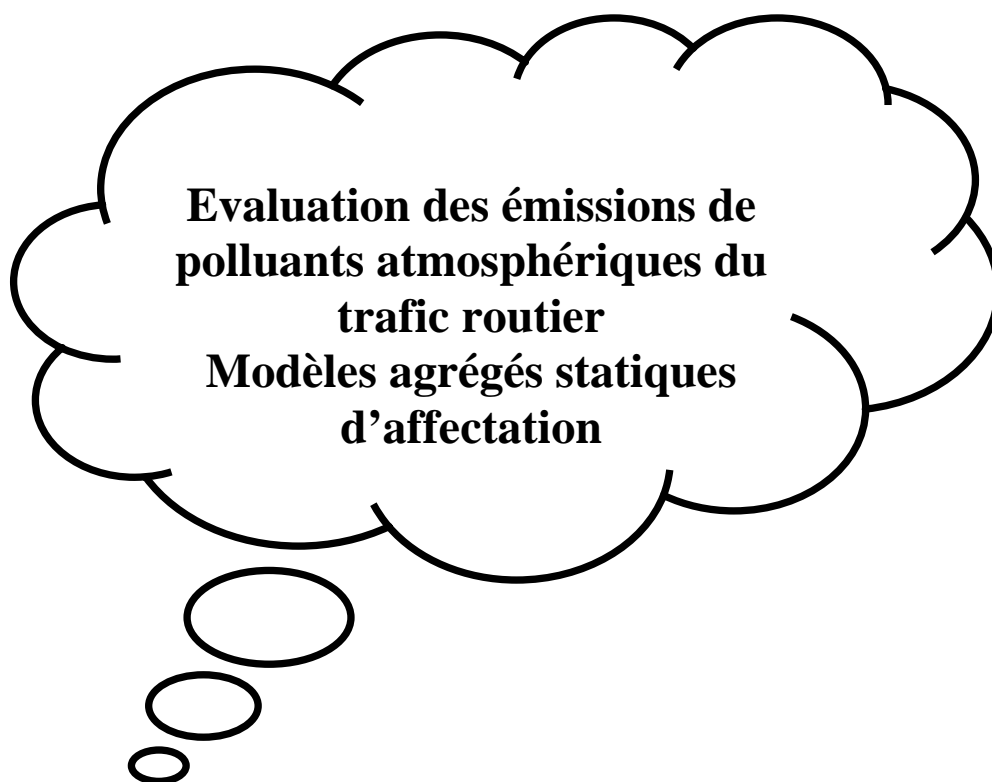


CAHIERS DU LAB.RII

- DOCUMENTS DE TRAVAIL -

N°145

Mars 2007



Noomen GUIRAT

EVALUATION DES EMISSIONS DE POLLUANTS ATMOSPHERIQUES DU TRAFIC ROUTIER. MODELES AGREGES STATIQUES D’AFFECTATION

ASSESSMENT OF THE POLLUTANT AIR EMISSIONS CAUSED BY THE ROAD TRAFFIC USING THE AGGREGATE STATIC ASSIGNMENT MODELS

Noomen GUIRAT

Résumé : Les modèles statiques d’affectation sont couramment utilisés pour gérer les réseaux routiers, et sont souvent repris pour évaluer les émissions car ils présentent le double avantage d’être simples à manipuler et de fournir des résultats facilement utilisables. Plusieurs modèles étaient développés et modernisés ces dernières années, années de la montée, d’un côté des préoccupations environnementales, et de l’autre la spectaculaire croissance démographique urbaine. Les questions environnementales exercent une pression toujours plus forte tant au niveau de l’ampleur des risques envisagés qu’à travers leur prise en compte dans les jeux des acteurs économiques et sociaux à l’échelle locale comme au niveau international. L’avènement de cette société urbaine s’illustre par le fait que plus des deux tiers de la population mondiale vivent aujourd’hui en ville, développant une culture spécifique et dominante ; les transports routiers, auxquels on associe bien souvent congestion, pollution atmosphérique et nuisances sonores, tiennent une place de choix entre ces deux préoccupations.

Abstract: Static assignment models are frequently used to manage the road networks, and are often repeated to assess the emissions because they present the double advantage to be simple for using and giving easy results. Many models, in the transport domain, were developed and modernized last years, years of the ascent of the environmental preoccupations and the spectacularly urban demographic growth. Environmental questions have a great pressure at both the extent of considered risks and through their consideration in the economic and social games at the local and international levels. The advent of this urban society appears clearly if we know that more than 66% of the population in the world live today in towns, developing a specific and dominant culture. The road transports, to witch we associate usually congestion, air pollution and harmful emissions for sound, hold the choice between those preoccupations.

EVALUATION DES EMISSIONS DE POLLUANTS ATMOSPHERIQUES DU TRAFIC ROUTIER. MODELES AGREGES STATIQUES D’AFFECTATION

ASSESSMENT OF THE POLLUTANT AIR EMISSIONS CAUSED BY THE ROAD TRAFFIC USING THE AGGREGATE STATIC ASSIGNMENT MODELS

TABLE DES MATIERES

Introduction	4
1. La modélisation du trafic routier et l’évaluation de ses émissions de polluants atmosphériques	5
2. Tester la pertinence des modèles agrégés statiques d’affectation pour évaluer les émissions	7
3. L’incidence de la mise en forme des données nécessaires à l’affectation	9
4. Sensibilité des résultats en fonction du type d’affectation	10
4.1. Affectation par tout ou rien (all or nothing)	11
4.2. Equilibre utilisateur (User equilibrium)	11
4.3. Equilibre utilisateur stochastique (Stochastic user equilibrium)	11
4.4. Equilibre système (system optimum)	11
4.5. Affectation Probit (Probit assignment)	11
5. Contraintes générées par les vitesses moyennes fournies en sortie	13
5.1. Non prise en compte des variations de vitesses sur un même arc	13
5.2. Effets de la congestion	14
Conclusion	15
Bibliographie	16

Introduction

Les modèles statiques d'affectation sont couramment utilisés pour gérer les réseaux routiers, et sont souvent repris pour évaluer les émissions car ils présentent le double avantage d'être simples à manipuler et de fournir des résultats facilement utilisables. Plusieurs modèles, ancrés dans le domaine des transports, étaient développés et modernisés ces dernières années, années de la montée, d'un côté des préoccupations environnementales, et de l'autre la spectaculaire croissance démographique urbaine. Les questions environnementales exercent une pression toujours plus forte tant au niveau de l'ampleur des risques envisagés qu'à travers leur prise en compte dans les jeux des acteurs économiques et sociaux à l'échelle locale comme au niveau international ; l'avènement de cette société urbaine s'illustre par le fait que plus des deux tiers de la population mondiale vit aujourd'hui en ville, développant une culture spécifique et dominante ; les transports routiers, auxquels on associe bien souvent congestion, pollution atmosphérique et nuisances sonores, tiennent une place de choix entre ces deux préoccupations.

