultats. L'étude a été

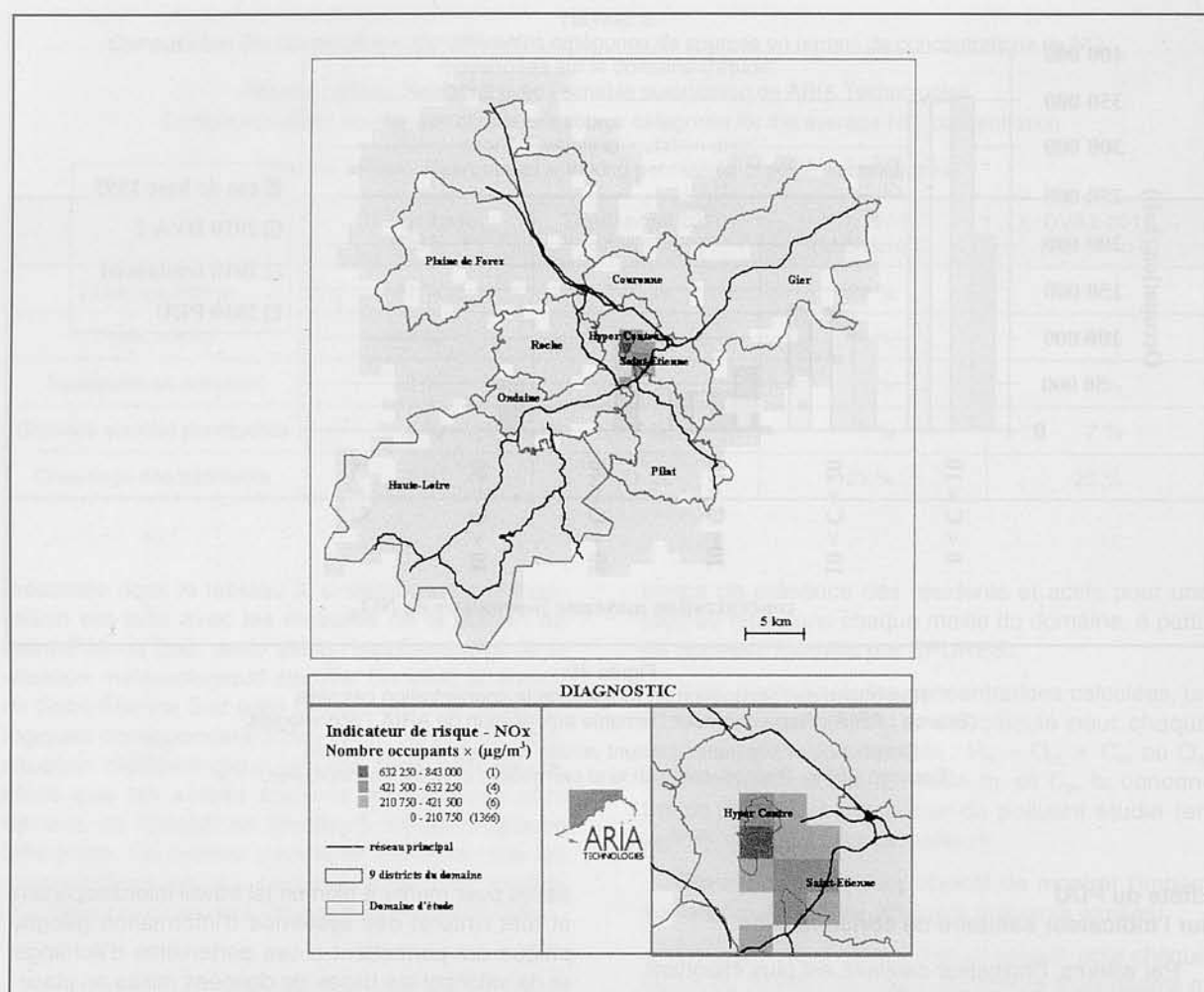


Figure 11.

Indicateur sanitaire calculé à partir des concentrations journalières de NO_x pour la situation de référence 1995. (Sources : MVA, ARIA, IGN). Reproduit avec l'aimable autorisation de MVA Ltd France et ARIA Technologies. BD CARTO © IGN – Paris 1996 – Autorisation n° GC02-15.

Population health indicator based on NO_x daily concentrations for the reference year 1995. (Sources : MVA, ARIA, IGN). Reproduced with kind permission of MVA Ltd France and ARIA Technologies. BD CARTO © IGN – Paris 1996 – Permission n° GC02-15.

réalisée à une résolution spatio-temporelle fine (heure par heure, arc par arc pour le trafic et les émissions, au km^2 pour les concentrations) avant agrégation pour la présentation des résultats sur des journées types ; cette démarche est un gage de fidélité pour les comparaisons entre scénarios.