La forte poussée de l'urbanisation, les mouvements de nos sociétés humaines sont de plus en plus perçus en contradiction avec les rythmes et les grandes régulations naturelles de notre planète. Depuis les années 80, les instances internationales ont proposé la notion de développement durable pour servir de cadre de réflexion à une politique mondiale concertée, permettant de réduire cette contradiction. Les modèles sont de plus en plus développés dans l'objectif essentiel d'évaluer des projets d'aménagement du réseau routier d'une agglomération. Ils permettent notamment d'établir une utilité collective globale d'un projet particulier ou de tester sa cohérence avec l'ensemble du réseau. Cet objectif d'évaluation a conduit la plupart de ces modèles à évoluer depuis les années 80 (année de proposition de la notion de développement durable) pour s'adapter aux préoccupations des périodes traversées, et à traverser, en affinant les modules de prise en compte de la congestion, et en s'enrichissant aujourd'hui des modules d'évaluation des émissions polluantes.

Ces modèles donnent une image statique de l'état de la circulation au niveau d'une agglomération. Ils établissent un bilan moyen de ce qu'on obtiendrait si on faisait une série d'observations pendant plusieurs jours sur une même période. Ils sont susceptibles de répondre à des calculs économiques d'évaluation globale de grands projets de modification du réseau. Par contre, ils fournissent une information relativement pauvre pour décrire les conditions de circulation sur le réseau routier et peuvent facilement indiquer des trafics par arc erronés s'ils sont mal paramétrés. C'est dans ce cadre qu'on se posera les questions suivantes auxquelles on essaiera de répondre dans cet article : en quoi ces modèles statiques d'affectation peuvent-ils être intéressants pour évaluer les émissions de polluants atmosphériques du trafic routier ? Quels biais et quelles incertitudes introduisent-ils ? Il faut souligner également qu'il convient d'adapter les précautions méthodologiques aux objectifs de l'évaluation.

On commencera par une présentation de la logique générale suivie lors d'une évaluation des émissions du trafic, nous adoptons une démarche pas à pas consistant à nous interroger à chaque grande étape de calcul sur la pertinence et les limites des hypothèses propres à la procédure d'affectation statique. Nous évoquerons successivement les limites des données initiales décrivant l'offre et la demande de transport, la sensibilité relative des résultats en fonction du type d'affectation et, enfin, l'efficacité de l'usage des vitesses moyennes par arc par rapport à une représentation plus fine avec des vitesses variables.

Ce travail se base sur des simulations effectuées à partir du modèle ATESAME développé par le GRT (Groupe de Recherche sur les Transports, aux Facultés Universitaires Notre Dame de la Paix, en Belgique), ce modèle statique d'affectation du trafic sera appliqué à l'agglomération tunisoises, et complété de fonctions d'émissions établies sur la base de recherches empiriques. La mise en œuvre de scénarios différenciés permet de tester l'impact des hypothèses propres à ce type de modèles sur les résultats d'émissions que l'on peut en déduire.

1. La modélisation du trafic routier et l'évaluation de ses émissions de polluants atmosphériques

Différentes préoccupations peuvent être à l'origine d'une évaluation des nuisances de transport. Parmi ces préoccupations, au moins trois méritent d'être prises en considération :

- L'évaluation des niveaux réels d'émissions du secteur de transport pour les comparer à celles des autres secteurs d'activité (industrie, commerce, activités humaines...) et imputer ainsi à chacun sa part de responsabilité dans la pollution atmosphérique ;
- La mesure de la sensibilité des émissions aux variations des caractéristiques du système de transport, permettant par exemple de tester et de comparer l'impact environnemental des différents scénarios d'évolution du réseau ou de la demande du transport ;
- L'élaboration d'une approche spatialisée des nuisances pour rendre compte à un niveau local des problèmes posés par les transports routiers.

Ces trois préoccupations apparaissent beaucoup plus complémentaires qu'opposées. Une première piste pour y répondre consiste à utiliser les modèles de trafic urbain qui fournissent la description la plus précise possible des conditions de circulation au sein d'une agglomération, tant il est vrai que les caractéristiques cinématiques des véhicules apparaissent déterminantes pour expliquer leurs niveaux d'émissions. Les premiers travaux dans ce sens ont permis de montrer que les émissions ne sont pas uniformément réparties au sein d'un réseau ou le long d'un même arc. Il existe notamment de fortes pointes de pollution aux intersections (Patterson, Meyer, 1975 ; Lieberman, Cohen, 1976). Parallèlement, la recherche de précision spatiale dans l'évolution a conduit à soigner les modules de diffusion des émissions, car la physionomie des rues ainsi que l'orientation et l'intensité des vents dominants jouent un rôle fondamental dans la concentration des polluants (Horowitz, 1982).

Les outils ainsi développés apparaissent dès lors performants pour établir un bilan des nuisances de proximité de la pollution routière ; ils sont également intéressants pour tester l'impact environnemental immédiat des mesures d'ingénierie qui améliorent la fluidité du trafic et modifient les caractéristiques cinématiques des véhicules en circulation, comme par exemple la mise en place de plans de feux.

Par contre la complexité des calculs limite ce type d'approche à un ensemble restreint d'arcs et de carrefours et ne permet pas d'établir une évaluation au niveau global d'une agglomération. On est alors obligé d'avoir recours à une nouvelle famille de modèles de trafic : les modèles agrégés statiques d'affectation. Conçus pour évaluer les flux sur le réseau routier de toute agglomération, ces modèles n'apportent pas le même degré de finesse en matière de représentation des conditions de circulation : ils ne fournissent qu'une vitesse moyenne par arc. Par contre, ils sont plus globaux et permettent d'établir des évaluations sur une échelle beaucoup plus vaste.

Ces modèles ont pour objectif essentiel d'évaluer des projets d'aménagement du réseau routier d'une agglomération. Ils permettent notamment d'établir une utilité collective globale d'un projet particulier ou de tester sa cohérence avec l'ensemble du réseau (Manheim, 1979). Cet objectif d'évaluation a conduit la plupart de ces modèles à évoluer depuis les années 70 pour s'adapter aux préoccupations des périodes traversées, en affinant les modules de prise en compte de la congestion, en intégrant l'impact de la mise à péage des infrastructures, en s'enrichissant aujourd'hui de modules d'évaluation des émissions polluantes.

Ces modèles donnent *une image statique* de l'état de la circulation au niveau d'une agglomération, fournissant ainsi une modélisation d'une situation *moyennée sur la période considérée* sur un réseau de trafic : il s'agit d'un bilan moyen de ce que l'on obtiendrait si on faisait une série d'observations pendant plusieurs jours sur une même période. Un tel outil continue à être d'une certaine utilité, notamment pour des études relatives à la planification du trafic, répondant à des calculs économiques d'évaluation globale des grands projets de modification de réseau par exemple ; il ne faut cependant pas utiliser ces modèles à des fins pour lesquelles ils ne sont pas conçus, comme, par exemple, la recherche des évolutions temporelles de la circulation. Dans ce cas, on aura plutôt recours à des modèles dynamiques. Mais il faut néanmoins noter que les modèles statiques ont l'avantage supplémentaire par rapport aux modèles dynamiques de nécessiter un ensemble moins fouillé (et donc plus facile à récolter) de données. Ils sont agrégés dans le sens où chaque déplacement n'est pas considéré isolément. Ils sont au contraire regroupés à partir d'un découpage de l'aire géographique étudiée, permettant de les caractériser par leur zone d'origine et leur zone de destination.

Une représentation schématique du territoire est tout d'abord nécessaire avant toute utilisation d'un modèle. Cette description consiste tout d'abord en un découpage du territoire en zones déterminées selon les motivations de l'étude, le contexte socio-économique de la région considérée et les données disponibles. Chacune de ces zones est représentée par un point, appelé *nœud* ou plus précisément *centroïde*. Ces centroïdes sont donc des émetteurs et/ou récepteurs de déplacements. Ensuite, les routes du réseau de transport sont représentées par des lignes, appelées *arcs* dont les croisements sont des points également appelés *nœuds* (plus précisément *carrefours*). Les arcs relient donc les différents nœuds, qu'ils soient centroïdes ou carrefours. A ces arcs sont associées une série de caractéristiques, telles que la longueur, la vitesse autorisée ou observée, la capacité, la sensibilité à la congestion,... Nous obtenons ainsi un *réseau* représentant la région étudiée.

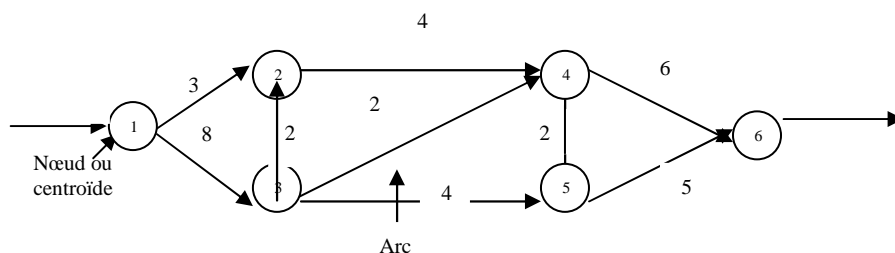


Fig. 1 Réseau routier

Les zones, représentées dans le modèle par les centroïdes, sont à l'origine et/ou la destination de déplacements. Nous pouvons ainsi définir une *matrice de demande*, ou *matrice origine/destination*, dont l'élément situé au croisement de la $i^{\text{ème}}$ ligne et de la $j^{\text{ème}}$ colonne représente le nombre de déplacements, noté q_{ij} , ayant pour origine la zone i et pour destination

la zone j . La procédure d'affectation consiste à rechercher les itinéraires empruntés pour fournir les flux et les vitesses par arc. (Pour notre exemple de la figure 1, le nombre de déplacements entre les centroïdes 1 et 2 noté q_{12} est de 3, entre 1 et 3 noté q_{13} est de 8).

A partir de ces résultats, il est alors possible d'estimer un niveau d'émission de polluants atmosphériques sur chacun des arcs à l'aide d'abaques fournissant les émissions moyennes par véhicule pour un kilomètre parcouru à une vitesse donnée. Ce calcul fait souvent appel à des informations complexes :

- En distinguant plusieurs types de véhicules, véhicules légers/poids-lourds, véhicules essence/diesel, etc. et en différenciant leurs émissions. Des logiciels permettent de prendre en compte, de manière fine, l'état des véhicules en circulation ainsi que les facteurs d'émissions qui leur correspondent. Le modèle développé et actualisé régulièrement par l'Environmental Protection Agency reste une référence dans ce domaine (US-EPA, 1994).
- En affinant la représentation des conditions de circulation. Une première solution consiste à décomposer chaque arc en plusieurs parties distinctes, chacune étant caractérisée par l'une des phases d'accélération, de vitesse de croisière, de décélération et de ralenti des véhicules en circulation (Hickman, Colwill, 1982). D'autres travaux ont cherché à mettre en évidence des cycles de conduite type, représentatifs des conditions réelles de circulation. Reproduits en laboratoire, ces cycles ont permis d'établir des taux moyens d'émission (Cf. par exemple Journard, Hickman, Nemerlin, Hassel, 1992), évitant ainsi de simuler les caractéristiques cinématiques des véhicules en circulation.