Le cas de Saint-Étienne n'est certes pas représentatif des situations d'autres agglomérations du fait de sa situation particulière à proximité du pôle d'attraction lyonnais, de l'évolution de sa ville centre, du dynamisme de développement de certains de ses pôles périphériques, mais aussi des décisions déjà prises avant l'étude PDU en matière de politique des transports urbains (scénario tendanciel) ; les acquis méthodologiques n'en demeurent pas moins transposables à d'autres études d'impact de politiques de transport urbain. En ce qui concerne les résultats, la réduction des émissions de polluants du trafic urbain sur la période 1995-2010 proviendra pour une large

part du renouvellement du parc de véhicules (de l'ordre de 60 à 80 % selon les polluants, sauf pour le CO_2 qui évoluera peu), là où les politiques de transport urbain les plus volontaristes ne pourront apporter une réduction des émissions que de quelques pourcent, en cohérence avec la réduction du trafic routier induite par les mesures mises en œuvre. Ces ordres de grandeur restent valables quelle que soit l'agglomération considérée. Remarquons enfin que si les PDU n'apportent qu'une contribution modeste à l'amélioration de la qualité de l'air des agglomérations en comparaison avec l'effet du renouvellement du parc de véhicules, ils contribuent également à d'autres objectifs environnementaux tels que la maîtrise de l'effet de serre, du bruit et de l'occupation de l'espace public.

Dans la continuité de cette étude qui a permis de mettre en place ces premières bases de méthodologies appliquées, l'ADEME, le CERTU et la

Communauté urbaine de Lille ont lancé une étude détaillée des effets sur la qualité de l'air du PDU de Lille avec le concours du Centre d'études techniques de l'équipement (CETE) Nord-Picardie et du CETE de l'Est. Cette action de recherche comporte l'étude du transport de voyageurs et de marchandises, le calcul des émissions et de la dispersion, les effets sanitaires et leur coût pour la société ; elle s'inscrit dans les travaux du groupe « Monétarisation des effets du transport sur la santé » du programme de recherche PRÉDIT2 ; les résultats sont attendus pour 2003.

Remerciements

Nous tenons à remercier l'ensemble des partenaires qui ont permis la réalisation de cette étude, à savoir l'ADEME (M. Morcheoine, Mme Noppe et M. Vallouis), le MATE/DPPR (M. Geiger et Mme Callabe), le CERTU (M. Rotheval, M. Delcampe et

M. Vinot), la DDE 42 (M. Brot et M. Noullet), le SIOTAS/STAS (M. Moreau), l'EPURES (Mme Bariol et Mme Boutantin) et l'AMPASEL (M. Richard).

Mots clés

Modélisation. Qualité de l'air. Plans de déplacements urbains, PDU. Émissions de polluants. Trafic routier. Sources fixes. Indicateur sanitaire.

Keywords

Modelling. Air quality. Traffic. Transportation scheme. Stationary sources. Population health indicators. Emission of pollutants.

Références

1. Évaluation de l'impact sur la qualité de l'air de scénarios de déplacements urbains (PDU, DVA, mesures d'urgences) : Étude pilote de Saint-Étienne, co-édition ADEME-CERTU, avril 2002.
2. Guide ADEME-CERTU. Prise en compte de la pollution de l'air, du bruit et de la consommation d'énergie dans les plans de déplacements urbains 1999.
3. Bourdeau B. Évolution du parc automobile français entre 1970 et 2020. Mémoire de thèse – Rapport INRETS LEN N° 9801, 1998 : 377 p.
4. Ahlvik P et al. COPERT II (COMputer Programme to calculate Emissions from Road Transport) Final Draft Report 2nd Edition November 1997 European Environment Agency – European Topic Center on air Emission, 1997.
5. CITEPA, Inventaires d'émissions dans l'atmosphère dans le cadre des plans régionaux pour la qualité de l'air Région Rhône-Alpes, Convention N° 14/96, 1997 : 87 p.
6. Albergel A et al. Environmental Impact of Goods Traffic in Urban, Transport and Air pollution, Graz, 1999.
7. Perdriel S. Note de principe du code HERMES, Rapport EDF-DER HE-33/90.04, 1990.
8. Perdriel S, Moussafir J, Carissimo B. Note de principe du code MINERVE, version 4.0, Rapport EDF-DER HE-33/95/008, 1995.