Ces évaluations peuvent, ensuite, tout aussi bien être présentées au niveau géographique très fin de l'arc ou du tronçon de voirie qu'être réagrégées sur un quartier ou une agglomération. Comme dans le cas précédent, ces modules de diffusion des émissions peuvent également être utilisés.

2. Tester la pertinence des modèles agrégés statiques d'affectation pour évaluer les émissions

Différents types de tests peuvent être envisagés pour mesurer la pertinence des résultats. On peut tout d'abord confronter ces résultats à des mesures sur le terrain. Ceci constitue une étape primordiale pour établir l'efficacité globale de la procédure d'évaluation. Par contre cette méthode ne permet pas de repérer les maillons faibles à l'intérieur de la procédure. On peut également établir une comparaison entre les résultats issus de modèles différents.

De telles démarches sont bien entendu nécessaires pour permettre de vérifier les performances des modèles destinés à mesurer les émissions polluantes du trafic. Notre propos, cependant, se situe en amont de cette phase de validation empirique et s'attache, comme nous l'avons précisé en introduction, à l'impact spécifique d'un modèle agrégé statique d'affectation du trafic sur les résultats obtenus. Nous nous sommes dès lors attachés à vérifier la sensibilité de ces résultats aux variations des principaux paramètres liés à la procédure d'affectation. Pour structurer cette réflexion, nous avons repris le déroulement naturel de toute procédure, entrées / calculs / sorties, étant entendu que ces trois points sont complètement conditionnés par la logique d'ensemble de l'affectation agrégée statique. Trois niveaux d'interrogation ont donc été abordés :

- L'incidence de la mise en forme des données nécessaires pour alimenter les modèles d'affectations (voiries et déplacements) ;

- La sensibilité des résultats aux options de calcul et au paramétrage des fonctions d'affectation ;
- Enfin, les contraintes que l'usage de vitesses moyennes fait peser sur les calculs d'émissions.

Le modèle d'affectation utilisé est le modèle ATESAME (Another Traffic Equilibrium Software And Matrix Estimation) développé par le GRT (Groupe de recherche sur les transports) en Belgique. Une première version du logiciel (ATES) a été écrite par Wang Baoshan (Northern Jiaotong University, Pékin) et Ph. Toint lors d'une visite de celui-ci à Pékin dans le cadre d'un projet sino-belge sur la simulation du trafic urbain. D'autres fonctionnalités ont été ensuite implémentées par E. Cornélis. Ce logiciel a enfin été à la base du développement du modèle régional wallon. Ce modèle sera appliqué sur la ville de Tunis. Nos évaluations ont été établies à partir de comptages fournis par le département des ponts et chaussées du ministère de l'équipement à la ville de Tunis. Elles concernent les déplacements routiers d'une heure de pointe du matin de l'agglomération tunisoise en 2004. Les données d'émissions étant reprises de travaux de l'ANPE (Agence Nationale de Protection de l'Environnement) en collaboration avec le ministère de l'environnement et du développement durable, du ministère de l'équipement et de l'ANERE (l'Agence Nationale des Energies Renouvelables) datant de la même époque.

Grâce à ce modèle, nous obtenons une image statique des flots sur les différents arcs, c'est-à-dire que nous obtenons un bilan moyen de ce que nous obtiendrons si nous faisons une série d'observations pendant plusieurs jours sur une même période. En aucun cas, ces résultats ne sont pertinents pour un moment précis. Mais dans l'idée d'obtenir une évaluation des émissions de polluants sur de longues périodes, cette méthode s'avère tout à fait adéquate.

La phase *d'affectation*¹ terminée, nous pouvons évaluer les émissions globales des gaz polluants. Cette étape, nous la réalisons à l'aide des données fournies par l'ANPE, le ministère de l'environnement et du développement durable, le ministère de l'équipement et l'ANERE. En effet, ces données fournissent des émissions moyennes par véhicule pour un kilomètre parcouru à une vitesse donnée et pour une température considérée. Une fois les émissions totales évaluées, nous redistribuons les émissions en fonction des types de véhicules ou par zone étudiée.

La dernière étape s'avère la plus compliquée à modéliser. En effet, lors de cette étape, deux types de données entrent principalement en jeu : les données météorologiques et les données topographiques. Cette dernière étape consiste, à partir des émissions totales par arc, à déterminer la concentration réelle des gaz polluants présents dans l'atmosphère en tenant compte des différents phénomènes météorologiques (la température peut jouer un rôle de catalyseur lors de certaines réactions chimiques et, ainsi, diminuer la concentration réelle de gaz polluants dans l'atmosphère) et des données topographiques (la topographie de certaines rues peut accroître les phénomènes de vents dominants et, ainsi, réduire les concentrations de polluants présentes dans l'atmosphère (Horowitz, 1982)). Nous la dénommons phase de *diffusion*, son but principal étant de s'intéresser à la dispersion des polluants dans l'atmosphère et non à l'évaluation, à proprement parler, des gaz polluants. Ainsi donc, nous pouvons résumer ce problème en quatre phases distinctes que sont les phases d'affectation, d'évaluation des émissions, de répartition de ces mêmes émissions et de diffusion.

¹ Phase au cours de laquelle on assigne à chaque arc un flot de véhicules, avec ses caractéristiques.

3. L'incidence de la mise en forme des données nécessaires à l'affectation

Pour effectuer ses calculs, un modèle statique d'affectation des déplacements nécessite deux principales sources d'informations : une description du réseau de voirie et une matrice des déplacements avec leurs zones d'origines et leurs zones de destinations. L'élaboration de ces entrées du modèle est une première source d'imprécision qu'il convient de ne pas négliger.

Une première difficulté concerne la constitution de la matrice origine-destination des déplacements. Dans le cadre traditionnel de la modélisation du trafic dite « à quatre étapes », la procédure consiste à réunir un système de modèles qui vont successivement générer la demande de déplacements (generation modelling), distribuer ces déplacements selon leur zone de destination (distribution modelling) et, éventuellement, les répartir entre différentes alternatives modales (modal split). Les matrices de déplacements par mode ainsi obtenues sont ensuite affectées sur les réseaux qui leur correspondent (assignment modelling). On peut également procéder directement à des enquêtes sur terrain pour constituer la matrice des déplacements. De simples données de comptages peuvent fournir les premières indications, même si elles ne renseignent pas sur les origines et destinations des déplacements. On peut également utiliser des enquêtes plus complètes. Par exemple en France, on combine une enquête ménage qui apporte une image des déplacements des résidents d'une agglomération et une enquête cordon qui recueille les déplacements de transit et d'échange. Par contre, les déplacements professionnels ainsi que les déplacements des non résidents à l'intérieur du périmètre enquêté se trouvent ignorés. D'après le ministère de l'équipement tunisien, les comptages établis sur le réseau laisseraient apparaître une proportion de 10 à 15% de déplacements oubliés au sein de l'agglomération tunisoise, dont on ne connaît ni l'origine ni la destination, et qui sont redistribués au mieux au sein de la matrice de déplacements.

Ainsi chaque méthode permet de construire une matrice sur la base d'informations de natures différentes et conduit à des erreurs et incertitudes peu comparables. Pour une gestion des infrastructures à court et moyen terme, des enquêtes-déplacements, complétées par des données de comptages, apparaissent plus directement ancrées sur la réalité. Par contre, une modélisation des phases de génération et de distribution des déplacements permet plus facilement de déboucher sur des exercices prospectifs de simulations d'évolutions de l'urbanisation et du système de transport.

Un autre point concerne la période temporelle idéale pour mettre en œuvre des indicateurs de nuisance au niveau d'une agglomération. Les modèles d'affectation sont le plus souvent utilisés pour calibrer le réseau viaire en fonction de la congestion, et les matrices de déplacements sont construites sur la base d'une heure de pointe du jour. L'adaptation des simulations à une évaluation plus optimale des émissions polluantes nécessite, dès lors, de construire au moins une matrice d'heure creuse supplémentaire. Ce travail est d'autant plus nécessaire que la structure des origines et destinations évolue suivant la période de la journée, et que la dégradation des conditions de la circulation entre heure creuse et heure de pointe affecte les émissions unitaires des véhicules. La distinction et la prise en compte de ces deux périodes sont également importantes pour effectuer des simulations de long terme, car les trafics ont tendance à augmenter beaucoup plus vite en heure creuse (et en périphérie) qu'en heure de pointe (ou en centre ville), déjà saturée.

En plus de ces questions liées à la constitution de la matrice des déplacements, d'autres limites sont introduites par la nécessaire simplification de la représentation géographique des données. Pour des raisons pratiques de calcul et des contraintes statistiques de représentativité, les déplacements ne sont pas considérés individuellement avec leurs lieux

précis de départ et d'arrivée. Ils sont regroupés par zones géographiques d'origine et de destination. Chaque zone est en fait représentée par un point, son centroïde, source ponctuelle d'émission et de réception des flux située le plus souvent au niveau du centre de gravité de la zone en question. Cette simplification géographique a une double conséquence. D'une part, l'affectation ne portant que sur les déplacements effectués d'une zone à une autre, les déplacements effectués à l'intérieur d'une même zone ne sont pas pris en compte dans les calculs et n'apparaissent donc pas dans les résultats. D'autre part, la liaison entre les centroïdes et ce réseau simplifié est assurée par des liens fictifs dont les caractéristiques sont établies de façon à représenter correctement les temps moyens d'accès entre chaque zone et ce réseau. Par contre les longueurs, les temps de parcours et les trafics sur ces liens n'ont guère de simplification en tant que tels. Leur usage, pour calculer des niveaux d'émissions, ne peut se faire que faute de mieux et devrait être évité lorsqu'il n'est pas indispensable. Il va sans dire que plus le découpage initial des zones est fin, plus les erreurs d'appréciation, concernant les déplacements routiers et les pollutions qu'ils génèrent, se trouvent réduites.

En guise de premier bilan, nous avons donc quelques imprécisions dans l'évaluation des nombres de déplacements permettant de constituer la matrice origine/destination ; des trafics intrazones non connus et des trafics sur liens fictifs pris en compte de manière approximative ; des variations des caractéristiques des déplacements au cours de la journée dont la prise en compte, dans le cadre d'un bilan environnemental fin, nécessite souvent la construction d'au moins une matrice d'heure creuse supplémentaire. Les niveaux calculés des trafics et des polluants atmosphériques ne peuvent donc guère prétendre donner une image fidèle de la réalité. Ils indiquent des ordres de grandeurs sans qu'il soit véritablement possible d'avoir une idée de l'erreur commise. Ces limites conduisent à rester prudents sur les niveaux d'émissions obtenus et à insister sur la nécessité d'un découpage fin des zones et d'un taux de sondage élevé lors du recueil d'informations sur les déplacements pour que les bilans locaux puissent être fiables.

Par contre, ces imprécisions propres aux données initiales n'ont pas de raison d'affecter différemment plusieurs scénarios d'affectation. Ceci signifie que les incertitudes sur les niveaux obtenus n'empêchent pas de mener des analyses relatives en comparant les bilans environnementaux établis sur différents états du système de transport. « Although the actual absolute levels of pollution may be affected by many other factors besides those included in the component models, the modelling system can reasonably detect relative differences in levels of pollution between alternative sets of traffic load distributions » (Taylor, Young, 1995). Ainsi, si les incertitudes introduites par les données nécessaires à l'affectation rendent moins fiables les niveaux d'émissions calculés, elles affectent beaucoup moins les comparaisons entre différents résultats.

4. Sensibilité des résultats en fonction du type d'affectation

La vérification de la sensibilité des résultats aux différentes procédures d'affectation possibles nous permet de réaliser pour chaque affectation une évaluation des émissions de gaz polluants. Nous reprenons pour chaque cas le réseau étudié auquel nous appliquons, successivement, les différentes possibilités d'affectation prévues par le programme ATESAME et terminons par estimer les évaluations de gaz polluants. ATESAME offre à l'utilisateur la possibilité de choisir parmi cinq types d'affectations. Il s'agit des méthodes dites *tout ou rien* (plus court chemins), *équilibre utilisateur*, *équilibre système*, *équilibre utilisateur stochastique* et *affectation probit*.

4.1. Affectation par tout ou rien (all or nothing)

Dans l'affectation dite « tout ou rien », la demande de déplacement entre une origine i et une destination j notée q_{ij} , est entièrement affectée sur le chemin du coût minimum (temps minimum) joignant cette origine à cette destination. Aucun des autres chemins reliant i à j ne sert à acheminer la demande q_{ij} . Une telle approche ne peut être utilisée que si l'on suppose que le coût associé aux arcs (ou le temps de trajet sur les arcs) est constant, c'est-à-dire indépendant du flux sur l'arc.

4.2. Equilibre utilisateur (User equilibrium)

Il est raisonnable de penser que chaque utilisateur va tenter de minimiser son coût de déplacement (représenté, par exemple, par son temps de parcours) pour se rendre d'une origine i à une destination j . Mais cela ne signifie pas automatiquement que toutes les personnes désirant se rendre de i à j vont emprunter un même chemin. En effet, le temps de parcours sur chaque arc du réseau étant fonction du flux sur l'arc, le temps de parcours de différents trajets sur le réseau est modifié lorsque les flux sur les arcs changent. Un équilibre est atteint lorsque aucun usager ne peut améliorer son temps de parcours en changeant unilatéralement d'itinéraire. Ainsi, l'*équilibre utilisateur* est atteint, pour une paire OD (i, j), les temps de parcours sur tous les itinéraires utilisés entre i et j sont égaux, et ils sont inférieurs ou égaux aux temps de parcours qu'aurait un usager en empruntant un itinéraire non utilisé.

4.3. Equilibre utilisateur stochastique (Stochastic user equilibrium)

Les hypothèses de connaissance parfaite du réseau, et selon lesquelles tous les usagers confrontés à un choix auraient le même comportement, peuvent paraître irraisonnables. L'équilibre utilisateur stochastique tente d'y donner une réponse en distinguant les coûts que les usagers perçoivent et le coût du trajet réel. L'équilibre est atteint lorsque chaque usager estime qu'il peut améliorer son temps de parcours en changeant unilatéralement son itinéraire.

4.4. Equilibre système (ou social) (system optimum)

Dans la méthode de l'équilibre système (social), l'affectation de la matrice de demande sur le réseau est faite de telle manière que le coût (le temps) total sur le réseau, c'est-à-dire la somme des coûts (temps) de tous les déplacements effectués, soit minimum. L'équilibre système ne représente généralement pas dans la réalité une situation d'équilibre (chaque usager doit favoriser la diminution du coût total (temps total) des trajets et non pas son propre coût (temps), ou autrement dit les usagers auraient la possibilité de diminuer leur propre coût de parcours en modifiant leur itinéraire), mais l'intérêt de cette procédure d'affectation repose sur le fait que les résultats peuvent servir de point de repère pour la comparaison de différentes affectations des flux.

4.5. Affectation Probit (Probit assignment)

Le modèle probit est un modèle de choix discrets basé sur la théorie de l'utilité aléatoire². Dans le cas précis du choix d'un itinéraire entre une origine et une destination, l'utilité de chaque itinéraire envisagé est le coût du parcours perçu qui lui est associé et que les usagers essaient de minimiser.

² On associe à chaque alternative une utilité. Cette utilité est fonction des caractéristiques des variables intervenant dans l'alternative, mais aussi de caractéristiques propres à la personne qui effectue le choix.

Résultats :

Nous récapitulons dans le tableau ci-dessous les résultats d'émissions (en tonnes) obtenus pour les différentes affectations présentées précédemment. Nous prenons les résultats obtenus suite à l'affectation de type équilibre système comme base. La température lors des évaluations est de 27 degrés Celsius (moyenne pour la saison printemps/été à la ville de Tunis (Selon Météo Tunisie)).

Affectation	CO ₂ ³	CO ⁴	SO ₂ ⁵	NO _x ⁶
Equilibre système	100.0	100.0	100.0	100.0
Equilibre utilisateur	99.55	99.55	99.55	99.55
Probit	100.28	100.28	100.28	100.28
Tout ou rien	99.55	99.55	99.55	99.55
Equilibre utilisateur stochastique*				

Tableau 1- Evaluation des émissions. Cas des polluants CO₂, CO, SO₂, NO_x.

Affectation	CH ₄ ⁷	COV ⁸	N ₂ O ⁹
Equilibre système	100.0	100.0	100.0
Equilibre utilisateur	99.55	99.55	99.39
Probit	100.28	100.28	99.51
Tout ou rien	99.55	99.55	99.39
Equilibre utilisateur stochastique*			

Tableau 2- Evaluation des émissions. Cas des polluants CH₄, COV, N₂O.

* Aucun résultat n'a pu être produit pour ce type d'affectation.

Comme nous pouvons l'observer, la phase d'affectation que nous allons choisir pour évaluer les émissions de gaz polluants produit des résultats fort semblables. La raison en est simple : la phase d'affectation assigne un nombre de véhicules sur les arcs du réseau différent pour chaque type d'affectation. Cette différence est directement répercutée sur l'évaluation des émissions de gaz polluants (elles sont calculées à partir des longueurs d'arcs, de la vitesse moyenne et du nombre de véhicules présents sur ces arcs). Si nous comparons les résultats obtenus pour une affectation du type équilibre système et une affectation probit, les émissions varient de moins de 1%. Cette différence s'explique par les méthodes utilisées pour réaliser ces affectations. La répartition de la demande selon l'affectation probit résulte du choix de l'itinéraire le moins coûteux (du point de vue de l'utilité) pour chaque usager, alors que pour l'équilibre système, c'est le coût total sur le réseau qui est minimisé (voir Sheffi Y. « Urban transportation networks equilibrium analysis with mathematical programming methods pour plus d'amples informations »).

³ Dioxyde de carbone

⁴ Monoxyde de carbone

⁵ Dioxyde de soufre

⁶ Oxyde d'azote

⁷ Méthane

⁸ Composés organiques volatils

⁹ Protoxyde d'azote

Le cas du polluant N_2O est un peu différent. En effet, il ne s'évalue qu'à partir des longueurs d'arcs et est indépendant de la vitesse moyenne. Il n'y a pas non plus de différence entre les émissions à chaud et à froid.

Au vu des résultats, nous utiliserons une affectation du type équilibre système pour réaliser la phase d'affectation des différents scénarii implémentés dans notre travail. Cette affectation présente des valeurs centrales par rapport aux autres méthodes d'affectations.

5. Contraintes générées par les vitesses moyennes fournies en sortie

Une autre interrogation concerne la représentation des conditions de circulation fournie en sortie par les modèles agrégés statiques d'affectation du trafic : en quoi l'usage des vitesses moyennes par arc affecte-t-il les résultats d'émissions ? Une telle question peut être abordée d'au moins trois manières différentes.

L'usage des vitesses moyennes ne permet pas de se rendre compte des variations de la cinématique d'un véhicule tout au long d'un arc. Ce point se traduit par un lissage des résultats d'émissions, alors qu'ils devraient être plus élevés au niveau des intersections et plus faibles à mi-longueur. La pratique la plus courante pour traiter ce type de questions reste l'emploi des modèles dynamiques. Soulignons que ce point pose un autre problème à ne pas négliger pour l'usage des modèles statiques : l'évolution des réglementations et des comportements de conduite, ainsi que des mesures d'ingénierie du trafic peuvent, à long terme, modifier les caractéristiques cinématiques des véhicules au sein de la circulation ; les caractéristiques des cycles de conduite utilisés pour évaluer les émissions deviennent alors obsolètes, et il est nécessaire de les réactualiser régulièrement.

5.1. Non prise en compte des variations de vitesses sur un même arc

On peut également s'interroger sur la non prise en compte des différences de vitesses entre véhicules sur une même portion de voirie à un moment précis, ou tout au long de la période d'observation. Pour tester les effets de la non prise en compte des variations de vitesse sur un même arc, nous avons réintroduit de la variance dans les vitesses par arc estimées par ATESAME avant de continuer sans autre modification de la suite de la méthode d'évaluation des émissions de gaz polluants. Nous avons réintroduit la variance en considérant que, sur chaque arc, 40% des véhicules circulent à la vitesse moyenne (V_{it_m}), et que les 60% restants se répartissent en deux classes égales, l'une regroupant les véhicules circulant à une vitesse $V_{it_m} + x\%$ et l'autre regroupant les véhicules circulants à une vitesse $V_{it_m} - x\%$. Cinq simulations ont dès lors été réalisées. La première, S_0 , nous sert de référence et correspond à $x = 0$. Les quatre suivantes, S_1 , S_2 , S_3 et S_4 introduisent, quant à elles, une variabilité croissante, avec x respectivement égale à 5, 10, 15, 25%. Ces chiffres sont tout à fait subjectifs et ont été fixés sans aucune recherche de réalisme. L'objectif principal est de rendre compte de l'impact éventuel de la variabilité des vitesses par axe sur les résultats et non pas de trouver cette variabilité. Nous avons, pour le scénario S_5 , tenté de nous rapprocher d'une distribution normale. Nous estimons que 5% des véhicules circulent à 42,5 km/h, 10% à 45 km/h, 20% à 47.5 km/h, 30% à 50 km/h, 20% à 52.5 km/h, 10% à 55 km/h et 5% à 57.5 km/h.

	S ₀	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅
CO	100.00	100.08	100.34	100.76	101.26	100.29
CO ₂	100.00	100.08	100.40	100.91	102.97	100.34
SO ₂	100.00	100.08	100.40	100.91	102.97	100.34
NO _x	100.00	100.06	100.36	100.69	101.68	100.28
CH ₄	100.00	100.05	100.21	100.47	101.30	100.18
COV	100.00	100.06	100.23	100.52	100.65	100.20
N ₂ O	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Tableau 3 Evaluation des émissions polluantes en fonction de la variabilité des vitesses par arc

Nous observons que les résultats obtenus restent très stables entre les six simulations (l'augmentation maximale d'émissions de gaz polluants ne dépassant pas les 3%). Ceci s'explique par le fait que d'une part, la distance totale parcourue n'intervient pas car les flux par arc restent constants et d'autre part, les variations d'émissions d'un véhicule à l'autre liées aux écarts de vitesses se compensent entre elles. La recherche d'une image plus fidèle des conditions de circulation à travers l'introduction de vitesses différenciées sur un même arc ne semble donc pas devoir apporter grand-chose à la qualité des résultats. L'usage des vitesses moyennes par arc reste donc tout à fait suffisant tant que nous restons à un niveau moyen d'émissions le long de la voirie.

Les résultats produits pour les gaz CO₂ et SO₂ sont identiques pour chaque simulation. En effet, ces deux gaz polluants sont évalués à partir de la consommation de carburant et sont donc sujets aux mêmes variations. Les émissions de N₂O quant à elles ne dépendent que de la longueur d'arc (paramètre qui n'a pas été modifié pour cette série de tests).

5.2. Effets de la congestion

Nous allons maintenant tenter de montrer l'éventuel impact de la congestion au niveau des émissions de gaz polluants. Nous allons pour cela réaliser plusieurs affectations, simulant une montée en charge progressive du réseau. A cette fin nous réalisons 9 simulations pour lesquelles nous multiplions la matrice de demande de déplacements par un facteur λ . Le coefficient multiplicateur λ prend successivement les valeurs allant de 0.6 à 1.4 augmentant de 0.1 pour chaque simulation. Avant de se pencher sur les résultats, il est important de souligner que cette manière d'envisager la congestion ne permet pas d'en mesurer toutes les conséquences. Les résultats obtenus valent donc plus par l'indication qu'ils donnent sur la sensibilité des émissions à une dégradation des conditions de circulation que par l'interprétation trop immédiate que nous pourrions en tirer sur la congestion elle-même.

λ	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4
CO	59.6	59.8	79.6	90.1	100.0	110.8	112.6	112.4	112.3
CO ₂	59.6	69.8	79.6	90.1	100.0	110.8	112.6	112.4	112.3
SO ₂	59.6	69.8	79.6	90.1	100.0	110.8	112.6	112.4	112.3
NO _x	59.6	69.8	79.6	90.1	100.0	110.8	112.6	112.4	112.3
CH ₄	59.6	69.8	79.6	90.1	100.0	110.8	112.6	112.4	112.3
COV	59.6	69.8	79.6	90.1	100.0	110.8	112.6	112.4	112.3
N ₂ O	59.6	69.8	79.6	90.1	100.0	110.8	112.6	112.4	112.3

Tableau 4 Evaluation des émissions polluantes en fonction de l'augmentation du trafic.

Au vu des résultats présentés dans la figure 5, nous pouvons observer que la pollution augmente avec une dégradation des conditions de circulation (augmentation du trafic), donc diminue avec l'amélioration des conditions de circulation (baisse du trafic). Les valeurs de λ valant de 1.3 et 1.4, représentent les émissions évaluées sur le réseau lorsque la demande dépasse la capacité. Nous ne pouvons malheureusement conclure sur les effets réels de la congestion au niveau des émissions des gaz polluants (un modèle dynamique se révèle plus adéquat pour rendre les effets liés à la congestion).

Ces résultats permettent également d'avoir une idée de l'erreur globale qui serait commise en étendant sur une journée entière ces résultats obtenus à partir d'une matrice d'heure de pointe. Pour conclure, rappelons qu'au cours d'une procédure d'évaluation des émissions du trafic routier, la phase d'affectation reste insuffisante pour prendre en compte les effets d'une croissance du trafic : une partie des adaptations liées à la congestion ne peut être établie qu'en phase amont, la sensibilité des émissions dépend des caractéristiques du parc, définies en aval. Les incertitudes introduites par l'affectation statique sont, sur ce point, sans doute limitées sous condition de disposer de matrices différenciées pour les heures de pointes et les heures creuses. Cette distinction permet d'améliorer les estimations d'émissions des polluants les plus sensibles à la dégradation des vitesses, tels que les hydrocarbures et le CO, même si cette sensibilité a déjà commencé à se réduire. Elle permet également de disposer d'indications plus fines en matière d'évolution géographique des émissions du fait d'une meilleure prise en compte de la modification des origines et destinations au cours d'une journée.

Conclusion

L'évaluation des émissions peut tout d'abord relever d'une logique de bilan comptable ou d'état des lieux, pour repérer des zones géographiques plus touchées ou de retrouver la part de responsabilité dans la pollution atmosphérique des différentes activités qu'une ville abrite – transport, industries, chauffage notamment. Plus ce bilan s'établit à un niveau spatial fin, plus les incertitudes sont fortes du fait de la variabilité des résultats de trafic par axe suivant les valeurs des paramètres d'affectation. Cela ne signifie pas que les modèles statiques agrégés d'affectation du trafic ne sont pas indiqués pour ce type de travail, mais qu'il est nécessaire de prêter le plus grand soin à la phase de calibrage des paramètres. Par contre, lorsqu'on s'attache à des résultats plus globaux, ces erreurs se compensent entre elles et la sensibilité des évaluations aux valeurs des paramètres d'affectation est très réduite au niveau d'une agglomération.

Il existe également une logique de comparaison des scénarios qui correspond à une lecture beaucoup plus relative des résultats : les niveaux obtenus importent moins que les différences mises en évidence entre les alternatives testées. Or les sources d'incertitudes affectent autant les résultats d'un scénario que ceux d'un autre et les différences d'impact n'ont pas de raison d'être mal appréciées. Cependant, si pour une raison ou pour une autre, ces résultats sont analysés à un niveau spatial très fin, on retrouve alors les incertitudes.

Il faut souligner l'importance des données initiales dans la qualité des résultats d'évaluation. En effet, c'est essentiellement d'elles que va dépendre la fixation du trafic global exprimé en véhicule kilomètre, et donc du niveau général des émissions. La procédure d'affectation, elle-même, intervient beaucoup plus sur la détermination des itinéraires. Elle concerne donc plus spécifiquement la charge de chacun des axes et les pollutions qu'ils subissent. Enfin la finesse de prise en compte de la congestion peut permettre d'améliorer les résultats sur les polluants les plus dépendants des conditions de circulation, hydrocarbures et monoxyde de carbone,

bien que cette sensibilité décroisse aujourd'hui avec les évolutions technologiques des véhicules et notamment la systématisation du pot catalytique.

Bibliographie

- Bulletin mensuel sur la qualité de l'air en Tunisie (2006). ANPE N° 56.
- Cornelis E., Luyckx A., Masquillier B. (2003) "ATESAME : Another Traffic Equilibrium Software And Matrix Estimation" – Manuel d'utilisation. GRT, Namur, Belgique.
- Etat de l'environnement (2004). Publications du ministère de l'environnement et du développement durable.
- Hickman A.J., Jourmard R., Nemerlin J., Hassel D. (1992) "Modelling of emissions and consumption in urban areas" – final report. Rapport INRETS, LEN 9213, INRETS, Bron, France.
- Hickman, Colwill (1982) "The estimation of air pollution concentration from road traffic". TRRL report number LR1052, Crowthorne, UK.
- Horowitz J. (1982) "Air Quality Analysis for Urban Transportation Planning". MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- Jourmard R., Paturol L., Vidon R., Guitton J.P., Saber A. I., Combet E. (1990) "Emissions unitaires de polluants des véhicules légers". Rapport INRETS n° 116, Bron, France.
- Lieberman E.B., Cohen S., "New technique for evaluation of urban traffic energy consumption and emissions". Transportation Research Record, 599, 41.
- Manheim M. L. (1979) "Fundamentals of Transportation Systems Analysis", Vol. 1, Basic Concepts. MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- Ministère de l'équipement, de l'habitat et de l'aménagement du territoire (2003). Annales de l'équipement, publication semestrielle, vol. XIII – N° 2.
- Patterson R.M., Meyer E.L. (1975) "An approach for relating traffic to ambient CO concentrations at signalised intersections". 68th Annual Meeting of Air Pollution Control Association, 15-20/6/75, Boston, Massachusetts. Paper No 75-44.4.
- Sheffi Y. (1985) "Urban transportation networks equilibrium analysis with mathematical programming methods". Prentice-hall, New York, USA.